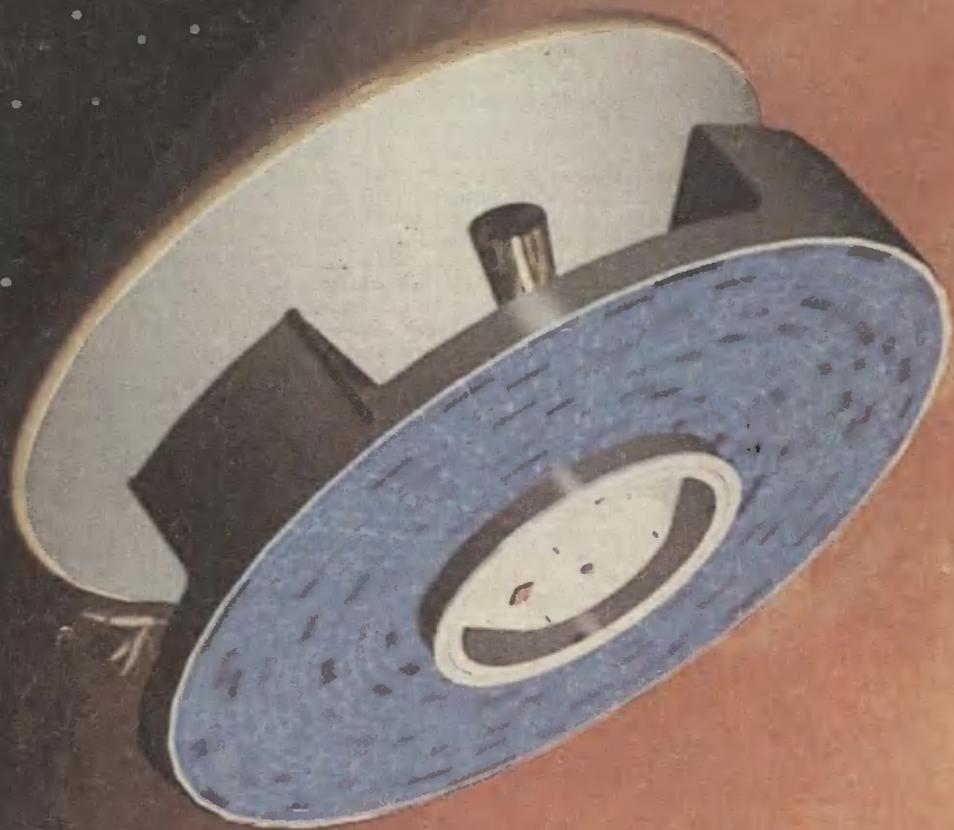


ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

3 98



Главный редактор академик А.Ф.АНДРЕЕВ

Первый заместитель главного редактора А.В.БЯЛКО

Заместители главного редактора:

А.А.ГУРШТЕЙН (история естествознания),

А.А.КОМАР (физика),

А.К.СКВОРЦОВ (биология),

А.А.ЯРОШЕВСКИЙ (науки о Земле)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

И.Н.АРУТЮНЯН (редактор отдела физико-математических наук), О.О.АСТАХОВА (редактор отдела биологии и медицины), кандидат химических наук Л.П.БЕЛЯНОВА (редактор отдела экологии и химии), член-корреспондент РАН Н.А.БОГДАНОВ (геология), член-корреспондент РАН В.Б.БРАГИНСКИЙ (физика), член-корреспондент РАН А.Л.БЫЗОВ (физиология), доктор географических наук А.А.ВЕЛИЧКО (палеогеография), академик АМН А.И.ВОРОБЬЕВ (медицина), доктор биологических наук Н.Н.ВОРОНЦОВ (охрана природы), академик М.Е.ВИНОГРАДОВ (биоокеанология), член-корреспондент РАН С.С.ГЕРШТЕЙН (физика), член-корреспондент РАН Н.Ф.ГЛАЗОВСКИЙ (география), академик Г.С.ГОЛИЦЫН (физика атмосферы), кандидат физико-математических наук Ю.К.ДЖИКАЕВ (ответственный секретарь), академик Г.В.ДОБРОВОЛЬСКИЙ (почвоведение), академик В.А.ЖАРИКОВ (геология), академик Г.А.ЗАВАРЗИН (микробиология, экология), М.Ю.ЗУБРЕВА (редактор отдела географии и океанологии), академик В.Т.ИВАНОВ (биоорганическая химия), академик В.А.КАБАНОВ (общая и техническая химия), Г.В.КОРОТКЕВИЧ (редактор отдела научной информации), академик Н.П.ЛАВЕРОВ (геология), доктор биологических наук Б.М.МЕДНИКОВ (биология), Н.Д.МОРОЗОВА (научная информация), доктор геолого-минералогических наук Л.Л.ПЕРЧУК (геология), доктор технических наук Д.А.ПОСПЕЛОВ (информатика), член-корреспондент РАН В.А.СИДОРЕНКО (энергетика), академик В.Е.СОКОЛОВ (зоология), академик В.С.СТЕПИН (философия естествознания), академик В.Н.СТРАХОВ (геофизика), Н.В.УЛЬЯНОВА (редактор отдела экологии, геофизики и геохимии), Н.В.УСПЕНСКАЯ (редактор отдела философии, истории естествознания и публицистики), академик Л.Д.ФАДДЕЕВ (математика), член-корреспондент РАН М.А.ФЕДОНКИН (палеонтология), доктор биологических наук С.Э.ШНОЛЬ (биология, биофизика), О.И.ШУТОВА (редактор отдела охраны природы), член-корреспондент РАН А.М.ЧЕРЕПАЩУК (астрономия, астрофизика).

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Космическая станция «Марс Пасфайндер» до отделения посадочного модуля и внедрения в атмосферу Марса. Модуль-носитель — синего цвета, посадочный аппарат — белого.

Фото Р-44293Ас Лаборатории реактивного движения (НАСА)

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Полная копия посадочного аппарата «Марс Пасфайндер» с марсоходом на фоне панно с марсианским ландшафтом в Лаборатории реактивного движения.

Фото Р.О.Кузьмина

См. в номере: ПЕРВЫЕ ШАГИ НА МАРСЕ.



Издательство «Наука» РАН

© Российская академия наук,
журнал «Природа», 1998

В НОМЕРЕ

3 Цыб А.Ф., Иванов В.К., Чечин О.И.
ЧЕРНОБЫЛЬСКИЙ РЕГИСТР РОССИИ: ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ

8 Ефремов Ю.Н., Засов А.В., Чернин А.Д.
ЗВЕЗДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СПИРАЛЬНЫЕ РУКАВА

Образование звезд в галактиках — сложный процесс, охватывающий области размером до нескольких сотен парсек. Формирование звездных группировок гигантского размера (звездных комплексов) связано с поведением межзвездного газа в гравитирующих дисках галактик.

17 Маккавеев П.Н., Якушев Е.В.
ОСОБЕННОСТИ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В АРКТИЧЕСКОМ БАСЕЙНЕ

Результаты исследований последних лет позволяют пересмотреть роль Арктики в глобальном круговороте углерода. Возможно, именно морям Арктического бассейна принадлежит ключевая роль в регулировании содержания CO₂ в атмосфере.

26 Болдырев А.А.
МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ МОЗГА ОТ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО СТРЕССА

Поиски природных соединений, повышающих устойчивость мозга к неблагоприятным воздействиям, показали, что такой защитной функцией обладает нейротептид карнозин, описанный В.С.Гулевиным еще в 1900 г.

35 Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.
ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

39 Константинов М.М.
РЕВОЛЮЦИЯ В ГЕОЛОГИИ ЗОЛОТА

Чисто экономический факт — десятикратный рост цены на золото — имел колоссальное значение для геологов. При отработке больших объемов руды стало выгоднее потерять часть металла, но зато удешевить весь технологический цикл.

46 ПЕРВЫЕ ШАГИ НА МАРСЕ

Летом 1997 г. американский космический аппарат «Марс-Пасфайндер» совершил успешную посадку на Марс. НАСА сообщая основные научные результаты этой миссии.

Базилевский А.Т. ПРОЕКТ «МАРС-ПАСФАЙНДЕР»: УСПЕХИ И УРОКИ (46)

Кузьмин Р.О. ИССЛЕДОВАНИЕ МАРСА ПРОДОЛЖАЕТ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «МАРС-ПАСФАЙНДЕР» (57)

73 ЛЕКТОРИЙ
Гиляров А.М.
ЭКОЛОГИЯ В ПОИСКАХ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПАРАДИГМЫ

Живой облик планеты оказался познаваемым, причем познание это уже не ограничивается констатациями в духе естественной истории, а сопровождается объяснениями по типу тех, которые характерны для точных наук.

83 Бурзин М.Б.
ДОКЕМБРИЙСКИЕ ПРЕДТЕЧИ «ПИОНЕРОВ СУШИ»

Микробный мир Земли, предшествовавший первым сухопутным растениям, уже был способен защищаться от избытка солнечной радиации, сохранять влагу, противостоять «силам тяжести». Для распространения же в новой среде обитания могли служить кохлеатины — свернутые в катушки лентовидные формы, остатки которых найдены в докембрийских отложениях.

96 Филатова Т.Н.
ВАКЦИНА ПРОТИВ МЕНИНГИТА

Около 30 лет ученые «сражаются» с возбудителем менингококковой инфекции, но до сих пор не удалось создать эффективную вакцину, способную надежно защитить человека от всех штаммов менингококка. В чем проблемы и каковы прогнозы?

105 ЗАМЕТКИ И НАБЛЮДЕНИЯ

Булавинцев В.И.
ГИГАНТСКИЙ БУРЕВЕСТНИК

107 Несис К.Н.
КАК ЧЕРНОЕ ОЗЕРО СТАЛО ЧЕРНЫМ МОРЕМ
ОБЪЯВЛЕНИЯ (109)

110 НОВОСТИ НАУКИ (25)

123 РЕЦЕНЗИИ
Сурдин В.Г.
ВСЕЛЕННАЯ АРТУРА ЭДДИНГТОНА

125 НОВЫЕ КНИГИ

127 В КОНЦЕ НОМЕРА
Виноградов Г.М., Виноградова Т.Н.
БУКЕТ ИЗ КРАСНОЙ КНИГИ

CONTENTS

- 3 Tsyb A.F., Ivanov V.K. and Chechin O.I.**
THE CHERNOBYL REGISTER OF RUSSIA

- 8 Efremov Yu.N., Zasov A.V. and Chernin A.D.**
STELLAR COMPLEXES AND SPIRAL SLEEVES

Star formation is a complex process that encompasses regions up to several parsecs in size. Stellar complexes – gigantic star clusters – owe their origin to interstellar gas residing in the gravitating disks of galaxies.

- 17 Makkaveev P.N. and Yakushev E.V.**
CARBON CYCLE PATTERN IN THE ARCTIC

Recent studies lead to a reconsideration of the role played by the Arctic Ocean in the global carbon circulation. It is possible that the Arctic seas are the key determinant in controlling the CO₂ content in the atmosphere.

- 26 Boldyrev A.A.**
MECHANISMS FOR PROTECTING THE BRAIN FROM OXIDATION STRESS

A search for natural compounds that enhance the brain's resistance to unfavorable impacts has revealed that this protective function is possessed by neuropeptide carnosine, which was described by V.S. Gulevich as far back as 1900.

- 35 Belousov A.B. and Belousova M.G.**
BEZMYANNI VOLCANO ERUPTIONS

- 39 Konstantinov M.M.**
REVOLUTION IN GOLD GEOLOGY

The purely economic factor – tenfold increase in the price of gold – had tremendous implications for geologists. When extracting large quantities of ore, it is now more profitable to give up a portion of the metal, thereby reducing the cost of the technological cycle.

- 46 FIRST STEPS ON MARS**
In the summer of 1997, the American spacecraft Mars-Pathfinder successfully landed on Mars. NASA has reported on the main scientific results of this mission.

- Basilevsky A.T.** MARS-PATH-FINDER PROJECT: SUCCESSES AND LESSONS (46)

- Kuzmin R.O.** MARS STUDIES CARRIED ON BY MARS-PATH-FINDER (57)

73 LECTURES

- Gilyarov A.M.**
ECOLOGY IN SEARCH OF A UNIVERSAL PARADIGM

It was found that the living face of the planet can be understood to an extent that far exceeds those statements that were typical of natural history. The explanations that are now provided resemble the findings of the exact sciences.

- 83 Burzin M.B.**
PRECAMBRIAN PRECURSORS OF «LAND PIONEERS»

The earth's microbial kingdom, which preceded the first terrestrial plants, was capable of protecting itself from excess solar radiation, maintaining moisture, and resisting gravity. Their spread in a new habitat could have been made possible by coelenterates – coiled band-shaped species, whose remains have been found in Precambrian deposits.

- 96 Filatova T.N.**
VACCINE AGAINST MENINGITIS

Scientists have been combating the meningococcus infecting agents for some 30 years now, but so far have failed to produce an effective vaccine capable of reliably protecting humans from all meningococcus strains. What are the problems and what are the prospects?

105 NOTES AND OBSERVATIONS

- Bulavintsev V.I.**
GIANT STORMY PETREL

- 107 Nesis K.N.**
HOW A BLACK LAKE BECAME THE BLACK SEA
ADVERTISEMENTS (109)

110 SCIENCE NEWS

- 123 BOOK REVIEWS**
Surdin V.G.
THE UNIVERSE OF ARTHUR ED-DINGTON

125 NEW BOOKS

- 127 END OF ISSUE**
Vinogradov G.M. and Vinogradova T.N.
A BOUQUET FROM THE RED DATA BOOK

Чернобыльский регистр России: оценка и прогноз

Академик РАМН **А. Ф. Цыб**

Медицинский радиологический научный центр РАМН

Обнинск

В. К. Иванов,

доктор технических наук

Российский государственный медико-дозиметрический регистр

Обнинск

О. И. Чечин

Москва

ИДЕЯ создания автоматизированного персонального учета всех облученных лиц, находящихся под длительным медицинским контролем, родилась в июне 1986 г., вскоре после чернобыльской катастрофы. Эту работу, по решению Минздрава СССР, поручили Медицинскому радиологическому научному центру (МРНЦ) в г.Обнинске, где она велась совместно с медиками всех бывших советских республик вплоть до распада СССР в 1991 г.

Тогда Всесоюзный распределенный регистр включал список из 670 тыс. человек, в том числе 280 тыс. ликвидаторов аварии. Значительная часть этих облученных вошла в Российский государственный медико-дозиметрический регистр¹, который начал функционировать с 1992 г.

У Чернобыльского регистра две цели. Первая — наблюдения за медицинскими последствиями и ежегодная аналитическая оценка отмеченных эффектов (рекомендации направлены на поддержку диспансеризации населения) и вторая — радиационно-эпидемиологический анализ новых сведений о состоянии здоровья лиц из групп

риска. Это касается прежде всего ликвидаторов, работавших в 30-километровой зоне в 1986—1987 гг., а также детей и подростков, перенесших йодный удар.

По данным Министерства по чрезвычайным ситуациям РФ, в результате аварии на Чернобыльской АЭС оказалось загрязненной более 56 тыс. км² российской земли. На этой территории живет около 3 млн человек, в том числе 700 тыс. детей. Кроме того, свыше 200 тыс. россиян участвовали в ликвидации последствий крупнейшей в истории человечества техногенной катастрофы.

Из-за радиоактивных выбросов больше всего в России пострадали Брянская, Орловская, Тульская и Калужская области. Здесь нанесен значительный ущерб здоровью населения. В частности, выявлено 160 случаев рака щитовидной железы у людей, которые были детьми или подростками во время аварии. В этих областях отмечен и существенный рост общесоматической заболеваемости детей с неблагоприятными тенденциями в развитии, увеличилось также число беременных с патологическим течением и людей, подверженных хроническому радиационному стрессу. Постоянное нервное напряжение отрицательно сказывается на качестве жизни и психике облученных. В Брянске, Орле, Туле и Калуге действуют отделения Чернобыльского регистра, имеющие статус региональных центров. Всего таких центров в нашей стране 20. Они

© А.Ф.Цыб, В.К.Иванов, О.И.Чечин

¹ В 1993 г. было принято специальное постановление правительства РФ о создании на базе МРНЦ РАМН Национального радиационно-эпидемиологического регистра России, куда вошли не только «чернобыльцы», но и те, кто подвергся радиационному воздействию на Южном Урале, Семипалатинском полигоне и в других местах бывшего Советского Союза.

собирают информацию о состоянии здоровья облученных людей, которые постоянно наблюдаются примерно в 5 тыс. медицинских учреждений.

Отдаленные радиологические последствия чернобыльской катастрофы еще скажутся в ближайшие 10—15 лет. Но уже сегодня очевидно, что у детей, облученных в младенческом возрасте, рак щитовидной железы встречается в 6.2 раза чаще, чем в целом по стране в аналогичных возрастных группах. Причем такая тенденция проявилась лишь пять лет спустя после чернобыльской аварии. В группу риска входят также дети, рожденные от ликвидаторов 1986 г. или облученные внутриутробно, у которых могут проявиться генетические нарушения.

Детский рак отличается агрессивным течением и быстрым появлением метастазов, а сам организм более чувствителен к радиации. Однако при ранней диагностике опухоль неплохо поддается лечению, поэтому так важен своевременный и точный диагноз.

Российский государственный медико-дозиметрический регистр охватывает 160 тыс. ликвидаторов (на Украине их 170 тыс., в Белоруссии — 110 тыс.). Хуже всего обстоит дело со здоровьем ликвидаторов 1986 и 1987 гг. В настоящее время среди них зарегистрировано двукратное увеличение заболеваемости лейкозами и пятикратное (для ликвидаторов 1986 г.) — раком щитовидной железы.

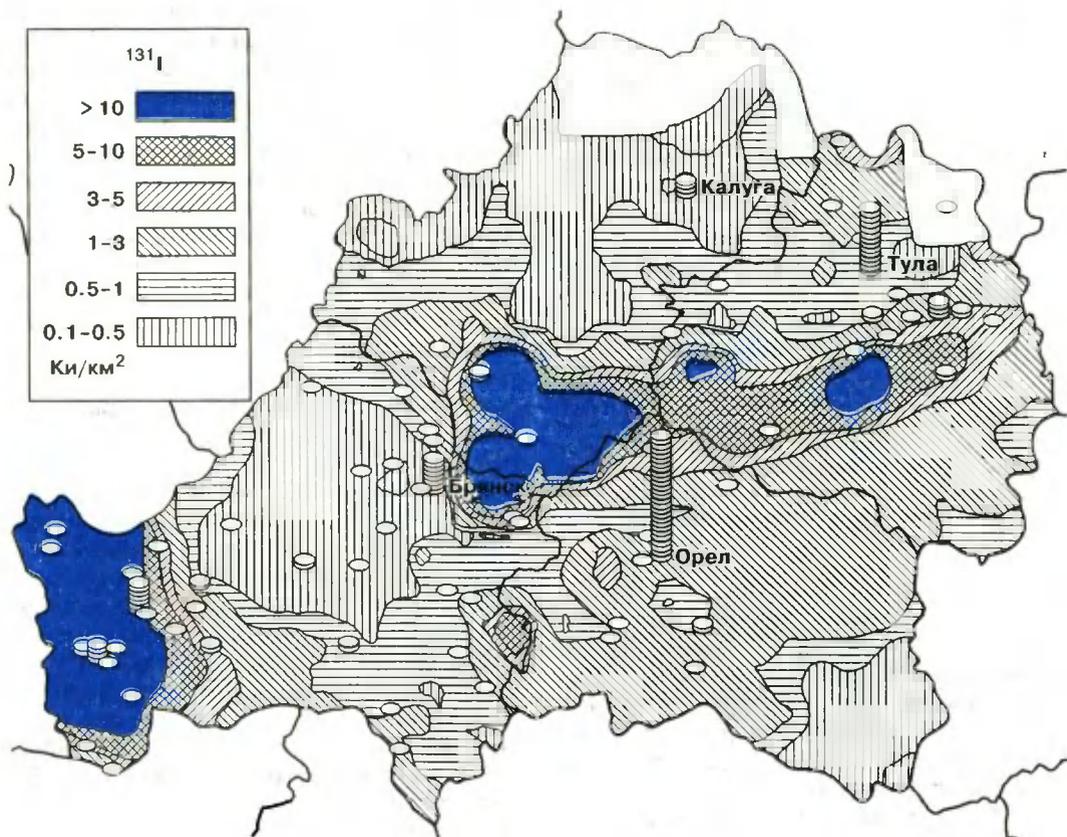
У ликвидаторов, работавших первые два года в 30-километровой зоне, значительно чаще, чем в контрольных группах мужского населения России, встречаются заболевания эндокринной системы (более чем в девять раз), крови и кроветворных органов (более чем в три раза), психические расстройства (более чем в пять раз), болезни систем кровообращения и пищеварения (более чем в четыре раза). Число инвалидов среди них возросло с 1991 г. почти в 10 раз, превысив 30 тыс. А ведь многим из этих людей сегодня всего 42—44 года! Да и ежегодная смертность у них

более чем вдвое выше среднего показателя у россиян! Чернобыльская авария вызвала серьезные радиационные поражения у 134 чел., 37 из них умерли. Но в целом схема лечения пострадавших ликвидаторов оказалась вполне эффективной. Во многих случаях успешной была поддерживающая терапия, которая продлевала жизнь больных.

Больше всего ликвидаторов (35 тыс.) живет на Северном Кавказе — в Ростовской обл., Краснодарском крае и на Ставрополье. Самый высокий уровень загрязненности как по радиоактивному цезию, так и по йоду — в Брянской обл. Там, естественно, и больше всего пострадавших от радиации. Медицинский радиологический научный центр оказывает им помощь в лечении рака щитовидной железы и других заболеваний.

Вычленив влияние малых и средних доз облучения (в числе прочих возможных факторов) на частоту возникновения злокачественных новообразований и определить коэффициенты риска для прогноза обстановки в аварийных ситуациях при разных дозах облучения достаточно сложно. Как известно, в оценке опасности радиационных загрязнений существуют две концепции: одна предполагает наличие радиационного порога воздействия (пока он не превышен, компенсаторные функции организма нивелируют мутагенные и канцерогенные эффекты), другая, непороговая, — признает негативные эффекты малых доз.

Эта дискуссия продолжается до сих пор, и проблема малых доз еще не решена. Как показывает японский, да и наш последний опыт, скрытый период в радиационном происхождении рака может составлять 5—10 и более лет, после чего радиационные эффекты выявляются более интенсивно. Поэтому так необходимо, чтобы работы Национального регистра (ему присвоен статус Сотрудничающего центра ВОЗ по радиационной эпидемиологии) и всех его структур в России не прекратились из-за нынешних экономических неурядиц.



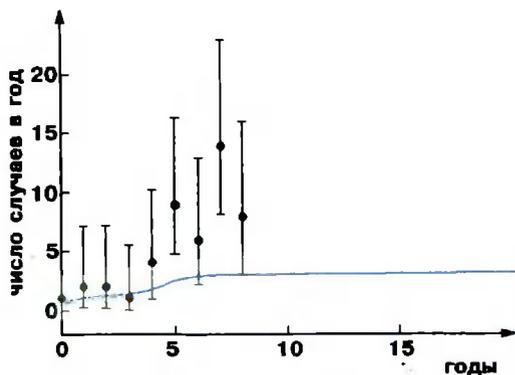
Распределение случаев заболеваний раком щитовидной железы среди детей и подростков (возраст на момент аварии) с 1986 по 1995 г. на карте плотности загрязнения.

Одна из самых важных работ в рамках Чернобыльского регистра — сбор информации и реконструкция индивидуальных доз облучения на территориях, загрязненных радионуклидами. Очень часто такая информация весьма приблизительна, и для ее уточнения необходимо восстановить ситуацию на ранней стадии аварии на ЧАЭС. Особенно важно установить динамику выпадения радиоактивного йода и других короткоживущих радионуклидов в апреле — мае 1986 г. Без достоверной информации в полном объеме невозможно подсчитать лучевые нагрузки на людей, а следовательно, и предсказать отдаленные

медицинские последствия. Ведь наибольший ущерб здоровью населения был нанесен в первые два месяца после аварии радиоактивным йодом-131 с периодом полураспада восемь суток.

Для реконструкции индивидуальных доз облучения щитовидной железы измеряют йод-129, поскольку он может тысячелетия существовать в почве и биоматериалах, хотя и в ничтожно малом количестве. Наличие йода-129 свидетельствует, что местность была загрязнена и радиоактивным йодом-131, так как поврежденный реактор выбрасывал оба изотопа. До недавнего времени такие работы лимитировались большими затратами (одно измерение йода-129 стоило не менее 1 тыс. долл.), но сейчас уже есть более дешевый способ обработки загрязненной почвы.

Восстановить радиационные нагрузки можно и по эмали удаленных



Число случаев заболеваний раком щитовидной железы среди ликвидаторов и прогнозные оценки (цветная линия), сделанные на основе рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите. По оси ординат — годы, прошедшие после чернобыльской аварии.

по медицинским показаниям зубов, а также по термолюминесцентному свечению образцов окружающей среды, содержащих кварц. Оба метода позволяют выявить территории с наибольшим облучением. К населению этих территорий, конечно же, должно быть повышенное внимание.

Восстановить радиационную обстановку помогают специальные опросники, подготовленные в Обнинске. Они предназначены, в частности, для уточнения сведений, в которой оказался конкретный житель. Опросы проводят врачи совместно с дозиметристами, чтобы ретроспективно оценить индивидуальную дозу облучения.

В лаборатории медико-экологической дозиметрии МРНЦ сформированы выездные бригады для работы на загрязненных территориях. В их распоряжении передвижные лаборатории, оснащенные новейшей измерительной аппаратурой, портативными электрогенераторами, компьютерами и другой вспомогательной техникой. Кроме того, для лабораторного анализа отбираются образцы почвы, продуктов питания, воды, а также кристаллосодержащие материалы: кирпичи, электрические изоляторы, керамика и т.д. Для уточнения доз нередко приходится изучать и архивные материалы.

Дорогостоящее современное оборудование для передвижных лабораторий Медицинскому радиологическому научному центру удалось получить благодаря международному сотрудничеству, в частности с Международным консорциумом по изучению действия радиации, Японским мемориальным фондом здравоохранения им. Сасакавы, Международным Красным Крестом, а также с ведущими научными институтами и лабораториями Европейского сообщества.

К сожалению, в настоящее время совместные усилия России, Украины и Белоруссии по устранению медицинских последствий аварии на ЧАЭС не соответствуют масштабу и сложности решаемых задач. До 1991 г. действовала единая Чернобыльская программа, а после распада Советского Союза каждое государство ведет самостоятельную работу. Отсутствие межгосударственной координации привело, в частности, к дублированию научных исследований и осложнило крупномасштабные радиационно-эпидемиологические обследования больших групп населения. Во многом это объясняется резким снижением финансирования работ по Чернобыльской программе. Это не позволяет максимально эффективно осуществлять профилактические и лечебно-диагностические мероприятия на загрязненных территориях.

К сожалению, пока ученые России, Белоруссии и Украины активнее, чем между собой, взаимодействуют с зарубежными коллегами в рамках международных проектов и программ под эгидой Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Европейской комиссии, МАГАТЭ, ЮНЕСКО, а также в рамках двусторонних проектов.

Так, в рамках международной программы ВОЗ «Айфека» совместно осуществлен проект «Эпидемиологический регистр», благодаря которому для населения России, Белоруссии и Украины разработана единая оценка последствий прямых канцерогенных и косвенных психосоматических, связанных с затяжным стрессом.

В рамках Европейской комиссии,

Случаи заболеваемости раком щитовидной железы среди населения в наиболее загрязненных областях России

годы Область	1986— 1990 гг.	1991— 1996 гг.	1986— 1996 гг.
Дети и подростки (1968—1986 гг. рождения) на момент аварии			
Брянская	5	74	79
Калужская	—	14	14
Орловская	4	38	42
Тульская	4	44	48
Итого	13	170	183
Взрослые			
Брянская	267	681	948
Калужская	81	179	260
Орловская	144	385	529
Тульская	222	624	846
Итого	714	1869	2583

под эгидой Международного агентства по исследованиям рака в Лионе (Франция), российские и белорусские специалисты ведут совместные работы по изучению заболеваемости ликвидаторов лейкозами. Это основная проблема в радиационной эпидемиологии, наличие которой, как лакмусовая бумажка, определяет вероятность других онкологических заболеваний. К этому проекту скоро присоединятся и украинские ученые. Их работы ранее финансировались американской стороной, а теперь они получают дополнительную материальную поддержку в Европе.

Японский мемориальный фонд здравоохранения им. Сасакавы участвует в изучении заболеваемости щитовидной железы при обследовании группы из 3 тыс. российских детей, у

которых измерена доза облучения, что позволяет выявить рак на самой ранней стадии. Японцы обеспечили Центр хорошим диагностическим оборудованием и компьютерной техникой. Их, как и нас, тоже интересует не только коэффициент риска онкологических заболеваний, но частота предраковых состояний.

В сентябре в Мюнхене состоялось заседание Научного комитета международного проекта «Щитовидная железа», на котором определены приоритетные направления для более глубокого изучения радиационных рисков. На эти цели Швейцария и Нидерланды уже выделили 430 тыс. долл.

Сегодня в Российский государственный медико-дозиметрический регистр внесены имена почти полумиллиона человек, пострадавших из-за чернобыльской аварии. Этот список более чем в пять раз превышает Японский регистр, действующий в связи с бомбардировками Хиросимы и Нагасаки.

Реконструкция поглощенных доз требует кропотливой исследовательской работы и серьезной поддержки со стороны государства. В Японии дозы, полученные населением пострадавших городов, уточняли четыре раза (в последний раз в 1986 г., т.е. через 41 год после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки) и получили новые коэффициенты радиационного риска. Нам также предстоит уточнить информацию, имеющуюся сейчас в нашем распоряжении, и не надо стесняться исправлять допущенные ошибки.

Звездные комплексы и спиральные рукава

Ю. Н. Ефремов, А. В. Засов, А. Д. Чернин



Анатолий Владимирович Засов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ, ведущий научный сотрудник ГАИШ им. П. К. Штернберга МГУ. Действительный член Международной академии наук высшей школы (1994). Специалист в области физики галактик, кинематики межзвездного газа, звездообразования. Автор более 100 научных работ, соавтор учебника «Астрономия» для средней школы. Лауреат Ломоносовской премии МГУ (1996) и премии Астрономического общества (1996).

Артур Давидович Чернин, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник того же института. Область научных интересов — теоретическая астрофизика и космология. Автор книг: «Введение в космологию» (М., 1987), «Происхождение галактик и звезд» (М., 1983, 1987) — обе совместно с Л. Э. Пуревичем, «Звезды и физика» (М., 1984) и др. Печатается в «Природе» с 1974 г. Лауреат Ломоносовской премии МГУ (1996) и премии Астрономического общества (1996).

Юрий Николаевич Ефремов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом изучения Галактики и переменных звезд ГАИШ МГУ. Области исследования: молодые звездные группировки, строение галактик, цефеиды, история астрономии. Один из первооткрывателей переменности блеска квазаров и рентгеновских источников, выдвинул концепцию звездных комплексов, установил существование зависимости период—возраст для цефеид. Автор многих научных, научно-популярных и методологических работ. В «Природе» печатается с 1961 г. Лауреат Ломоносовской премии МГУ (1996) и премии Астрономического общества (1996).

РОЖДЕНИЕ ЗВЕЗД

Природа звезд издревле занимала человеческий ум. Смелые догадки о том, что Солнце — ближайшая к нам звезда, подтвердились лишь в первой половине XIX в., когда впервые удалось определить расстояния до звезд. В начале нашего века были заложены основы теории внутреннего строения этих огромных самосветящихся газовых шаров, однако вопрос об источниках энергии звезд оставался загадкой до конца 30-х годов, когда выяснилось, что ими являются реакции термоядерного синтеза, в первую очередь превращения водорода в гелий. Подобные же реакции, но во много раз более быстротечные, проходят в водородной бомбе.

По запасам ядерного горячего (пропорциональным массе звезды) и темпам его израсходования (пропорциональным светимости) уже в 40-х годах была оценена возможная продолжительность жизни звезд разного типа. Для объектов высокой светимости — спектрального класса O и сверхгигантов — эти сроки не превышают 1—10 млн лет. Стало ясно, что звездообразование продолжается и в наше время, так что, наблюдая молодые звезды, мы получаем возможность понять механизм их рождения.

Два факта сыграли ключевую роль в понимании того, как образуются звезды. Во-первых, молодые звезды высокой светимости, как правило, встречаются группами, а во-вторых, по соседству всегда или почти всегда имеются газопылевые туманности. Ряд астрономов в начале 40-х годов высказал предположение, что это — следствие группового рождения звезд из-за фрагментации газовых облаков на протозвезды. Вначале холодные и сильно разреженные протозвезды сжимаются под действием собственных гравитационных сил до тех пор, пока температура централь-

ных областей не станет достаточно высокой для «включения» термоядерных реакций. Выделяемый поток энергии уравнивает звезду и излучается ее поверхностью в оптическом диапазоне.

Данная гипотеза полностью подтвердилась в последующих исследованиях. Важную роль в признании коллективного рождения звезд, продолжающегося и в современную эпоху, сыграли исследования О-ассоциаций — разреженных группировок молодых, массивных и горячих звезд спектрального класса О. По размеру ассоциации значительно больше, чем звездные скопления, и часто включают последние в свой состав. Динамическая неустойчивость ассоциаций — это предположение сделал советский астрофизик В.А.Амбарцумян в 1949 г. — впоследствии нашла свое подтверждение. Оценка возраста звезд, выполненная на ее основе, составила около 10 млн лет, что близко к тому, что дает теория звездной эволюции.

Однако в качестве причины расширения О-ассоциаций Амбарцумян выдвинул гипотезу взрывного рождения звезд (и окружающего их газа) из сверхплотных ненаблюдаемых тел, свойства которых, возможно, не объясняются известными законами физики. Эта гипотеза, мало распространенная на Западе, в нашей стране вызвала ожесточенные споры¹. Большинство исследователей считали, что во введении «новой физики» для объяснения происхождения звезд нет никакой необходимости. Однако долгое время дамокловым мечом оставалась проблема отсутствующего звена в эволюционной цепи между газовыми облаками с известными свойствами, с одной стороны, и молодыми звездами — с другой. Как оказалось впоследствии, звездные скопления действительно возникают из объектов более плотных, чем они сами. Эти объекты удалось обнаружить только в 70-х годах. Имеются в виду молекулярные облака², состоящие главным образом из молекул H_2 .

¹ См., напр.: Ефремов Ю.Н. Очаги звездообразования в галактиках: звездные комплексы и спиральные рукава. М., 1989.

² См.: Василенко Ж.Г., Сурдин В.Г. Ключ к межзвездной химии найден // Природа. 1997. № 7. С.27.

Эти молекулы в отличие от атомарного водорода, наблюдаемого в радиолинии на 21 см, не излучают ни в каком диапазоне спектра при той низкой температуре, которую они имеют. Их присутствие обнаруживают по излучению молекул CO, всегда сопровождающих молекулярный водород, на длинах волн миллиметрового диапазона. Хорошо видимые на снимках межзвездные газовые облака (в основном области ионизованного водорода, обозначаемые HII) и темные туманности — лишь индикаторы присутствия гораздо более массивных ($\geq 100\ 000$ солнечных масс) молекулярных облаков, столь холодных (до нескольких кельвин), что в их наиболее плотных ядрах должна происходить фрагментация газа на протозвезды. Последние обнаруживаются при исследованиях областей звездообразования в инфракрасном диапазоне спектра.

В звезды переходит лишь несколько процентов массы исходного облака, но излучение новорожденных горячих О-звезд, равно как и взрывы сверхновых, в которые превращаются наиболее массивные звезды, рассеивают родительское облако. Если это происходит достаточно быстро, рожденная группировка становится гравитационно-несвязанной ассоциацией и в ее расширении нет ничего удивительного.

Средний размер О-ассоциаций в нашей и соседних галактиках — около 80 пк (1 пк равен $\sim 3 \cdot 10^{16}$ м, или примерно четыре световых года). В их состав часто входят и более плотные скопления, родившиеся, очевидно, в областях исходного облака с наиболее высокой эффективностью звездообразования. Долгое время считалось, что ассоциации — это самые большие существующие звездные группировки, хотя с начала 60-х в ближайших галактиках было найдено и несколько так называемых сверхассоциаций — группировок одного-двух десятков ассоциаций общим размером до 1 кпк.

Однако в 1964 г. канадскому астроному Ван ден Бергу удалось выделить в галактике Андромеды около 200 группировок молодых звезд, не столь богатых О-звездами, как известные сверхас-

социации, но имеющих сравнимые с ними размеры. Они были названы ассоциациями, хотя их средний диаметр составляет 500 пк. Причину столь большого различия в размерах ассоциаций в нашей Галактике и галактике Андромеды Ван ден Берг усматривал в большой плотности звезд Млечного Пути, на фоне которых теряются внешние разреженные области ассоциаций и остаются заметными лишь их наиболее плотные части.

ЗВЕЗДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

В 1975—1978 гг. один из авторов статьи (Ю.Н.Ефремов) обнаружил, что в нашей Галактике существуют столь же большие группировки молодых звезд, но найдены они были в первую очередь по пространственному распределению не массивных O-звезд, а более старых звезд — цефеид. (Цефеиды — это пульсирующие переменные звезды, период изменения блеска которых однозначно связан с их светимостью и возрастом.) О тенденции O-ассоциаций Галактики образовывать группы еще в 1958 г. писал советский астроном И.М.Копылов. Ассоциации голубых звезд, найденные Ван ден Бергом в M31, по всем параметрам, в том числе и по концентрации в них цефеид (их возраст 50—100 млн лет, тогда как O-звезд — 5—10 млн), следовало бы классифицировать именно как звездные комплексы.

Была высказана гипотеза, что концентрация молодых объектов в обширных комплексах означает и их генетическое родство — совместное происхождение из единого сверхоблака, в котором в течение довольно длительного времени образуются более плотные облака, непосредственно порождающие скопления и ассоциации. Это означает, что исходный масштаб звездообразования больше на порядок по размерам и на два порядка по массам, чем считалось раньше!

Предположение о том, что образование звезд, по крайней мере массивных, начинается с рождения сверхгигантского газового облака массой $\sim 10^7$ и размерами ~ 1 кпк получило поддержку в работе американских астрономов Б. и

Д.Эльмегринов. В 1983 г. они установили, что именно таковы масштабы порождающих звездные комплексы сверхоблаков, которые должны возникать в газовом диске галактик под действием крупномасштабной гравитационной неустойчивости. Эльмегрины нашли, что во многих галактиках эти комплексы расставлены вдоль спиральных рукавов через регулярные интервалы, соответствующие так называемой джинсовской длине волны в теории гравитационной неустойчивости. Такая регулярность не наблюдалась бы, если бы сверхоблака возникали в результате слияния более мелких облаков.

Изучение группировок голубых (т.е. O- и B-) звезд показало, что следует различать ассоциации (диаметр в среднем около 80 пк), группировки ассоциаций — агрегаты (200 пк) и комплексы (600—1000 пк). Последние помимо группировок низшего иерархического уровня включают и индивидуальные, как правило более старые звезды (например, цефеиды), не входящие в состав ассоциаций. Эти звезды, очевидно, были членами первых образовавшихся в комплексе ассоциаций, уже распавшихся к настоящему времени.

Что касается галактики Андромеды, где Ван ден Берг обнаружил звездные комплексы, то позднее в ней удалось разыскать и классические ассоциации со средним диаметром 80—100 пк. Первоначально они были идентифицированы визуально³ по пластинкам болгарского двухметрового телескопа, а затем и объективным методом кластерного анализа по данным ПЭС-фотометрии. Тот же метод позволил недавно доказать объективность выделения в галактике Андромеды агрегатов и комплексов⁴.

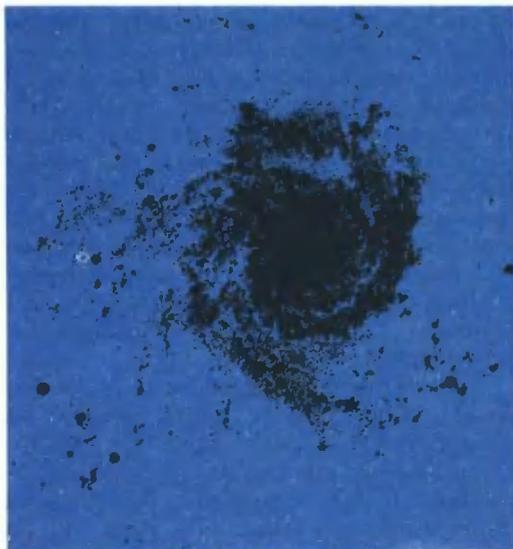
СПИРАЛЬНЫЕ РУКАВА НАШЕЙ И ДРУГИХ ГАЛАКТИК

Вернемся теперь к нашей Галактике. Богатые звездные комплексы в ней хорошо обрисовываются изолиниями поверхностной плотности соответствующей

³ Efremov Yu.N., Ivanov G.R., Nikolov N.S. // *Astrophys. Space Sci.* 1987. V.135. P.119.

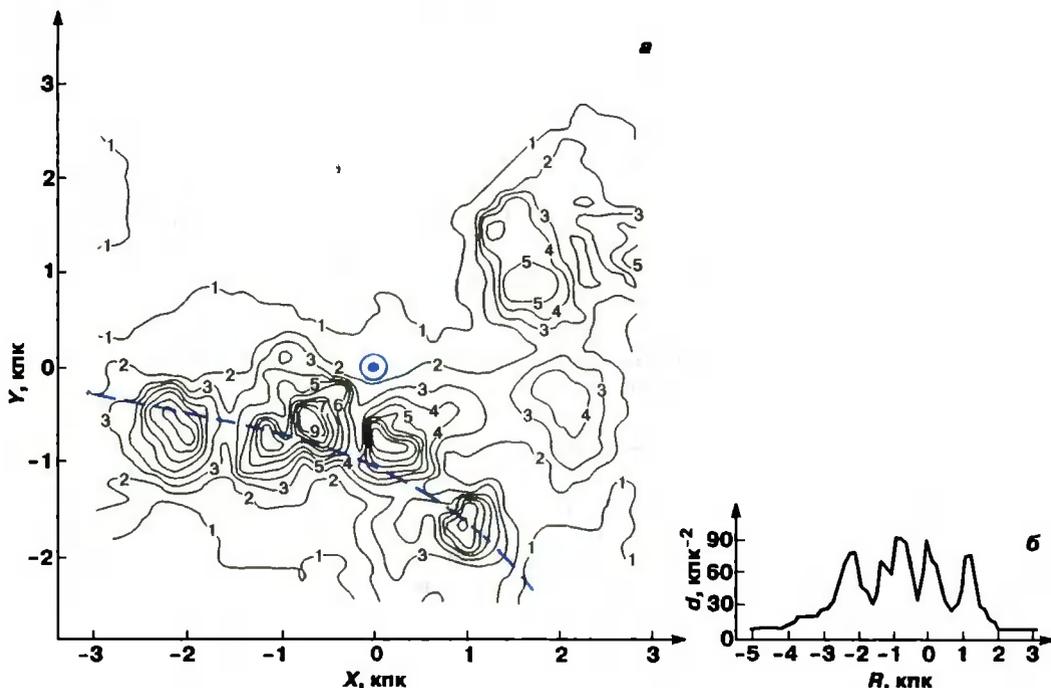
⁴ Battinelli P., Efremov Yu.N., Magnier E.A. // *Astron. Astrophys.* 1996. V.314. P.51—58.

Фотоснимок (негатив) спиральной галактики NGC 628 в созвездии Рыб, полученный на шестиметровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН. Хорошо видна неоднородная структура спиральных ветвей, связанная с гигантскими комплексами звездообразования.



ших объектов (в проекции на галактическую плоскость). Исследования показали, что наибольшие по размерам и самые населенные комплексы, выделяемые по молодым скоплениям и по цефеидам, концентрируются к внутреннему спиральному рукаву, известному как рукав Киля—Стрельца. Считается, что он — часть длинного спирального рукава, охватывающего всю Галактику, и вывод о концентрации в нем наибольших звездных комплексов согласуется с такой картиной.

Спиральные рукава в галактиках выделяются по яркости не только потому, что благодаря повышенной плотности газа в них сосредоточены очаги



а — карта окрестности Солнца, на которую нанесены изолинии поверхностной плотности цефеид, обрисовывающие гигантские звездные комплексы вдоль рукава Киля—Стрельца. Солнце находится в начале координат, центр Галактики — внизу, на расстоянии 7 кпк от него (за пределами рисунка); б — изменения поверхностной плотности σ цефеид вдоль средней линии рукава Киля—Стрельца (показана цветом на рис.а). R — расстояние вдоль рукава.

звездообразования и молодые звезды высокой светимости; снимки в ИК-диапазоне показывают: в них повышена и плотность более старых звезд. Это, по-видимому, справедливо и для нашей Галактики, по крайней мере для рукава Киля—Стрельца, в котором плотность цефеид и скоплений с возрастом до 100 млн лет оказалась вдвое выше, чем вне его пределов, что накладывает определенные ограничения на возможные механизмы возникновения спиральных волн плотности.

Комплексы, выделяемые по цефеидам, расположены вдоль рукава на расстоянии ~ 1 кпк друг от друга. Подобная же регулярность была обнаружена и во взаимных расстояниях сверхоблаков атомарного газа HI во «всегалактическом» рукаве Киля—Стрельца. Эти сверхоблака прекрасно обрисовывают форму рукава. Внутри сверхоблаков HI находятся более плотные молекулярные облака, с которыми непосредственно связаны молодые звездные скопления и ассоциации.

Обнаружение такой регулярности важно не только потому, что подтверждает ведущую роль крупномасштабной гравитационной неустойчивости в образовании звездно-газовых комплексов. Она типична именно для длинных и контрастных спиральных ветвей, которые объясняются лишь в рамках теории волн плотности и наблюдаются далеко не во всех спиральных галактиках. Теперь мы можем быть уверенными в том, что и наша Галактика относится к регулярным спиральным системам, где спиральные ветви имеют волновую природу.

Заметим, что образование спиральной структуры — одна из ключевых проблем в современной науке о галактиках. Спиральная форма, которую принимают различные образования в неоднородно-вращающихся дисках, столь естественна и распространена, что теоретически получить спиральный узор галактик оказалось возможным самыми различными способами, и это породило большое число взаимоисключающих подходов. Однако основная сложность состоит в том, чтобы объяснить долгоживучесть спиралей: ведь они наблюда-

ются в большинстве дисковых галактик, имеющих солидный возраст. Во многих предлагавшихся схемах спирали быстро «сглаживаются» и пропадают за один-два оборота диска. Большое время жизни узора говорит о том, что либо спиральные ветви непрерывно исчезают и возобновляются, например в силу каких-либо локальных неустойчивостей в газе, либо же это устойчивый во времени волновой узор, вращающийся с постоянной угловой скоростью (твердотельно) несмотря на то, что угловая скорость диска падает с расстоянием от центра.

Прямое свидетельство волновой природы ветвей дает анализ поля скоростей газа в галактических дисках. В России в настоящее время эти работы проводятся по наблюдениям на крупнейшем в Европе шестиметровом рефлекторе Большого азимутального телескопа под руководством А.М.Фридмана (Институт астрономии РАН). Само существование спиральных волн связано с регулярными осцилляциями звезд и газовых облаков относительно «невозмущенных» круговых орбит. Именно эти осцилляции, линии равных фаз которых имеют форму спиральных ветвей, и были обнаружены в газовых дисках галактик. Характер спиральной структуры определяется вращением звездного диска, его гравитацией и гидродинамическими процессами в межзвездном газе.

Отдельные звезды и долгоживущие облака газа проходят сквозь спиральный узор, лишь слегка отклоняясь от круговой орбиты. Но если реакция старых звезд диска на волны плотности достаточно простая и сводится к регулярному изменению плотности и вектора скорости, вызванному возмущением гравитационного поля волной, то реакция газа более сложна и интересна. Прохождение газа через гребень волны рождает целый комплекс еще далеко не полностью изученных явлений, - приводящих к возникновению сложной системы ударных волн, быстрому переходу части газа в молекулярную форму, образованию сверхоблаков и, наконец, звезд и звездных систем внутри них. Яркие вспыхивают очаги звездообразования,

под действием излучения горячих ультрафиолетовых звезд начинает флуоресцировать разреженный газ — и спиральная ветвь становится ярким контрастным узором, который мы обычно и видим на фотографиях галактик. Таким образом, сверхоблака и звездные комплексы — это вторичные образования, своего рода нелинейные эффекты, которые могут рождаться даже слабой волной. Составляемый ими узор выдает нам существование той инфраструктуры, пронизывающей диск, которая связана с распределением гравитационных сил, полёй скоростей газа и сил газового давления в диске.

СВЕРХАССОЦИАЦИИ

Существует редкая, но впечатляющая разновидность звездных комплексов, уже давно известная под названием сверхассоциаций. Такое название дал им американский астроном В.Бааде по аналогии с ассоциациями Амбарцумяна. Это ярчайшие из звездных группировок, целиком охваченные интенсивным звездообразованием. В обычном комплексе встречаются чаще всего две—три, иногда пять ассоциаций; сверхассоциации же буквально нашпигованы ими. Так, в наиболее яркой из близких к нам сверхассоциаций — 30 Золотой Рыбы в Большом Магеллановом Облаке — насчитывается 19 ассоциаций и лишь 3 цефеиды, которые к тому же могут быть случайно проецирующимися объектами фона. Если отвлечься от цефеид, возраст старейших объектов в этой сверхассоциации не превышает 10—30 млн лет (сравнительно с 100—150 млн лет в обычных комплексах). Сопоставление возрастов и численностей комплексов и сверхассоциаций в ближайших галактиках показывает, что стадию сверхассоциаций проходит лишь один из примерно десяти комплексов.

Каковы причины вспышек звездообразования, которые превращают комплексы в сверхассоциации? Это могут быть аномально высокие плотность и масса в исходном сверхоблаке, связан-

ные, вероятно, с его особым положением в галактике (например, у конца вытянутого звездного уплотнения, как в сверхассоциации 30 Золотой Рыбы⁵).

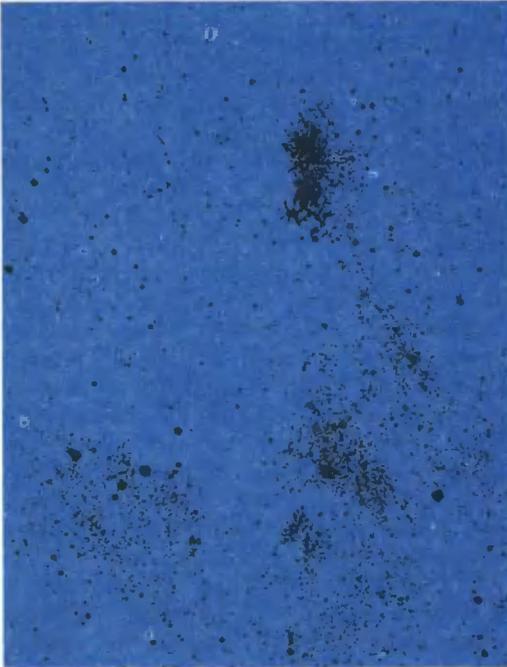
Другая возможность состоит в том⁶, что при появлении в сверхоблаке одновременно двух или более очагов звездообразования, содержащих О-звезды, от них исходят ударные волны, обусловленные активностью массивных звезд, которые распространяются по сверхоблаку. При столкновении ударных волн в сильно уплотненном ими слое газа должно происходить очень эффективное звездообразование, а следовательно, появление новых ударных волн. Возникает своего рода цепная реакция звездообразования, приводящая к быстрому заполнению сверхоблака ассоциациями.

Стоит рассмотреть физику этого процесса немного подробнее. Присутствие ударных волн, разных по интенсивности и пространственным масштабам, — характерная особенность межзвездной среды. Ударные волны и прежде не раз привлекались для объяснения природы и механизмов звездообразования. Самые большие по пространственному масштабу ударные волны связаны с движением газа через спиральные рукава галактик. Их считают причиной сжатия газа в рукавах, которое и стимулирует рождение звезд. Ударные волны меньшего масштаба, создаваемые вспышками отдельных сверхновых или их групп, также способны сжимать межзвездный газ и тем самым давать начало «волне звездообразования», которая движется вдоль газового диска галактики.

А что произойдет, если две распространяющиеся в межзвездной среде ударные волны столкнутся? Оказывается, при своем взаимодействии они порождают новые ударные волны сложной конфигурации. В этом случае возникают, в частности, отраженные волны, которые распространя-

⁵ Efremov Yu.N. // *Astron. J.* 1995. V.110. P.2757.

⁶ Chernin A.D., Efremov Yu.N., Voinovich P.A. // *Monthly Notices of Royal Astron. Soc.* 1995. V.275. P.313—326.



Фотоснимок (негатив) звездных комплексов в одном из спиральных рукавов галактики Андромеды, полученный на двухметровом рефлекторе Национальной обсерватории Болгарии (Родопы). В верхней части находится ярчайший из комплексов NGC206 — единственная сверхассоциация в этой галактике.

ются назад, к «центрам» взрывов, увлекая за собой значительную долю газа. При таких обстоятельствах в областях, где появились первые «обычные» вспышки звездообразования, происходят новые вспышки, где создание массивных звезд идет, возможно, еще более высокими темпами.

Действительно, наблюдения дают примеры сверхассоциаций с двумя поколениями звезд — цефеид (возраст 50—80 млн лет) и OB-звезд (до 10 млн лет). Существование резкого разрыва в возрасте двух поколений естественно понимать как результат двух, разделенных по времени последовательных вспышек звездообразования в данных областях пространства.

РОЖДЕНИЕ СВЕРХОБЛАКОВ

Итак, процесс звездообразования обычно начинается с рождения сверхоблака в спиральной ветви галактики. Но это не является непреложным законом. Звезды могут образоваться и без сверхоблаков, т.е. вне звездных комплексов, но, конечно, при наличии газа достаточной плотности. Например, во внешних, далеких от центра частях галактик часто наблюдаются спиральные ветви, хотя газовый диск там гравитационно устойчив. Встречаются и такие спиральные галактики, где плотность газа во всем диске слишком низка для того, чтобы в нем возникла крупномасштабная гравитационная неустойчивость. Тем не менее в этих случаях также часто наблюдается звездообразование, но обычно оно слабое, а компактные сверхоблака и звездные комплексы там, как правило, отсутствуют.

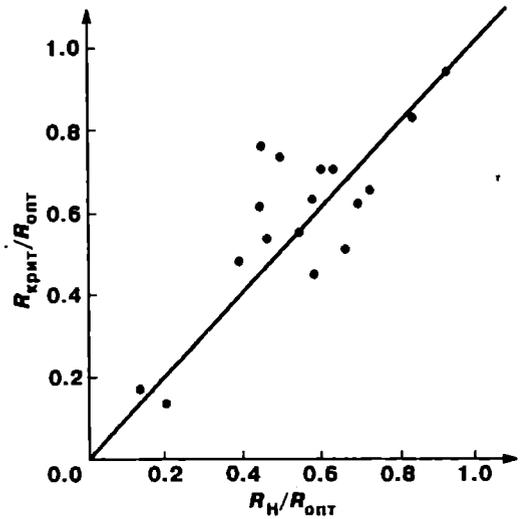
При каких же условиях возникают звездные комплексы в «нормальных» галактиках с активным звездообразованием? Здесь существуют два конкурирующих (или, возможно, дополняющих друг друга) подхода. Известны два физических механизма, способные приводить к концентрациям газа на масштабах в тысячи световых лет. Во-первых, это так называемая паркеровская неустойчивость (по имени американского астрофизика Р.Паркера, впервые рассмотревшего ее). Она развивается в слое токопроводящего газа (каким является межзвездная среда), пронизываемом упорядоченным магнитным полем, в гравитационном поле галактического диска. Система газ—поле стремится занять положение с минимальной потенциальной энергией. Это приводит к тому, что газовые облака, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля и деформируя их своим весом, «соскальзывают» к плоскости звездного диска, где накапливаются, как вода в горной впадине, образуя сверхоблака. Во-вторых, это гравитационная неустойчивость вращающегося газового диска.

В отличие от паркеровской гравитационная неустойчивость может

развиваться лишь при поверхностной плотности газа (т.е. массе газа, отнесенной к единице площади диска), превышающей пороговое значение. Только в этом случае собственная гравитация газового диска приводит к разбиению его на отдельные сжимающиеся сверхоблака. Теоретически оцениваемое значение критической плотности зависит от скорости вращения галактики и дисперсии облаков газа. Оно ниже на периферии диска, чем в его центральных частях, вращающихся с более высокой угловой скоростью. Для типичных случаев пороговая плотность составляет около 10^{21} атомов водорода на 1 см^2 диска, или несколько масс Солнца в столбе с сечением 1 пк^2 .

Исследования, проведенные в последние годы, показали, что там, где плотность газа не слишком низка, решающую роль играет именно второй, гравитационный, механизм. В 1989 г. американский астрофизик Р.Кенникатт на примере целого ряда спиральных галактик продемонстрировал, что области ионизованного водорода резко пропадают на таком расстоянии от центра, где плотность газа приближается к критическому значению или делается чуть ниже его. Более подробно условия звездообразования «по обе стороны границы» рассматривали Засов и Бизьяев⁷. Оказалось, что при плотности ниже критического порога (это обычно имеет место во внешних частях галактических дисков) меняется характер звездообразования, резко падает число молодых звезд в расчете на единицу массы газа, а сам газ остается преимущественно атомарным, а не молекулярным. Массивные газовые комплексы, основу которых составляют молекулярные облака, при этом уже не образуются.

Для ряда близких спиральных галактик с высоким содержанием газа



Соотношение между расстоянием от центра, где плотность газа становится ниже критической, $R_{\text{крит}}$ и расстоянием, при котором атомарный водород начинает преобладать над молекулярным, R_H . Для удобства сравнения галактик разного размера радиусы нормированы на оптические радиусы галактик $R_{\text{опт}}$.

удалось показать, что расстояние от центра, начиная с которого газовый диск становится устойчивым, одновременно является и тем расстоянием, при котором атомарный водород начинает преобладать над молекулярным. Близость сопоставляемых расстояний (см. рисунок.) очевидна. Это позволяет сделать вывод, что гравитационная неустойчивость газового диска действительно ответственна за появление молекулярных облаков, а следовательно, именно она служит началом той цепочки процессов, которая в итоге и приводит к рождению звездных комплексов, всегда связанных с молекулярным газом, и к активному звездообразованию.

ЗВЕЗДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Миллиарды лет назад, когда галактики только формировались, массивные сверхоблака должны были возникнуть первыми сразу же после образования газового диска. Они оказали огромное влияние на его эволюцию, поскольку были наибольшими флуктуациями плот-

⁷ Засов А.В., Бизьяев Д.В. // Письма в Астрон. журн. 1996. Т.22. С.83—91; Zasov A.V., Bizyaev D.V. Star-Formation Efficiency and Gravitational Stability of Gaseous Disks in Galaxies. Conf. Ser. Astron. Soc. of the Pacific. 1994. V.66. P.73—80.

ности вещества. Именно наличием таких флуктуаций можно объяснить давно известное высокое значение дисперсии скоростей старых звезд; они могут также способствовать и образованию спиральной структуры в молодой галактике⁸. Частоту и фазу общего вращения спирального узора может задавать несесимметричное образование, возникающее в центральной части диска, — перемычка, или бар.

По-видимому, характер этого процесса зависит от существования темных гало (корон) галактик, в которых содержится, как полагают, до 90% массы галактики. Поле тяготения массивного гало существенно влияет на всю эволюцию вложенного в него галактического диска. От массы гало, например, зависит, возникнет ли в галактике бар и какими будут его размеры и масса. Поле тяготения бара может оказаться вполне достаточным, чтобы возбудить в распределении сверхоблаков спиральную волну плотности, которая будет усиливаться и поддерживаться общим гравитационным полем диска.

По причине высокой (по сравнению с современной) плотности газового диска его гравитационная неустойчивость должна была дать начало очень массивным сверхассоциациям. По-видимому, именно они наблюдаются как яркие структурные детали у очень далеких галактик, изображения которых недавно были впервые получены американским Космическим телескопом им.Хаббла. Из-за большого времени распространения света мы видим эти системы в эпоху их молодости — миллиарды лет назад. Таким образом, наблюдения далеких галактик позволяют исследовать еще одно звено в длинной цепи процессов, связанных со звездообразованием: формирование того

диска, в котором в современную эпоху разыгрываются явления, упомянутые на предыдущих страницах.

Наблюдения с помощью Космического телескопа им.Хаббла дают дополнительные основания для той общей картины космогонического процесса, которую мы здесь развиваем. Очень важно, что многие новорожденные галактики видны как округлые образования сравнительно небольшого размера, вокруг которых можно различить зачатки дисков довольно правильной формы. Это дает основание предположить, что каждая галактика в своей основе может возникать из единого газового облака (вложенного в корону из темных масс), а не сливаться из более мелких систем, как часто считают. И только после формирования диска в нем зарождаются сверхоблака, дающие начало первым сверхассоциациям. Именно поэтому самые молодые галактики иногда выглядят на снимках как цепочки сверхассоциаций: такой вид они и должны иметь, если диск наклонен к лучу зрения.

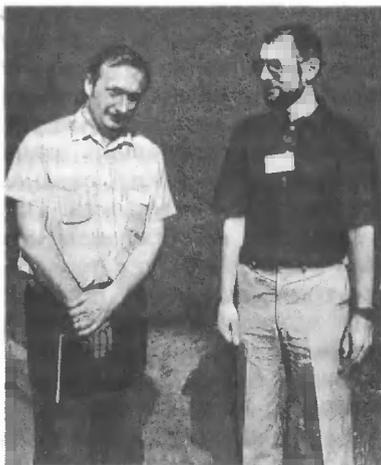
Можно предположить, что иерархическому ряду молодых звездных группировок — от кратных звезд до комплексов — соответствует последовательность порождающих их облаков турбулентного газа. Их размеры и масса могут быть самыми различными. Чем больше размер областей звездообразования, тем продолжительнее процесс рождения в них звезд. Звездные комплексы — наибольшие образования в этом ряду, еще не растянутые дифференциальным вращением галактики во фрагменты спирального рукава; их размеры определяются параметрами тех галактических дисков, в которых они наблюдаются⁹.

⁸ Efremov Yu.N., Chernin A.D. // *Vistas in Astronomy*. 1994. V.38. P.165—205.

⁹ Elmegreen B.G., Efremov Yu.N. // *Astrophys. J.* 1996. V.466. P.802—807.

Особенности углеродного цикла в Арктическом бассейне

П. Н. Маккавеев, Е. В. Якушев



Петр Николаевич Маккавеев (слева), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и гидрохимии Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН. Занимается карбонатной системой природных вод, гидрохимией океана. Член рабочей группы по проблеме CO₂ при Межправительственной океанографической комиссии.

Евгений Владимирович Якушев, кандидат географических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — математическое моделирование циклов биогенных элементов.

ИЗВЕСТНО, что индустриальная деятельность человека нарушает естественные геохимические циклы вещества. Особый интерес в последние годы вызывает изучение содержания в атмосфере углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄), поскольку чрезмерное накопление этих газов в атмосфере может отразиться на глобальном климате Земли. Причем основная опасность таится скорее не в изменении концентрации этих газов в атмосфере и связанных с ней геосферах (в геологической истории Земли известны периоды, когда уровень содержания диоксида углерода значительно превосходил современный), а в той скорости, с которой происходят эти изменения. Природа не терпит резких изменений, и ее ответную реакцию трудно предсказать.

Судя по количеству CO₂, поступающего ежегодно в атмосферу в результате сжигания человеком ископаемого топлива и другой его деятельности (около 5 Гт), и тому количеству, какое в ней остается, в ходе различных природных процессов должно поглощаться до половины этого антропогенного CO₂. Углекислый газ связывается в процессах деятельности биоты (углерод идет на построение органического вещества), химического выветривания, когда, взаимодействуя с водой и породами, образует слаборастворимые карбонаты и бикарбонаты, и растворения в водах Мирового океана с последующим выведением в донные осадки. Согласно современным представлениям, глобальный цикл углерода не замкнут. Известные в настоящее время стоки CO₂ и скорость его накопления в атмосфере не компенсируют всего

антропогенного поступления. Значит, должны существовать «невьявленные стоки» («missing sinks»), обнаружение которых составляет важнейшую задачу в контексте изучения глобальных изменений в настоящее время и особенно в будущем.

В геологическом масштабе времени интенсивность химического выветривания можно считать величиной постоянной. Основные районы стока углерода на суше — лесные сообщества — постоянно сокращаются. Хотя, по имеющимся данным, фотосинтез наземных растений может усиливаться при увеличении содержания CO_2 в атмосфере, трудно ожидать значительного повышения интенсивности поглощения ими диоксида углерода. Видимо, дополнительные стоки техногенного углекислого газа надо искать в водах Мирового океана. Прогноз возможных изменений, связанных с парниковым эффектом, остро нуждается в достаточно точной количественной оценке CO_2 , поглощаемого водами Мирового океана, так как именно он служит важнейшим стоком в глобальном балансе этого газа.

Принято считать, что океан «поглощает» атмосферный CO_2 , сдерживая его поступление от сжигаемого ископаемого углерода, и выделяет в атмосферу часть кислорода, вырабатываемого его растительностью (главным образом фитопланктоном), т.е. как бы «вдыхает» CO_2 , очищая атмосферу. Однако на самом деле механизм регулирования океаном содержания атмосферного углекислого газа несколько сложнее. Различные части Мирового океана могут как выделять, так и поглощать различные газы, в частности диоксид углерода. Причем сильная изменчивость содержания CO_2 в водах приводит к тому, что одни и те же акватории могут в зависимости от внешних условий выступать как его источник или как сток. Исследования последних лет дали достаточно подробную картину пространственной и временной динамики газообмена по акваториям Тихого, Атлантического и Индийского океанов.

РОЛЬ ВЫСОКОШИРОТНЫХ РАЙОНОВ СУШИ И ОКЕАНА

До недавнего времени была широко распространена заманчиво простая схема «меридионального переноса» диоксида углерода. Антарктика рассматривалась как основной район стока CO_2 . Поглощенный диоксид углерода опускался в глубинные воды и выносился обратно в атмосферу теплыми водами экваториальной и тропическими зонами океанов. Моря Арктики в существовавших ранее оценках обмена CO_2 между океаном и атмосферой не учитывались. Полагали, что их участие в глобальном цикле углерода незначительно по сравнению с другими районами Мирового океана, что объяснялось наличием ярко выраженного сезонного пикноклина (слоя резкого скачка плотности вод) и ледяного покрова, которые препятствуют интенсивному газообмену.

Миф об Антарктике как о «легких планеты» опровергли экспедиционные исследования последних лет. Воды Антарктики могут поглощать CO_2 только в короткий летний период активного фотосинтеза, зимой вся акватория представляет собой источник углекислого газа. Это подтверждается и относительным увеличением уровня атмосферного CO_2 в прибрежных районах Антарктиды (по данным, полученным на станциях Палмер и Холли-Бей). В холодное время года поглощение CO_2 возможно в Атлантическом секторе, где при охлаждении теплых вод Бразильского течения увеличивается их углекислотная емкость (так как при уменьшении температуры увеличивается растворимость диоксида углерода в воде)¹. Сам же ледниковый щит Антарктиды, видимо, «нейтрален» по отношению к атмосферному CO_2 (если не считать того, что льды Антарктики служат уникальным «архивом» прошлых изменений климата и содержания углекислого газа в атмосфере).

Мы полагаем, что основная причина пренебрежения ролью полярных

¹ Химия морей и океанов. М., 1995.

районов в глобальном обмене диоксидом углерода между океаном и атмосферой кроется в недостаточной изученности условий карбонатного равновесия и особенностей газообмена в их водах. Но в последние годы интерес к этим районам усилился. Это связано еще и с тем, что, по современным представлениям, в почвах, болотах и верхнем слое мерзлоты Арктики и Субарктики аккумулировано около 455 Гт углерода², это лишь немного меньше количества атмосферного углерода — 690 Гт. Возможное повышение глобальной температуры может вызвать расконсервацию запасов и тем самым активизировать этот источник CO_2 и CH_4 .

Доказано, что существует значительная эмиссия углекислого газа и метана из почв, болот и озер Аляски и Азиатского севера. Воды озер Арктики и Субарктики, занимающие значительную часть этих регионов, пересыщены CO_2 и CH_4 по сравнению с атмосферой в сотни раз. Благодаря этому возникает поток метана и диоксида углерода в атмосферу, особенно интенсивный в осенне-зимний период при «перевороте» вод. Эти выбросы CO_2 и CH_4 количественно еще не оценены, но мощность их такова, что планетарный максимум диоксида углерода и метана в атмосфере смещается от умеренных широт, где сосредоточены основные антропогенные источники этих газов, к северу, в более высокие широты.

Если роль наземных территорий Арктики и Субарктики в глобальном цикле диоксида углерода определена достаточно хорошо, правда только качественно — как источника CO_2 (получение количественных оценок мощности этого источника — одна из важных задач будущего), то роль Северного Ледовитого океана и Арктических морей не столь однозначна.

Для того чтобы оценить действительное значение Арктических морей, надо рассмотреть особенности биогео-

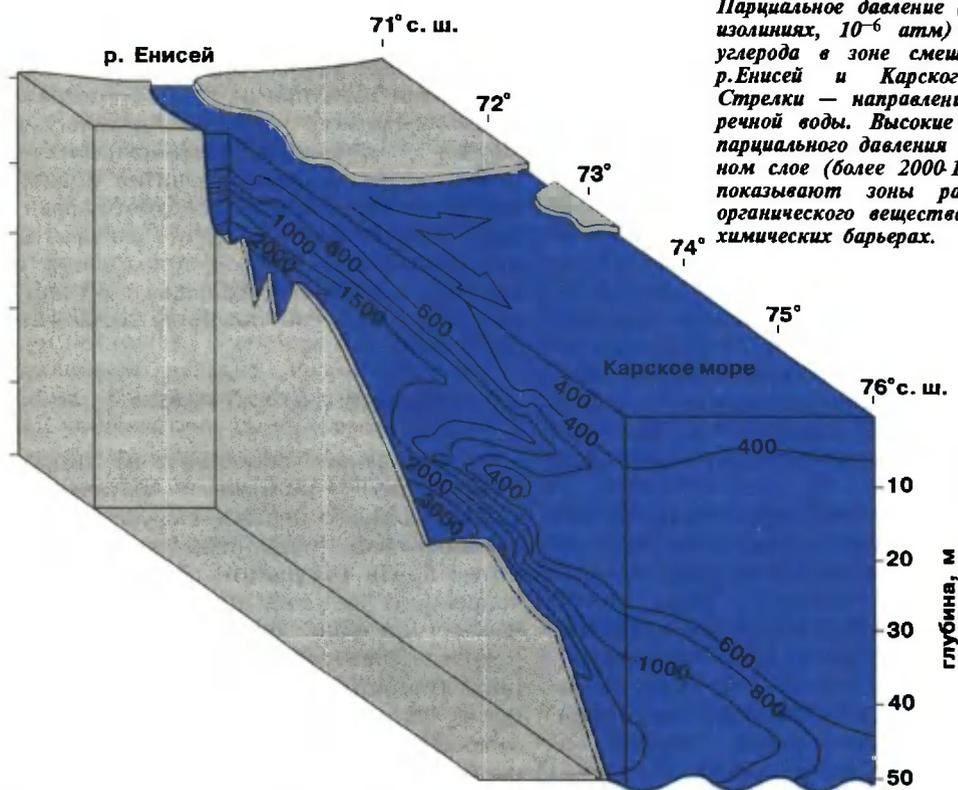
химического цикла углерода в водах высоких широт. Его специфика в Арктических морях определяется несколькими факторами: особенностями гидрологического режима Арктических морей; влиянием поверхностного стока; особенностями развития водной биоты и процессов осадкообразования. Кроме того, следует учитывать, что для всех процессов, проходящих в Арктике, характерна большая контрастность и сильная сезонная изменчивость.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

К главным особенностям гидрологического режима Арктических морей можно отнести сильную стратификацию вод, периодические «перевороты» вод в результате осенне-зимней конвекции, а также наличие большей часть года (или постоянно) ледяного покрова. Влияние ледяного покрова на цикл углерода в целом и на интенсивность газообмена между океаном и атмосферой, в частности, наименее изучено. Однако уже доказано, что лед не препятствует потоку газа между океаном и атмосферой. Вопрос о степени проницаемости льда для потоков газа требует дополнительного изучения и в первую очередь проведения корректных натуральных наблюдений.

Сильный сезонный термоклин, возникающий в высокоширотных морях из-за резкого роста плотности вод, с глубиной снижает интенсивность массообмена между поверхностными и глубинными водами и диффузионный обмен между водой и воздухом, особенно в теплое время года, когда прогрев поверхностных вод и их распреснение в результате таяния льда и речного стока значительно уменьшает их плотность. В осенне-зимний период конвекция вод приводит к размыванию плотностного барьера, выравниванию гидрологических и гидрохимических характеристик по вертикали и привнесу в верхний деятельный слой биогенных элементов и растворенного углекислого газа, накопившихся в промежуточных и глу-

² Global atmospheric — biospheric chemistry / R.G. Prinn (ed.). N.Y., 1994.



Парциальное давление (числа на изолиниях, 10^{-6} атм) диоксида углерода в зоне смешения вод р. Енисей и Карского моря. Стрелки — направление выноса речной воды. Высокие значения парциального давления в придонном слое (более $2000 \cdot 10^{-6}$ атм) показывают зоны разложения органического вещества на геохимических барьерах.

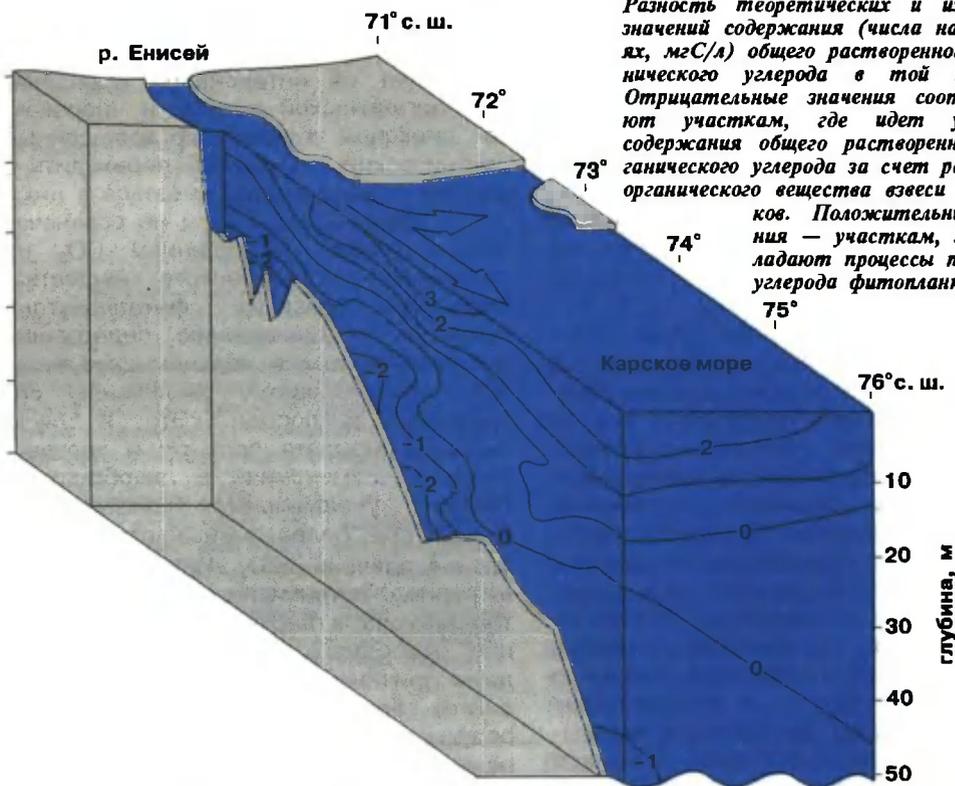
бинных водах. Это приводит к пересыщению поверхностных вод диоксидом углерода за счет его поступления из нижележащих слоев и увеличению содержания биогенных элементов — необходимой пищевой базы для развития фитопланктона.

Арктический бассейн наиболее подвержен влиянию материкового стока среди других районов Мирового океана. В Северный Ледовитый океан поступает с речным, поверхностным и подземным стоками 354 мм пресных вод на единицу его площади в год, что почти в 3 раза превышает средний речной сток для Мирового океана³. Реками вносится значительное количество веществ, в том числе и углерода в растворенном и взвешенном виде, которые большей частью осаждаются в зоне контакта морских и речных вод (90—95% взвешенного материала и

20—30% растворенного органического вещества). Те части зон смешения вод, где изменения их химического состава максимальны, носят название геохимических барьеров. На геохимических барьерах наблюдается массовое осаждение органического углерода во взвешенных формах и лавинообразное накопление его в донных осадках, где он частично минерализуется и возвращается обратно в воду в виде CO_2 . Это проявляется в сильном пересыщении вод углекислым газом в зонах смешения и увеличении парциального давления растворенного диоксида углерода (p_{CO_2}) до $1000 \cdot 10^{-6}$ атм и более.

Наглядно показать трансформацию углерода в зонах контакта река—море можно на примере устья реки Енисей. На основе уравнения смешения морских и речных вод мы рассчитали стационарное содержание растворенного неорганического углерода. Разница между теоретическими и

³ Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М., 1983.



Разность теоретических и измеренных значений содержания (числа на изолиниях, мгС/л) общего растворенного неорганического углерода в той же зоне. Отрицательные значения соответствуют участкам, где идет увеличение содержания общего растворенного неорганического углерода за счет разложения органического вещества взвеси или осадков. Положительные значения — участкам, где преобладают процессы поглощения углерода фитопланктоном.

реально наблюдавшимися значениями концентрации растворенного неорганического углерода показывает, увеличивается или уменьшается его содержание в воде. Эту разницу с некоторыми допущениями можно приписать биогеохимическим процессам. Так, уменьшение реально наблюдавшейся величины по сравнению с теоретической может быть вызвано потреблением углерода при фотосинтетической деятельности биоты или связыванием его в результате процессов на биохимическом барьере река—море. Превышение реально наблюдавшейся величины над расчетной может быть связано с поступлением неорганического углерода в результате разложения органического вещества в воде или в верхнем слое осадков⁴. На разрезе во всех поверхностных водах идет поглощение неорганического углерода. По-

ступление его в воду наблюдается практически везде в придонном слое с отдельными «очагами», положение которых хорошо согласуется с распределением величины $p\text{CO}_2$ и положением биохимических барьеров, где зафиксирована активная седиментация взвеси.

ОСОБЕННОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В появляющихся обобщениях о динамике углерода в Арктике основной акцент делался на чисто физические факторы, в то время как биологические освещены недостаточно полно. В то же время многочисленные биологические исследования Арктических морей в основном не были непосредственно связаны с проблемой обмена углерода между океаном и атмосферой. Совершенно очевидно, что биохимические процессы в поглощении излишков CO_2 в Арктике преобладают над физическими, поскольку диффузи-

⁴ Маккавеев П.Н. // Океанология. 1994. Т.34. № 5. С.668—672.

онный и турбулентный переносы углерода значительно затруднены большую часть года, о чем говорилось выше.

Хорошо известно, что роль океанской биоты в процессах поглощения и перераспределения углерода — агрегирование растворенных неорганических соединений углерода во взвесь, седиментация которой и частичное захоронение в донных осадках на длительное время выводит углерод из его глобального цикла.

В высоких широтах химико-биологические процессы протекают в чрезвычайно контрастной форме. Продолжительность вегетационного периода здесь около двух-шести недель, однако его интенсивность очень велика, так как высокое содержание биогенных элементов позволяет синтезировать большое количество органического вещества, прежде чем фотосинтез будет лимитирован. Цветение фитопланктона в высоких широтах Арктики имеет достаточно сложную временную структуру и представляет собой несколько (до шести) чрезвычайно интенсивных всплесков, длящихся иногда лишь несколько суток. Причем каждому пику соответствует свой доминирующий вид фитопланктона. Средние величины первичной продукции в этот период превышают 2000—3000 мгС/м²сут, что на порядок больше аналогичных значений в умеренных широтах⁵.

Краткость периода активного фотосинтеза приводит к тому, что массовое развитие фито- и зоопланктона в Арктических морях происходит практически одновременно, а не разнесено по времени, как на большей части акватории Мирового океана. По этой причине в фотический период, когда освещенность воды достаточна для развития фитопланктона, может отсутствовать ярко выраженный максимум кислорода, потребляемого при дыхании зоопланктона⁶, хотя в некоторых

случаях наблюдаемые концентрации кислорода и превышают 10 мл/л, а величины рН — 8.6. Все это свидетельствует об интенсивном образовании органической взвеси и «перекачке» диоксида углерода во взвешенный органический, способный переходить в донные осадки и накапливаться в них.

Однако вклад биоты не ограничивается только поглощением CO₂ на построение органического вещества. Весеннее развитие фитопланктона приводит к уменьшению содержания углекислого газа в верхнем слое воды и соответствующему увеличению содержания кислорода. Это в свою очередь вызывает рост рН и соответственно изменения в карбонатной системе: увеличивается концентрация CO₃²⁻ и еще более уменьшается парциальное давление CO₂. Иными словами, в период интенсивного развития фитопланктона в верхнем слое содержание свободного CO₂ уменьшается по двум причинам — при потреблении на синтез органического вещества и в результате трансформации из собственно растворенного CO₂ через бикарбонат ион HCO₃⁻ в CO₃²⁻.

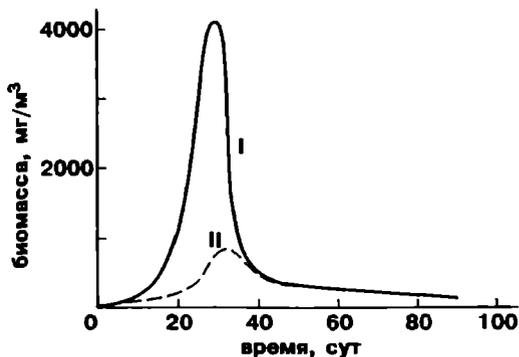
Чтобы подробно исследовать это явление, была применена математическая модель⁷. Расчеты были основаны на системе уравнений, описывающих изменчивость концентраций рассматриваемых компонентов как результат совместного действия химико-биологических процессов продукции и деструкции органического вещества, седиментации взвеси, интенсивности обмена верхнего слоя с подстилающими подповерхностными водами и газообмена воды с атмосферой.

С помощью модели рассчитаны величины амплитуды изменчивости элементов карбонатной системы. Расчеты показали, что до 60% амплитуды годовой изменчивости обеспечено гидрофизическими факторами (изменением солёности и температуры вод, боковой и вертикальной адвекцией углерода), а до 40% — химико-биоло-

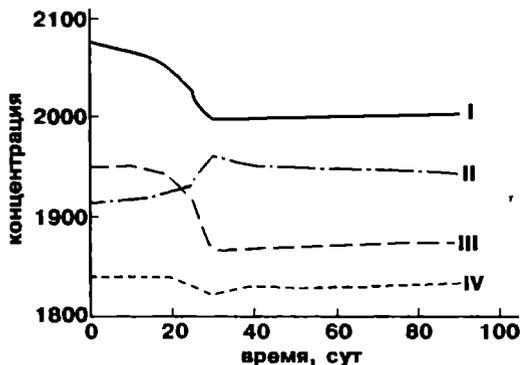
⁵ Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Функционирование планктонных сообществ. М., 1987.

⁶ Биология центрального Арктического бассейна / Под ред. М.Е.Виноградова и И.А.Мельникова. М., 1980.

⁷ Якушев Е.В., Михайловский Г.Е. // Океанология. 1994. Т.34. № 2.



Результаты модельных расчетов изменчивости элементов карбонатной системы во время вспышки весеннего цветения фитопланктона в высоких широтах с учетом образования кальциевого скелета водорослями-кокколитофорами. Слева — биомасса фитопланктона (I), зоопланктона (II); справа — общая щелочность в мкг-экв/л (I), концентрации в мкМ/л : карбонат иона CO_3^{2-} (II), бикарбонат иона HCO_3^- (III), растворенной CO_2 (IV). Значительный рост фитопланктона во время весеннего цветения вызывает рост биомассы зоопланктона и изменение содержания растворенного органического углерода в различных формах.



гическими процессами. Основные изменения происходят в чрезвычайно короткий период — во время цветения фитопланктона. Во время вегетационного периода вода может поглощать более 14—42 г углерода под квадратным метром поверхности, что может привести к снижению парциального давления CO_2 в верхнем деятельном слое вод на $60 \cdot 10^{-6}$ атм. Таким образом, вклад биоты океана, и прежде всего фитопланктона, в процессы обмена CO_2 между океаном и атмосферой весьма велик, и в ряде случаев именно биота способна определять направление такого обмена.

Проведенные ранее оценки не учитывали еще одного фактора, характерного для Арктики. Считалось, что биологическая весна в Арктике начинается после вскрытия и подвижки льдов. Но в последнее время было показано, что активное развитие фитопланктона начинается еще до таяния льда — в его порах и под ним⁸, в то

время когда освещенность становится достаточной для начала фотосинтеза. Первичная продукция в этот период очень велика (3—4 $\text{гC/м}^2\text{сут}$). Таким образом, вода подо льдом оказывается сильно недонасыщенной CO_2 и в случае контакта с атмосферой может поглотить значительное количество атмосферного диоксида углерода.

В дальнейшем поглощенный в вегетационный период углерод может трансформироваться следующими путями:

- увеличением содержания свободного CO_2 при минерализации органического вещества (образовавшийся органический углерод в основном окисляется в пределах верхнего деятельного слоя вод), что приводит к летней эвазии — выделению CO_2 из воды в атмосферу;

- перемещением части взвешенного органического углерода в нижележащие слои и частичным переходом в осадок или минерализацией в верхнем слое осадка.

ОСОБЕННОСТИ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ

Условия накопления углерода в осадках Северного Ледовитого океана и Арктических морей весьма специфичны и отличаются от карбонатонакопления в умеренных и низких широтах. Осаждение углерода и вывод его в осадки в основном может идти двумя путями: биогенным осаждением карбонатов и захоронением углерода в составе органического вещества. Теоретически существует возможность хе-

⁸ Океанологические исследования и подводно-технические работы на месте гибели атомной подводной лодки «Комсомолец» / Под ред. М.Е.Виноградова и А.М.Сагалевица. М., 1996.

могенного осаждения карбонатов, но в современных условиях, особенно в Арктических холодных морях, ее можно и не рассматривать. Основным механизмом современного карбонатакопления — биогенный, главную роль здесь играют планктонные организмы с известковым скелетом, в первую очередь — фораминиферы, в меньшей степени — кокколитофориды и птероподы. Состав планктона Арктического района таков, что основное значение для накопления CaCO_3 в донных осадках имеют бентические организмы и терригенный материал. Последний практически весь осаждается в приустьевых областях. Это приводит к тому, что в современных осадках Арктических морей карбонатного материала содержится чрезвычайно мало. Доля CaCO_3 в них редко превышает 1—2%. Больше количество карбонатного углерода в составе осадков, как правило, приурочено к районам выноса и захоронения терригенного материала.

На большей части Мирового океана основная масса органического углерода окисляется в зоне фотосинтеза или в глубинных водах по мере опускания на дно; активное окисление органического материала происходит и в верхнем слое осадка. В результате в осадках захоранивается всего около 0.1—1.3% от его количества. Однако в Северном Ледовитом океане создаются благоприятные условия для накопления органического углерода в осадках. Этому способствует относительная «мелководность» океана — около 40% его площади приходится на глубины до 200 м. Поэтому частицы органической взвеси быстрее достигают дна, и, следовательно, потери на растворение в толще вод меньше. Мощный и короткий всплеск развития планктона вызывает периодические интенсивные потоки органической взвеси из верхнего деятельного слоя. Часто мощность потока частиц такова, что органическое вещество взвеси оказывается погребенным раньше, чем процессы разложения и минерализации успеют его переработать.

Слабая интенсивность процессов

минерализации органического вещества в толще вод и верхнем слое осадка обусловлена еще и тем, что активность бактерий связана с температурой нелинейной зависимостью и резко падает при ее понижении. Таким образом, в экосистемах Арктических морей бактериальная продукция более чем на порядок ниже тропических, где поток бактериального превращения энергии может быть по величине сравним с количеством энергии, трансформируемой путем фотосинтеза⁹. Одно из подтверждений низкой интенсивности процессов разложения органического вещества в глубинных и промежуточных водах открытой части Северного Ледовитого океана отражается в относительно невысоких величинах парциального давления CO_2 ($400\text{--}600 \cdot 10^{-6}$ атм) и небольших концентрациях метана и аммония.

В этом плане интересно сравнить условия накопления углерода в осадках для таких «полярных» по отношению друг к другу районов Мирового океана, как моря Арктики и коралловые рифы тропического и экваториального поясов. Для коралловых сообществ, в которых отлагается около половины всего карбонатного материала, поступающего на дно Мирового океана, характерно отсутствие четко выраженной сезонности развития. Высокая продуктивность ($5\text{--}20 \text{ гC}_{\text{орг}}/\text{м}^2$ в сутки) практически не зависит от содержания биогенных элементов и сохраняется в течение всего года. Структура организации коралловых сообществ столь совершенна, что позволяет практически полностью использовать все образующееся в них органическое вещество. Это проявляется в полном отсутствии или крайне низком содержании в осадках коралловых рифов органического углерода. В их составе главное место занимает карбонат биогенного происхождения, образуемый кораллами, фораминиферами и известковыми водорослями¹⁰.

⁹ Биогеохимия органического вещества арктических морей / Под ред. И.С.Грамберга и Е.А.Романкевича. М., 1982.

Напротив, для Арктических морей характерны чрезвычайно низкое содержание карбонатного углерода (как правило, менее 2%) в донных осадках, сильная сезонность, контрастность биохимических процессов и большая роль органического углерода в формировании донных осадков.

Возможно, именно в Арктике, особенно в ее морях, мы можем найти «невывявленные стоки» углерода и тем самым замкнуть его глобальный цикл. Особенности гидрологического и биологического режимов в высоких широтах приводят к тому, что содержание диоксида углерода в водах Арктических морей может меняться в очень широких пределах. Причем недосыщение вод CO_2 по сравнению с атмосферой наблюдается не только в период активного развития фотосинтеза, но и в зимний период, т.е. и в холодный период воды могут поглощать диоксид

углерода из атмосферы. Достоверных оценок количества диоксида углерода, поглощаемого арктическими водами, пока нет не только для холодного времени, но и для периода активного фотосинтеза.

Количество поглощаемого CO_2 может быть уточнено, если учитывать вспышку планктона, проходящую до вскрытия льда. В настоящее время мы пытаемся определить величину первичной продукции фотосинтезирующего планктона подо льдом, что позволит судить хотя бы о масштабе этого процесса. Необходимо также более детальное исследование имеющихся материалов по составу и распределению углерода в осадках Арктических морей. Такие исследования должны быть приоритетными для России как страны, к которой прилегают наибольшие площади Арктического шельфа.

Работа выполнена по программе «Глобальные изменения природной среды и климата», проект 4.6.2., и при поддержке РФФИ, грант 96-05-65134.

¹⁰ Сорокин Ю.И. Экосистемы коралловых рифов. М., 1990.

НОВОСТИ НАУКИ

Охрана окружающей среды

Судьба хранилища в Селлафилде

Британская компания «British Nuclear Fuels», которой принадлежит завод по переработке атомных отходов ядерного центра Селлафилд (графство Кумбрия), заключая контракты с иностранными фирмами, брала обязательство возвращать отходы радиоактивных материалов, поступивших из-за границы, своему клиенту в течение ближайших 25 лет. Была также принята практика замены: компании пред-

стояло держать отходы средней радиоактивности в своем хранилище, а возвращать клиенту их эквивалент в виде высокоактивных материалов.

В этих целях в районе Селлафилда планировалось создать специальную подземную лабораторию, которой предстояло дать заключение о том, насколько геологические, геофизические, гидрологические и иные характеристики местности подходят для постоянного хранения радионуклидов средней активности. Однако в результате протестов общественности решение вопроса о сооруже-

нии подземной лаборатории было отложено, что может привести к срыву весьма выгодных для Великобритании контрактов с Японией и Германией.

С другой стороны, из предусмотренного договором 25-летнего срока истекло лишь около трех лет, что позволяет пока продолжить практику переработки и замены отходов. Руководство компании надеется найти возможность соорудить для них постоянное безопасное хранилище.

New Scientist. 1997. V.154. № 2078. P.5 (Великобритания).

Механизмы защиты мозга от окислительного стресса

А. А. Болдырев



Александр Александрович Болдырев, доктор биологических наук, профессор Международного биотехнологического центра при МГУ им. М.В. Ломоносова по кафедре биохимии, заведующий лабораторией клинической нейрохимии Института неврологии РАМН, руководитель межгосударственной научной российско-японской программы «Конформация биомолекул и роль сигнальных пептидов в ее изменениях». Научные интересы связаны с изучением природных механизмов устойчивости возбудимых структур к окислительному стрессу. Автор более 200 научных публикаций в отечественной и зарубежной научной периодике, нескольких монографий и учебных пособий.

ИССЛЕДОВАНИЕ процессов, протекающих в мозге, — одна из наиболее сложных задач современной биологии. Недаром для консолидации усилий ученых всех стран ЮНЕСКО объявило последнее десятилетие XX в. десятилетием мозга. Изучение окислительной устойчивости мозга составило одно из направлений многогранной программы. Свободные радикалы — неперенные участники окислительных процессов в организме — долгое время считались лишь токсичными для клеток. Успехи в понимании тонких механизмов деятельности мозга и ее регуляции во многом изменили взгляд на роль этих активных окислителей в клеточном метаболизме.

ОШИБКИ КИСЛОРОДНОГО ОБМЕНА

Мозг — один из наиболее специализированных органов, работа которого определяет самые существенные проявления жизнедеятельности: поведение, память, абстрактное мышление¹. Биохимика всегда привлекали особенности обмена веществ в клетках мозговой ткани — нейронах, электрическая активность которых лежит в основе высшей нервной деятельности.

Обычно для нейронов активное потребление кислорода составляет в минуту 3—4 мл/100 г ткани, а его уменьшение до 2—2.5 мл/100 г ткани нарушает метаболизм нейронов.

Как известно, основной энергетический субстрат мозгового обмена — глюкоза. Ее анаэробный распад (гликолиз), протекающий в цитоплазме, может обеспечить клетки энергией

© А.А.Болдырев

¹ Блум А., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение. М., 1988.

АТФ даже без участия кислорода. Однако высвобождаемая при этом энергия мала, а в результате бескислородного превращения глюкозы образуется молочная кислота. Клетке гораздо выгоднее полное окисление глюкозы, протекающее в митохондриях с участием кислорода. При этом преимущественник молочной кислоты — пировиноградная кислота — окисляется до углекислого газа и воды, а высвобождающаяся энергия удовлетворяет все энергетические потребности клетки. Кроме того, при таком окислении глюкозы в клетке не накапливаются кислые продукты обмена, например молочная кислота.

Однако интенсивное использование кислорода нейронами таит в себе опасность окислительного повреждения тканей: при нарушении кислородного обмена образуются его активные, частично восстановленные формы с высокой окисляющей способностью. Такие реакции, которые совсем недавно считали нежелательным признаком, сопровождающим патологические отклонения метаболизма, связаны с появлением избытка высокореактивных форм кислорода², в первую очередь супероксид-радикала (O_2^-).¹

Действительно, при нарушениях мозгового кровообращения наступает ишемия — состояние, когда из-за ограниченного доступа крови ухудшается снабжение мозга кислородом. В этом случае энергетический обмен перестраивается на анаэробный гликолиз, при котором накапливается молочная кислота. Ведь в условиях дефицита кислорода она не успевает утилизироваться (поскольку компоненты дыхательной цепи митохондрий находятся в восстановленном состоянии), и в результате образуется супероксид³. Поэтому в ишемической ткани мозга от избытка молочной кислоты закисляется среда и одновременно увеличивается количество свободнорадикальных форм кислорода.

Какая же опасность грозит нейронам в зоне ишемического очага? Каков вред от перепроизводства свободнорадикальных форм кислорода?

Дело в том, что свободные радикалы способны разрушать биологические макромолекулы. Так, супероксид легко превращается в пероксид водорода (H_2O_2), который в присутствии Fe^{2+} образует гидроксид-радикал, а с помощью фермента миелопероксидазы — анион гипохлорита. Эти соединения обладают высоким окислительным потенциалом, могут повреждать белки, нуклеиновые кислоты и липиды клеточных мембран. Кроме этого, супероксид активирует NO-синтазу — фермент, катализирующий образование оксида азота (NO). Сам по себе радикал NO почти не активен и в норме участвует в регуляции давления крови. Но в кислой среде, взаимодействуя с супероксидом, он образует токсичное соединение — пероксинитрит.

Все эти превращения имеют место при повышенной генерации супероксида и ускоряются в кислой среде, типичной для области ишемического повреждения, а также при высвобождении ионов железа из биологических структур (в частности, из гемопroteинов, например гемоглобина), разрушаемых при окислительных повреждениях.

Наглядным примером деструктивного действия свободных радикалов в клетке служит окисление липидов в ее мембранах⁴. При окислении ненасыщенных жирнокислотных цепей этих липидов в области сопряженных двойных связей образуются гидроперекиси, которые увеличивают проникновение молекул воды внутрь бислоя и нарушают целостность мембраны⁵.

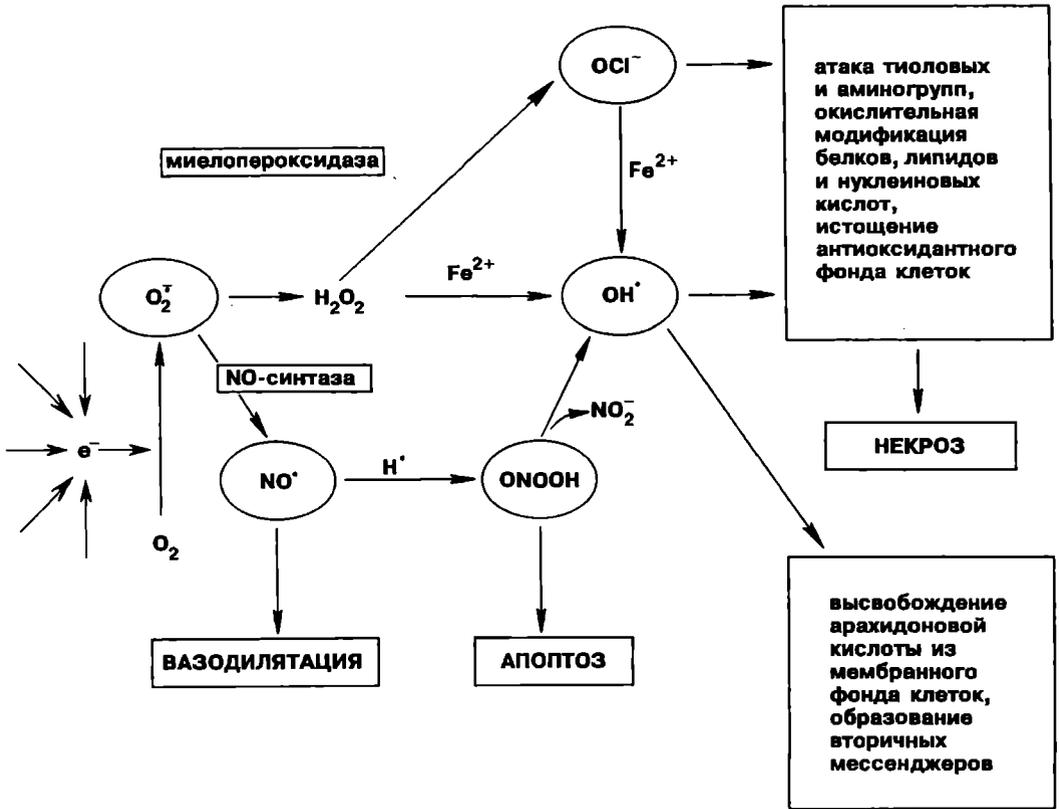
Таким образом, супероксид инициирует образование различных радикалов (табл.). Хотя их концентрация в тканях, как правило, очень низка, а

² Скулачев В.П. Мембранные преобразователи энергии. М., 1989.

³ Скулачев В.П. // Биохимия. 1994. Т.59. С.910–912.

⁴ Введение в биомембранологию / Под ред. А.А.Болдырева. М., 1990.

⁵ Болдырев А.А., Куклей М.Л. // Нейрохимия. 1996. Т.13. С.271–278.



Свободные радикалы в клетке и их биологические эффекты.

время жизни мало⁶, все исследователи сходятся во мнении, что окислительный стресс увеличивает количество свободнорадикальных соединений и активизирует перекисные процессы.

КЛЕТОЧНЫЕ АНТИОКСИДАНТЫ

Очевидно, что клетка должна бороться с перепроизводством свободных радикалов, которое ведет к смерти нейрона. Для преодоления нежелательных последствий окислительных повреждений в клетке существуют множественные системы антиок-

⁶ Например, время жизни радикалов составляет: супероксида — 10^{-6} с, гидроксида — 10^{-9} , алкоксида — 10^{-6} , пероксида — 10^{-2} . Синглетный кислород живет в клетке 10^{-6} с, а молекулярный — значительно дольше (10^2 с).

сидантной защиты⁷. Все они делятся на два основных типа: ферментативные и неферментативные.

Среди ферментов, контролирующей концентрацию супероксид-аниона ($O_2^{\cdot-}$) и пероксида водорода (H_2O_2), наиболее распространены следующие: супероксиддисмутаза, участвующая в превращении $O_2^{\cdot-}$ в H_2O_2 , каталаза и глутатионпероксидаза, катализирующие превращение H_2O_2 в H_2O . При недостаточной активности этих ферментов могут накапливаться гидроксид-радикалы, способные проникать даже в гидрофобные области клеточных мембран и индуцировать повреждения жирнокислотных цепей мембранных липидов.

Неферментативных природных антиоксидантов, нейтрализующих гидроксид-радикалы, очень много. По

⁷ Подробнее см.: Скулачев В.П. Кислород в клетке: добро и зло // Природа. 1997. № 11. С.26–35.

Таблица
Некоторые свойства свободнорадикальных форм кислорода

Соединение	Хим. символ	Свойства
Супероксид-анион	O_2^-	Хороший восстановитель, плохой оксидант
Гидроксид-радикал	OH^\cdot	Высокая реакционная способность при переносе и запасании электронов. Диффузное распространение ограничено
Пергидроксид-радикал	HO_2^\cdot	Сильный оксидант с высокой растворимостью в липидах. Инициатор перекисного окисления липидов
Пероксид-радикал	LOO^\cdot	Более низкая окислительная способность, чем у гидроксид-радикала, но большее время жизни
Алкоксид-радикал	LO^\cdot	Способность окислять липиды между ROO^\cdot и OH^\cdot
Пероксид водорода	H_2O_2	Оксидант с низкой реактивностью и большим временем жизни
Синглетный кислород	1O_2	Выраженный окислитель, достаточно гидрофобный

механизму действия различают нейтрализующие свободные радикалы (витамины E, глутатион, таурин и др.) и прерывающие реакции цепного окисления (комплексоны металлов переменной валентности). Наличие в тканях многоступенчатой антиоксидантной системы можно рассматривать как естественную защиту клетки от окислительного стресса.

Механизмы антиоксидантного действия разнообразны. Например, в случае перекисного окисления липидов их по крайней мере три: нейтрализация самого свободного радикала (OH^\cdot), взаимодействие с радикальными составляющими цепных реакций (L^\cdot , LOO^\cdot) и прерывание разветвления цепей в результате хелатирования ионов железа. Наиболее общепринятая модель — взаимодействие антиоксиданта (АН) со свободным радикалом, приводящее к появлению радикала антиоксидантной молекулы, которая может нейтрализовать еще один радикал:



Недавно Ю.А.Владимировым и сотрудниками показано⁸, что антиоксиданты могут действовать и другим способом:



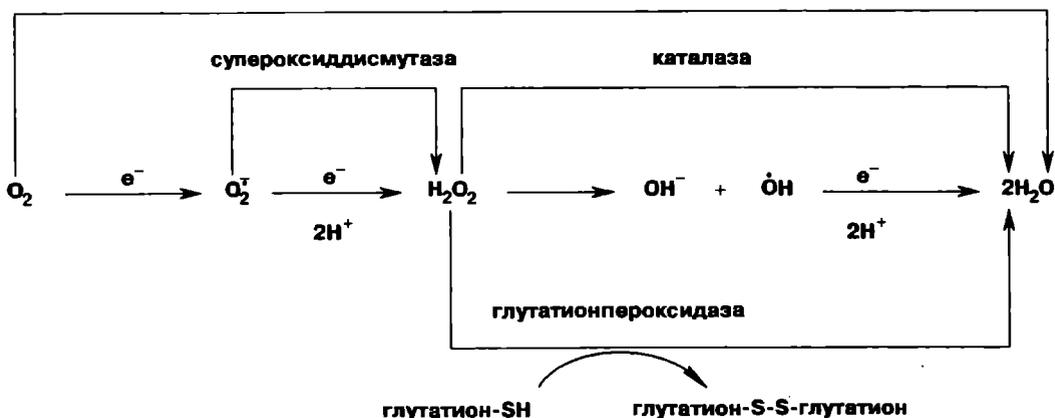
И хотя на первый взгляд присутствие антиоксиданта не дает никакого выигрыша (начальные продукты реакции не отличаются от конечных, а концентрация свободных радикалов не снижается), скорость связывания радикалов в первой части уравнения существенно выше, чем во второй.

Выяснение механизма действия природных антиоксидантов стимулировало синтез искусственных аналогов и проверку антиоксидантных свойств многих известных лекарств. В настоящее время такой эффект обнаружен для ряда препаратов, с чем, видимо, и связана их терапевтическая активность. Одновременно выяснилось, что многие антиоксиданты обладают смешанным типом действия, т.е. взаимодействуют с радикальными молекулами по нескольким механизмам. Целый ряд синтетических антиоксидантов оказался полезен для лечения заболеваний, связанных с генерацией свободнорадикальных соединений.

Истощение антиоксидантной защиты при ишемии мозга объясняется

⁸ Владимир Ю.А. Хемилюминесценция в биологических системах // Природа. 1997. № 3. С.18—28.

дыхательная цепь



Участие клеточных ферментов в антиоксидантной защите.

накоплением свободнорадикальных форм кислорода, что вызывает множественные повреждения нейрональных мембран и биомолекул — и в итоге гибель нейронов. Подобная картина наблюдается и в случае возрастных изменений мозга. При нейродегенеративных патологиях также нарушен баланс между образованием и нейтрализацией радикальных соединений, сопровождающийся окислительным повреждением ткани: По этой причине возникли представления о том, что избыток свободных радикалов сопутствует патологическим процессам, а усиленная антиоксидантная защита мозга устраняет повреждения нейронов при ишемии мозга, старческой потере памяти, а также при таких нейродегенеративных заболеваниях, как болезни Альцгеймера и Паркинсона.

ДВОЙНАЯ РОЛЬ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ В КЛЕТКАХ

В последние годы установлено, что свободные радикалы выполняют в тканях двойственную функцию. Так, радикалы NO служат вторичными посредниками, приводящими к расслаблению стенок кровеносных сосудов (вазодилатации), что улучшает кровоснабжение. Пероксинитрит стимулирует

специфическую гибель клеток — апоптоз, который называют запрограммированной смертью клеток. Высвобождающиеся в ходе апоптоза фрагменты ДНК, белковые молекулы и целые молекулярные ансамбли используются как «детали» для строительства новых клеток. Это сберегает организму и энергию для их образования, и информацию, заложенную в этих клеточных фрагментах. Важность апоптоза видна уже из того факта, что он участвует в «обучении» клеток иммунной системы в тимусе в процессе созревания организма.

Регуляторная роль гидроксид-радикала (OH^\cdot) состоит в том, что он способствует высвобождению из мембран арахидоновой кислоты, которая участвует в синтезе важных биологических регуляторов — простагландинов, лейкотриенов, тромбоксанов.

Таким образом, свободные радикалы несут в организме полезную нагрузку. Вот почему лечение ишемии мозга и синтетическими, и природными антиоксидантами оказалось недостаточно эффективным, как можно было бы предположить, исходя из концепции антиоксидантной защиты. Более того, обнаружилось, что кроме антиоксидантных свойств многие лекарственные препараты проявляют и побочные эффекты, вызываемые продуктами их обмена в тканях. Все эти наблюдения заставляли искать природные вещества, которые не подавляли

образование свободных радикалов, а регулировали их превращения.

АНТИОКСИДАНТНАЯ ЗАЩИТА МОЗГА

Удивительно, что мозг, который интенсивно поглощает кислород и по логике вещей должен быть надежно защищен от ошибок кислородного обмена, отличается слабой антиоксидантной защитой. Более того, в нейронах присутствует целый ряд важных белков — рецепторов, каналов и ферментов, весьма чувствительных к свободнорадикальному окислению. Так, сравнение изоформ одного и того же фермента — например, Na/K-АТФазы, отвечающей за асимметричное распределение ионов натрия и калия на мембране нейрона и тем самым за его возбудимость, — показывает, что мозговая изоформа фермента намного чувствительнее к окислительному повреждению, чем почечная. Этот факт только подтверждает важную регуляторную роль свободнорадикальных соединений в работе нейрональных клеток.

По мере нарушения нервных функций при старении или нейродегенерациях (болезнь Паркинсона) нейроны отмирают постепенно, затрагивая все большие и большие области мозга, что и приводит к утрате мозговых функций. Возможно, более устойчивые к повреждению нервные центры, сопротивляющиеся повреждению, обладают дополнительными механизмами стабильности. При сравнении экстрактов разных областей мозга выяснилось, что наиболее устойчивы к нейродегенеративным изменениям зоны, где локализован нейропептид карнозин. Не с этим ли природным соединением связаны, хотя бы частично, защитные ресурсы мозга?

Карнозин — природный дипептид, впервые описанный В.С.Гулевичем в 1900 г. Его биологические функции до последнего времени оставались непонятными. Независимо от простую структуру (две аминокислоты, соединенные пептидной связью, — гистидин и β-аланин), он обладает целым рядом полезных качеств: повышает работоспособ-

ность утомленной мышцы, защищает ферменты от ионов тяжелых металлов, сохраняет целостность клеточных мембран, нарушенных свободнорадикальной атакой⁹.

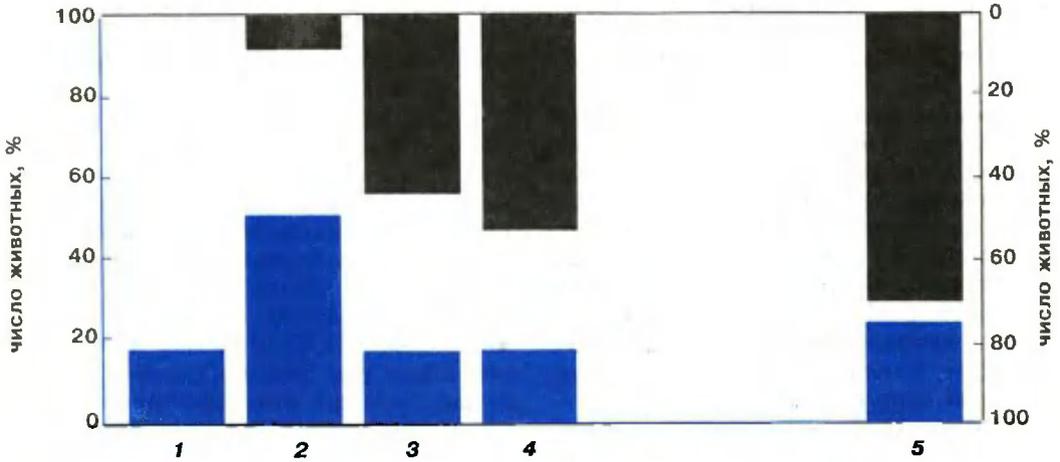
Карнозин появляется в тканях в период раннего онтогенеза, когда в клетках начинается активно работать карнозинсинтетаза, которая и замыкает связь между входящими в состав карнозина аминокислотами¹⁰. В функционально развитых частях мозга, а также в скелетных мышцах карнозина столько же, сколько и АТФ (2—5 мМ), или даже в несколько раз больше (до 5—10 мМ и выше). Этот дипептид достаточно устойчив и распадается только под влиянием другого специального фермента — карнозиныазы. Обычные протеазы (ферменты, расщепляющие клеточные белки и пептиды) ничего не могут сделать с этой молекулой, потому что в ее состав входит необычная для белков аминокислота β-аланин. Видимо, природа защитила карнозин от контроля протеиназ, уготовив ему какие-то специальные функции.

Тем не менее у животных и человека карнозин синтезируется и накапливается в одних тканях (специальных отделах мозга, мышечной ткани) и гидролизуется в других (печени, почках, плазме крови). Специфические ферменты обеспечивают строгое тканевое распределение карнозина и родственных ему соединений. Так, в мозге наряду с карнозином, и даже в больших количествах, присутствует гомокарнозин (в котором β-аланин замещен γ-аминомасляной кислотой). В скелетных мышцах птиц и наземных млекопитающих карнозин метилируется с образованием анзерина, а в сердце найдены ацетилированные производные обоих дипептидов. У змей и морских млекопитающих (дельфинов, китов) обнаружен аналог анзерина — офидин. Все эти превращения каким-то образом связаны с функциональной нагрузкой органов и тканей,

⁹ Boldyrev A.A., Severin S.E. // Adv. Enzyme Regul. 1990. V.30. P.175—194; Болдырев А.А. Карнозин и его биологическое значение // Природа. 1991. № 7. С.11—16.

¹⁰ Северин С.Е. // Биохимия. 1992. Т.57. С.1285—1295.

ИШЕМИЯ



ИШЕМИЯ + КАРНОЗИН

Влияние карнозина на течение экспериментальной ишемии у крыс. (Черные столбики — контроль, заштрихованные — присутствие карнозина.) 1 — без неврологической симптоматики, 2 — слабое, 3 — среднее, 4 — тяжелое течение ишемии, 5 — число смертельных случаев через 24 ч после операции.

поскольку при ослаблении активности клеток содержание в них этих дипептидов уменьшается.

Какие же свойства лежат в основе биологического действия карнозина? Первыми обратили на себя внимание его буферные свойства — в водной среде при физиологических значениях pH карнозин в нервной и мышечной тканях связывает более половины протонов, образующихся в клетках. Если вспомнить о нежелательных последствиях закисления в ходе свободнорадикальных реакций в ишемическом мозге, то очевидно, насколько важно это свойство карнозина.

Вторая существенная особенность карнозина — его способность образовывать комплексы с ионами металлов переменной валентности. Может быть, именно связывание ионов железа (а также меди и цинка) устраняет их нежелательное действие на нейроны мозга? Может быть, карнозин, прерывая разветвления цепных свободнорадикальных реакций, выполняет функции антиоксиданта? Такое взаимодействие карнозина со свободнорадикаль-

ными соединениями, предсказанное Е.А. Нейфахом, нами было продемонстрировано в 1984 г. Позже эти реакции идентифицировали: оказалось, что карнозин легко образует комплекс с супероксидом (это происходит с переносом заряда), что и увеличивает время его жизни, а также нейтрализует гидроксид-радикал и гипохлорит-анион, одновременно подавляя активность миелопероксидазы — фермента, обеспечивающего его образование.

Эти свойства в неодинаковой степени выражены у карнозина и его производных. Наибольшим сродством к супероксиду и гидроксид-радикалу обладает карнозин, а к гипохлорит-аниону — анзерин. Ацетилкарнозин наиболее эффективно препятствует агрегации тромбоцитов, а гомокарнозин — защищает Na/K-АТФазу мозга от окислительного повреждения¹¹. Вероятно, клетки способны синтезировать те производные карнозина, которые эффективно регулируют свободнорадикальные реакции, протекающие в этих тканях.

КАРНОЗИН — ПРИРОДНЫЙ
ПРОТЕКТОР МОЗГА

Исследования биологической активности карнозина и родственных ему

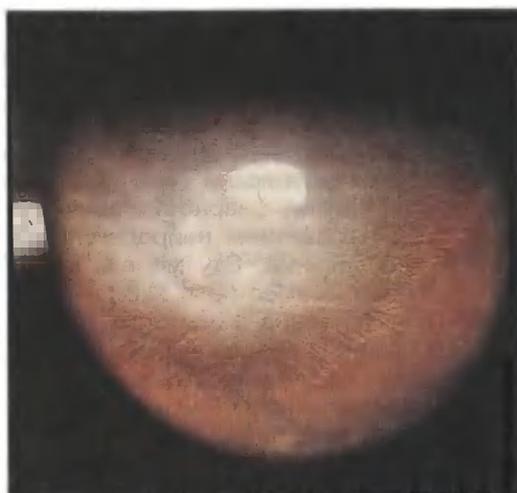
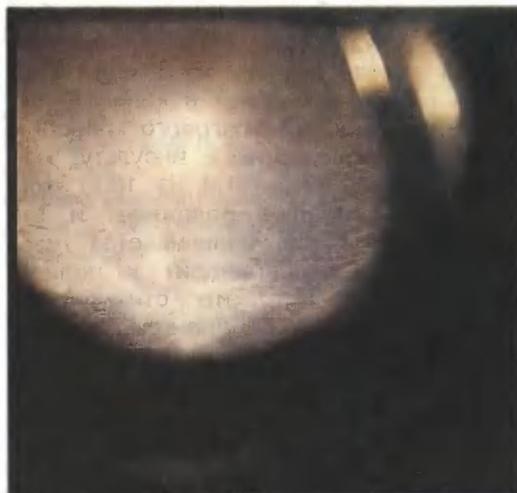
¹¹ Boldyrev A., Stvolinsky S., Tyulina O., Koshelev V., Hori N., Carpenter D. // Cell. Molec. Neurobiol. 1997. V.17. P.259—271.

Влияние карнозина на старческую катаракту у собак: 1 — исходное состояние (область помутнения соответствует размерам бельма), 2 — через 18 дней лечения, 3 — через 45 дней после лечения. Видно, что в процессе лечения область помутнения уменьшается, и на последней стадии после завершения лечения прозрачность хрусталика достаточна, чтобы увидеть структуру сетчатки. Данные получены М.А.Бабичаевым в совместной работе Института им.Гельмгольца и МГУ им.М.В.Ломоносова.

соединений позволяли считать карнозин природным регулятором физиологических функций и стимулировали попытки использовать его как лекарственный препарат. В нашей стране еще в 30-е годы пытались оценить способности карнозина нормализовать обмен веществ организма в преклонном возрасте. Обнадеживающие эксперименты оборвала война. В конце 70-х годов в Японии описали ранозаживляющие эффекты карнозина и предложили использовать его для лечения различных поражений слизистой (например, при экстракции зубов или язвах желудка). Спустя десятилетие в России впервые продемонстрировали свойство карнозина как радиопротектора (что очень важно при ликвидации последствий воздействия радиационного поражения) и как противовоспалительного (противоаллергического) агента.

В 1987 г. сотрудники Биотехнологического центра при МГУ им.М.В.Ломоносова совместно с сотрудниками Института глазных болезней им.Гельмгольца показали положительный эффект карнозина при старческой катаракте у собак. Его применение задерживало помутнение хрусталика, а на некоторые виды катаракты оказывало явное рассасывающее действие. На основе этих наблюдений был создан отечественный препарат «Севитин», выпуск которого уже разрешен Фармкомитетом РФ. Наконец, совсем недавно в Испании разработано и запатентовано новое тонизирующее средство, куда помимо витаминов и биологических активаторов включен карнозин.

В современном обществе человека подстерегают заболевания, связан-



ные со спецификой цивилизации, обилием стрессов, ухудшением экологической обстановки и т.д. В индустриально развитых странах в конце XX в. частота нарушений мозгового кровообращения, приводящих к инсульту, колеблется от 1.27 до 7.4 на 1000 чел. ежегодно. Ситуацию осложняет и то, что инсульт плохо излечивается полностью и часто приводит к полной инвалидности. Все это стимулирует поиск природных соединений, повышающих устойчивость мозга к действию неблагоприятных факторов.

Именно поэтому в Институте неврологии РАМН в Москве было начато изучение нейрохимических механизмов противоишемического эффекта карнозина на лабораторных крысах, у которых вызывали экспериментальную ишемию. Глубину поражения определяли по смертности животных через 24 час после операции и по тяжести неврологической симптоматики, которую оценивали специальным индексом McGrow, разработанным для контроля за развитием нейродегенеративных заболеваний. Эту модель мы и использовали совместно с И.В.Ганнушкиной для изучения защитного действия карнозина, вводя его крысам в дозе 100 мг/кг массы животного (приблизительно половина содержания в тканях мозга)¹².

Как показали эксперименты, введение карнозина за 30 мин до создания ишемии снижает смертность крыс в 3 раза по сравнению с контролем (животные, получавшие перед операцией физиологический раствор). Неврологическая симптоматика подтвердила, что карнозин ослаблял ишемическое поражение, причем у части подопытных животных мозговая недостаточность вовсе не проявлялась. Интересно, что и в контрольной группе крысы по-разному переносили последствия экспериментальной ишемии: у части животных (правда, меньшей, чем при использовании карнозина) также

выявлялась умеренная неврологическая симптоматика. Это несомненно означает, что хотя природные механизмы защиты мозга от окислительного стресса индивидуальны, карнозин существенно повышает естественную устойчивость мозга к неблагоприятным воздействиям.

Итак, результаты экспериментов позволяют рекомендовать карнозин как лечебный препарат при ишемических заболеваниях мозга. Однако несомненно, что необходимы еще тщательные и всесторонние исследования. Начало такой программы уже положено¹³. Установлено, что при ишемическом повреждении мозга карнозин проникает через гематоэнцефалический барьер и стимулирует образование гомокарнозина, защитные свойства которого выше, чем у исходного дипептида. Возможно, что введение в организм карнозина в условиях быстро развивающейся патологии помогает бороться с болезнью, стимулируя синтез тех его производных, которые в наибольшей степени отвечают состоянию и потребностям каждой ткани.

Это предположение, которое необходимо проверить, могло бы объяснить биологический смысл метаболизма карнозина. Требуется также установить, как действует карнозин на память и мыслительные функции пораженного мозга, способность к обучению и запоминанию, имеются ли долговременные последствия и отсроченные эффекты карнозина.

Таким образом, проблема защитной функции карнозина в ишемическом мозге захватывает не только теоретические, но и биомедицинские аспекты. Возникает типичная картина, сопутствующая развитию нового направления в науке, когда каждый решенный вопрос открывает горизонты новых и новых проблем. Тем и привлекает процесс познания, что он бесконечен и дарит исследователю радость постижения окружающего мира.

¹² Стволинский С., Котлобай А., Болдырев А. // Эксперим. клин. фармакология. 1995. Т.58. С.66—73.

¹³ Boldyrev A., Suslina Z. // Europ. Hosp. Management Journ. 1996. V.3. P.41—42.

Извержения вулкана Безымянный

А. Б. Белоусов,

кандидат геолого-минералогических наук

М. Г. Белоусова,

кандидат геолого-минералогических наук

Институт вулканческой геологии и геохимии Дальневосточного отделения РАН
Петропавловск-Камчатский

5 декабря 1997 г. многие информационные агентства сообщили об извержении вулкана Безымянный на Камчатке. Вулканологов, как и других специалистов, всегда радует, когда о предмете их исследований вспоминает широкая общественность. Поэтому воспользуемся поводом и немного расскажем про этот вулкан, историю его изучения и особенности извержений.

Безымянный входит в состав Ключевской группы вулканов, расположенной в центральной части п-ова Камчатка. Высота его около 3000 м, всего на 776 м ниже знаменитой Фудзиямы, но он выглядит карликом среди гигантских, покрытых ледниками соседей — вулканов Ключевской (абсолютная высота 4800 м), Камень (4575 м), Крестовский (4108 м), Ушковский (3943 м) и Толбачик (3682 м). Из населенных пунктов вулкан Безымянный не виден. Исключение составляет поселок Козыревск в 45 км к западу от вулкана, из этого поселка он сморкнется, как маленький бугорок у подножия Камня. Район, где расположен Безымянный, труднодоступен даже в наше время. Ближайшая грунтовая дорога заканчивается в 16 км от вулкана. А еще не так давно добраться сюда можно было только на лошадей летом и на собачьих упряжках зимой, причем путь при

благоприятных условиях занимал несколько дней. Эти особенности, а также то обстоятельство, что Безымянный долгое время считался потухшим, не только определили название вулкана, но и не способствовали его изучению. Впервые Безымянный, правда под другим названием, отмечен на карте К.И.Богдановича, изданной в 1904 г. Изображения вулкана в 1925 г. опубликовал Н.Г.Кель, участник Камчатской экспедиции Русского географического общества 1909—1910 гг. В 1935 г. в селе Ключи была основана Камчатская вулканологическая станция АН СССР и начались непрерывные наблюдения за деятельностью вулканов Ключевской группы и изучение их геологического строения, но — до 1955 г. Безымянный систематически не изучался. Он был только бегло осмотрен В.И.Влодавцем и Б.И.Пийлом¹, которые опубликовали краткие сведения о его морфологии и петрографии. У первых поколений отечественных вулканологов было правило распределять между собой вулканы и извержения для изучения. Когда в 1954 г. на Камчатскую вулканологическую станцию в г.Ключи прибыла молодая аспирантка Г.Е.Богоявленская, все «крутые» вулканы были уже заняты, и ей достался самый

невзрачный — Безымянный. Как потом стали говорить, вулкан не выдержал, что его доверили женщине, и взорвался — осенью 1955 г. началось первое историческое извержение вулкана, 30 марта 1956 г. достигшее кульминации: 0,5 км³ постройки вулкана в виде обвала-оползня съехало в сторону, спровоцировав гигантский взрыв, воздушная волна которого полтора раза обогнула земной шар. Изучением этого извержения и его последствий долгое время занимался Г.С.Горшков, благодаря ему Безымянный стал широко известен во всем мире.

Об извержении 1956 г. «Природа» писала дважды², здесь мы остановимся на дальнейшем развитии событий. После этого извержения на вершине вулкана образовался подковообразный кратер поперечником около 1,5 км, широко открытый на восток. Вероятно, сразу после извержения в кратере началось формирование вулканического купола андезитового состава. Вулканические купола (крутосклонные нагромождения лавы над жерлом) — родственники лавовых потоков, образующиеся, когда лава в силу особенностей

¹ Влодавец В.И., Пийп Б.И. // Бюл. вулканол. ст. 1957. № 25. С.5—95.

² Горшков Г.С. Необычайное извержение на Камчатке // Природа. 1958. № 1. С.61—68; Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Гигантские обвалы на вулканах // Там же. 1997. № 11. С.70—81.



*Слева направо — Безымянный, Камень и Ключевской. Вид с востока. 1987.
Здесь и далее фото А.Б.Белоусова*



Поверхность пирокластического потока 9 мая 1997 г.

Пепловое облако над небольшим пирокластическим потоком, спускающимся с купола вулкана Безымянный. Июль 1985 г.



состава имеет слишком большую вязкость и, не растекаясь в стороны, выдавливается вверх в виде жесткой пробки или коротких и толстых оплывин, наслаивающихся одна на другую. Высокая вязкость лавы препятствует свободному выходу вулканических газов, и формирование куполов обычно сопровождается взрывами — эксплозивными извержениями различной силы. Вулканические купола растут, иногда с перерывами, годы и даже десятилетия, нередко достигая объема нескольких кубических километров. Формирование купола вулкана Безымянный — пример такого длительного развития, продолжающегося по настоящее время. Важно, что этот

процесс наблюдается учеными с самого начала, в течение более 40 лет, что позволяет проследить его эволюцию.

Сразу после извержения 1956 г. купол рос очень быстро, со средней скоростью 3.3 м/сут, достигнув к концу года относительной высоты ~300 м. В этот период происходило непрерывное выжимание жестких блоков — обелисков. Периодически активизировалась то одна, то другая части купола. Неоднократные обвалы растущих обелисков сформировали вокруг него мантию обломочного материала. По свечению раскаленного вещества в трещинах температура купола была оценена в 650°C. В дальней-

шем его рост замедлился и стал прерывистым. Существенные изменения произошли в 1977 г., когда наряду с жесткими блоками стали выжиматься вязкие лавовые потоки. В настоящее время купол почти заполнил кратер 1956 г., достигнув объема около 0.4 км³.

Все эксплозивные извержения вулкана Безымянный после 1956 г., включая извержение 5 декабря 1997 г., связаны с ростом его купола. Это относительно слабые и умеренные извержения с образованием пирокластических потоков — раскаленных лавин из смеси крупных глыб, пепла и вулканических газов. Извержения происходят в среднем один-два раза в

год³. Мы начали работать на Камчатской вулканологической станции с 1985 г., и нам посчастливилось наблюдать и изучать процесс и отложения многих извержений Безымянного. Последние 10 лет развитие событий, как правило, происходит по следующей схеме. В верхней части купола начинается выжимание обелиска. Это очень медленный процесс, заметный только по учащению грохота обвалов и появлению темных осыпей на склонах купола. Верхняя часть растущего обелиска, несмотря на постоянные обрушения, постепенно поднимается. Со временем из глубины поступает все более горячий материал, и ночью осыпаящиеся раскаленные обломки становятся похожими на катящиеся по склону угли. Через несколько дней, а иногда и недель, в верхней части купола начинаются взрывы с выбросом пепла — эксплозивное извержение, которое, то усиливаясь, то ослабевая, продолжается несколько дней. Частые взрывы на вершине образуют облако пепла, поднимающееся на высоту до 10 км. Во время наиболее сильных взрывов по склонам купола сходят пирокластические потоки, обычно распространяющиеся на расстояние 4—6 км, а у наиболее интенсивных извержений достигающие длины 7—14 км. К относительно сильным можно отнести извержения 1977, 1979, 1985 и 1993 гг. В пирокластических потоках

содержится большое количество горячих вулканических газов, которые во время движения потоков, а также некоторое время после их остановки, бурно выделяются вверх, вынося с собой большое количество тонкообломочного материала. Над поверхностью образуются огромные, высотой до нескольких километров, клубящиеся облака пепла. Вулканический лепел, поднимаясь вверх, становится влажным от конденсации на нем водяного пара. Пепловые частицы слипаются, и на землю выпадает град из влажных горошин — аккреционных лапилли. Молнии, постоянно сверкающие в пепловой туче, дополняют картину извержения. В результате на куполе образуется небольшой кратер, из которого в течение нескольких дней, а иногда и месяцев выдавливается короткий лавовый поток. (Наиболее протяженный — около 700 м — отмечался в 1994 г.) Поток движется очень медленно. Его фронт часто обваливается, и раскаленные глыбы, издавая неожиданный мелодичный звук бьющейся черепицы. Последние порции лавы запечатывают кратер, и вулкан погружается в спячку до следующего события. Это очень грубая схема. В действительности каждое извержение имеет свои неповторимые особенности. Так иногда образуются пирокластические волны, или, как их еще называют, «палачие тучи», в сущности те же пирокластические потоки, но содержащие преимущественно мелкообломочный материал и значительно боль-

ше газа. Они способны преодолевать значительные препятствия и охватывают те области подножия вулкана, куда пирокластические потоки обычно не доходят. Такой волной в 1985 г. были разбиты в щепки домики вулканологов в 4 км от вулкана. Мощная пирокластическая волна в мае 1997 г. мгновенно растопила снег в кратере вулкана, что вызвало бурные грязевые потоки.

Начало нашей работы на Камчатской вулканостанции в 1985 г. совпало с новым этапом в деятельности Безымянного: во время сильных извержений стали происходить обрушения не только новых растущих обелисков, но и старых частей купола. Наиболее крупные обрушения купола произошли в ходе извержений 1985 и 1993 гг., в результате которых на его склоне образовались глубокие рытвины, впоследствии заполненные лавовыми потоками.

Об извержении вулкана 5 декабря 1997 г. пока известно только то, что высота пеплового облака составляла около 5 км над куполом. Вероятно, это обычное для Безымянного, относительно слабое извержение с образованием небольших пирокластических потоков. Характер и последовательность событий каждого извержения запечатлевается в его отложениях и в изменении формы купола. Мы надеемся, что исследование летом 1998 г. с привлечением данных визуальных наблюдений и записей сейсмических волн помогут восстановить картину последнего извержения.

³ Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Жданова Е.Ю. // Вулканология и сейсмология. 1996. № 2. С.25—33.

Революция в геологии золота

М. М. Константинов



Михаил Михайлович Константинов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий отделом геологии, методов поисков и прогнозирования месторождений благородных металлов Центрального научно-исследовательского геолого-разведочного института Министерства природных ресурсов России.¹ Область научных интересов — геология и оценка месторождений золота и других благородных металлов. Лауреат премии им. академика В.А.Обручева (1984).

ПРИ слове «революция» мы повеживаемся — уж слишком неоднозначными бывают иногда результаты. Между тем революции происходят непрерывно: и в науке, и в технологиях, и в духовном мире.

С легкой руки академика А.Е.Ферсмана средние содержания элементов в горных породах названы «кларками» по имени американского геолога, который впервые их подсчитал¹. Так вот, кларк золота равен примерно $5 \cdot 10^{-7}\%$. Это очень малая величина. Промышленные геологи определяют содержание золота в руде в граммах на тонну, что соответствует $10^{-4}\%$ (т.е. в 1000 раз больше кларка), или, реже, в унциях (одна унция — 28.35 г). В обозримом историческом периоде, составляющем около шести тысячелетий, добыча золота велась из рудных жил (коренных месторождений) или из продуктов их выветривания и эрозии, при которых происходило накопление золота в речном аллювии (россыпей). Золотые лихорадки конца XIX — начала XX в., хорошо известные по книгам Джека Лондона, смели основные мировые источники россыпного золота. Дальше речь пойдет только о коренных месторождениях. Золото в них присутствует в виде мелких зерен, размером от тысячных до десятых долей миллиметра. Достаточно редко встречаются крупные красивые кристаллы, впоследствии украшающие многие музеи мира. Содержания металла в рудах составляют десятки, сотни грамм и даже (в рудных столбах и гнездах) килограммы на тонну, что соответственно в десятки и сотни тысяч раз превышает его обычные содержания в породах. Такие

© М.М.Константинов

¹ См.: Ярошевский А.А. Химический состав земной коры // Природа. 1997. № 6. С.58—66.



*Золоторудный карьер, уходящий на глубину более 200 м. Месторождение Раунд Маунтин (штат Невада, США).
Здесь и далее фото автора*

жилы можно очень эффективно обрабатывать, отсюда и пошло хорошо известное выражение: «Найти золотую жилу».

Чтобы объяснить, как могло так много золота появиться в одном месте, геологи создали столь же красивую, сколь трудно доказуемую гипотезу, по которой на больших глубинах (в десятки километров) образуются горячие, насыщенные газами водные растворы, обладающие способностью растворять большое количество золота. Выжимаясь под большим литостатическим давлением в трещины, такие растворы охлаждаются и на глубинах от сотен метров до нескольких километров кристаллизуются, выделяя полезный компонент.

Дальше пришло то, что называется естественно-историческим подхо-

дом: образование месторождений золота было связано с общим развитием и цикличностью геологических процессов, и в этом первейшая заслуга нашего замечательного русского геолога Юрия Александровича Билибина. Для советских геологов-рудников построения Билибина были равнозначны теории эволюции Дарвина. Оказалось, что между исходными концентрациями металла в горных породах и тысячекратно превышающими их содержаниями в рудах месторождений существует целый ряд переходных ступеней, связанных с эволюцией конкретного участка земной коры.

Отдельные интрузии, представляющие раскристаллизованную магму, вулканические покровы или небольшие вулканические тела, образовавшиеся вблизи поверхности, горизонты



Организованно и спокойно в таком карьере добывается 12 млн т золотой руды. Место-рождение Голд Кворри (штат Невада, США).

осадочных пород могут¹ содержать золото в концентрациях в 10 раз выше фоновых (т.е. $10^{-8}\%$). Наиболее любознательные исследователи, заинтересовавшись, чем же обусловлен этот результат, установили, что ряд минералов, главным образом обогащенных железом — биотит, амфибол, магнетит, сульфиды, — содержат золота еще на порядок выше ($10^{-5}\%$), что и определяет общий повышенный фон. Отдельные участки горных пород — приконтактовые части интрузий, вулканические жерла, обогащенные органическим веществом, а иногда кремнеземом или туфовым материалом, слои осадочных пород — также концентрируют золото на два порядка выше кларка.

В то время, пока происходили эти важные геологические исследования, золотодобывающая промышленность и экономика делали свое «черное дело» — многие месторождения

золота, особенно в США, Канаде и Австралии, уже в довоенное время были полностью отработаны, шахтные стволы таких крупных рудников, как Колар в Индии, Витватерсранд в Южной Африке, Хоумстейк в Северной Америке, опустились под землю на 2,5—3 км. Южно-Африканские геологи подсчитали, что четырехкилометровая глубина, даже при самой совершенной горнодобывающей технике, — предельно рентабельна, глубже — пойдут одни убытки. Новые богатые месторождения открывались все реже.

В начале 80-х годов разразился валютный кризис: цена на золото, ранее составляющая около 30—40 долл. за унцию, подскочила сразу в 20 (!) раз — до 800 долл. Эта максимальная цена, зафиксированная в 1980 г., потом также быстро стала падать и за два-три года опустилась до 350—450 долл. На этом уровне, многократно превышавшем предыдущий, она стабилизировалась².

² В последнее время цена на золото начала снижаться. На сегодня унция золота стоит 280—290 долл.

Вот этот чисто экономический факт — десятикратный рост цены на золото — мы и называем «революцией», поскольку он имел колоссальные последствия для геологии.

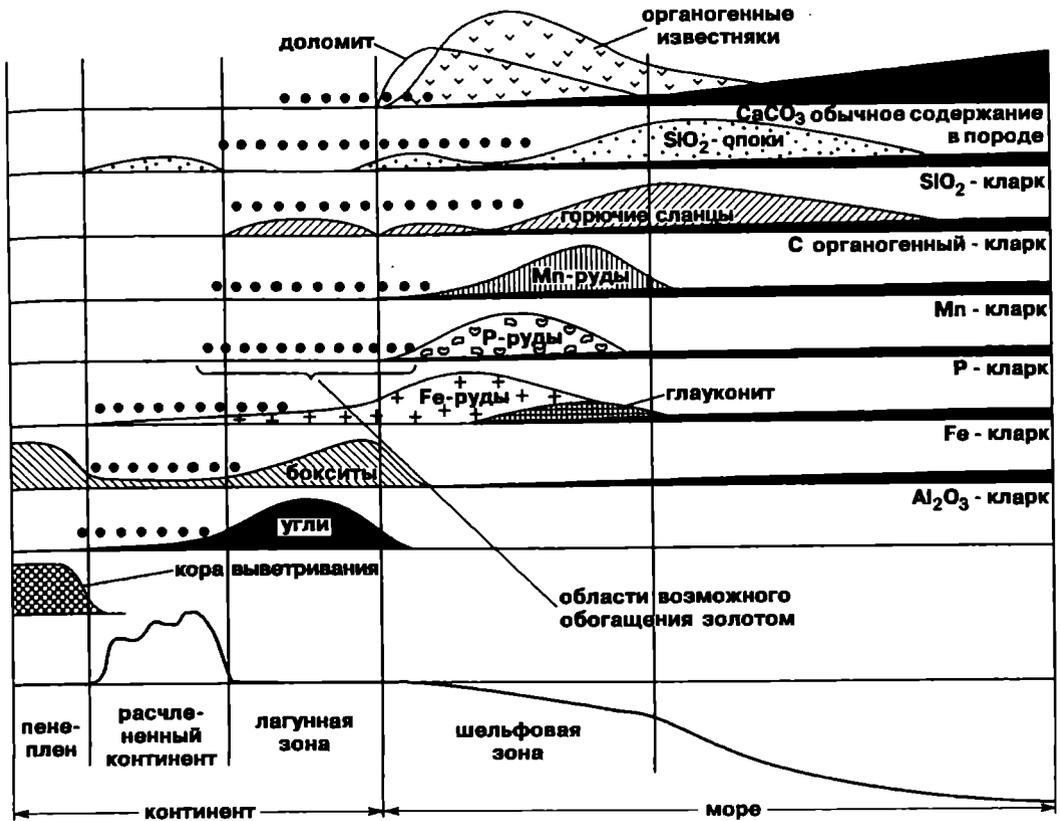
Прежде всего он изменил технологическое мышление. Если раньше инженеры стремились к максимальному извлечению металла из руд, доводя его до 93—96%, то при отработке больших объемов рудной массы с низкими содержаниями стало более выгодно терять часть металла, извлекаемая всего 65—70%, но зато значительно удешевляя весь технологический цикл.

Так появилась технология «кучного выщелачивания», рассчитанная на переработку больших объемов руд (крупнообъемных месторождений). Сущность ее очень проста. Не нужно строить обогатительной фабрики. Ровная площадка покрывается сначала утрамбованной глиной, затем плотной полиэтиленовой пленкой. Далее с помощью карьерной разработки экскаваторами и самосвалами она наполняется ровным, примерно трехметровым, слоем рудной массы, на котором размещаются трубопроводы, подводящие цианидный раствор.

Особое внимание уделяется экологической защите. На золоторудных месторождениях в Неваде при использовании кучного выщелачивания швы, образованные при сварке листов полиэтиленовой пленки, сопровождаются датчиками. В случае разрыва пленки данный участок фиксируется на пульте. Порода с этого места убирается, и повреждение ликвидируется. После полного цикла переработки, который состоит из трех последовательно загружающихся и цианируемых трехметровых порций руды, вся куча длительно промывается водой. Далее проводится контрольная проверка. Если все в порядке, отработанная площадь покрывается слоем дерновой земли и иногда, скорее для рекламных целей, засеивается злаковыми культурами. Вообще отношение к экологии в США серьезное. В некоторых «цитрусовых»

областях, например в штате Калифорния, вообще запрещено применение такой технологии на определенных золоторудных месторождениях только потому, что они расположены на возвышенных областях и существует хотя бы теоретическая возможность попадания цианидов в грунтовые и речные воды. В общем все, как говорят американцы, о'кей. И все же... как сообщают независимые экологи, стаи перелетных птиц, которые останавливались на ночлег в местах открытых разработок, оставляли утром сотни трупиков. Через какое-то время птицы сменили маршруты перелетов. Цианид — это всегда опасность для жизни. Поэтому некоторые компании, в частности в Южно-Африканской Республике, перешли на переработку руд с тонкодисперсным золотом при помощи бактериальных технологий. Смысл их состоит в том, что некоторые виды бактерий, например *Thiobacillus ferrooxidans*, окисляют золотосодержащие сульфиды — пирит и арсенопирит — и высвобождают заключенное в них золото. Мышьяк (элемент, входящий в состав арсенопирита) — также вредный экологически компонент — кальцинированием переводится в нерастворимый осадок. Однако и здесь не удастся обойтись без цианидов на заключительной стадии экстракции золота из растворов и реликтов золотосодержащих сульфидов, которые сохранились от бактериального окисления.

По описываемой нами схеме кучного выщелачивания около двух-трех месяцев раствор цианида пропитывает породы, растворяет заключенное в них золото и по пленке стекает в отстойник, где осаждается на уголь (для получения которого американцы используют кожуру кокосового ореха). Оказалось, что при такой технологии и массовой открытой (карьерной) отработке даже извлечение 1 г золота из тонны породы дает пять долларов чистой прибыли! Но это — при огромных объемах добычи! Переработка 1 млн т руды в год — много даже для очень крупного месторождения. На



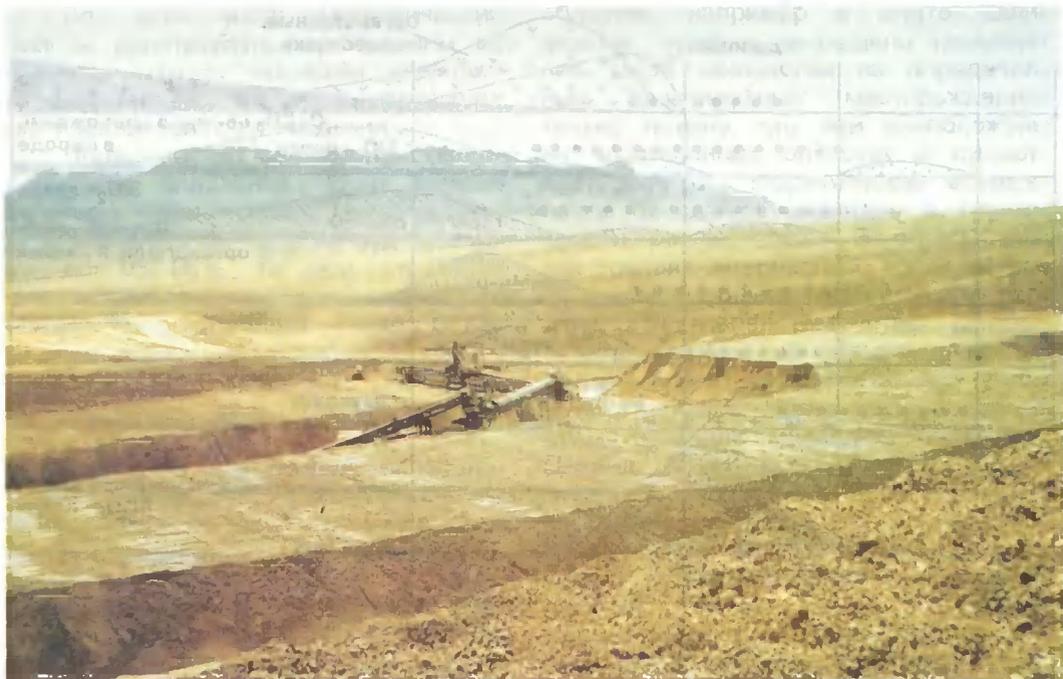
Общий фациальный профиль аутигенного осадкообразования (по Н.М.Страхову) с областью возможного обогащения золотом угленосных, марганцевых, фосфоритовых, железорудных и бокситоносных бассейнов.

современных же карьерах, таких как Голд Кворри или Раунд Маунтин в штате Невада, ежегодно добывается около 12 млн т руды!

В результате применения новой технологии и огромных объемов добычи рентабельными стали руды с содержаниями металла 0.5—2 г/т. Это как раз тот «рубеш» 10^{-5} — 10^{-4} %, которого не доставало в общей цепи перехода от обычной породы до богатой рудной жилы. Таким образом, распределение золота в земной коре приняло вид законченного эволюционного ряда (в %): 10^{-7} (кларковые содержания в горных породах) → 10^{-6} (отдельные, обычно поздние фации

плутонических и вулканических комплексов, метаморфические и осадочные образования) → 10^{-5} (площадные поля гидротермально-метасоматических и гидротермально-метаморфических образований, минералы-концентраторы золота в горных породах, «микрорудные фации» — пласты и горизонты, обогащенные золотом) → 10^{-4} (крупнообъемные рудные месторождения) → 10^{-3} (богатые рудные месторождения) → 10^{-2} (богатые рудные столбы и гнезда в пределах месторождений). Переход на открытую отработку крупнообъемных месторождений позволил США, а затем Австралии, Бразилии и Канаде стремительно увеличить добычу металла.

Перед геологами встала совершенно новая задача: найти крупные объемы горных пород со сравнительно низкими концентрациями металла, пригодные для открытой отработки. Ока-



Грейдеры разравнивают руду для последующей обработки. Месторождение Раунд Маунтин.

в прямом смысле слова лежат под ногами. Это, например, латеритные коры выветривания по вулканическим породам, широко распространенные в Бразилии, Австралии, Индии. Сложный геохимический процесс, детально изученный геологами этих стран, не только приводит к высвобождению золота на верхнем уровне выветривания, но и к просачиванию поверхностных вод на глубину, растворению заключенного в них золота и возвратному движению обогащенных золотом растворов по капиллярной системе к поверхности. Таким образом происходит обогащение верхнего уровня, образуется плащеобразное месторождение, которое просто «сгребается» бульдозерами.

Второй значительный источник большеобъемных руд — продукты вулканической возгонки, которые слагают обширные поля в центре кальдер и интенсивно выщелачивают вмещающие породы, образуя сульфаты, самород-

ную серу, сульфиды, с которыми связано золото. Объемы таких руд, как и вскрывающие их карьеры, достигают огромных размеров.

Третий тип крупнообъемных месторождений — обогащенные органическим веществом и кремнеземом карбонатно-глинистые породы — доломиты, мергели, известковистые песчаники. Формируясь на окраине древнего континента (пассивной континентальной окраине), они насыщались кремнистыми золотоносными растворами, которые коагулировались в щелочной среде. Такие месторождения содержат тонкодисперсное (размером в первые микроны) золото, заключенное в мелких выделениях сульфидов и кремнистых стяжениях.

Все эти породы с рассеянно-концентрированным золотом формировались в самые различные геологические эпохи и могли затем под влиянием погружения и литостатических нагрузок до неузнаваемости измениться на протяжении многих миллионов лет геологической истории.

Перспективы выявления подобных месторождений на территории России,



Куча руды, подготовленная для цианирования, уходит за горизонт. На переднем плане видны шланги, по которым подается цианидный раствор. Месторождение Голд Кворри.

имеющей разнообразное геологическое строение, весьма значительны.

Другой, не оцененный как следует источник крупнообъемных золотых руд — крупные бассейны накопления железа, углей, фосфоритов и бокситов. На фациальной схеме, составленной академиком Н.М.Страховым, с учетом данных по сорбции золота глинистыми частицами и возможности его переноса в виде органических

соединений, можно ожидать отложения большой массы золота в периферических частях угленосных, бокситовых, железорудных, фосфоритоносных и марганцевых бассейнов.

Именно эти районы, вероятно, и заслуживают ревизии.

Завершая наше изложение, отметим, что мы сознательно не акцентировали внимание на некоторых уродливых аспектах современной экономики России, с чем органически связана вся золотодобыча. Рано или поздно общие тенденции мирового развития проявятся и у нас, и мы — российские геологи-рудники — должны быть готовы к использованию новых современных технологий.

ПЕРВЫЕ ШАГИ НА МАРСЕ

4 июля 1997 г. в очередную, 221-ю годовщину Дня независимости США американский космический аппарат «Марс-Пасфайндер» совершил успешную посадку на Марс. Английское «pathfinder» в словарях переводится как «следопыт», хотя в данном контексте это скорее «первопроходец». Название символично, так как проект задумывался в первую очередь как инженерный. Главная цель его — показать, что системы перелета, спуска в атмосфере и мягкой посадки с доставкой полезной нагрузки на поверхность Марса можно сделать недорогими и эффективными. Научная цель проекта — изучение состава камней и грунта, морфологии поверхности и геологического строения в ближайших районах точки посадки, а также метеорологические наблюдения (за температурой, давлением, скоростью ветра). Об этом нашим читателям рассказывают ведущие российские специалисты в области планетологии.

Проект «Марс-Пасфайндер»: успехи и уроки

А. Т. Базилевский



Александр Тихонович Базилевский, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Специалист в области геологии и геохимии планет. Участник космических экспериментов: «Луноход-1 и -2», «Луна-16, -20, -24», «Марс-4, -5», «Венера-9, -10, -13, -14, -15, -16». Гость-исследователь в американских космических проектах. Лауреат Государственной премии СССР (1989).

АМЕРИКАНСКАЯ миссия «Марс-Пасфайндер» вызвала в мире огромный резонанс. Отчасти потому, что посадка на другую планету — само по себе очень интересно. Отчасти потому, что это посадка на Марс — планету, где, возможно, существовала, а может быть, и сейчас существует жизнь. Отчасти потому, что ответственное за полет Национальное агентство по авионавигации и космическим исследованиям (НАСА) США сумело сделать ему очень широкую рекламу в средствах массовой информации. И несомненно потому, что впервые в истории полетов к другим планетам широкая публика получила возможность прямого доступа к результатам через сеть Интернет. Миллионы пользователей Интернета могли видеть на мониторах своих компьютеров передаваемые «Пасфайндером» цветные, а в некоторых случаях и объемные изображения поверхности Марса, знакомиться с результатами экспериментов и читать комментарии членов команды. Это создавало у людей чувство причастности к миссии и, конечно, увеличивало интерес к ней. Интернет — основной, хотя и не единственный, источник информации и для нашей статьи.

«Марс-Пасфайндер» — это второй из проектов программы «Дискавери». Цель ее — организация недорогих, но результативных полетов к разным телам Солнечной системы. Первый из космических аппаратов, запущенных по программе «Дискавери», аппарат «NEAR»¹, стартовал в феврале 1996 г., но своей цели, астероида 433 Эрос, он достигнет лишь в 1999 г. «Пасфайндер» — третья успешная посадка американских космических аппаратов на Марс. В 1976 г., в 200-летнюю годовщину независимости США, поверхности Марса достигли спускаемые аппараты «Викинг-1» и «Викинг-2». Нашей стране в изучении этой планеты везло гораздо меньше. Четыре попытки сесть на Марс оказались неудачными, и, конечно же, наши специалисты в изучении планет, и я в их числе, смотрят на успех «Пасфайндера» с чувством глубокой, но не черной, зависти.

«Пасфайндер» был запущен с мыса Канаверал 4 декабря 1996 г. ракетой «Дельта-II-7925». Общая масса космического аппарата 890 кг, из них 100 кг — горючее для коррекции орбиты. Масса спускаемого аппарата без систем торможения — 250 кг, из них 25 кг — полезная нагрузка: научные приборы, мароход и система его связи со спускаемым аппаратом. «Пасфайндер» вошел в атмосферу Марса со скоростью 7.65 км/с прямо с траектории перелета Земля—Марс без перехода на орбиту спутника этой планеты. Специальный огнеупорный щит уберег аппарат от перегрева во время его входа в верхние слои атмосферы. Когда аппарат замето затормозился, открылся парашют. Потом парашют отделился, и аппарат еще немного притормозился за счет включения маленького твердотопливного ракетного двигателя. К моменту соприкосновения с поверхностью вокруг «Пасфайндера» надулись пластиковые воздушные мешки, которые

смягчили удар о поверхность. После нескольких подпрыгиваний «мячик» остановился, из мешков был выпущен воздух, и они были подтянуты к основной конструкции.

В сложенном, «полетном» состоянии спускаемый аппарат имеет форму тетраэдра. После посадки три грани тетраэдра раскрываются, как лепестки цветка, относительно четвертой центральной панели, на которой с внутренней стороны смонтированы основные системы. Распределение частей по весу таково, что, независимо от того, на какую из четырех граней тетраэдра аппарат сядет, при раскрытии лепестков он перевернется таким образом, что внизу окажется центральная панель. Надо сказать, что посадка в «мячике» и самоориентирующаяся при раскрытии лепестковая конструкция — не американское изобретение. Тридцать лет назад так садились наши «Луна-9» и «Луна-13»². Американская пресса, заслуженно прославляя успех «Пасфайндера», об этом не упоминает, что, впрочем, понятно. Жаль, что об этом не вспоминали российские журналисты, довольно регулярно сообщавшие об успехах «Пасфайндера».

РАБОТА НА ПОВЕРХНОСТИ

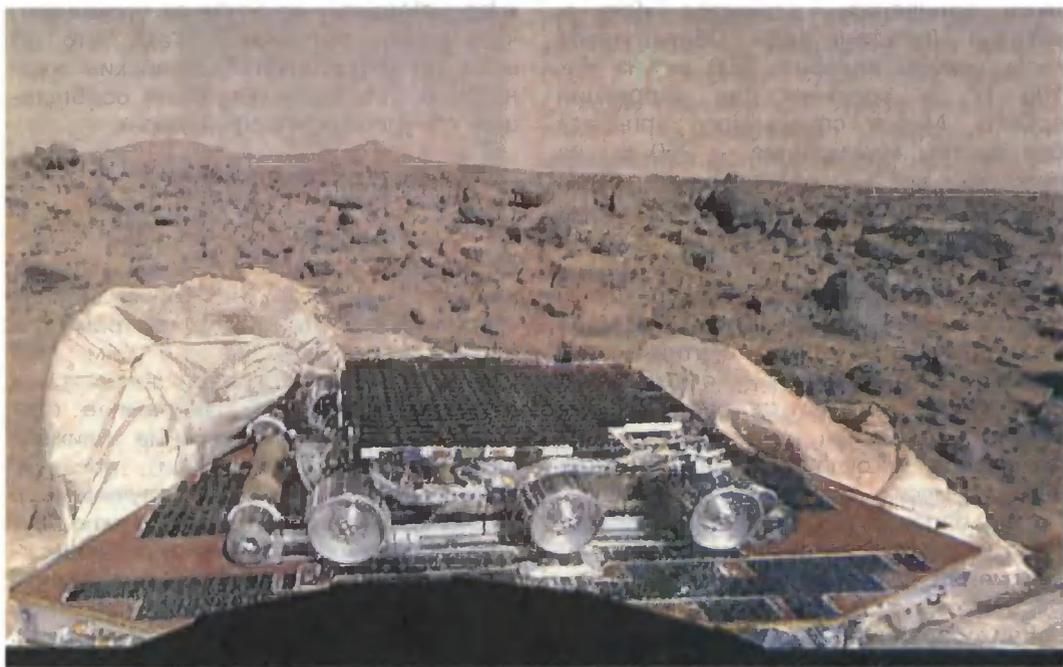
На посадочной ступени «Пасфайндера» установлено два научных прибора. Первый — телевизионная стереокамера с 12 фильтрами в диапазоне от 0.45 до 1.0 мкм. Она работает после раскрытия лепестковой конструкции и дает панорамное стереоскопическое изображение ближайших окрестностей точки посадки. Сравнивая изображения, полученные с разными светофильтрами, можно судить о минеральном составе поверхности. В поле зрения телекамеры располагаются несколько магнитов разной силы, на которые постепенно налипают и становятся видны магнитная компонента атмосферной пыли. И, наконец, в поле зрения телекамеры

¹ Базилевский А.Т. Космический аппарат «NEAR» пролетает вблизи Матильды // Природа. 1997. № 11. С.105—106.

² Минчин С.Н., Улубеков А.Т. Земля—Космос—Луна. М., 1972.



Глобальный вид Марса (съемка «Викингов»)

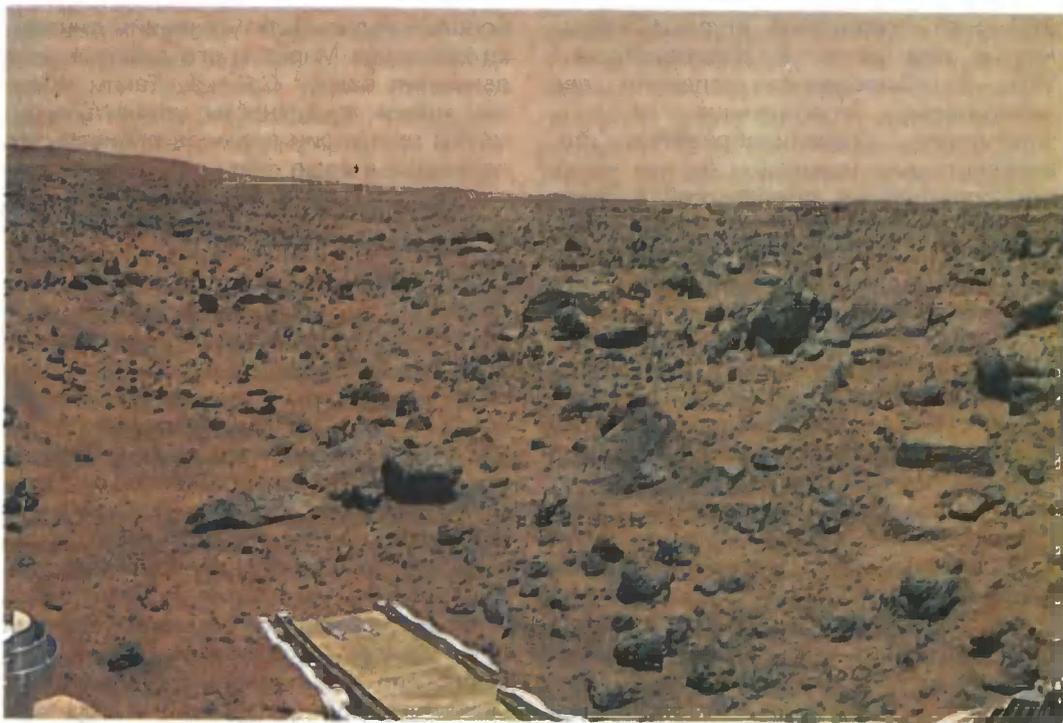


Одно из первых изображений поверхности Марса, полученное «Пасфайндером» вскоре после посадки. На переднем плане «Соджорнер». Аппараты для спуска марсохода на поверхность еще не раскрыты. Видны подтянутые к посадочной ступени воздушные мешки. На темно-оранжевой поверхности Марса много камней. На дальнем плане двойная вершина — Близнецы.

Фото НАСА P-48824

На этом фрагменте панорамы «Пасфайндера» цветовые различия преувеличены. Голубые грани камней на изображении на самом деле имеют спектры, в которых вклад красного цвета лишь немного меньше основного фона. Стрелками показаны три разных типа камней. Красными — камни с округлыми очертаниями; считается, что они окатывались при перемещении в водном потоке. Голубыми — камни с острыми ребрами, скорее всего выброшенные из ударных кратеров или древних вулканов. Белыми — светлые образования; возможно, это грунт, сцементированный солями, осажденными из испарившейся воды древнего потока.

Фото НАСА P-49028



Фрагмент панорамы «Пасфайндера». Под одну аппарат (на переднем плане) попал камень, и ее конец завис над поверхностью. Марсоход сошел с посадочной ступени на грунт по другой аппарели. Холм на горизонте слева — часть вала удаленного ударного кратера.

Фото НАСА P-48982

находятся подвешенные на разной высоте над поверхностью три ветровых конуса, по отклонению которых от вертикали можно оценивать скорость ветра. Второй прибор — комплексный. Он включает в себя акселерометр для изучения в процессе посадки структуры атмосферы, а также термометры и датчики скорости ветра для метеорологических наблюдений после посадки.

Изюминка миссии «Пасфайндер» — маленький марсоход, получивший собственное имя — «Соджорнер». Оно было выбрано в честь Sojourner Truth — женщины, которая в прошлом веке во время Гражданской войны в Америке прославилась как борец против рабства и за права женщин. Кроме того, «Соджорнер» значит «путешественник», что весьма уместно для марсохода. Его длина 65 см, ширина 48 см, высота 32 см, масса 10.5 кг. На своих шести ведущих колесах он способен удалиться на расстояние до 500 м от посадочной ступени, сохраняя с ней связь в радиодиапазоне УКВ. У «Соджорнера» спереди две телекамеры, позволяющие получать чернобелое стереоизображение поверхности для навигации (в том числе для определения препятствий в автономном режиме) и для научных наблюдений. На корме марсохода установлена еще одна телекамера, дающая цветное изображение.

Там же стоит научный прибор APXS (альфа-протон-рентгенофлуоресцентный спектрометр) для изучения химического состава поверхности. Во время измерений сенсорную часть прибора можно помещать на поверхность камня или опускать на грунт. Задняя телекамера марсохода дает изображение места измерений с разрешением не хуже 1 мм. Прибор APXS с помощью радиоизотопного источника облучает место исследования потоком альфа-частиц и измеряет: поток отраженных альфа-частиц; поток протонов, образующихся при реакции взаимодействия альфа-частиц с ядрами легких элементов; поток характеристического рентгеновского излучения, возни-

кающего при рекомбинации вакансий атомных оболочек во время бомбардировки альфа-частицами. Комбинация этих трех видов измерений дает возможность определять содержания любых, кроме водорода и гелия, химических элементов, если они присутствуют в количествах, превышающих десятки доли процента.

Кроме того, с помощью марсохода проводился ряд экспериментов и измерений, отнесенных к категории технологических. Их результаты позволяют улучшить работу будущих планетоходов: автоматическое определение геометрии поверхности по телевизионным наблюдениям, изучение физико-механических свойств грунта по изображениям следов от колес и глубине продавливания их в грунт, измерение темпа налипания марсианской пыли на панели солнечной батареи и т.д.

Доплеровское слежение за аппаратом «Пасфайндер» и двухпутевые измерения дальностей в радиодиапазоне использовались для уточнения динамики вращения Марса и его орбитального движения вокруг Солнца. Таким образом можно, в частности, уточнить параметры прецессии полюсов планеты, что позволяет в свою очередь уточнить значение ее момента инерции, а это дает возможность изучать характер внутреннего строения Марса.

Служебные системы и научные приборы и посадочной ступени, и марсохода получают электроэнергию из двух источников: возобновляемого — от солнечных батарей и невозобновляемого — от химических батарей. За счет энергии химической батареи проводились все операции на спускаемом аппарате до раскрытия его лепестков, на внутренней поверхности которых находятся солнечные батареи, и некоторые измерения и наблюдения в ночное время. С помощью энергии уже другой химической батареи на марсоходе проводилось измерение химического состава камней и грунта в ночное время. А днем «Соджорнер» получал дополнительную энергию от солнечных батарей, расположенных на его верхней стороне.

Малая емкость заряда химических батарей — главный ограничитель длительности и эффективности работы и посадочной ступени, и марсохода. Запланированная длительность работы посадочной ступени — 30 дней, марсохода — семь. Последний сеанс связи с «Пасфайндером» состоялся 27 сентября 1997 г. Таким образом, посадочная ступень проработала почти в три раза, а марсоход — почти в 12 раз дольше запланированного. Впрочем, следует сказать, что при определении гарантийного срока существования космических аппаратов инженеры всегда сильно страхуются, и, если не происходит каких-либо непредвиденных происшествий, аппараты, как правило, работают дольше. Наш «Луноход-1» вместо запланированных трех месяцев проработал почти 10 месяцев³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На момент написания этой статьи результаты миссии «Пасфайндер» в научных журналах еще не опубликованы. Ожидается публикация серии статей в журнале «Science». Однако довольно большое количество информации НАСА сделало доступным в своих пресс-релизных сообщениях и через сеть Интернет. Это и изображения поверхности Марса, и результаты измерений с помощью различных приборов. Исключительное право анализа полученных данных в течение определенного времени (обычно полгода с момента начала получения результатов) принадлежит членам команды космического проекта. Чтобы не вступать в ненужный конфликт с этими правилами, я не буду анализировать первичные результаты, полученные «Пасфайндером», а просто познакомлю читателей с 13 основными результатами полета в том виде, как они сформулированы в заявлении НАСА⁴ от 5 ноября 1997 г. При этом я позволю себе две

вольности: изменю порядок их перечисления, сделав его более логичным с моей точки зрения и попытаюсь разъяснить суть проблемы и откомментировать значимость тех данных, которые мне профессионально близки.

1. Химический состав грунта в долине Арес [место посадки «Пасфайндера»]⁵ похож на таковые в местах посадки «Викинга-1 и -2».

Комментарий. Это в какой-то мере ожидавшийся результат. Еще в 1976 г. было установлено, что химический состав грунта в местах посадки космических аппаратов «Викинг-1 и -2» в пределах точности анализа (тоже рентгеноспектрального) практически одинаков. Тогда же этому было найдено и объяснение: глобальные пылевые бури, которые время от времени наблюдаются на Марсе, перемешивают материал поверхностного слоя в масштабе всей планеты. Такое объяснение предполагает, что мелкозернистый материал поверхностного слоя (а именно его называют словом «грунт»), — в основном пыль, легко разносимая ветром. Если бы в грунте существенную роль играл более грубозернистый материал, дальность перемещения которого по поверхности Марса гораздо меньшая, глобальное перемешивание вряд ли было бы возможно. Отсюда никак не следует, что где-нибудь на Марсе грунт не может быть грубозернистым. Может, но тогда похожий состав грунтов из разных районов должен объясняться химическим сходством их источников. Вот почему так важно понимать размеры частиц грунта в местах посадки (см. результат б).

2. Химический состав камней в месте посадки, по-видимому, отличается от состава найденных на Земле метеоритов с Марса. Он мог бы соответствовать составу [земных] базальтовых андезитов.

Комментарий. По моему мнению, этот очень осторожно сформулированный результат есть один из самых существенных, если не самый главный в

³ Передвижная лаборатория на Луне — «Луноход-1» / Отв. ред. В.Л.Барсуков. М., 1978.

⁴ Цитируется по бюллетеню «The Daily Planet» (1997, 5 нояб.), распространенному Группой планетной геологии Университета Брауна (Провиденс, США).

⁵ Здесь и далее в квадратных скобках — примечания автора.



«Соджорнер» около небольшого камня Барнак Билл (слева от марсохода), анализ которого показал, что его состав близок к земным базальтовым андезитам. Большой камень в правой верхней части изображения — Йоги. Он похож на земные базальты. Однако после учета загрязнения поверхности пылью состав его оказался тоже андезитовым.

Фото НАСА Р-48889

миссии «Пасфайндер». Дело в том, что просто частичное плавление ультраосновного вещества недр приводит к появлению на поверхности планеты базальтовых лав. В этом причина широкого развития базальтов на Земле, Луне, Венере и, очевидно, в ряде районов Марса. О широком развитии базальтового вулканизма на Марсе говорят и пологие склоны большинства марсианских вулканов, и то обстоятельство, что грунт в местах посадки «Викингов» и «Пасфайндера» по составу очень напоминает выветрелые базальты.

Породы же андезитового состава пока были известны только на Земле. Здесь они связаны с магматизмом зон субдукции — областей, где одна лито-

сферная плита пододвигается под другую. Но на Марсе мы не видим в рельефе следов субдукции. Это может означать, что субдукция там нет и не было, а андезитовые составы образовались в каком-то ином процессе. А может быть, это свидетельство того, что субдукция на Марсе была, но очень давно, и ее следы в рельефе не сохранились. И то и другое очень интересно.

Долины Арес и Тиу, в дельтовой части которых находится место посадки «Пасфайндера», прорезают испещренные древними ударными кратерами возвышенные области, характерные для южного полушария планеты. Камни андезитового состава, очевидно, привнесены именно из этих областей. Последние своим возвышенным положением в глобальном рельефе и многочисленными крупными ударными кратерами очень напоминают материковые области Луны, возвышающиеся над базальтовыми равнинами морей. Породы лунных материков небазальтовые. Они отличаются от базальтов

морей обогащенностью полевыми шпатами (анортитом). Интересно, что породы земных континентов тоже обогащены полевыми шпатами (хотя и другими) и земные материки возвышаются над базальтовыми равнинами океанов. Некоторые исследователи видят в этом не простое совпадение, а указание на сходство в происхождении материковых кор разных планетных тел⁶. Обнаружение андезитового вещества в коре Марса, а в пересчете на минералы оно тоже существенно полевошпатовое, — серьезный факт, который может помочь разобраться в проблеме происхождения материковых кор планет.

3. Разнообразие в альbedo, или, что то же самое, вариации яркости марсианской поверхности подобны обнаруженным при других наблюдениях. Но здесь [в месте посадки «Пасфайндера»] не найдены признаки полос поглощения кристаллического гематита или пироксена, установленные в других районах Марса.

Комментарий. Судя по информации, распространенной командой «Пасфайндера» через Интернет, грунт в месте посадки, как правило, светлее, чем камни. Этого следовало ожидать, исходя из результатов дистанционных, в том числе наземных телескопических, наблюдений Марса. Они уже давно показали, что на Марсе есть светлые и темные области. При этом спектры отражения светлых областей очень однообразны и похожи на спектры в периоды глобальных пылевых бурь. Это указывает на то, что светлые области покрыты пылью. Спектры же темных областей Марса разнообразны, и скорее всего там пылевой покров не сплошной — на поверхности есть камни и обнажения коренных пород. Состав последних от места к месту варьирует, поэтому

спектры темных областей так разнообразны. Отсутствие признаков полос поглощения кристаллического гематита и пироксена очевидно говорит о том, что их в камнях возле места посадки в ощутимых количествах для имеющегося метода наблюдений нет. Интересно, что приведенные в Интернете данные пересчета анализа камней на минералы дают заметные количества пироксена. Тот факт, что полоса поглощения, характерная для этого минерала, наблюдениями «Пасфайндера» не обнаружена, может означать, что вещество камней не раскристаллизовано, а это для андезитов типично.

4. Распределение камней по размерам согласуется с таковым для [земных] отложений, связанных с [катастрофическими] паводками.

Комментарий. Место посадки находится в богатой камнями дельтовой части паводковых долин Арес и Тиу, так что такой результат, казалось бы, вполне предсказуем. Однако в районе посадки есть еще и ударные кратеры. Аппарат мог сесть в зоне каменистых выбросов одного из них. А камни выбросов из кратеров могут представлять не только отложения флювиальных долин, но и залегающие под ними местные горные породы, которые, возможно, не имеют отношения к материковым областям Марса. Распределение камней по размерам согласуется с распределением, характерным для паводковых отложений, и говорит о том, что «Пасфайндер» сел куда надо и состав камней несет информацию о веществе материков.

5. Возможная идентификация окатанных галек и валунов, лежащих на поверхности, а также галек и пустот [от выпавших галек] в некоторых камнях указывает на присутствие конгломератов, сформированных текучей водой в прошлую эпоху, когда жидкая вода была устойчива на поверхности.

Комментарий. Считается, что катастрофические паводковые долины Марса, включая Арес и Тиу, сформировались, когда постоянно присутствия воды на поверхности планеты не

⁶ Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бурба Г.А. и др. Очерки сравнительной планетологии. М., 1981; Nikolaeva O.V., Ivanov M.A., Borozdin V.K. Crustal Dichotomy: Inverial for terrestrial planets // Lunar Planet Science Conference XXI. 1990. P.891—892.

было. Такие долины не имеют древо-видных сетей водосбора и скорее всего возникали при эпизодических прорывах воды из глубины на поверхность. По-видимому, те, кто сформулировал результат 5, хотели сказать, что катастрофический поток не образует хорошо окатанных галек и мелких валунов. Но коль скоро они есть, значит, гальки и валуны были захвачены долинообразующим потоком уже в готовом окатанном виде. А если так, то окатывание их должно было происходить в условиях благоприятных для длительного некатастрофического процесса. А это как будто требует термодинамической устойчивости воды на поверхности планеты⁷.

6. Обнаружены следы ветровой абразии камней, а также отложения [мелкозернистого материала] в форме дюн, что указывает на присутствие песка.

Комментарий. Самые детальные изображения поверхности Марса, полученные спускаемыми аппаратами «Викинг-1,2» и «Пасфайндер», имеют разрешение не лучше 0.5—1 мм, что не позволяет отличить пыль от песка. Присутствие пыли на поверхности Марса неоспоримо, ибо не раз наблюдавшиеся на этой планете пылевые бури поднимались до таких высот, что скрывали даже вершину горы Олимп — 27 км над условным нулевым уровнем поверхности. Очевидно, что так высоко в разреженной атмосфере Марса может подняться только тонкая пыль. На присутствие песка на поверхности планеты указывают лишь косвенные признаки, прежде всего — большие и маленькие дюны. Процесс образования дюн хорошо изучен и в природных условиях на Земле, и в лабораторных экспериментах. Дюны из пыли образоваться не могут, а коли они существуют на Марсе, то там в значительных количествах есть и песок. Известно и то, что абразия наиболее эффективна, если ветровой поток нагружен песком. Вот почему дюны и следы абразии в месте посадки

«Пасфайндера» считаются доказательством присутствия песка.

7. Марсианская пыль содержит магнитные агрегатные частицы со средним размером в один микрон.

Комментарий. Поскольку марсианская пыль — продукт выветривания неких исходных пород, очевидно в основном базальтов, то этот вывод в принципе содержит в себе информацию как о породах, так и о характере их выветривания. И то, и другое пока мы понимаем довольно плохо.

8. Уточненный момент инерции Марса говорит о существовании ядра радиусом от 1300 до 2000 км.

Комментарий. Строго говоря, этот результат, по крайней мере в части оценки радиуса ядра Марса, нового знания не дает, потому что не сужает разброса уже определенных величин данного параметра⁸. В то же время его нельзя назвать и бесполезным, так как это — полученное независимым способом подтверждение существующих оценок.

Результаты 9—13 касаются атмосферы и выходят за пределы моей профессиональной компетентности. Их я привожу без комментариев.

9. Подтверждено, что главный поглотитель солнечной радиации в атмосфере Марса — пыль, и это имеет важные последствия для переноса энергии в атмосфере и циркуляции атмосферы. По изменениям температуры, ветра, давления, а также утренней турбулентности были обнаружены пылевые смерчи. По крайней мере один из них (на 62-й марсианский день после посадки), по-видимому, содержал пыль. Можно предположить, что такие смерчи являются механизмом поступления пыли в атмосферу.

10. Погода [в месте посадки «Пасфайндера»] похожа на погоду в месте посадки «Викинга-1». Отмечены резкие перепады давления и температуры, склоновые ветры по ночам (а

⁷ Kerr R.A. // Science. 17 Oct. 1997. V.278. P.380.

⁸ Жарков В.Н. // Астрон. вестн. 1996. Т.30. № 6. С.514—524.

вообще ветры были слабые). Температуры примерно на 10° выше, чем измеренные «Викингом-1».

11. Непрозрачность атмосферы утром связана с облаками, а не с приповерхностным туманом. По данным «Викингов», сделать выбор между этими двумя причинами не удавалось.

12. Исходя из наземных микроволновых измерений и с помощью Космического телескопа им. Хаббла, наблюдавшаяся прозрачность атмосферы оказалась выше, чем ожидалось.

13. Изучение структуры атмосферы показало, что профиль температуры [атмосферы по высоте] отличается от ожидавшегося по данным микроволновых измерений и наблюдений с помощью Космического телескопа им. Хаббла.

УРОКИ ПРОЕКТА «ПАСФАЙНДЕР»

Первый урок — это резкое увеличение эффективности исследований за счет даже той весьма ограниченной мобильности, которой обладал «Соджорнер». Последний удалялся от посадочной ступени всего на 10–15 м, а сколько ценных наблюдений и измерений, невозможных для неподвижного аппарата, он сделал! Этот урок уже усвоен. Недавно НАСА конкретизировало планы в отношении проекта «Марс-2001», в составе которого предусматривается спутник и спускаемый аппарат. Последний доставит на поверхность марсоход размером чуть больше «Соджорнера», но с дальностью хода до 100 км. Кроме комплекта научных приборов марсоход будет иметь устройство для отбора образцов с поверхности, их изучения, хранения, перегрузки в аппарат следующего проекта («Марс-2003 или -2005») и доставки на Землю.

Второй урок — нам. Речь идет об умении рекламировать свои достижения. Ну ладно, нет у нас сейчас успешных полетов к другим планетам. Но разве вообще у нас сейчас нет достижений в космосе? А орбитальная станция

«Мир»? Она пока у землян единственная, и следующая за ней по времени международная станция «Альфа» делается с нашим очень серьезным участием. Но российские средства массовой информации вспоминают о «Мире» лишь тогда, когда там случается что-то плохое. А когда не случается, то ее вроде бы и нет. А она есть и должна быть предметом нашей гордости. Но чтобы эта гордость возникала, надо постоянно напоминать, что мы тут первые, что за опытом идут именно к нам. Это упрек Российскому космическому агентству и нашим средствам массовой информации. К сожалению, я почти уверен, что никакого урока они из этого не извлекут.

Третий урок кажется мне важным и для нас, и для НАСА. «Пасфайндер» — первый практически законченный проект программы «Дискавери». Она возникла как одна из реализаций лозунга НАСА: «Быстрее, лучше, дешевле». Против «лучше» возразить нечего. Что касается «быстрее» и «дешевле», здесь есть предмет для разговора. За понятное желание быстрее осуществить ту или иную миссию приходится платить дефицитом времени на создание космического аппарата, научных приборов, на их испытания и калибровки. И если с созданием аппаратов и приборов как-то успевают, то с испытаниями и калибровками — не всегда. Вспомним, что прибор APXS, созданный для изучения химического состава камней и грунта, — это по сути три прибора в одном: спектрометры обратного рассеяния альфа-частиц, протонов и рентгенофлюоресцентный. Судя по сообщениям в прессе и в Интернете, прибор APXS в целом работал без замечаний. Но почему-то вся распространяемая информация о составе грунта и камней шла только с блока рентгенофлюоресцентного анализа. Из частных разговоров выясняется, что у двух других методов — проблемы с калибровками.

Или вспомним полные сдержанной паники сообщения американской прессы в начале работы «Пасфайндера» о том, как бортовой компьютер посадочной ступени вдруг перезагру-

жался, ломая план работы на день, на два, на три. Выяснилось, что причина — ошибка в компьютерной программе. Оба приведенных примера — свидетельства недостаточной подготовленности. Почему? Что здесь главное? Дефицит времени или недостатки организации работы? Я склонен думать, что главное все-таки — дефицит времени, затрудняющий организацию работы. Третий компонент лозунга — «дешевле». В принципе абсолютно верный. Именно из-за относительной дешевизны программа «Дискавери» резко расширила количество изучаемых объектов: «Пасфайндер» принес бесценные данные о Марсе. «NEAR» летит к астероиду Эрос. «Лунар Проспектор» вот-вот начнет изучение состава поверхности Луны. «Стардаст» готовится к полету за образцами кометной пыли⁹.

Это все прекрасно. Но, если бы химические батареи посадочного блока «Пасфайндер» и марсохода «Соджорнер» могли бы заряжаться от солнечных батарей, результаты миссии могли бы быть еще более впечатляющими. Ведь главное (с моей точки зрения) достижение — открытие на Марсе вещества, похожего на горные породы континентов Земли, — опирается на результаты анализа всего пяти камней.

А почему проанализировано только пять камней? Да потому, что больше не успели. Когда кончился заряд химической батареи на марсоходе, проводить измерения состава ночью стало невозможно. А днем энергия есть, да результаты плохие, потому что для прибора APXS наилучшие условия для измерений — ночью, когда холодно. Я спрашивал людей, причастных к проекту: «Скажите, пожалуйста, почему поставили химические батареи, которые не могут заряжаться от солнечных?» Отвечали: «Они же дешевле!» Я не уверен, что достигнутая экономия соизмерима с масштаба-

ми недополученной информации.

Еще одно встревожившее меня обстоятельство, которое, как мне кажется, проявилось в ходе миссии «Пасфайндер», — это, надеюсь, невольное игнорирование американскими средствами массовой информации вклада других стран. Понятно, что пишущие о проекте «Пасфайндер» могли просто не знать о том, как садились на Луну советские «Луна-9» и «Луна-13». Это давняя история. Они справедливо славили прекрасную организацию НАСА и чудесную страну Америку. Но несправедливо забывать, что открытие андезитоподобных пород на Марсе сделано прибором, наполовину созданным в Германии, и ключевой компонент телевизионной камеры посадочного аппарата, так называемая фокальная плоскость, поставлена тоже немцами. Эти факты, конечно же, не скрывались, иногда упоминались, но, как правило, не подчеркивались. Мне вспоминается наш проект «Вега» — полет к Венере и далее встреча с кометой Галлея. Там отношение к иностранным участникам было совершенно другим. Впрочем, возможно, это тот случай, когда я вижу соломинку в чужом глазу и не вижу бревна — в своем.

Конечно, сотрудничество в проекте «Пасфайндер» было выгодным не только для американцев, но и для немцев. Ведь не будь «Пасфайндера», немецкий спектрометр, созданный для полета на нашем «Марсе-96», так никогда и не очутился бы на Марсе. Но верно и обратное. Не будь немецкого участия в создании прибора APXS и телевизионной камеры, еще не известно, состоялась бы эта миссия и была бы она столь успешной.

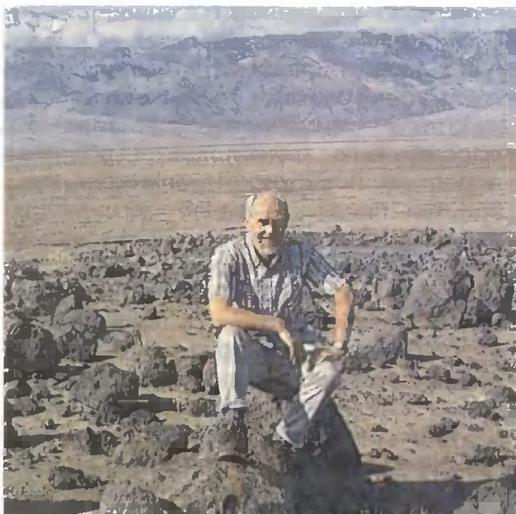
И все же уроки уроками, а успехи успехами. Проект «Пасфайндер» состоялся, дал новые, очень интересные результаты, открыл новые перспективы. И я искренне поздравляю всех его участников.

Автор признателен О.В.Николаевой за конструктивное обсуждение статьи.

⁹ Лунный геологоразведчик // Природа. 1996. № 1. С.108; Проект «Звездная пыль» // Там же. 1997. № 6. С.93.

Исследование Марса продолжает космический аппарат «Марс-Пасфайндер»

Р. О. Кузьмин



Руслан Олегович Кузьмин, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории сравнительной планетологии и метеоритики Института геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского РАН. Область научных интересов — геология и геоморфология Марса, строение и состав марсианской криосферы. Приглашенный российский исследователь в американском проекте «Марс-Пасфайндер», соисследователь научной группы «Термоэмиссионный спектрометр» в американском проекте «Марс-Глобал-Сервейер».

ПРЕДЫСТОРИЯ

После первых успешных посадок на поверхность Марса американских космических станций «Викинг-1 и -2» 21 год назад новые попытки исследования планеты российскими и американскими космическими аппаратами трудно назвать удачными. В 1988 г. к Марсу было запущено два российских аппарата «Фобос-1 и -2». Первый из них исчез в глубинах космического пространства, а второй, выйдя на орбиту, близкую орбите марсианского спутника Фобос, и выполнив лишь малую часть запланированной программы исследования планеты и ее спутника, также потерял связь с Землей. Подобная судьба постигла и крупный американский космический проект «Марс-Обзервер» 1992 г. Связь с аппаратом была потеряна в момент его выхода к Марсу. Еще более трагичной оказалась судьба российского проекта «Марс-96». Космический аппарат должен был доставить к Марсу орбитальный модуль, оснащенный множеством научных инструментов для дистанционного зондирования поверхности и атмосферы, и спустить на планету два пенетратора и две малые станции. Сроки запуска «Марса» переносились с 1992 г. дважды в течение четырех лет. Наша реформируемая космическая держава в силу многих причин не смогла найти средства, необходимые для выполнения проекта в запланированные сроки, что в свою очередь не позволяло Российскому космическому агентству вовремя выполнять взятые на себя международные обязательства по его реализации. Так или иначе, «Марс-96» даже не

вышел за пределы притяжения Земли и совершил незапланированную «посадку» где-то в районе Тихоокеанского побережья (в районе Перу).

Но, как говорится, на ошибках, пусть даже очень дорогих, можно учиться. На неудачу «Марс-Обсервера» НАСА среагировало довольно быстро. Было принято решение реанимировать проект, запустив два аппарата поменьше — «Марс-Глобал-Сервейер» и «Марс-Сервейер». Научное оборудование, что установлено на «Марс-Обсервере», было распределено между ними пополам.

К большому сожалению многих российских и зарубежных ученых, участвовавших в проекте «Марс-96», подобных решений у Российского космического агентства не появилось, а принятая ранее перспективная программа исследования Марса растворилась на фоне бюджетного безденежья и заметного ослабления интереса к планетной науке и технике.

Проекту «Марс-Пасфайндер» было суждено первым проложить новый путь для выполнения недорогих по затратам и эффективных по реализации научных программ последующих миссий с посадочными аппаратами. В очень короткие сроки (за три года) были созданы новые аппаратноситель и посадочный модуль (включая научную аппаратуру), испытана система безопасности посадки. С конструктивной точки зрения в этом проекте были удачно совмещены в едином полетном средстве функции межпланетного перелета, внедрения в марсианскую атмосферу, спуска в ней и мягкой посадки на поверхность планеты. При этом «Марс-Пасфайндер» унаследовал от «Викинга» парашютную систему с удлиненными стропами и фронтальный конусовидный щит, оберегающий аппарат от перегрева при входе в атмосферу Марса. Диаметр всего космического аппарата составил 2,65 м.

ВЫБОР РАЙОНА ПОСАДКИ

Когда «Марс-Пасфайндер» уже воплощался инженерами в реальный аппарат, его основные узлы подверга-

лись всевозможным проверкам, а система мягкой посадки испытывалась на поверхностях с камнями разных размеров и геометрии, перед научной группой проекта встал важнейший вопрос: в какой район на Марсе должен совершить посадку «Марс-Пасфайндер»? При этом, несомненно, приоритет отдавался безопасности посадки, но с твердым желанием найти наиболее интересный район для работы мини-марсохода, оснащенного анализатором химического состава как марсианского грунта, так и обломков пород на поверхности планеты. Руководство проекта решило организовать рабочее совещание с привлечением широкого круга ученых, занятых исследованием Марса. Именно на этом этапе я наиболее близко познакомился с проектом и его разработчиками и принял участие в интереснейшем процессе выбора района посадки.

В этот период совместно с профессором Р.Грилли (руководителем лаборатории планетной геологии в Университете штата Аризона, г.Темпе, США) и его студентами я работал над проектом «Изучение аналогов марсианских геологических ландшафтов на Земле», предложенным ранее совместной Российско-Американской рабочей группой по исследованию Солнечной системы. Мы уже имели опыт изучения районов в пустыне Махаве (Калифорния) как наиболее вероятных марсианских геологических аналогов на Земле. Параллельно начались наши совместные работы по геологическому картированию одного из районов на Марсе, наиболее перспективного для проведения экзобиологических исследований и сбора марсианских пород для доставки на Землю будущими миссиями. Так что полученное мной предложение участвовать в совместной работе по выбору потенциальных районов посадки для «Марс-Пасфайндера» находилось непосредственно в поле моих научных интересов. И я с увлечением включился в эту работу.

Совещание было организовано в Институте лунно-планетных исследований (г.Хьюстон, штат Техас, США) в

апреле 1994 г. На нем собралось более 60 американских и европейских ученых и инженеров. Было рассмотрено свыше 40 предложений по выбору мест посадок, учитывающих инженерные ограничения, безопасность посадок и спектр научных задач.

Из одиннадцати предложенных нами районов приоритет был отдан единой дельтовой равнине, образованной крупными долинами Арес и Тиу, расположенной в юго-восточной части Равнины Хриса и сложенной отложениями многочисленных гигантских катастрофических потоков, которые бушевали от 3 до 1 млрд лет тому назад. На поверхности, охватывающей сотни квадратных километров, видны многочисленные формы рельефа (эрозионные останцы-холмы, острова, бары и линейные структуры течений), оставшиеся от последних крупномасштабных потоков воды¹.

Примерно через год, после тщательного сравнительного анализа научная группа проекта остановила свой выбор именно на этом районе. По расчетам аппарат «Марс-Пасфайндер» предполагалось посадить на поверхность Марса в эллипсе прицеливания 100x200 км (с центром в точке с координатами 19.5 N; 32.8 W), расположенном на общей дельтовой равнине долин Тиу и Арес.

АНАЛОГИ МАРСИАНСКИХ ЛАНДШАФТОВ НА ЗЕМЛЕ

В конце сентября 1995 г. в г.Спокан (штат Вашингтон, США) было организовано второе рабочее совещание. В фокусе внимания находился уже вполне конкретный район, о геологии, геоморфологии и физических характеристиках поверхности которого хотелось бы узнать как можно больше.

Однако как можно понять природу крупномасштабных катастрофических наводнений на Марсе и изучать их морфологические и литологические последствия, если Вы никогда не

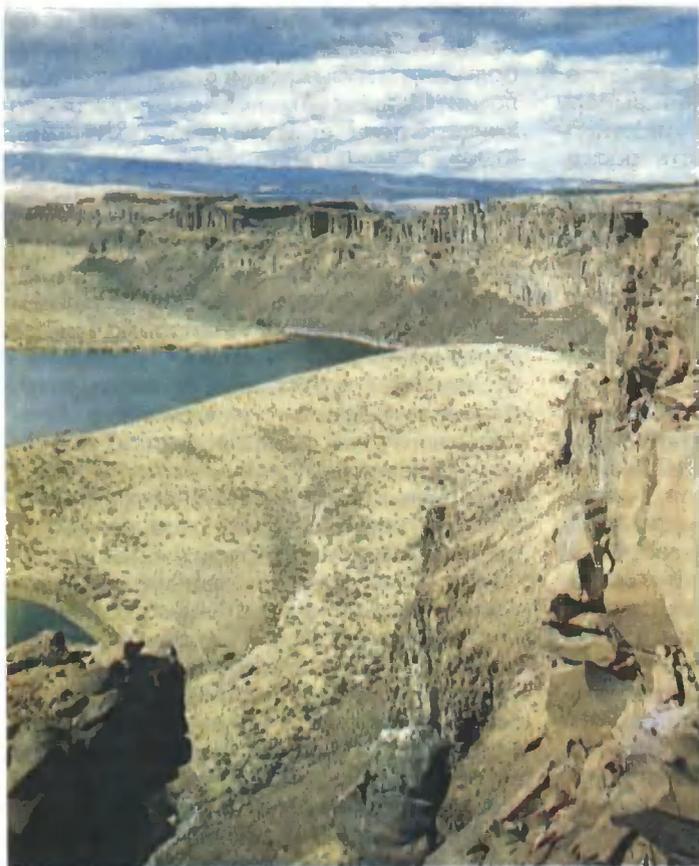
видели воочию подобного явления на Земле? Именно по этой причине большие энтузиасты исследования геологии Марса, молодые ученые из Университета штата Аризона (г.Темпе) К.Эджет и Д.Райс организовали для участников данного совещания полые экскурсии в район Channeled Scabland² (наиболее близкого земного аналога марсианских ландшафтов), сформированного под воздействием гигантских катастрофических потоков в восточной части штата Вашингтон (Колумбийское плато), в междуречье Спокана, Колумбии и Клиавоты. Прекрасным гидом был профессор В.Бейкер (Аризонский университет, г.Тусон) — признанный научный авторитет в области изучения процессов палеогидравлики и седиментологии катастрофических наводнений из ледникового озера Мизула. Он же — автор многих научных статей и монографии о процессах водной эрозии на Марсе.

В этой экскурсии (как и в совещании) также приняли участие учителя (13 человек), преподающие в школах и колледжах штатов Вашингтон и Айдахо курс по естественным наукам и выигравшие специальный конкурс на тему, как они предполагают включить в образовательный процесс новые данные о проекте «Марс-Пасфайндер». Так была реализована одна из образовательных программ, инициированных НАСА с целью привлечения внимания молодого поколения Америки к планетным космическим проектам (и тем самым к наукам о планетах Солнечной системы).

Так что же произошло на Колумбийском плато в историческом прошлом? Именно здесь в конце последнего ледникового периода (16 000—12 000 лет тому назад) разыгрались поистине драматические геологические катаклизмы. Вследствие крупномасштабного катастрофического стока огромных масс воды первичная поверх-

¹ Примеч. ред. На эту тему см.: Марченко А.Г. История формирования долины Арес // Природа. 1997. № 12. С.57—61.

² «Channeled Scabland» в вольном переводе означает «изрезанная каналами земля». См.: Рудой А.Н. Скейбленд Центральной Азии // Природа. 1994. № 6. С.3—20.



Вид с обрыва палеоводопада Потолсс (Колумбийское плато), сформированного в последний ледниковый период неоднократными катастрофическими паводками из оз. Мизула. Высота стенок водопада, прорезанных в толще базальтов, достигает 100 м. Здесь и далее фото Р.О.Кузьмина

Холмы «Марса» — эрозионные останцы в Долине Смерти (штат Калифорния), сложенные отложениями грязе-каменных потоков, подвергшиеся впоследствии ветровому воздействию и химическому и физическому выветриванию, — геоморфологический аналог марсианских ландшафтов на Земле. Размер крупных камней более 1 м.



Восьмиколесный прототип марсохода «Соджорнер» проходит испытание на каменистой поверхности конуса выноса отложений катастрофических потоков, размывших Колумбийское плато 16–12 тыс. лет тому назад.



Гигантский обломок базальтовой породы (18x11x8 м) был вынесен катастрофическим паводком (при прорыве ледникового оз. Мизула), на расстояние 8 км от места его первоначального положения.



ность плато (окончательно сформированная в плиоцене, примерно 1.6 млн лет назад) была эродирована на глубину до 100 м в пределах 800 км². Причиной такого катастрофического стока (временами до 40—50 км³/час) служили эпизодические прорывы из ледникового озера Мизула, существовавшего тогда вдоль долины р.Кларк-Форк (к востоку от цепи Скалистых гор). Ледники, спускавшиеся с края огромного ледяного щита, который располагался в южной части Британской Колумбии (Канада), перегораживали речные долины, что приводило к периодическому формированию подпруженного озера.

В моменты прорывов катастрофические потоки выносились на просторы Колумбийского плато, круша и стирая его первичную поверхность до неузнаваемости. Могущественные турбулентные течения, возникавшие в них, перемещали огромные массы обломочного материала размером от глинистых частиц и песка до крупных каменных глыб в поперечнике более 10 м. Там, где течение потоков замедлялось, формировались обширные области накопления этого материала. Мы посетили такой район — Quincy Basin, расположенный в западной части Колумбийского плато. В эпизоды катастрофических паводков этот бассейн полностью затопливался, и здесь образовывались наносы каменисто-гравийного и песчано-гравийного материала мощностью до нескольких десятков метров. Водные массы затем стекали в долину реки Колумбия через два крупных водопада. Энергия стока была столь велика, что подстилающая базальтовая толща изрезана на глубину до 5 м, а стенки водопадов отступили вверх по течению на несколько километров, оставив после себя огромные котлованы-промоины глубиной до 60 м. На затухающих стадиях активности катастрофических потоков формировались гигантские поля со знаками ряби течения, расстояние между гребнями которых колеблется от 20 до 200 м при высоте от нескольких до 15 м. Такие крупные

«волны» рельефа сложены преимущественно гравийным материалом.

Особенно впечатляющей оказалась поездка в район Ephrata Fan — обширный конус выноса (в центральной части бассейна Quincy Basin), сформированный отложениями катастрофических паводков. Поверхность конуса выноса (в его средней части) сложена типичным для катастрофических потоков несортированным материалом, состоящим из смеси песка, гальки, щебня и крупных обломков пород. Отдельные камни-монстры имеют в поперечнике несколько метров и более. Самый крупный из них (18×11×8 м) перемещен потоком на 8 км от места его первоначального залегания.

Чем-то похожим на этот ландшафт представлялся нам выбранный район посадки «Марс-Пасфайндера». Именно здесь, на сильно каменистой поверхности (к большому удовольствию участников экскурсии), группа инженеров (создателей микро-марсохода) продемонстрировала ходовые качества его восьмиколесного прототипа. Облет на самолете (специально сконструированном для наблюдения природных объектов с воздуха) всей области Channeled Scabland помог нам увидеть во всей природной красе единую картину результатов бурной деятельности катастрофических паводков. Впечатления от этой поездки, конечно, превзошли все наши ожидания, и эффект от вида необычных форм рельефа и отложений, сформированных гигантскими катастрофическими потоками, был огромен.

Тем не менее во время путешествия меня не менее во время путешествия меня не покидало ощущение некоторой несовместимости масштабов деятельности катастрофических потоков на Земле с теми, что мы наблюдаем на космических изображениях Марса. Те поистине гигантские масштабы эрозии и осадконакопления в пределах Channeled Scabland в самом деле могут служить лишь малой моделью подобных процессов на Марсе. Вся область Колумбийского плато спокойно помещается в эллипсе посадки «Марс-Пасфайндера».

«МАРС-ПАСФАЙНДЕР» ИДЕТ НА ПОСАДКУ

*...Тихо на предугрошенном Марсе,
тихо как в черном студенном
колодце...*

Рей Бредбери.
«Марсианские хроники»

В конце 1996 г был запущен к Марсу космический аппарат «Марс-Пасфайндер». Чуть более семи месяцев понадобилось ему, преодолев в космосе расстояние 309 млн км, достичь планеты Марс и совершить мягкую посадку на ее поверхности.

Мне посчастливилось принимать непосредственное участие (в течение первых двух недель) в работе оперативной научной группы проекта и быть свидетелем триумфа этой миссии. Я прибыл в Лабораторию реактивных движений, что в г.Пасадена (штат Калифорния), за два дня до момента посадки «Марс-Пасфайндера» и познакомился с многочисленной группой американских, немецких и датских ученых, входивших в оперативную научную группу. Команда «Марс-Пасфайндер» занимала весь второй этаж здания, состоявшего из огромного лабиринта небольших и удобных рабочих комнат, в центре которого находилось помещение для управления полетом «Марс-Пасфайндера», отделенное стеклянной стеной от зала совещаний. Таким образом, научная группа могла не только слышать, но и наблюдать, как происходили все «ступени» посадки аппарата.

Стены этажа были завешаны рабочей информацией о подготовительных этапах проекта и результатах стендовых испытаний, схемами режима полета «Марс-Пасфайндера» и распланированных до секунды этапов посадки аппарата, плакатами с изображениями конструкций посадочного модуля и мини-марсохода. Здесь же висели геологические карты и фотографии района посадки, включая огромные изображения эллипса прицеливания «Марс-Пасфайндера». Многочисленные цветные изображения, полученные 20

лет назад с космических аппаратов «Викинг-1 и -2», создавали особую марсианскую атмосферу. Так что, попадая в это помещение, посетитель как бы отсекался от внешнего мира.

В это время космический аппарат стремительно приближался к планете. Все его системы работали отлично, а впереди был самый сложный и непроходимый путь прямого входа в марсианскую атмосферу, спуска и посадки. За неделю до посадки с Космического телескопа им.Хаббла была проведена контрольная съемка Марса, неожиданно показавшая, что в тысяче километров к югу от намеченного района (в пределах крупных тектонических депрессий системы Долин Маринера, из которых берут начало Арес и Тиу) сформировались два крупных пылевых облака — прямое свидетельство зародившейся в этом месте локальной пылевой бури. Прогнозируемый сезон крупномасштабных пылевых бурь на Марсе должен был начаться только с октября-ноября. Так что эта локальная пылевая буря обеспокоила команду, ибо сразу возник вопрос: а не распространится ли эта буря к моменту посадки на север? К счастью, этого не произошло.

И вот наступило долгожданное 4 июля. Ранним утром все участники научной группы «Марс-Пасфайндера» собрались в зале рядом с помещением управления полетом, и внимательно следили за всеми этапами посадки. Каждое сообщение о благополучном прохождении очередного этапа спуска встречалось бурной овацией присутствующих. Эмоциональный накал нарастал. Вскоре посадочный модуль отделился от аппаратаносителя, переориентировался для внедрения в атмосферу Марса, и начался его спуск. Этот этап (от входа в атмосферу до момента касания поверхности планеты) занял чуть более 5 мин. Но какие это были минуты! Все этапы спуска проводились точно в соответствии с намеченным инженерами планом и прошли исключительно успешно — «как по маслу»!

Темп спуска аппарата оказался ошеломляющим. Собственно вход в



Цветная «Галерея-панорама» (360°). «Соджорнер» подошел к камню Егип. На горизонте виден холм со сдвоенными вершинами (вверху).
Детальное изображение холма со сдвоенными вершинами, полученное способом анаглиф, т.е. когда стереографические пары панорамы
спроецированы одна на другую в разных цветах. В стереоскопах (с красным и синим фильтрами) получается трехмерное изображение.
Здесь и далее фото НАСА



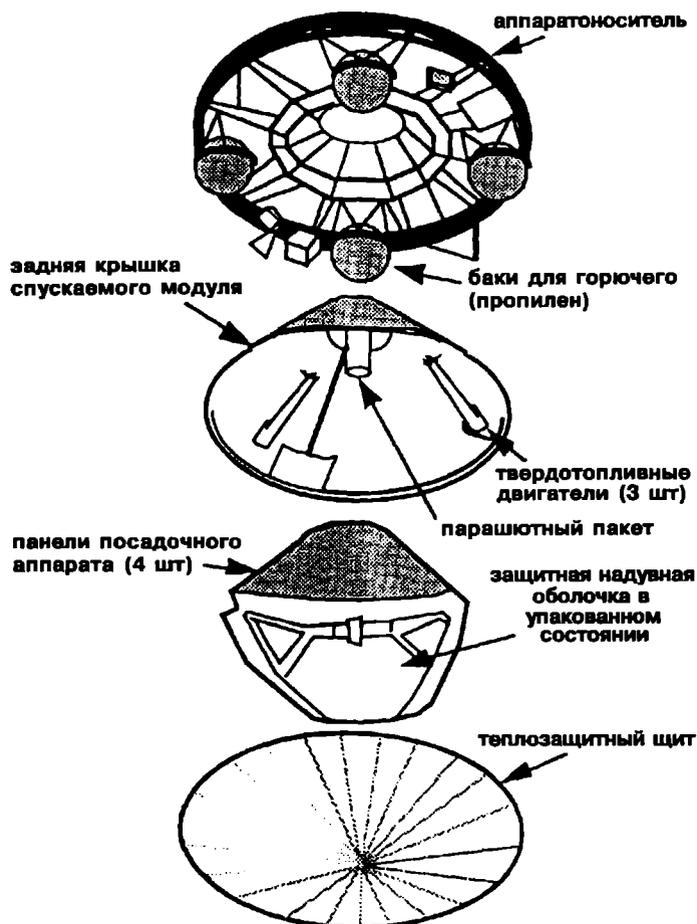
Черно-белая «Монстр-панорама» марсианской поверхности вокруг посадочного аппарата. «Соджорнер» направляется к крупному камню Еги.

марсианскую атмосферу был осуществлен непосредственно с гиперболической траектории на высоте 130 км от поверхности при скорости 7.47 км/сек только за 5.0 мин до момента посадки. Раскрытие парашюта произошло на высоте 9 км за 2.23 мин до посадки со скоростью уже 370 м/сек. Когда парашют полностью раскрылся, отделился щит, оберегавший аппарат от перегрева во время входа в верхние слои атмосферы Марса. Снижение на парашюте уменьшило скорость спуска до 80 м/сек, а надувание системы обеспечения мягкой посадки (воздушной оболочки вокруг аппарата), происходящее с высоты 355 м за 10.1 сек до посадки (при скорости спуска около 60 м/сек). За 6 сек до момента касания поверхности (начиная с высоты около 100 м) парашютная система была отведена в сторону от спускаемого аппарата включением трех небольших твердотопливных двигателей. После этого в течение менее 4 сек при скорости около 21.5 м/сек продолжалось свободное падение аппарата. И вот ровно в три часа ночи по марсианскому времени надувной многошаровый «мячик» «Марс-Пасфайндер» упруго коснулся поверхности планеты. Инерции удара хватило на 16 скачков. Высота первого прыжка достигла 15 м. Аппарат остановился в небольшом понижении, слегка покачиваясь (следы качания на марсианской поверхности были обнаружены позже на первом панорамном изображении).

Затем воздушная оболочка была автоматически спущена и притянута к аппарату, панели его постепенно раскрылись, и новая научная автоматическая станция стала проводить исследования марсианской поверхности и атмосферы.

МАРС ГЛАЗАМИ «МАРС-ПАСФАЙНДЕРА»

Уже через семь часов с борта «Марс-Пасфайндера» началась трансляция на Землю первых изображений марсианской поверхности. Все члены команды проекта, от инженеров до ученых, сгрудились у мониторов и с восхищением наблюдали, как кадр за кадром проходили на экране изображения первой обзорной панорамы места посадки. Эта панорама была получена при низком положении съемочной камеры (на высоте 1 м), когда ее штанга еще не была выдвинута на полную высоту (1 м 80 см), образно говоря — из положения с «колена», и была транслирована на Землю при довольно сильном сжатии данных. Тем не менее она поражала детальностью изображения марсианской поверхности на удалении от нескольких метров до самого горизонта, на расстоянии около 3 км. При первом взгляде на полную панораму было ясно, что этот ландшафт заметно отличается от ландшафта предыдущих посадок «Викингов». Мы были в восторге от увиденного разнообразия камней, поскольку одна из целей миссии (сечь в район с морфологически различными камнями) была достигнута. Но более всего поразил вид в юго-западном секторе. Здесь открылась сильно каменистая поверхность, изрезанная неглубокими ложбинами и грядами с островом-холмом размером около километра с



Основные элементы системы космического аппарата «Марс-Пасфайндер».

двумя вершинами, возвышающимися над равниной на 30 м. Этот двугорбый холм сразу получил название Сдвоенные вершины, или Близнецы.

Запечатлеть на панораме живописный вид Марса было давней мечтой главного исследователя проекта по фотографическому эксперименту и разработчика стереокамеры — Питера Смита из Аризонского университета (г.Тусон). Помнится, как еще до запуска «Марс-Пасфайндера», на рабочих совещаниях по выбору мест посадок, Питер неоднократно склонял научную группу проекта выбрать эллипс посадки так, чтобы в поле зрения камеры оказались не только монотонные равнины, но и более высокие формы рельефа — горы или холмы. Его мечта осуществилась в лучшем виде. Наблюдая за его сияющими глазами, я вдруг вспомнил

фразу из «Марсианских хроник» Рэя Бредбери: «...и он повернул голову, чтобы поглядеть на холмы и равнины Марса». В данной ситуации «голову» повернула камера и тем самым сделала мечту своего создателя реальной.

На следующее утро новую панораму древней флювиальной равнины Марса увидело все человечество.

Всю первую неделю функционирования «Марс-Пасфайндера» территория Лаборатории была буквально оккупирована огромной армией американских и иностранных журналистов. В специальном здании (им.Ван Кармана) размещался зал, где ежедневно члены команды «Марс-Пасфайндера» делились с журналистами самой свежей информацией и своими впечатлениями о работе. Во многих тенистых уголках (июль был жарким) можно было увидеть участников проекта, которых без усталости интер-



Схема входа «Марс-Пасфайндера» в марсианскую атмосферу и сценарий спуска и посадки рабочего модуля.

выюировала журналистская братия вкупе с киношниками.

Но еще больше «подлили масла» в информационный огонь события следующего дня, на который был запланирован переход мини-марсохода «Соджорнер» с несущей панели (одной из солнечных панелей) на марсианский грунт. Еще в первый день при взгляде на полученное изображение этой панели было ясно, что развертывание спусковой дорожки осложнится тем, что фрагмент защитной оболочки аппарата нахлестнулся на солнечную панель, как раз в том месте, где находилась в свернутом состоянии (подобно дорожке, скатанной в валик) правая спусковая дорожка. Тут же было принято решение послать команду бортовому компьютеру провести маневр по закрытию-открытию этой солнечной панели. Контрольная съемка после такого маневра показала, что она освободилась от пут защитной

оболочки. За этим последовала команда развернуть спусковые дорожки; данные телеметрии показали, что только правая дорожка коснулась поверхности грунта, а левая не дошла до нее и зависла на небольшой высоте. Так что волею судьбы «Соджорнеру» было суждено пойти направо, на север. Впервые за всю историю исследования планеты Марс в этот день должен был произойти выход на неизведанную планету самоходного средства перемещения, созданного на Земле и оборудованного чувствительными датчиками для определения химического состава и вооруженного тремя телевизионными мини-камерами. «Соджорнеру» была отведена важнейшая миссия — проторить первую дорожку на красной поверхности планеты. Успешно преодолев спуск, «Соджорнер» коснулся грунта передними колесами и, продолжая движение, уже вскоре стоял на марсианской поверхности всеми шестью колесами, вонзившись в нее маленькими (0.5 см) шипами.

Следуя исторической правде, справедливо напомнить, что этот мини-марсо-



Натуральная копия защитной оболочки, в которой находился «Марс-Пасфайндер» в момент посадки на Марс.

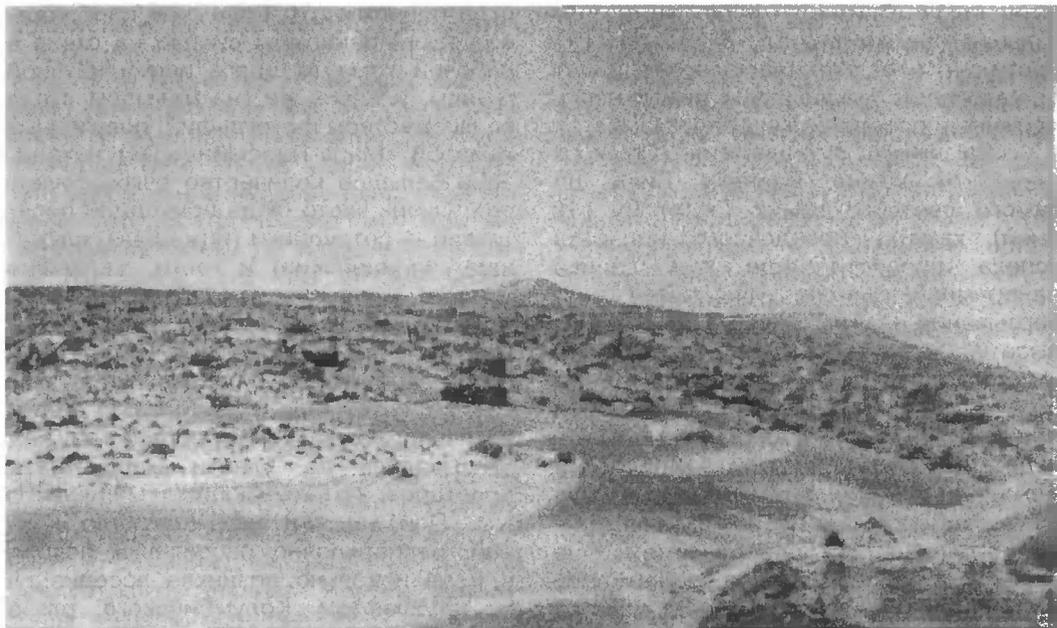
Фото Р. О. Кузьмина

ход появился на Марсе не первым. Более двадцати трех лет назад две советские автоматические станции «Марс-2» и «Марс-6» сели на поверхность планеты, доставив на своем борту по марсоходу. Но они так и не вышли из посадочных аппаратов и стали историческими памятниками первым попыткам землян высадить на поверхность Марса автоматические передвижные аппараты.

И как надлежит действовать первопроходцам, «Соджорнер» в том месте, где впервые «ступили» его колеса, провел измерения химического состава марсианского грунта. Успешно «переночевав» в двух «марсоходовских шагах» от края посадочного аппарата, он поутру сфотографировал место первых измерений, затем опробовал на прочность грунт и двинулся в направлении первой каменной мишени, которую уже успели назвать именем Барнакла Билла. И опять исторический момент — это был самый первый на всей поверхности Марса (а она как

никак равна поверхности всех континентов Земли) обломок марсианской породы, у которой впервые был измерен химический состав.

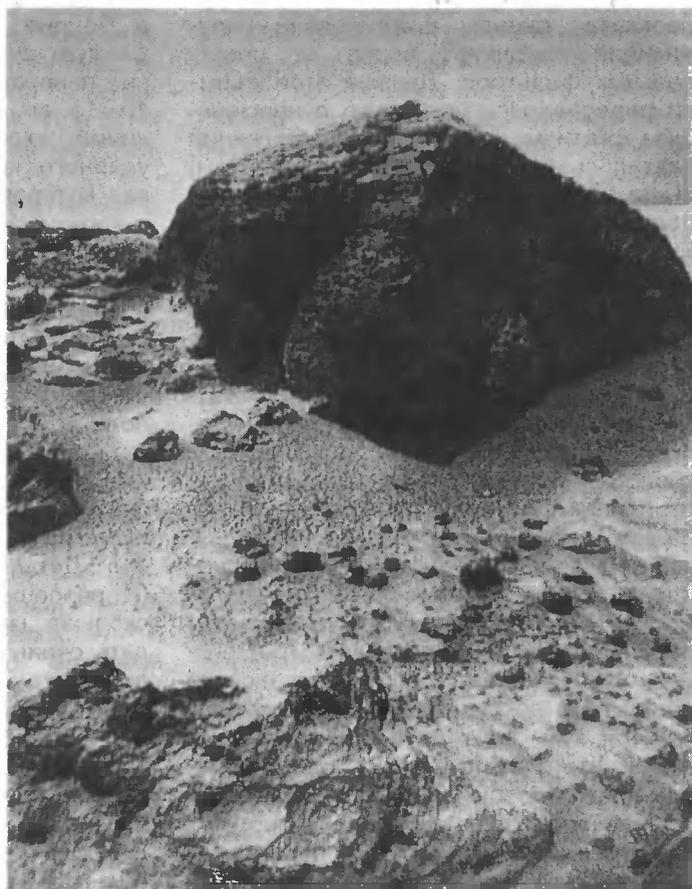
81 день «Соджорнер» направленно двигался вокруг посадочного аппарата и шаг за шагом изучал свойства и состав марсианского грунта и время от времени проводил точные измерения химического состава камней размером от нескольких десятков сантиметров до такого двухметрового гиганта, как уже известный камень Еги. С помощью телекамер «Соджорнера» были получены детальнейшие изображения (с лучшим разрешением до 1 мм) поверхности грунта, форм и текстуры камней. Время от времени марсоход поворачивался в сторону «родительского» аппарата и с помощью стереокамеры проводил его съемку. Затем «Соджорнер», забравшись на небольшую каменистую гряду, сфотографировал поверхность невидимой с посадочного аппарата депрессии, имеющей в поперечнике несколько десятков метров и покрытой системой дюн, на фоне которых опять же живописно виднелся холм Близнецы. Большое количество химических анализов камней, удаленных друг от друга, возможность «заглянуть в глаза» объекту



Дюнное поле, расположенное за грядой Сад камней и сфотографированное «Соджорнером».

«Портрет» камня Шимп — последнего объекта исследований «Соджорнера» на гряде Сад камней.

Фото НАСА



изучения с близкого расстояния, детальная съемка разных типов поверхности — все это, несомненно, дает предпочтение марсоходам перед неподвижными посадочными средствами.

За время путешествия «Соджорнера» от камня Барнакл Билл до самого светлого камня Скуби Ду (12 дней) камера посадочного аппарата успела провести еще два сеанса панорамной съемки. Так, после развертывания мачты камеры на полную высоту, была сфотографирована «Монстр-панорама» с использованием спектрозональной съемки, а на 8—10-й день — цветная «Галерея-панорама», отдельные части которой снимались в одно и то же время марсианских суток, дабы сохранить близкую геометрию освещения поверхности. Еще более подробная научная информация получена после многодневных сеансов панорамной съемки, когда оба «стереоглаза» камеры фиксировали окружающий ландшафт через 12 спектральных фильтров. Данные этой съемки передавались на Землю с наименьшим сжатием, и качество изображений оказалось (по детальности и четкости) выше предыдущих. Такая панорама получила название «Суперпанорама». Кроме того, при комбинации (по специальной методике) семи-восьми фильтров с обеих «глаз» камеры были получены изображения поверхности с суперразрешающей способностью. Обработку «Суперпанорамы» и трехмерную реконструкцию изображений провел Т. Паркер — один из ведущих геологов проекта «Марс-Пасфайндер», сторонник гипотезы существования на Марсе в прошлом древнего океана.

На основе «Монстр-панорамы» создана первая стереопанорама поверхности Марса. Используя специальные очки-фильтры, можно увидеть трехмерное изображение всего марсианского ландшафта вокруг посадочного аппарата. При этом зрительный эффект столь высок, что, кажется, стоит лишь «перешагнуть» нижнюю границу панорамы и вы уже отправитесь в пеший маршрут по каменистой и довольно пересеченной (за счет ложбин и гряд) марсиан-

ской поверхности. Огромное изображение такой панорамы висело на стене в рабочей комнате оперативной научной группы, и здесь же (на большом столе со множеством фотографий, полученных камерой «Марс-Пасфайндера») находилось большое количество очков-фильтров. Очень часто сюда приходили посетители — сотрудники (инженеры, служащие, полицейские) и гости, желавшие увидеть, как выглядит Марс вблизи. Как правило, когда очередная группа надевала «чудо-очки» и обращала свои взоры на панораму, раздавался общий возглас изумления и восторга. И действительно, глядя на стереопанораму, вы оказывались во власти марсианских просторов, захватывающих и манящих.

При взгляде на множество камней, беспорядочно рассеянных вокруг, у меня невольно возникла ассоциация с ландшафтом Колумбийского плато (Ephrata Fan) или Марсианских холмов в Долине Смерти в пустыне Махаве. Следует добавить, что часть видимых на панораме мелких камней (менее 10—15 см) с остроугольными очертаниями скорее всего выброшены из ударного кратера (диаметром 1.4 км), вал которого четко виден на горизонте в южном секторе изображения.

На панорамах также обнаружено много морфологических свидетельств современной активности золотых процессов. Это формы ветровой эрозии: дефляционные поверхности в виде участков остаточного гравия, золотые полосы с подветренной стороны и котловинки с наветренной стороны крупных и мелких обломков, а также формы золотой аккумуляции: ветровые наносы со знаками ярки и дюны.

Детальная съемка «Соджорнером» (с разрешением изображения до нескольких миллиметров) позволила сделать очень важное наблюдение. Оказалось, что поверхность многих камней имеет ячеистую и (или) бороздчато-желобчатую структуру, которая в земных условиях формируется в результате ветровой абразии — процесса, действующего подобно пескоструйному аппарату. Необходимым условием такого проявления служит наличие песчинок в ветро-

вом потоке. В зависимости от ориентировки ветрового потока относительно плоскости камня могут сформироваться либо ячеистая (при прямом ударе песчинок о камень), либо бороздчато-желобчатая (при косом ударе) текстуры. Это наблюдение вызвало непростой вопрос: откуда на Марсе мог взяться кварцевый песок? До недавнего времени считалось, что там в силу более примитивного (по сравнению с Землей) развития недр не могли сформироваться породы, богатые кремнеземом, одним из самых распространенных на Земле минералов. Однако уже самые первые измерения химического состава марсианских камней показали, что их состав скорее всего отвечает андезитовым породам, которые обогащены двуокисью кремния. Так, например, данные химического анализа камней Барнкл Билл и Шарк, пересчитанные по специальной методике в наиболее правдоподобные формулы минералов, показали, что они могут состоять из ортопироксенов, полевых шпатов и кварца с примесью окислов железа и титана. При этом доля кварца может составлять 12% объема минеральной смеси.

Если суммировать впечатления о геологии района посадки «Марс-Пасфайндера», основанные на анализе панорамных изображений (как с посадочного аппарата, так и с «Соджорнера»), то можно уверенно сказать следующее. Видимый вокруг «Марс-Пасфайндера» марсианский ландшафт скорее всего был сформирован в результате размыва отложений катастрофических потоков в завершающую стадию их активности. В последующий длительный период геологической истории планеты рельеф дельтовой равнины, образованной долинами Тиу и Арес, подвергался химическому и физическому выветриванию, ветровой переработке самого поверхностного слоя отложений. Тонкие эоловые наносы скорее всего не задерживаются надолго на одном месте, а под действием ветров мигрируют, время от времени переваливая через грядовый рельеф местности. Характер текстуры поверхности многих камней может

рассматриваться как морфологическое свидетельство активности на Марсе (в настоящее время или в недавнем прошлом) ветровой абразии. Обнаженный ветром светлый и более плотный подповерхностный материал (типа сцементированных корочек), встреченный вокруг посадочного аппарата, мог сформироваться в результате обогащения грунта солевыми минералами.

«Марс-Пасфайндер» проводил и астрономические наблюдения. Уже на третий день после посадки был сфотографирован меньший спутник Марса — Дэймос. Впервые с поверхности «родительской» планеты получены спектры отражения ее естественного спутника. В дальнейшем неоднократно проводились съемки и другого спутника — Фобоса. Результаты ночной съемки оказались полезными и для изучения свойств марсианской атмосферы. Что касается Солнца, то наблюдения за ним велись от восхода до заката при разных его высотах над горизонтом и азимутах относительно посадочного аппарата. При этом съемка Солнца осуществлялась через разные фильтры, изучались оптическая толща марсианской атмосферы, количество и размер пыли и водяного пара в ней. Восходы и закаты Солнца на Марсе — яркое зрелище, и камера «Марс-Пасфайндера», конечно, неоднократно запечатлела их. В момент заката исследовалось распределение пыли в атмосфере, которая служит существенным препятствием на пути солнечного света в разных цветовых областях спектра. Так, розово-красноватый цвет марсианского неба вызван поглощением солнечного света в голубой части видимой области спектра частицами пыли, а свет в красной области спектра рассеивается в небесном пространстве такими частицами. В земной атмосфере происходит обратная картина — в ней преимущественно рассеивается свет голубой части оптического спектра, что и придает ей голубой тон.

Съемочной группе проекта очень хотелось запечатлеть, как выглядит Земля в предрассветном небе Марса. И вот на 16-й день работы была предпринята попытка сфотографиро-

вать нашу планету. Однако, как часто случается при астрономических наблюдениях, помешали неблагоприятные погодные условия. Облака, состоящие из мелких кристалликов льда на пылевых частицах, полностью скрыли от «глаз» «Марс-Пасфайндера» (и к огромному сожалению от нашего взора) вид Земли. Такие облака розоватого оттенка формируются в ночной атмосфере Марса на высоте около 16 км и быстро исчезают в первых лучах Солнца.

Как и любой космический проект, настоящая миссия имела свой номинальный срок существования. В реальности «Марс-Пасфайндер» значительно «пережил» эти сроки и проработал 85 дней при активном функционировании всех его систем. Начиная с 28 сентября связь с аппаратом практически прекратилась из-за сбоя «отживших» свой срок энергетических систем. После многочисленных попыток связаться со станцией в начале ноября НАСА официально сделало заявление об окончании миссии. За срок своей работы эта станция передала на Землю около 2.6 млрд бит научной и технической информации, включая 16 000 изображений марсианской поверхности, полученных с посадочного аппарата, и 550 снимков, полученных камерами «Соджорнера». В настоящее время научный коллектив проекта проводит обработку и анализ этой информации. Уже появились первые публикации по предварительным данным — в журнале «Science» (5 декабря 1997 г.), а часть результатов докладывалась на научных конференциях. Однако, думается, наиболее важные научные анализы этой миссии появятся в печати не ранее середины 1998 г.

ЭСТАФЕТА ПРОДОЛЖАЕТСЯ

Не успели еще остыть впечатления от результатов работы «Марс-Пасфайндера», как в небе Красной планеты появилось уже другое творение рук

человеческих — американский космический аппарат «Марс-Глобал-Сервейер», который вышел на орбиту вокруг Марса 11 сентября 1997 г. В этот день «Соджорнер» еще продолжал трудолюбиво работать на небольшой каменной гряде в 10 м от посадочного аппарата, названной Садам камней. «Марс-Глобал-Сервейер» прибыл к Марсу, имея на своем борту четыре научных инструмента: ТЕС — термоэмиссионный спектрометр; МОЛА — высокоточный лазерный альтиметр, МОК — орбитальную камеру сверхвысокого разрешения до 1.5 м и магнитометр для исследования магнитного поля.

Первоначально планировалось, что после выхода «Марс-Глобал-Сервейера» на околомарсианскую орбиту в течение четырех месяцев будет формироваться основная круговая (полярная) орбита с высотой 250 км. Но еще в начале перелета станции к Марсу одна из солнечных панелей не смогла полностью раскрыться, и ее нештатное положение значительно затянуло время формирования основной орбиты, которое продлится до конца 1998 г. Тем не менее уже за первые два месяца облета планеты с «Марс-Глобал-Сервейера» получены десятки детальных снимков поверхности с разрешением 4.5 м, множество спектральных анализов состава поверхности и атмосферы в диапазоне длин волн 6—50 мкм и высокоточных топографических профилей планеты. Кроме того, в ходе первых магнитометрических исследований получены данные о существовании в коре аномалий остаточной намагниченности — «вмороженной» памяти о когда-то существовавшем магнитном поле. Накопление наблюдений о магнитных аномалиях в коре в дальнейшем поможет реконструировать раннюю историю марсианских недр. А пока пожелаем удачи этой интереснейшей миссии, перехватившей эстафету исследования Красной планеты от «Марс-Пасфайндера».

Экология в поисках универсальной парадигмы

А. М. Гиляров



Алексей Меркурьевич Гиляров, доктор биологических наук, профессор биологического факультета МГУ. Основные труды посвящены экологии планктона, биоразнообразию, а также истории науки. Автор учебника «Популяционная экология» (М., 1991). Неоднократно публиковался в журнале «Природа».

НАЧАЛО формирования экологии как самостоятельной науки пришлось на 20—40-е годы. Как бы завершением этого периода, уже рассмотренного нами ранее¹, можно считать появление в конце 50-х — начале 60-х годов первых учебников общей экологии, из которых, пожалуй, наиболее влиятельным стало второе издание книги Юджина Одума «Основы экологии» (так называемый «зеленый Одум»)². Авторы этих учебников должны были волей-неволей сформулировать ряд обобщений, образующих концептуальную основу новой учебной дисциплины, и хотя сейчас мы можем относиться к этим попыткам довольно критически, значение их ни в коей мере не следует преуменьшать.

С начала 60-х годов экология вступила в новую стадию своего развития, для которой характерен быстрый рост числа специалистов, вовлеченных в данную сферу, и быстрый рост объема первичных реальных данных. Круг поднимаемых вопросов и используемых при этом подходов был весьма разнообразен, прежде всего постольку, поскольку еще очень сильно проявляли себя традиции, определяемые спецификой изучения отдельных групп организмов или же отдельных типов местообитаний. Что же касается стремления найти некие общие закономерности, относящиеся к широкому кругу конкретных ситуаций, то оно было выражено довольно слабо.

По-прежнему широкое хождение имела вера в то, что теоретические

© А.М.Гиляров

¹ Гиляров А.М. Экология, обретающая статус науки // Природа. 1998. № 2.

² Odum E. Fundamentals of Ecology. 2nd ed. Philadelphia, Saunders. 1959.

обобщения в экологии возникнут сами собой, когда будет собрано и проанализировано достаточное количество первичного эмпирического материала. С конца 60-х годов многие исследователи стали возлагать особые надежды на быстро возрастающие возможности электронно-вычислительных машин. Порой казалось, что важнейшие установления этой науки, выраженные в виде системы уравнений и констант, вот-вот будут сформулированы. Однако время шло, а очевидных успехов не было.

Математические имитационные модели экосистем становились все более и более сложными и, как ни странно, более оторванными от реальности. Модели другого типа, апеллирующие не столько к эмпирическому материалу, сколько к системе чисто априорных представлений, тоже предлагались, но вскоре вся эта область (называемая иногда неопределенным термином «математическая экология») превратилась в своего рода «игру в бисер», замкнутую в себе и практически никак не связанную с деятельностью большинства экологов. Как справедливо заметил В.Гримм³, модельеры-математики, стремясь достичь обобщений за счет «принесения в жертву деталей» (процедура, неизбежная при любом моделировании), все чаще предлагали экологам модели, которые оказывались в принципе непроверяемыми.

Чисто количественное накопление эмпирического материала (в том числе и в рамках Международной биологической программы, нацеленной в значительной мере на получение количественных характеристик превращения энергии в различных типах экосистем) не приводило к возникновению нового «качества», к распознаванию неких общих принципов, в соответствии с которыми организована жизнь на уровне популяций, сообществ и экосистем. Экология оставалась описательной, констатирующей наукой, и хотя в ходе отдельных исследований порой удава-

лось выяснить цепь причинно-следственных зависимостей между отдельными процессами, в целом объяснительное начало в экологии 60-х годов было развито еще слабо. Впрочем, недостаточная оформленность экологии, ее гетерогенность и отсутствие строгих общепризнанных канонов на самом деле способствовали определенному свободомыслию и появлению нестандартных подходов, получивших дальнейшее развитие уже в 70-е годы.

СВЕЖИЙ ВЗГЛЯД РОБЕРТА МАКАРТУРА

Заметный прогресс на пути создания экологической теории связан с развитием в 60—70-х годах подхода, который, может быть, не совсем точно именуют «гипотетико-дедуктивным» или даже «априорным», противопоставляя его господствовавшему ранее «апостериорному».

Если «апостериорный» подход в самом грубом приближении можно охарактеризовать как следование принципу: «Давайте собирать материал, а там посмотрим, что из этого получится», — то «априорный» подход заключался в том, чтобы, подметив какую-то закономерность в наблюдаемых явлениях, выявив их общий «паттерн» (повторяющуюся устойчивую структуру или регулярность), предложить гипотезу и построить модель, объясняющую лежащий в его основе механизм, а затем проверить соответствие предсказаний модели реальному положению вещей. При этом обычно предлагались альтернативные, исходящие из других предположений, гипотезы и соответственно строились иные варианты модели, результаты которых также сравнивались с тем, что наблюдается в природе. Ключевой момент — сопоставление именно с эмпирическими данными, и в этом, пожалуй, наиболее серьезное отличие «априорного подхода 70-х годов» от подхода В.Вольтерры и А.Лотки, который, также будучи априорным, концентрировался скорее на принципиально возможном, чем на действительно наблюдаемом.

³ Grimm V. // Ecological Modelling. 1996. V.75/76. P.641—651.

У истоков априорного подхода стоял целый ряд экологов, но лидирующее положение среди них бесспорно занимал американский исследователь Роберт Макартур. Получив в 1953 г. диплом о математическом образовании и находясь в поисках применения своим силам, он сблизился с кругом молодых биологов — участников семинара Дж.Эвелина Хатчинсона в Йельском университете. Именно Хатчинсон с энтузиазмом поддерживал первые работы Макартура и рекомендовал их для опубликования в трудах Национальной академии США, что безусловно способствовало укреплению авторитета молодого ученого⁴. Дискуссии, возникавшие на семинарах Хатчинсона, показали важность постановки экологами таких задач, которые, с одной стороны, не были бы чрезмерно сложными (т.е. относились бы к категории реально **решаемых**), а с другой — касались бы явлений достаточно распространенных и поэтому представляли бы **общий интерес**.

Одна из первых работ Макартура была посвящена анализу пропорций, в которых соотносятся численности разных видов в сообществе. Проблема эта была известна и раньше, но решение ее обычно сводили к поиску статистического (математического) распределения, наилучшим образом описывающего как можно более широкий набор эмпирических данных. Макартур пошел другим путем. Он предложил несколько моделей, исходя из разных предположений о наличии (или отсутствии) взаимодействий видов, рассчитал, каковы должны быть соотношения численностей видов в каждом конкретном случае, а затем сравнил результаты расчетов с имевшимися данными полевых учетов. Таким образом, на первое место выдвигалась задача не столько **описа-**



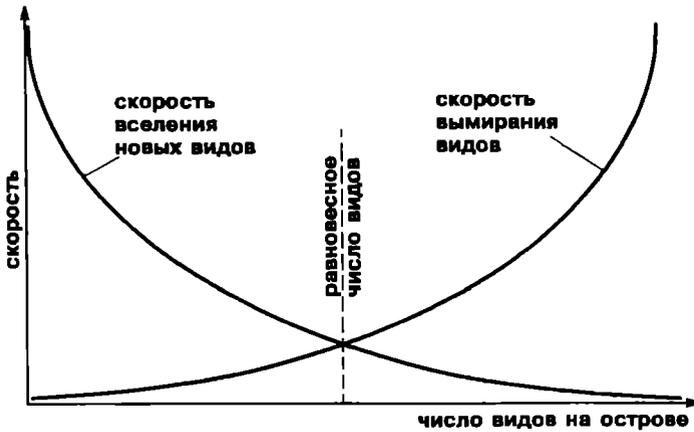
Роберт Макартур (1930—1972), выдающийся американский эколог, автор многих работ в области теоретической экологии, сторонник гипотетико-дедуктивного подхода.

ния распределения, сколько возможного **объяснения** тех механизмов, в результате которых и формируется то или иное распределение.

В частности, предложенная Макартуром модель «разломанного стержня» предполагала, что численности разных видов в сообществе соотносятся друг с другом как длины кусочков, на которые распадется стержень, если его разломать в случайных местах. При этом длина всего стержня соответствовала общей емкости биотопа (суммарной численности всех видов), а отдельные его части — объемам ниш (численностям) разных видов. Поскольку допускалось, что ниши соприкасаются, но не перекрываются, изменение численности любого вида всегда должно было сказываться на численности других видов.

Согласно двум другим, альтернативным моделям, ниши перекрывались или даже не соприкасались (в последнем случае биотоп был не заполнен до конца). Проверка соответствия предсказаний эмпирическим данным показала, что именно вариант соприкасающихся, но неперекрывающихся ниш

⁴ Статьи в «Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.» печатаются по представлению членов академии без рецензирования, и в данном случае это было очень важно, так как работы Макартура в силу их пионерского характера имели большой шанс быть отклоненными рецензентами.



Согласно модели Макартура и Уилсона, предложенной ими в теории островной биогеографии, скорость вселения новых видов на остров по мере роста числа видов, уже присутствующих в сообществе, уменьшается, а скорость их вымирания увеличивается. Точка пересечения кривых соответствует равновесному числу видов на данном острове.

(собственно модель «разломанного стержня») наиболее соответствовала реальности. И хотя в дальнейшем эта модель была подвергнута серьезной критике, а сам автор от нее отказался, логика использованного подхода получила широкое распространение.

Наряду с теоретическими исследованиями видовой структуры сообществ Макартур вел и чисто натуралистическую работу, изучая взаимоотношения пяти мелких видов насекомоядных птиц рода *Dendroica* (внешне похожих на наших славков, но относящихся к другому семейству). Будучи очень близкими, эти виды обитали в хвойных лесах северо-восточной части США бок о бок и, казалось, нарушали принцип конкурентного исключения Вольтерры—Гаузе, согласно которому два экологически близких вида (занимающих одну нишу) не могут устойчиво сосуществовать в одном биотопе. Наблюдая в течение многих часов за поведением птиц в природе, Макартур выяснил⁵, что разные виды *Dendroica* добывают корм в разных частях кроны дерева, да, кроме того, различаются местами гнездования и характером динамики популяций. Работа эта была признана в США лучшей экологической публикацией года и удостоена специальной награды.

В течение последующего десятилетия Макартур чрезвычайно интенсив-

но работает в области чистой теории, одновременно анализируя эмпирический материал и стремясь выявить те или иные «паттерны». Так, он показывает четкую зависимость видового разнообразия сообществ птиц от сложности ярусной структуры растительности, исследует теоретически (совместно с Э.Пианкой) проблему оптимального выбора организмом мест питания в гетерогенной (пятнистой) среде и разрабатывает представление о допустимости взаимного перекрывания ниш конкурирующих видов.

В результате сотрудничества Макартура с замечательным натуралистом, знатоком муравьев, Эдвардом Уилсоном рождается небольшая, но очень яркая по идеям и блестяще написанная книга «Теория островной биогеографии»⁶. Основное внимание в ней также обращено на выяснение общих принципов формирования островных сообществ, например таких, как зависимость числа видов, сумевших колонизировать остров, от его площади или же соотношение скорости заселения острова видами и скорости вымирания видов (оба процесса зависят от числа видов, уже имеющих-ся на острове).

О сути подхода, использованного при анализе островных сообществ (а такие сообщества фактически представляют собой эксперименты, постав-

⁵ MacArthur R. // Ecology. 1958. V.39. P.599—619.

⁶ MacArthur R., Wilson E.O. The Theory of Island Biogeography. Princeton; N.J., 1967.

ленные самой природой), Макартур очень точно написал через несколько лет в своей книге «Географическая экология»:

«Экологи, как и физики, ориентированы скорее на механизмы (mechanism oriented), тогда как палеонтологи и большинство биогеографов — на историю. Они склонны замечать в природе разные вещи. Исследователь, ориентированный на историю, часто обращает внимание на различия между явлениями, поскольку именно различия могут пролить свет на их происхождение. Он может, например, спросить, почему в тропиках Нового Света встречаются туканы и колибри, а в соответствующих широтах Старого Света — птицы-носороги и нектарницы. Человек, склонный искать механизмы, скорее удивится тому, что колибри и нектарницы так похожи, хотя у них и разные предки. Он увидит сходства между явлениями, и это поможет обнаружить регулярности»⁷.

Книга «Географическая экология» стала последней работой Макартура. Она была написана очень быстро, всего за несколько месяцев, когда он уже знал о диагнозе своей тяжелой, оказавшейся неизлечимой, болезни. Скончался Макартур от рака почки, когда ему было всего 42 года.

ПОПЫТКА ВСМОТРЕТЬСЯ В РЕАЛЬНОСТЬ

Гипотетико-дедуктивный подход получил бурное развитие в экологии в 70-х — начале 80-х годов. Представление о том, что каждое полноценное экологическое исследование должно содержать четко сформулированную гипотезу, достаточно прочно укоренилось в научном сообществе. Однако по мере того, как исследователи все чаще пытались использовать гипотетико-дедуктивный подход, становились очевидными и те трудности, с которыми им приходилось сталкиваться.

Во-первых, оказалось, что в эко-

логии почти невозможно сформулировать четкие нуль-гипотезы, аналогичные тем, что хорошо известны из математической статистики. Конструируя нуль-гипотезу, мы должны представить себе ситуацию, когда предполагаемого процесса не существует. Но как применить такую логику при оценке, скажем, роли межвидовой конкуренции в формировании структуры сообществ? Ведь практически невозможно представить себе сообщество, про которое можно было бы уверенно сказать, что оно сложилось без какого-либо участия конкуренции.

Во-вторых, многие предполагаемые теоретические модели опирались на практически не проверяемые допущения, а сами были настолько усложнены математически, что просто не воспринимались большинством экологов-практиков.

В-третьих, за процессом создания новых гипотез, отраженных в соответствующих моделях, не успевали гораздо более трудоемкие полевые и лабораторные исследования, результаты которых могли бы подтвердить или опровергнуть (что, возможно, еще важнее) положения, выдвигаемые теоретиками.

В-четвертых, постепенно стало выясняться, что число очевидных паттернов, выявляемых в ходе эмпирических исследований и служащих основой для конструирования гипотез, довольно ограничено. В то же время было показано, что порой простые, сугубо детерминистские модели некоторых экологических процессов (например, саморегуляции численности популяций), будучи реализованы на числовых примерах, могут давать такую сложную картину динамики, которая на взгляд не отличима от чисто стохастической. Отсюда следовало, что и в природе простые механизмы вовсе не обязательно приводят к легко трактуемым, понятным для исследователя, результатам.

Все эти обстоятельства безусловно способствовали тому, что интерес к гипотетико-дедуктивному подходу стал ослабевать. Но еще более важную

⁷ MacArthur R. Geographical Ecology (Patterns in the Distribution of Species). N.Y., 1972.

роль сыграло то, что в экологии все большее распространение стали получать исследования, обращенные не столько к самим паттернам (результатирующим структурам), сколько к процессам, их определяющим. Основной упор делался при этом непосредственно на физиологические и поведенческие особенности организмов. Этот новый подход, отчасти противостоявший идеологии гипотетико-дедуктивного, иногда называли «механистическим»⁸, подчеркивая тем самым значение, придаваемое исследованию именно механизмов.

Пожалуй, наиболее заметный вклад в его развитие внес американский эколог Дэвид Тилман, изучавший процесс конкуренции сначала среди микроскопических планктонных водорослей, а затем и среди высших наземных растений⁹. Очень важный параметр, широко использовавшийся Тилманом в этих исследованиях, — пороговая концентрация лимитирующего ресурса, т.е. такое содержание его в среде, которого хватает на то, чтобы популяция поддерживала свое существование, не увеличивая, но и не уменьшая свою численность. Представление о пороговой концентрации лимитирующего ресурса уже развивалось ранее микробиологами, но именно Тилман применил эту величину для предсказания исхода конкуренции между отдельными видами и анализа целого сообщества.

Хотя теоретики (в том числе и Макартур) раньше уже приходили к заключению о том, что экологически близкие виды могут сосуществовать только если они ограничены разными ресурсами, экспериментально это было четко показано именно Тилманом. Проводя опыты с монокультурами двух диатомовых водорослей *Asterionella formosa* и *Cyclotella meneghiniana*, он выяснил, что *Asterionella* может

существовать при более низкой концентрации фосфора, чем *Cyclotella*, тогда как последний вид может довольствоваться более низкой концентрацией кремния. При совместном культивировании обоих видов содержание как фосфора, так и кремния в среде снижается до величин, определяемых их порогами. При этом вытеснения одного вида другим не происходит, поскольку *Asterionella* лимитирована фосфором, а *Cyclotella* — кремнием.

В опытах с шестью видами злаков, развитие которых ограничивалось искусственно создаваемой нехваткой азота, Тилман для каждого вида отдельно определил пороговую концентрацию этого элемента, а на основании полученных данных предсказал исход конкуренции между ними, когда они выращивались парами — во всех возможных комбинациях. В тех случаях, когда разность пороговых концентраций была велика, результат конкуренции всегда соответствовал ожидаемому — побеждал тот вид, у которого ниже пороговая концентрация. Если же пороговые концентрации различались незначительно, предсказать исход конкуренции было гораздо труднее.

ЖИЗНЕННЫЕ СТРАТЕГИИ

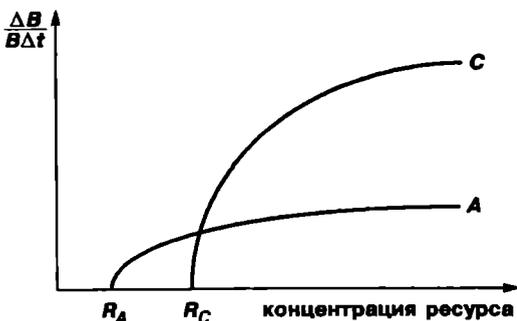
Во многих экологических исследованиях, развернувшихся в рамках популяционного подхода в 80-х годах, особое внимание стали уделять ограничениям, накладываемым на существование организмов теми или иными их физиологическими, морфологическими и поведенческими особенностями. Период восхищения адаптациями, возможности которых казались почти безграничными, сменился отчетливым пониманием того, что за каждое усовершенствование организма приходится чем-то **расплачиваться** и, следовательно, по каким-то критериям становиться менее совершенными.

Например, те виды злаков, которые в упомянутых опытах Тилмана отличались очень низкой пороговой

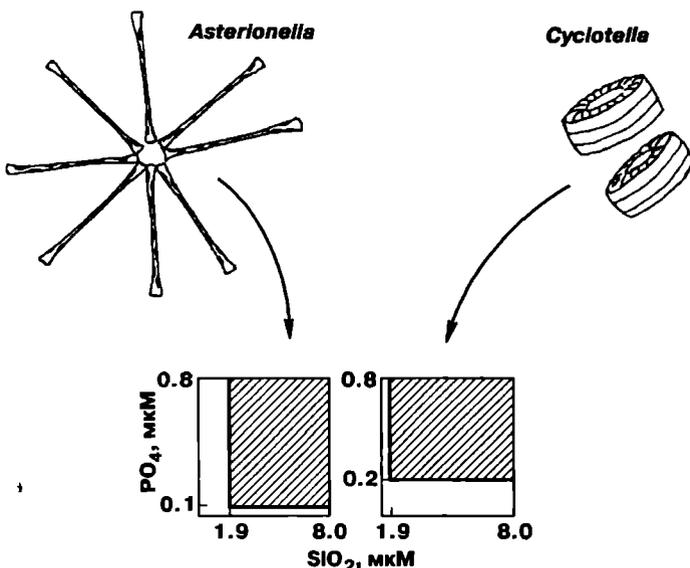
⁸ Schoener T.W. // American Zoologist. 1986. V.26. P.81—106.

⁹ Tilman D. Resource Competition and Community Structure. Princeton; N.Y., 1982; Tilman D. Dynamics and Structure of Plant Communities. Princeton; N.Y., 1988.

Изменение удельной скорости прироста биомассы ($\Delta B/B\Delta t$) двух видов растений (A и C) в зависимости от концентрации лимитирующего ресурса. Точка пересечения каждой кривой с осью абсцисс (R_A или R_C) соответствует пороговой концентрации ресурса — т.е. такой, при которой популяция еще может существовать. Обратите внимание на то, что вид A, характеризующийся более низкой пороговой концентрацией, при обилии ресурса растет медленнее, чем C, для которого пороговая концентрация выше. Хотя это только схема, она соответствует ситуации, часто встречающейся в природе.



Экспериментально определенными областями низких концентраций двух незаменимых ресурсов — фосфора и кремния, при которых возможен рост популяций диатомовых водорослей *Asterionella formosa* и *Cyclotella meneghiniana*. Эти виды могут сосуществовать, поскольку для одного из них (*Asterionella*) ниже пороговая концентрация фосфора, а для другого (*Cyclotella*) — кремния. При совместном культивировании оба вида снижают концентрацию лимитирующих ресурсов, и в результате *Asterionella* оказывается ограниченной кремнием, а *Cyclotella* — фосфором.



концентрацией лимитирующего элемента, при обилии его в среде росли значительно медленнее, чем виды, характеризовавшиеся более высокими пороговыми концентрациями. Подобный результат был вполне понятен: жизнь растения при дефиците в среде какого-то компонента минерального питания требует прежде всего развития мощной корневой системы — всасывающего аппарата. Однако чем больше имеющихся в распоряжении растения энергии и вещества тратится на развитие корней, тем меньше остается на надземные органы.

Между отдельными функциями организма существует как бы конкуренция за ресурсы; и это неизбежно приводит к возникновению определенных отрицательных корреляций (назы-

ваемых в англоязычной литературе труднопереводимым на русский язык словом «trade-off»). Так, например, растение может продуцировать небольшое количество крупных плодов, снабженных большим запасом питательных веществ, или же продуцировать много мелких плодов. Сочетать же крупный размер плодов с их большим количеством нельзя. Аналогичным образом, растение не может очень быстро расти и в то же время образовывать различные приспособления, надежно защищающие его от истребления растительноядными животными. Речь идет не только о шипах, толстой кутикуле и прочих образованиях, но и о накоплении в тканях веществ, делающих растения несъедобными и даже ядовитыми.

Подобные энергетические и морфо-функциональные ограничения, как и следующие из них возможности разного решения определенных проблем, конечно, были известны и раньше. Так, еще в 30-х годах об этом писал наш соотечественник Леонтий Григорьевич Раменский, разрабатывая представления о разных эколого-ценотических стратегиях (или, как он говорил, жизненных типах) растений. Однако только с 70-х годов в экологию вошел эволюционный, а точнее — дарвиновский подход. Кстати сказать, именно в это время появилась и классификация жизненных стратегий растений, разработанная английским экологом Дж. Филипом Граймом. Выделенные им три типа стратегий (конкуренты, стресс-толеранты и рудералы) практически совпали с теми, которые под другими названиями (виоленты, пациенты и эксплеренты) были предложены Раменским почти на шестьдесят лет раньше.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МАСШТАБЫ

Сталкиваясь в своей конкретной работе со множеством структур и процессов, экологи, конечно же, постоянно ощущали потребность в логической схеме, которая устанавливала бы соответствия между отдельными изучаемыми явлениями и, упорядочивая накапливающиеся сведения, позволяла бы надеяться на то, что в будущем будет разработана теория, дающая единую основу для всей этой области знаний. По-видимому, сейчас еще трудно судить о том, насколько реально подобная схема, однако в качестве возможной предпосылки ее создания можно указать на растущий интерес исследователей к проблеме соотношения **масштабов**, в которых реально разворачиваются те или иные экологические события. Проблема эта имеет ряд аспектов, из которых мы укажем только несколько.

Во-первых, очевидно, что для разных организмов масштабы, характеризующие динамику их популяций во времени и распределение в простран-

стве, могут быть совершенно разными (хотя бы в силу различий в размерах)¹⁰. Однако жизнь разных видов, протекающая как бы в разном пространстве—времени, вовсе не исключает их прямого взаимодействия (примером могут быть насекомые и питающиеся ими насекомоядные птицы). Описание же таких взаимодействий ставит перед исследователями нелегкую задачу установления сопряженности пространственно-временных шкал, присущих разным организмам.

Во-вторых, приуроченность разных организмов к разным масштабам пространства—времени может рассматриваться как свидетельство довольно «мягкой» (а не жесткой детерминистской) организации сообществ, экосистем, а возможно и биосферы в целом. Отсюда — значительные репарационные (восстановительные) возможности живой природы. И отсюда же — принципиальная неверность утверждений, будто бы в сообществах и экосистемах все компоненты между собой так тесно взаимосвязаны, что стоит только затронуть один из них, как это неизбежно отразится на всех других.

В-третьих, один вид может изучаться в разных масштабах. Более того, исследователь должен отдавать себе отчет в том, что выявленная им картина всегда представляет собой результат взаимодействия масштаба, использованного им самим (режим взятия проб и т.п.), и масштабов, в которых протекают те или иные природные процессы.

В-четвертых, само физическое пространство, в котором развиваются популяции, обладает определенной структурой, устроенной по иерархическому (точнее — фрактальному) принципу. Так, например, какой-то участок поверхности ствола дерева может показаться довольно ровным для крупного

¹⁰ Это различие можно продемонстрировать следующим простым примером. За одно поколение слонов успевает пройти 10⁵ поколений инфузорий. Для сравнения укажем, что за все время существования человека как биологического вида *Homo sapiens* такого числа поколений еще не прошло.

жука-оленья, но для мелких низших насекомых (например, коллембол) тот же участок может выглядеть как чрезвычайно сложный рельеф, с глубокими оврагами, гротами, утесами и т.п. За счет этих «неровностей рельефа» в распоряжении мелких насекомых обычно находится большее реальное пространство, чем в распоряжении крупных.

В-пятых, процессы экосистемные, т.е. связанные с циклами биогенных элементов или потоками энергии, образуют свою иерархию, которая может определяться чисто физическими процессами. Примерами могут быть: падение старого, подгнившего дерева в лесу и образование маленькой полянки (окна) с другим световым режимом и другой растительностью; перемешивание водной толщи озера сильным ветром и перенос биогенных элементов из глубинных слоев к поверхности; пожар в саванне, инициирующий начало новой сукцессии растительности и т.п.

По-видимому, сейчас еще нет оснований утверждать, что представление об иерархии масштабов, в которых происходят те или иные события, затрагивающие популяции, сообщества или экосистемы, есть некая новая универсальная парадигма экологии, однако это безусловно важный шаг на пути теоретического осмысления не только того, что возможно в принципе, но и того, что реально наблюдается.

CODA

Рассматривая развитие физики, Виктор Вайскопф как-то заметил, что путь, которым следует наука в XX в., определился примерно пятьсот лет назад, когда ученые «вместо того, чтобы устанавливать сразу всю истину и объяснять целиком Вселенную», попытались «найти отдельные истины малого масштаба, касающиеся некоторых поддающихся определению и должным образом выделенных групп явлений»¹¹. Именно тогда радикальным

образом изменился характер постановки проблемы. Отказавшись от общих вопросов типа: из чего состоит материя? как возникла Вселенная? в чем сущность жизни? — ученые стали спрашивать о вещах более конкретных: как падает предмет? как вода течет по трубе? И если раньше на общие вопросы они получали частные ответы, то задавая частные вопросы, они неожиданно стали получать общие ответы.

Сказанное по поводу физики в значительной степени приложимо и к экологии, с той лишь разницей, что подобные превращения начали происходить в ней на протяжении века двадцатого. Начав с очень общих вопросов и попыток установить сразу универсальные правила и соотношения, претендующие на статус «законов» (похожих на те, что были известны для физики), экологи пришли к необходимости ставить частные разрешимые задачи. И хотя само по себе решение каждой отдельно взятой задачи, как правило, не приводило к каким-либо крупным обобщениям, в своей совокупности множество ответов на конкретные вопросы давало реальное представление о тех аспектах устройства живой природы, которые призвана изучать экология. В качестве же важнейшего достижения последних десятилетий безусловно следует считать разработку (отнюдь не закончившуюся и в настоящее время) самой методологии, позволившей уверенно выяснять отдельные истины малого масштаба.

Живой облик планеты оказался познаваем, причем познание это не ограничивалось описанием, констатацией в духе естественной истории, а сопровождалось **объяснением**, которое в свою очередь соответствовало тому, что уже было достигнуто в других областях биологии (прежде всего в эволюционистике, генетике, физиологии), а также в других науках (например, в физике и математике). Объяснительное начало стало как бы императивом современной экологии, а описание, в том числе дополненное

¹¹ Вайскопф В. Физика в двадцатом столетии. М., 1977. С.256.

количественными оценками и даже имитационными моделями, все чаще рассматривалось только как начальный этап работы.

Множество конкретных частных истин постепенно формировали представление о целом. Это целое оказалось гетерогенным, стохастичным и не всегда предсказуемым. Ряд теоретических представлений, казавшихся очень важными в 20—30-х годах, пришлось отбросить, поскольку это были чисто умозрительные конструкции, порой даже заимствованные из мифологии (например, идея «природного равновесия»). Оказалось также, что в экологии не может быть в принципе модельных объектов, аналогичных *Escherichia coli* биохимиков или дрозофиле генетиков.

По-видимому, экологическая теория сможет охватить существующую в природе реальность, только когда перестанет трактовать громадное разнообразие ситуаций, в которых оказы-

ваются организмы, популяции, сообщества и экосистемы, как некий «шум», мешающий выявлению наиболее существенных закономерностей, и будет рассматривать его как основной предмет своего изучения и важнейший источник информации. При всей сложности положения, в которое экология поставлена своими собственными задачами, успехи ее методологии (а это, наверное, главный результат заканчивающегося столетия) позволяют смотреть в будущее с достаточным оптимизмом, тем более что разнообразие сложившихся конкретных ситуаций (напоминающих порой те, что возникают на шахматной доске) вовсе не исключает наличия довольно ограниченного набора «правил игры».

Автор признателен Российскому гуманитарному научному фонду, поддержавшему данное исследование (грант 96-03-04094а).

Докембрийские предтечи «пионеров суши»

М. Б. Бурзин



Михаил Борисович Бурзин, научный сотрудник лаборатории докембрийских организмов Палеонтологического института РАН. Область научных интересов — микропалеонтология докембрия. Первым обнаружил древнейшие водные грибы и нитчатые серные бактерии в верхневендских отложениях Русской платформы. В «Природе» опубликовал статьи: «Древнейшие организмы — источник нефти на Русской платформе?» (1996. № 2); «Зачем шиты докембрийскому фитопланктону?» (1997. № 2).

ОБЩЕИЗВЕСТНО, что один из важнейших этапов в развитии биосферы — выход жизни на сушу. Сегодня именно наземные экосистемы заключают большую часть живой биомассы и именно они определяют газовый состав атмосферы, а тем самым и климат Земли. Почти 150 лет палеоботаники изучают раннюю историю высшей наземной растительности — основы наземных экосистем, и в результате древнейшие этапы ее становления уже достаточно хорошо просматриваются¹. Но за последние годы появились новые данные, однако они не меняют целиком ранее сложившейся картины возникновения растительности на суше, а лишь уточняют и детализируют ее.

Ясно, что становлению высшей наземной растительности должно было предшествовать развитие наземной микробной жизни — только она и была способна превратить коры выветривания в прпочвы, в частности насытить их столь необходимыми для высших растений растворимыми соединениями азота. Однако ископаемая летопись наземных микробов изучена до сих пор крайне слабо. Одна из причин этого — плохая сохранность ископаемых органических остатков в наземных отложениях (в основном это коры выветривания). Что же касается бассейновых отложений, то здесь очень трудно отличить остатки водорослей и микробов, которые обитали на суше и были снесены в воду, от тех, что развивались в водной среде. Попробуем, несмотря на скудость ископаемой летописи, отыскать те предпосылки в микробном мире, которые создали условия для освоения суши высшими растениями. Но прежде рассмотрим, какой

© М.Б.Бурзин

¹ См. на эту тему серию статей С.В.Мейена в «Природе»: Предки высших растений. 1979. № 11. С.40—47; Флорогенез и эволюция растений. 1986. № 11. С.47—57; Первые «сухопутные» растения. 1989. № 5. С.17—20.

она была в докембрии, когда сухопутной жизни еще не существовало.

ОСОБЕННОСТИ ДОКЕМБРИЙСКОЙ СУШИ

Есть все основания полагать, что рельеф безжизненной докембрийской суши мог существенно отличаться от привычного нам современного рельефа. Определялось это в значительной степени именно отсутствием наземной растительности и почв. Как известно, почва — это закрепленные корнями растений рыхлые осадки, содержащие органические вещества и специфическое население. Без наземной растительности рыхлые осадки на суше не задерживаются, они легко могут смываться поверхностными водами, размываться, давая овраги, или перевеваться ветром. Конечно, сами корни растений способствуют эрозии твердых грунтов, а выделяемые гуминовые кислоты усиливают химическое выветривание минералов. Но не закрепленные корнями коры выветривания подвергаются резкому усилению (на порядки) эрозии. В результате приподнятая суша превращается в рельеф с поверхностью, наклоненной всего на 1—3°, поэтому текучие воды уже не могут сносить твердые частицы.

Известный отечественный палеонтолог А.Г.Пономаренко считает, что при отсутствии наземной растительности ландшафт докембрийской суши мог быть тем пустыннее (т.е. непригоднее для жизни), чем больше выпадало осадков (в отличие от современных пустынь): вода активной размывает горные породы и сносит разнообразные рыхлые отложения, тогда как ветер в большей степени лишь перевевает, а не переносит их². Без почв не могли существовать и реки, ибо не было важнейшего водного резервуара суши — почвенных и грунтовых вод. Вместо рек существовали или временные потоки, которые то обводнялись, то пересыхали, или временные протоки между внутриконтинентальными бассейнами.

Только вечная мерзлота могла обеспечивать в течение жаркого сезона поступление вод и существование относительно постоянных потоков.

В таких условиях должна была резко усиливаться эрозия, независимо от того, понижался уровень моря или поднималась суша. Кратковременно, но интенсивно терригенный материал выносился с суши, и она превращалась в широкие, плоские равнины, слабо наклоненные к морю, которые перемежались останцами более прочных кристаллических пород. Повышение уровня моря неизбежно влекло за собой образование обширных мелководных бассейнов непостоянных очертаний³. Даже небольшие вариации уровня моря должны были приводить к грандиозным по площади изменениям зеркала вод. Такова была сцена, на которой, вероятно, разыгрывались первые акты действия, приведшего обитателей водной стихии к выходу на сушу.

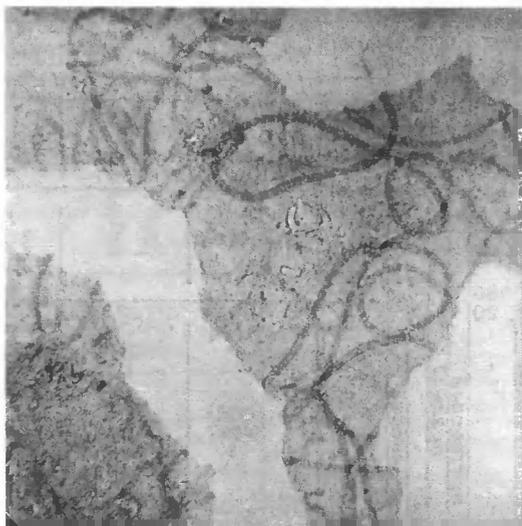
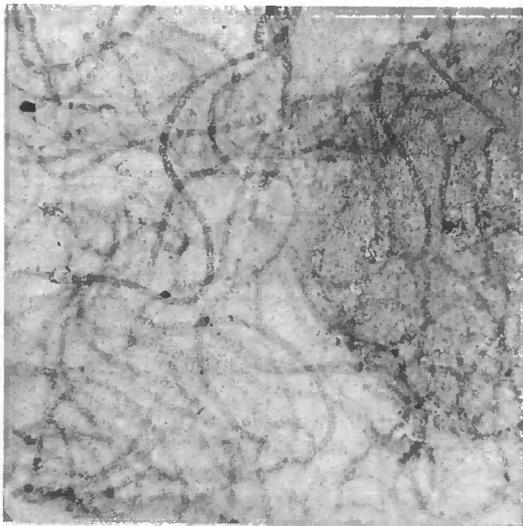
ЗАЩИТА ОТ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Первое, с чем неизбежно столкнулись организмы на суше, — воздействие прямой солнечной радиации, в том числе и коротковолновой, от которой их предохраняла вода. Способом защиты от избытка инсоляции, а стало быть, древнейшим знаком если не наземности, то обитания в условиях крайнего мелководья, можно считать интенсивную окраску остатков зоэнтофизалесовых цианобактерий (синезеленых водорослей), обнаруженных В.Н.Сергеевым в среднем рифее Северо-Восточной Сибири⁴. В современных цианобактериальных матах подобная окраска обеспечивается желто-коричневым пигментом — сцитонемином, который вырабатывается в ответ на избыточное солнечное облучение. Благодаря этому пигменту снижается интенсивность света, попадающего на тилакоиды — мембранные структуры, которые содержат пигмент и где осуществляется оксигенный фотосинтез.

² Пономаренко А.Г. Основные события в эволюции биосферы // Пробл. доантропогенной эволюции биосферы. М., 1993. С.15—25.

³ Мейен С.В. Основы палеоботаники. М., 1987. С.305—306.

⁴ Сергеев В.Н., Нолл А.Х., Колосова С.П., Колосов П.Н. // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1994. Т.2. № 1. С.23—38.



Центральная часть (слева) и край дерновины, образованной нитями цианобактерий *Leioirichoides* ex gr. *L. turicensis*. Нити окружены мощной фоссилизированной слизью, которая, возможно, служила адаптацией к защите от высыхания. Более интенсивно окрашенное тело — сапропелизованный остаток планктонной оболочки. На краю дерновины видно, что нити составляют единое целое с пленкой и обрываются вместе с ней. Увел. 80.

Здесь и далее фото автора

Любопытно, что, судя по летописи микрофоссилий, в рифее никаких специфических организмов в максимально мелководных зонах не было. Мелководья отличались от более глубоководных зон лишь явно меньшим разнообразием форм цианобактерий⁵. Как это ни странно, во второй половине рифея принципиальные различия между водным и предполагаемым наземным микробным населением отсутствовали. По мнению И.Н.Крылова и Г.А.Заварзина, часть известных рифейских микробиот была предствалена сообществами, обитавшими в полуводных-полуназемных условиях⁶. Этим, видимо, и объясняется необычный феномен — упомянутое сходство цианобактериального населения. Можно предположить, что в рифее не существовало четкой границы между бас-

сейном и сушей, а была обширная зона перехода, отдельные участки которой отличались лишь степенью или длительностью увлажнения. В таких условиях у цианобактерий механизмы защиты от избытка солнечной радиации скорее всего уже были развиты.

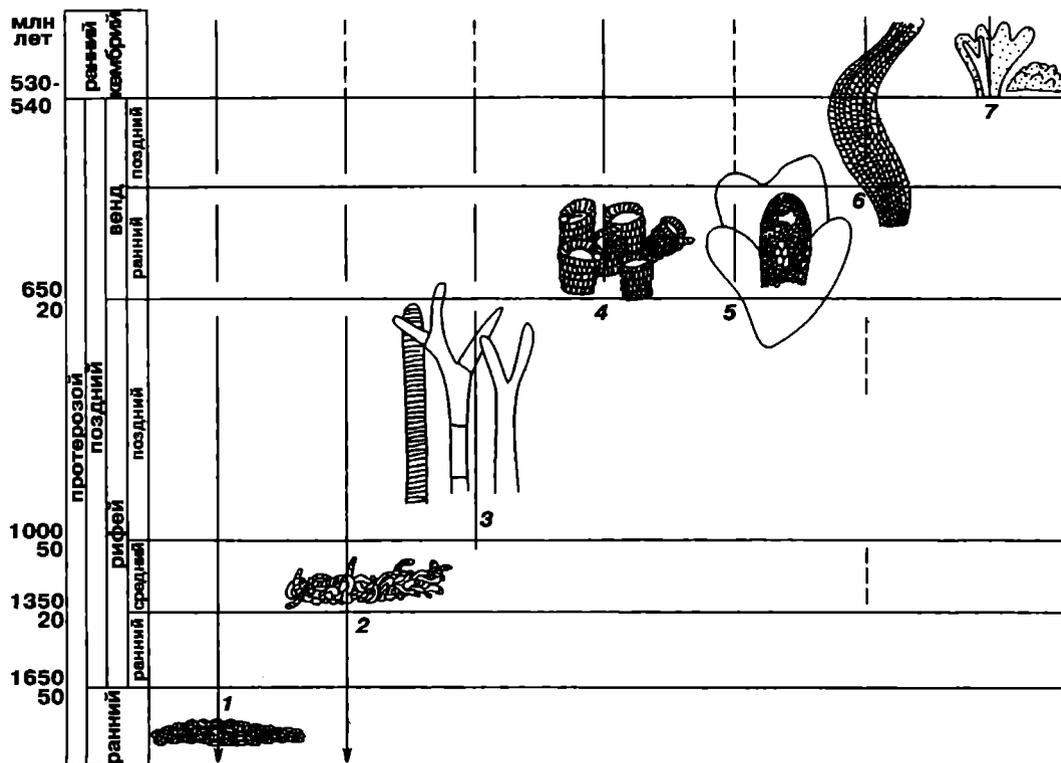
ЧТОБЫ СОХРАНИТЬ ВЛАГУ

Попадая на сушу, организм переходит от постоянно влажной среды в почти постоянно сухую (влажность редко бывает 100%). К обитанию в сухих (осушаемых) условиях первыми, видимо, приспособились нитчатые цианобактерии. В позднем венде они найдены как фрагменты фоссилизированных дерновин, в которых прихотливо изогнутые и переплетенные нити заключены в пленку сапропеллоподобного вещества. Такая пленка, вероятней всего, представляет собой фоссилизированную плотную общую слизь колонии, а не результат разложения остатков⁷. Среди современных цианобактерий мощный слой колониальной слизи (иногда даже хрящевидной) вырабатывают только те, что обитают в сухих наземных условиях, так как слизь удерживает влагу. В вендском палеобассейне Русской плиты, где такие дерновины и найдены,

⁵ Петров П.Ю., Семихатов М.А., Сергеев В.Н. // Там же. 1995. Т.3. № 6. С.79—99; Knoll A. H., Swett K., Mark J. // J. of Paleontology. 1991. V.65. № 4. P.531—570.

⁶ Крылов И.Н., Заварзин Г.А. // Докл. АН СССР. 1988. Т.300. № 5. С.1213—1215.

⁷ Бурзин М.Б. Микробные бентосные сообщества позднего венда // Пробл. доантропогенной эволюции биосферы. М., 1993. С.282—293.



Основные типы бентосных водорослей в позднем докембрии. 1, 2 — цианобактериальные маты: образованные одноклеточными формами (1) и нитчатыми (2); 3 — луга нитчатых водорослей; 4 — колонии спирально-свернутых нитчатых форм; 5—7 — многоклеточные водоросли: пластинчатые и коралловые (5), кожистые (6), известковые (7).

они встречаются как раз в его краевых частях, куда могли быть снесены из прибрежных зон.

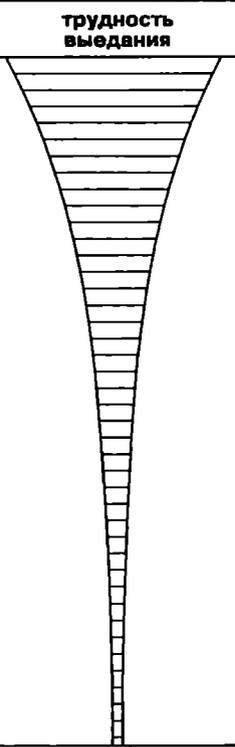
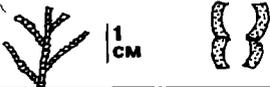
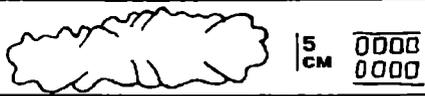
ПОДГОТОВКА К БОРЬБЕ С СИЛОЙ ТЯЖЕСТИ

Суша — это мир огромной силы тяжести для организмов, адаптированных к жизни в водной среде. Какие же приспособления могли обеспечить им существование в новых условиях?

В течение позднего докембрия в развитии бентосных водорослей заметна очень интересная тенденция — последовательное увеличение размеров и жесткости клеточных структур⁸. Древ-

нейшие — архейские — цианобактериальные маты, образованные одноклеточными и нитчатыми формами, имеют примечательную особенность: нитчатые формы в них представлены только голыми трихомами, без трубчатых чехлов, а одноклеточные формы не имеют материнских оболочек, которые обычно сохраняются вокруг дочерних клеток. Вероятно, в таких колониях отдельные особи объединялись вместе в матоподобную пленку только за счет колониальной слизи. Но в раннем протерозое нитчатые формы уже покрыты трубчатыми слизистыми чехлами, а одноклеточные объединены вместе сохраняющимися после деления материнскими оболочками. И трубчатые чехлы, и оболочки играли формообразующую роль и обеспечивали прочность мата. Чехлы переплетались между собой в результате скользящего движения нитей и образовывали войлокоподобную дерновину — матрикс мата. В рифе появляются нитчатые формы более широкие по сравнению с современными цианобактериями, они уже не обладают гибкостью циано-

⁸ Бурзин М.Б. // Альгология. 1996. Т.6. № 4. С.407—426.

функциональная группа	морфология и анатомия	трудность выедания
корковые кораллиновые водоросли	 3 см	
членистые известковые водоросли	 1 см 500 мкм	
кожистые макрофиты	 50 см 10 см 200 мкм	
коровые макрофиты	 5 см 200 мкм	
пластинчатые водоросли	 5 см 40 мкм	
нитчатые водоросли	 1 мм 50 мкм	
микроскопические водоросли	 10 мкм	

Функциональные группы цианобактерий и морских водорослей и степень затрудненности их выедания животными (по: Steneck R.S., Watling L. // *Marine biology*. 1982. V.68. P.299—312; с изменениями).

бактериальных нитей и не способны к скользящему движению. Такого рода нити, сегодня характерные для эвкаротических водорослей (они образуют заросли типа водорослевых лугов), растут не параллельно субстрату, а перпендикулярно благодаря большей жесткости клеточных стенок и оболочек, которые у эвкарот сложены целлюлозой. В позднем рифее появляются пластинчатые и лентовидные формы, жесткость их таллома возрастает, соответственно увеличиваются и размеры тела.

В венде встречаются макроскопические водоросли вендотениды, имевшие, судя по всему, кожистые талломы, покровные структуры которых отличались очень высокой жесткостью⁹. На границе венда и кембрия появились так

называемые известковые водоросли: как цианобактерии с обызвествленными слизистыми чехлами и оболочками, так и формы, которые откладывали карбонат не только на поверхности, но и внутри клеток¹⁰.

Если сравнить последовательность возникновения основных форм фитобентоса в докембрии и результаты экспериментов по скормливанию современным беспозвоночным водорослей с разными типами талломов, то выясняется, что в течение рифея и венда по мере возрастания жесткости таллома затруднялось выедание водорослей животными, а биомасса увеличивалась. У животных неминуемо должны были развиться структуры для разрушения плотных покровов водорослей или для проникновения сквозь них (возможно, и наоборот: фитобентос «одевался» в жесткие «одежды» в ответ на чрезмер-

⁹ Гниловская М.Б., Колесников Ч.М., Ищенко А.А. и др. Вендотениды Восточно-Европейской платформы. Л., 1988.

¹⁰ Чувашов Б.И., Лучинина В.А., Шуйский В.П. и др. Ископаемые известковые водоросли. Морфология, систематика, методы изучения. Новосибирск, 1987.

ное выедание). Примечательно, что известковые водоросли вышли на арену жизни примерно в одно время с древнейшими растительноядными организмами, подобными гастроподам, или брюхоногим моллюскам. Сегодня они вместе с хитонами — панцирными моллюсками — одни из основных групп животных, которые питаются водорослями. Таким образом, можно полагать, что в результате совместной эволюции растительноядных животных и водорослей у последних возникли адаптации в виде целлюлозных клеточных стенок и оболочек, жестких талломов, кожистых покровов. Весь этот арсенал нужен был для защиты от выедания, но он сыграл свою роль и в предстоящей борьбе с силой тяжести. Благодаря ему в раннем палеозое водоросли смогли выйти из воды, мира «невесомости», на сушу, в мир «силы тяжести».

ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА СУШЕ

Итак, в докембрии микробный мир Земли уже имел приспособления, чтобы защититься от избытка солнечной радиации, сохранить влагу, противостоять «силам тяжести». Свидетельства этих столь необходимых для жизни на суше новаций, как мы видели, можно отыскать в палеонтологических материалах. Гораздо сложнее обстоит дело с адаптациями, которые могли обеспечить распространение первых наземных обитателей.

У водных организмов с этим проблем нет: движения воды беспрепятственно разносят вегетативные части или споры. Но на суше споры должны иметь прочную оболочку, чтобы длительно сохранять жизнеспособность; и щель разверзания, через которую они могли бы прорасти в благоприятных условиях. Нужны также специальные структуры для разбрасывания спор и т.п. Последнюю роль могли, вероятно, выполнять загадочные хитиноидные спирали, названные кохлеатинами¹¹. Они известны из отложений второй половины верхнего венда и основания нижнего кембрия западной

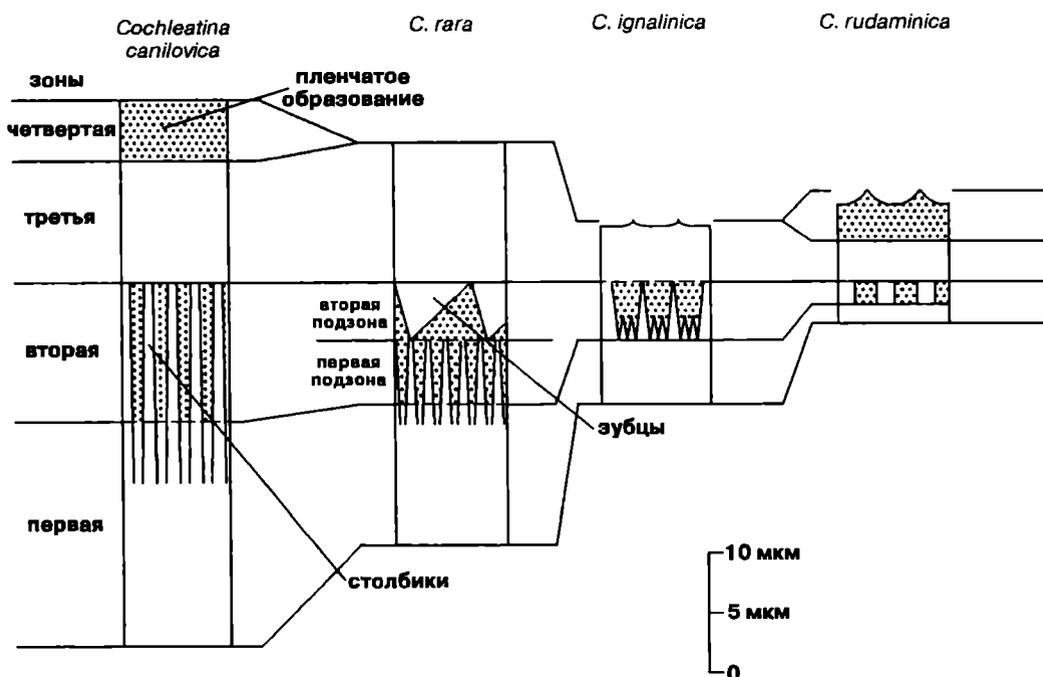
части Русской плиты и западного склона Анабарского массива на Сибирской платформе. Первые кохлеатины были описаны в 1974 г. Е.А.Асеевой как новый вид спирально свернутых нитчатых водорослей рода *Volyniella*. В 1980 г. Л.Т.Пашкявичене описала три новых вида кохлеатин, подчеркнула их необычное строение, но отнесла все к тому же роду. В 1983 г. Асеева выделила для этих форм новый род *Cochleatina*, однако их детальное строение так и осталось неизученным. Этому были две веские причины. Первая — необычность морфологии, вторая — несовершенство применявшихся тогда методов выделения микрофоссилий из пород. В процессе обработки пробы разрушались именно наиболее сложные и крупные формы, так что исследователям они попадались лишь изредка, причем в обугленном при нагреве виде. Изучать морфологию на таких экземплярах было просто невозможно. А если для обработки породы использовалась азотная кислота, кохлеатины разрушались полностью. Потребовалось специально модернизировать методику выделения микрофоссилий, и тогда выяснилось, что самые сложные и крупные формы, казавшиеся ранее редкими и экзотичными, на самом деле встречаются часто и бывают очень многочисленными.

При микроскопическом исследовании выяснилось, что кохлеатины представляют собой плоскую ленту шириной примерно 10—70 мкм, которая свернута в катушку диаметром от 50 до 300 мкм. Края этой плотной, по облику хитиноидной ленты (ее толщина 1—5 мкм) могут представлять собой части логарифмической спирали, дуги окружности или прямые линии. На ленте хорошо различимы продольные зоны: у двух видов кохлеатин их три, у двух других — четыре.

На внешнем обороте лента часто бывает раскручена и вытянута по дуге или прямой, а конец оборван у всех экземпляров. Характерная особенность ленты — ее продольный разрыв надвое. В образцах чаще встречаются изолированные катушки, реже — в скоплениях, наложенные друг на друга или на пленки сапропелеподобного вещества.

Катушки одного вида кохлеатин —

¹¹ Подробнее о кохлеатинах см.: Burzin M.B. // Paleontological J. 1995 (1996). V.29. № 2A. P.50—80.



Строение зон ленты четырех видов рода *Cochleatina*. У кохлеатин имеются три или четыре продольные зоны. Первая и третья почти одинаково плотные, темные и однородные. Вторая же зона или сплошь сложена тонкой пленкой с поперечными структурами, которые после ее естественного удаления превращаются в столбики одного или двух порядков (шириной около 1 мкм), или состоит из двух подзон. Во второй подзоне пленка разделена на треугольные участки; те из них, что прилегают основаниями к третьей зоне, при удалении пленчатых треугольников образуют зубцы.

Cochleatina canilovica — располагаются на поверхности всегда одной и той же части ланцетовидных талломов водоросли *Kanilovia insolita*, причем в один или два ряда (напротив или в шахматном порядке). Примечательно, что вне талломов на тех же поверхностях напластования кохлеатины почти не встречаются, значит, их присутствие на поверхности каниловии не случайно. А.А.Ищенко, обнаружившая каниловий, не сумела точно рассмотреть строение спиралей из-за того, что могла изучать материал лишь на поверхностях напластования пород. Она сочла, что спираль образована нитью, т.е. при жизни имела внутренний объем и была сходна с выводковыми побегами некоторых современных бурых водорослей и

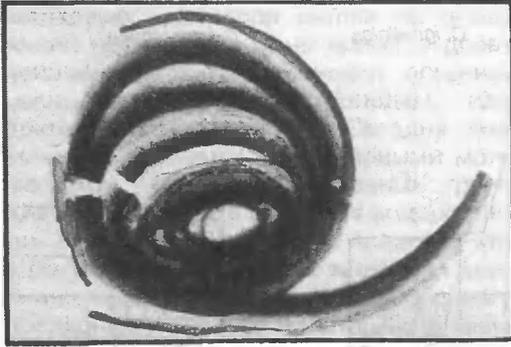
мохообразных, служащих им для вегетативного размножения. Такая аналогия с неизбежностью привела Ищенко к выводу об обитании и размножении каниловий в условиях кратковременного осушения прибрежных биотопов.

Как теперь выясняется, кохлеатины до сплющивания во время литификации жидкого осадка явно не имели внутреннего объема в отличие от акритарх¹² и нитчатых цианобактерий. Значит, кохлеатины не могут быть пустыми сплюснутыми оболочками или чехлами, как обычные органикостенные микрофоссилии. Из этого следует, что кохлеатины — это остатки не целостных организмов, а лишь отдельных их структур, которые служили, вероятно, для размножения.

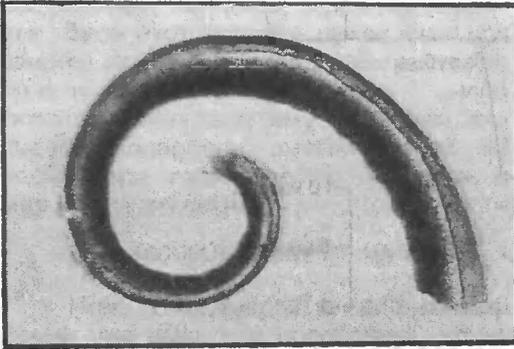
БЕЗ ПРЕДКОВ И ПОТОМКОВ

Пока неизвестны ни ископаемые, ни современные родственники — предки или потомки — «кохлеатиноносных» ор-

¹² Акритархи — одноклеточные ископаемые остатки организмов неопределенного систематического положения, в основном — водорослей. Акритархи имеют органическую оболочку, внутреннее содержимое не сохраняется. Известны с протерозоя.



1



2



3



4

Два вида кохлеатин (верхний венд Ровенской обл. Украины) в поле зрения светового микроскопа. На всех образцах хорошо различимы продольные зоны ленты.

Вертикальный ряд слева — *Cochleatina sapilovica*: 1 — частично раскрученная катушка (увел. 135); 2 — внутренний конец полностью раскрученной ленты с краями в форме логарифмических спиралей и суженным концом, несущим пленчатую оторочку (увел. 215); 3 — почти полностью раскрученный фрагмент ленты с продольным разрывом по границе второй и третьей зон и образовавшимися шипами. Видно, что ширина ленты плавно увеличивается от внутреннего конца (увел. 215); 4 — фрагмент ленты, на котором особенно отчетливо заметно ее зональное строение. Четвертая зона этого образца загнута (увел. 215).

организмов. Невозможно поэтому использовать для их интерпретации и прямые современные данные. Остается прибегнуть к косвенным способам познания природы кохлеатин:

— проанализировать их совместную встречаемость с другими ископаемыми организмами;

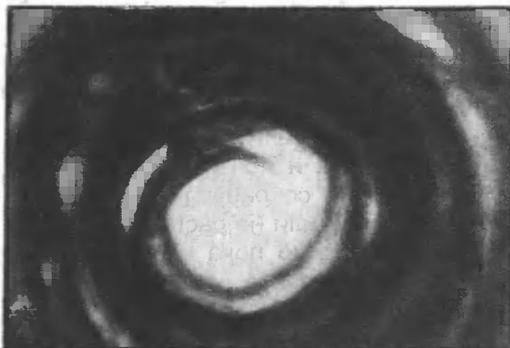
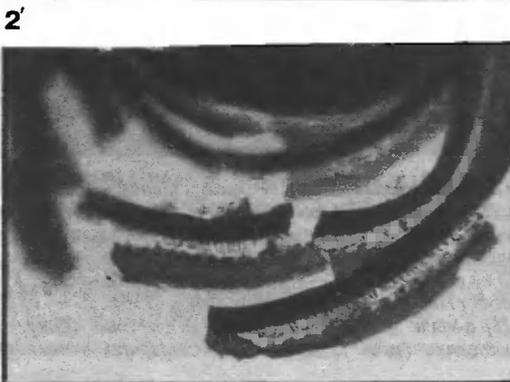
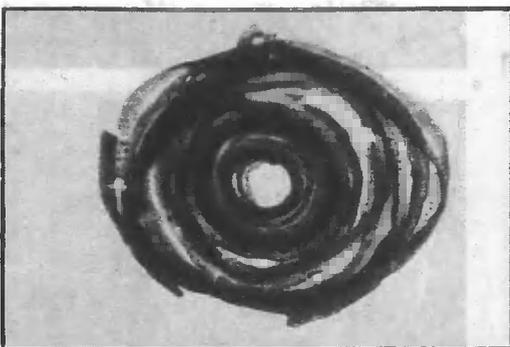
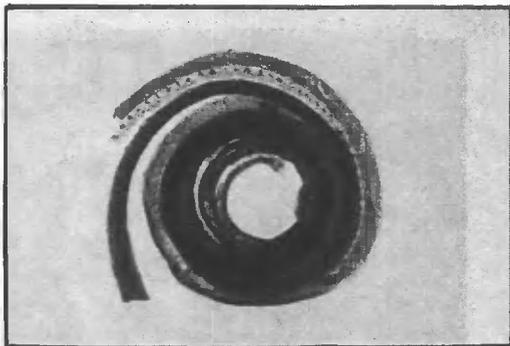
— экстраполировать тенденцию морфологических изменений кохлеатин в более древние времена и поискать формы, похожие на те, которые даст экстраполяция;

— провести функциональный анализ признаков кохлеатин по аналогии с современными организмами.

Сейчас известен, как уже отмечалось, вид кохлеатин, катушки которого расположены на талломах водоросли каниловии. Их упорядоченное распределение свидетельствует о взаимосвязи этих двух видов. Их распространение в разрезах верхнего венда Подольского Приднестровья совпадает с точностью до свиты. Удивительно, что остальные три вида кохлеатин из четырех известных не найдены на поверхности «материнского» таллома. Структурами каких же талломов они были?

В отложениях верхнего венда и нижнего кембрия Украины, Белоруссии, Литвы, Латвии и Анабарского массива Восточной Сибири обнаружены и кохлеатины, и представители трех родов макроскопических водорослей (*Vendotaenia*, *Tyrasotaenia* и *Dvinia*), а также еще не изученные так называемые кутикуляр-

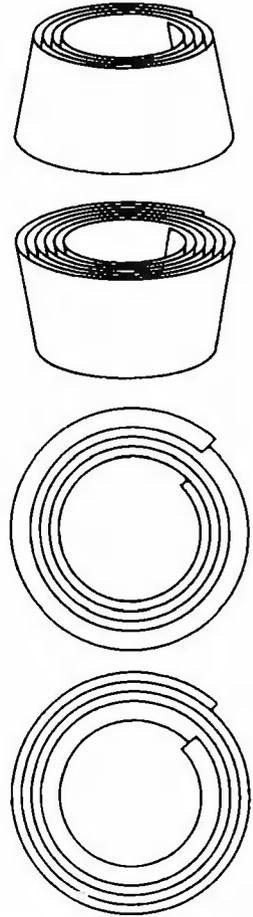
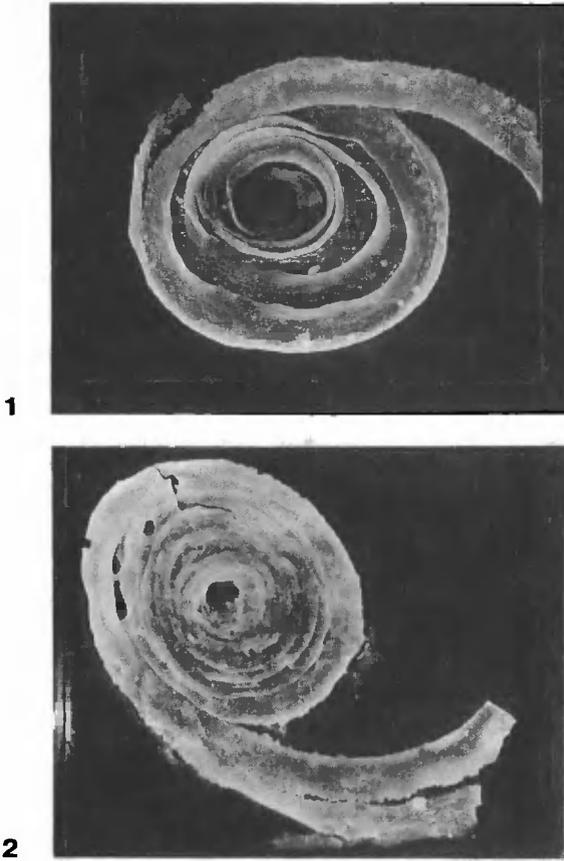
Вертикальный ряд справа — *S. rara* (верхний венд Ровенской обл. Украины): 1 — скрученная лента с формирующимися шипами и зубцами второй зоны (увел. 215); 2 — катушка, на которой заметно, что лента ориентирована параллельно оси навивания (увел. 135); 3 — раскрученные внешние обороты с четко выраженными зонами и шипами (увел. 330); 4 — скрученная лента, внутренний конец которой несет пальцеобразные выросты (увел. 500).



ные трубки. Но ни на одной из форм кохлеатины не встречаются. Ищенко указывала на морфологическое сходство талломов каниловий с макроскопическими водорослями рода *Thallulus* из нижнего кембрия Польши, но на ее территории кохлеатины вообще пока не найдены. Совпадает только стратиграфическое и географическое распространение лишь все тех же видов — *S. canilovica* и *K. insolita*. В стратиграфических разрезах другие виды кохлеатин не найдены ни на одной из перечисленных макроскопических водорослей, а географические ареалы значительно уже, чем этих водорослей. Все это невозможно объяснить разносом остатков водными потоками. Таким образом, три из четырех видов кохлеатин не имеют пока «материнского» носителя.

Кажется странным полное отсутствие каких-либо структур, соединяющих спирали кохлеатин с «материнским» талломом: их обрывки или следы отрыва не удается распознать ни на талломах каниловий, ни на кохлеатинах.

Совершенно не понятно также, что же находилось на внешнем конце их ленты — ведь даже у лежащих на талломах экземпляров (т.е. явно не фрагментированных при выделении из пород) этот конец всегда оборван. Если бы на нем имелась спора с прочной оболочкой, то она должна выглядеть, как акритарх, но акритархи не имеют точно такого же распространения, как кохлеатины. Нет спор и на нераскрученных катушках, обороты которых столь плотно прилегают друг к другу, что рассмотреть строение внешнего конца ленты пока не удастся. Кохлеатины встречены в рассеянном состоянии, их очень много, это может означать, что



Образцы кохлеатин в поле зрения сканирующего электронного микроскопа и схематическое изображение катушек. Каждая катушка имеет два основания: плоское и воронковидное у одного вида кохлеатин и одинаковые у другого. Внутренние обороты, как правило, более тугие, чем внешние.

Левый ряд — *Cochleatina canilovica*: 1 — вид со стороны воронковидного основания деформированной катушки (увел. 250); 2 — со стороны плоского основания (увел. 210).

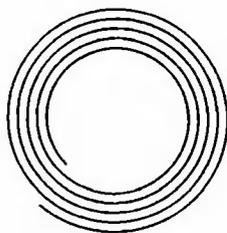
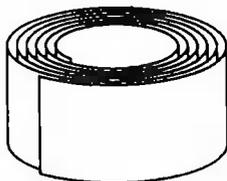
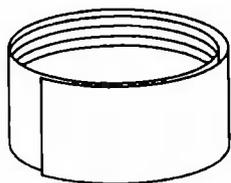
Правый ряд — *S. gara*: 1 — вид сбоку, при котором хорошо видна цилиндрическая форма катушки (увел. 330); 2 — со стороны основания (увел. 400).

организмы продуцировали их в большом количестве и высвобождали, может быть, в процессе размножения. Но что же выросло из кохлеатин и почему это не удастся обнаружить? В чем, в каких таких оболочках или органах «созревали» кохлеатинины и почему эти оболочки или органы не сохраняются в ископаемом состоянии или не распознаются?

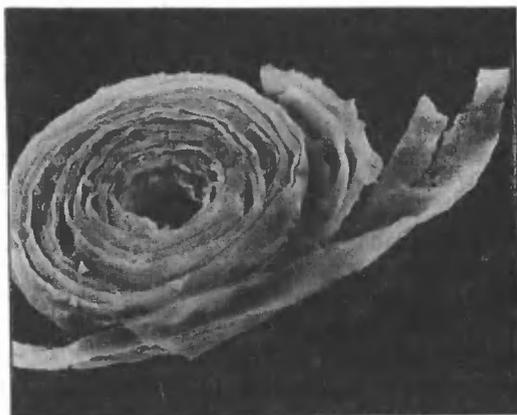
Необъяснимо пока и очень странное географическое распространение кохлеатин. Во второй половине котлинского века они известны только в Подольи и на Волини; в первой половине

ровенского — на Волини, юге Белоруссии (это один палеобассейн) и вдруг неожиданно — также на западном склоне Анабарского массива; во второй половине ровенского — только в Литве и Латвии, а в лонтоваском веке — в Латвии, Литве и на юге Белоруссии. Никакие другие микрофоссилии, макроскопические водоросли или иные ископаемые остатки так не распространены. И этот анализ скорее ставит вопросы, чем дает объяснения.

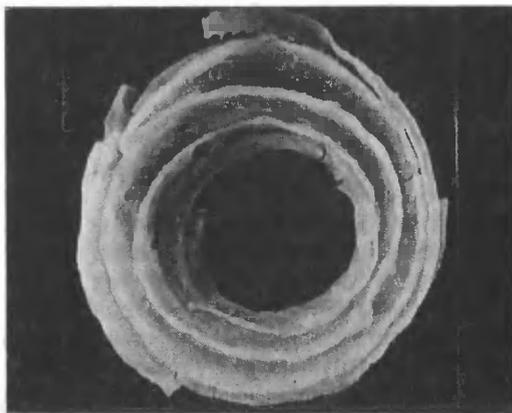
Попробуем проанализировать морфологические изменения кохлеатин во



1'



2'



времени. За период своего существования (а это примерно два с половиной века — с середины котлинского века — вероятно, до конца лонтоваского) прослеживается следующая тенденция:

— лента постепенно сужается (особенно первая зона, уменьшается также длина шипиков второй зоны), так что у самого молодого вида *C.rudaminica* она почти в 3.5 раза уже, чем у самого древнего вида *C.canilovica*;

— постоянно модифицируется вторая зона ленты — зона перфорации и разрыва (связанные с этим признаки явно были ведущими в эволюции кохлеатин, именно они и использовались для диагностики видов рода);

— внешний край ленты из пленчатого становится более плотным, и на нем появляется скульптурный рельеф;

— коническая катушка превращается в цилиндрическую за счет того, что

плоскость ленты оказывается параллельной оси навивания, а сама катушка — ту же скрученной, с удвоенным числом оборотов. Эта тенденция прослежена пока лишь на двух видах — *C.canilovica* и *C.rara* — на протяжении второй половины котлинского и первой ровенского веков.

Если экстраполировать обнаруженные тенденции в более древние времена, то выходит, что предки кохлеатин могли иметь широкую ленту с очень обширной первой зоной, длинными шипами и тонким, пленчатым внешним краем. Лента была закручена в пологую коническую спираль. В редкинское время, предшествовавшее котлинскому, таким характеристикам отчасти соответствуют представители рода *Redkinia*, считающиеся аналогами хитиноидных пластинок, которые располагаются на максиллах челюстного аппарата полихет

подкласса *Errantia*. Два вида этого рода — *R. spinosa* и *R. fedonkini* — отличаются размерами (в несколько раз), а также строением зубов (двух или нескольких порядков). Иными словами, характер межвидовой изменчивости этих признаков у редкиний и кохлеатин почти один и тот же. *R. fedonkini* явно имела форму фрагмента ленты, вероятно, спиральной, которая расширялась от одного конца к другому. Ее толщина и ширина увеличивались, равно как длина зубов и их число в следующих порядках, расположенных между зубами первого порядка. Наиболее длинные и явно лентовидные остатки почти всегда изогнуты так, что можно предположить, будто они составляют часть пологой конической спирали. Однако у редкиний не удается найти даже следов третьей зоны на внешней части ленты, а это значит, что отсутствует такой важный диагностический признак кохлеатин, как ее разрыв по зоне перфорации.

Могут ли быть кохлеатины элементами челюстных аппаратов каких-либо растительноядных животных или тех структур, которыми они удерживают добычу? Явно не могут, ибо лента кохлеатины смотана в плотную катушку практически без зазоров между оборотами, а шипики чаще всего освобождаются при продольном разрыве ленты на раскрученных внешних оборотах катушки. Одну такую катушку не посадить на набор максилл, мандибул и папилл челюстного аппарата полихет, а это значит, что несколько однотипных катушек должны были образовывать целый аппарат. Однако такие аппараты неизвестны. Но даже если бы они и были найдены, шипики кохлеатин из-за недостаточной жесткости, формы и размеров явно не пригодны ни для измельчения грубой клетчатки макроскопических водорослей, ни для удерживания.

Не лучше обстоит дело и с предположением об использовании катушки в качестве фильтра: гребенка из мелких шипиков разного размера, конечно, могла бы служить своеобразным ситом для фильтрации, но тогда обороты не должны плотно прилегать друг к другу, а образовывать каналы для прохода воды.

Кроме того, катушки у кохлеатин располагаются в один или два ряда, а не окружают ротовое отверстие. Само положение кохлеатин на поверхности каниловый тоже трудно объяснить, если считать, что каниловия — остаток не таллома водоросли, а тела червеобразного организма. Челюстной или фильтрующий аппарат, расположенные на поверхности тела животного вне связи с ротовым отверстием, просто не имеют аналогов.

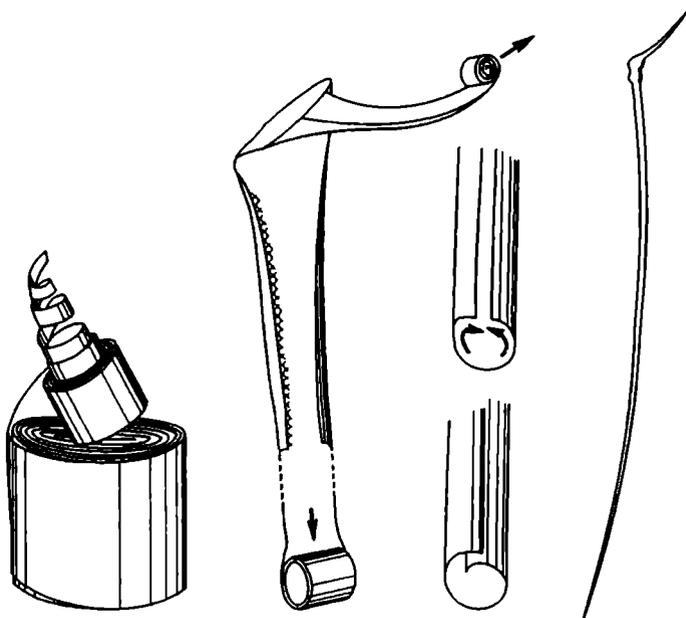
Не похожи кохлеатины и на шипы, покрывающие тело цефалоринхов.

Таким образом, ретроспективная экстраполяция пока не может пролить свет на природу кохлеатин, а лишь позволяет высказать ряд догадок.

Попробуем провести функциональный анализ кохлеатин по аналогии со спиральными образованиями у современных водорослей и наземных растений. У высших споровых растений, например элатеры хвощеобразных, такие структуры связаны с раскручиванием спор или движением и раскручиваются за счет внутриклеточного давления — тургора. Но к кохлеатидам эта аналогия не приложима, ведь их спираль образована не сплюсненной трубкой, а плоской лентой. Только благодаря ее эластичности спираль могла бы разворачиваться, но в строении ленты не удастся распознать слоев с разными свойствами. Нет — лента сплошная.

Если сравнивать кохлеатины со спиральными структурами, связанными с распространением спор, возникает очень важный вопрос: в каких условиях — водных или воздушных — катушка могла раскручиваться? Разворачивание в воздушной среде известно шире, оно контролируется влажностью воздуха и часто происходит из-за пересыхания и разрыва некой «ткани», соединяющей между собой витки. Но есть и примеры катушек, которые раскручиваются в воде, например эжектосомы некоторых криптофитовых водорослей. Эжектосома — это плоская лента, скрученная в две, разных размеров, цилиндрические катушечки, соединенные линейным участком. Эжектосомы размещаются во внутриклеточных вакуолях в перипласте

Эжектосомы криптофитовых водорослей. Слева направо: спираль покоящейся эжектосомы; раскручивающаяся спираль; начало продольного скручивания ленты; образованная из спирали игла (по: Haustapa K. // Int. Rev. Cytol. 1978. V.52. P. 197).



клетки и используются для защиты. Клетка «выстреливает» катушки в воду, где они сразу же полностью раскручиваются и тут же сворачиваются продольно в длинную острую иглу. У кохлеатин же лента никогда не образует иглообразных форм, все известные случаи продольного складывания ленты — это результат деформации остатка за счет уплотнения породы при литификации. Кроме того, использованием катушек для защиты не объяснить главную особенность строения кохлеатин — образование зоны перфорации и продольный разрыв ленты с высвобождением шпиков.

Как видим, проведенный анализ не дает прямых доказательств природы кохлеатин. Однако их наличие на поверхности талломов каниловий и регулярность расположения позволяют все же интерпретировать их как структуры для разбрасывания спор (хотя никаких остатков спор на лентах до сих пор не обнаружено). А такой разброс необходим в воздушной среде. Кохлеатины, таким образом, можно рассматривать как древнейшие приспособления водо-

рослей для заселения осушенных или даже наземных участков обитания. Чтобы убедиться в правильности предположения, «остается» ответить на несколько вопросов.

Каковы были способы образования и отделения кохлеатин, не оставившие следов на «материнском» талломе?

В чем состоит значение зоны перфорации и продольного разрыва ленты?

Почему ленты бывают спиральными или прямыми?

Каковы причины и механизм раскручивания катушки?

Пока ответов на них нет.

Итак, на ранних этапах освоения суши возникли некоторые важные адаптации, позже позволившие водорослям перейти к обитанию в наземных условиях. Защита от избытка солнечной радиации, от пересыхания, сил земного притяжения, образование приспособлений для разбрасывания спор — вот те предпосылки, которые были заложены еще в докембрии и которые обеспечили в дальнейшем замечательные новации в биосфере.

Вакцина против менингита

Т. Н. Филатова



Татьяна Николаевна Филатова, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова РАМН. Область научных интересов — структура и функция биополимеров.

СНАЧАЛА первой вакцинации против оспы (1796) и до нашего времени созданы вакцины с целью профилактики всего лишь 22 болезней, из них девять — для детей, а 13 — для взрослых в группах повышенного риска. По прогнозам Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), в ближайшие десять лет должны появиться новые вакцинные препараты еще для 28 заболеваний. Во второй половине XX в. начался активный поиск и в создании эффективной вакцины против менингококкового менингита. По числу смертельных исходов эта форма менингита лидирует среди других инфекционных заболеваний: погибает каждый пятый больной. Вызывают инфекцию менингококки (*Neisseria meningitidis*) — парные бобовидные бактерии размером 6—8 мкм. Это так называемые грамотрицательные диплококки. Впервые этот микроорганизм выделил из спинномозговой жидкости и довольно подробно изучил в 1887 г. венский медик А. Вейксельбаум. Как построена клетка менингококка? Она покрыта капсулой, которая состоит из молекул полисахарида. Под капсулой расположена клеточная стенка бактерии, образованная белками, липополисахаридами и липидами. На поверхности клеточной стенки у свежесделанных штаммов культуры менингококка можно разглядеть «реснички», состоящие из молекул белка (пили). Далее следует слой пептидогликана, а за ним — цитоплазматическая мембрана.

Удивительно, что возбудитель столь страшной болезни — очень «нежный» микроб: он погибает через 10 мин при температуре окружающей среды 60°C, а при 80°C его гибель наступает через 2 мин. Прямой со-

лучный свет убивает его за 2—8 ч, а под действием ультрафиолетовых лучей менингококки погибают почти мгновенно. Столь же чувствительны они и к действию низких температур, а также — присутствию некоторых химических веществ, например фенола: добавление его 1%-го раствора приводит к гибели микробной культуры через 1 мин. Но этот «нежный» и «чувствительный» микроб достаточно быстро приспосабливается к воздействию лекарственных препаратов. В 30—50-х годах нашего столетия первыми высокоэффективными препаратами, которые использовались для лечения менингита во всем мире, были сульфаниламиды. Однако уже через 20 лет менингококки приобрели устойчивость к их действию. Сейчас для эффективного лечения менингококкового менингита в основном используют антибиотики, хотя и к ним у возбудителей вырабатывается резистентность. Так, например, если в 60-х годах все штаммы менингококка погибали от действия тетрациклина, то через 10—12 лет чувствительными к нему остались лишь 20% штаммов. Аналогичная ситуация складывается и с пенициллином и его синтетическими аналогами. Врачам приходится вводить больным препараты этих антибиотиков в высоких концентрациях, а также использовать новые мощные лекарственные формы антибиотиков, еще незнакомые микробам.

ЗАРАЖЕНИЕ И ЗАЩИТА ОРГАНИЗМА

Менингококки — не только «нежные», но и «разборчивые» микробы: в качестве хозяина они выбирают исключительно человека, в естественных условиях животных к ним невосприимчивы. Распространение возбудителя происходит воздушно-капельным путем. Попав на слизистую оболочку носоглотки и размножившись там в достаточном количестве, менингококк проникает в лимфатические сосуды, кровь и, наконец, при остром течении заболевания, в мозговые оболочки человека, вызывая тяжелейшее гной-

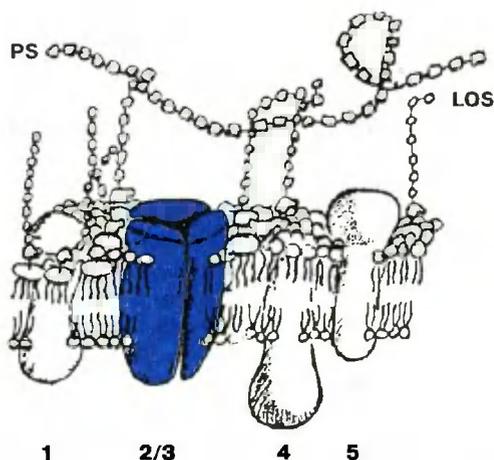
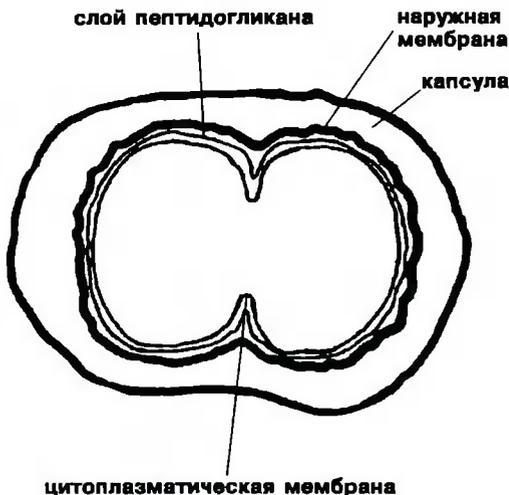


Схема строения клетки менингококка (вверху) и структура участка ее наружной мембраны. Цифрами обозначены классы белков наружной мембраны. Цветом показано количественное преобладание белков второго и третьего классов. PS — капсульный полисахарид, LOS — липоолигосахарид.

ное воспаление головного мозга. Но тяжелая форма менингита развивается не у каждого носителя, а лишь у тех, у кого ослаблен иммунитет, например, за счет ранее перенесенных заболеваний, неполноценного питания и т.д.

В ответ на появление в организме антигенов болезнетворных микробов, которые находятся на их поверхности, вырабатываются специфические антитела — иммуноглобулины (Ig). Для

менингококков известны три типа поверхностных антигенов: полисахариды, из которых построена капсула, липополисахариды и белки, входящие в состав наружной клеточной стенки возбудителя.

ПОЛИСАХАРИДНЫЕ ВАКЦИНЫ

У больных менингококковым менингитом было обнаружено повышенное содержание специфических антител к капсульному полисахариду (они принадлежали к IgM классу). Возникло предположение, что именно эти антитела могут обеспечивать защиту от инфекции. Поэтому первые вакцинные препараты против менингококковой инфекции были сконструированы на основе капсульного полисахарида.

По антигенному составу менингококки разделяются на 12 серогрупп, определяемых специфичностью капсульного полисахарида (А, В, С, Х и т.д.). Полисахарид серогруппы А представляет собой полимер N-ацетил-О-ацетил-маннозаминфосфата, а серогруппы С — полимер N-ацетил-О-ацетилнейраминовой кислоты. В 1969 г. немецкие ученые во главе с Е.Готшлихом разработали методы выделения и очистки указанных высокомолекулярных полисахаридов¹. Эти очищенные полисахариды были использованы для приготовления вакцины, которая оказалась весьма эффективной в тех случаях, когда возбудители относились к группам А и С. Позже для расширения спектра действия такой вакцины был приготовлен комплексный препарат, состоящий из очищенных капсульных полисахаридов не только групп А и С, но Y- и W-135.

До сих пор во всем мире для иммунопрофилактики широко используются только полисахаридные вакцины. Качество вакцины строго контролируется — определяются ее физико-химические параметры: молекулярные массы полисахарида, количественное содержание белка, нуклеиновых кис-

лот, липополисахарида и т.д. По требованиям ВОЗ вакцина считается годной, если не менее чем у 90% вакцинированных по крайней мере четырехкратно увеличивается содержание в сыворотке соответствующих антител. В нашей стране выпускается в настоящее время только полисахаридная вакцина группы А, которая по всем параметрам не уступает зарубежным и предназначена для двух возрастных групп: от года до восьми лет и старше девяти. Недавно закончены государственные испытания отечественной полисахаридной дивакцины — серогрупп А и С. Полученные результаты позволили рекомендовать ее для использования в практическом здравоохранении².

Однако полисахаридные вакцины оказались непригодны для защиты детей грудного возраста и неэффективны в случае, когда инфекция вызвана менингококками серогруппы В. Чтобы полисахаридные вакцины групп А и С были эффективны и для детей до года, пытались «привязать» к полисахариду какой-нибудь активный белок, например столбнячный токсин³. Такие препараты, называемые конъюгированными, были успешно испытаны на экспериментальных животных. Напомним, что в естественных условиях животные невосприимчивы к менингококку, и это создает большие трудности для предварительной оценки эффективности вакцинных препаратов. При искусственном заражении только у обезьян общая картина болезни наиболее близка к той, которая наблюдается у человека. Тем не менее такие не слишком дорогостоящие модельные животные, как мыши и кролики, широко используются для оценки целого ряда свойств иммунопрофилактических препаратов, например токсичности, характера иммунного ответа и

¹ Cotschlich E.C., Liu T.Y., Artenstein M.S. // J.Exp. Med. 1969. V.129. P.1349.

² Немировская Т.И. Менингококковые вакцины и диагностикумы // Актуальные пробл. создания и применения иммунобиол. препаратов для диагностики и профилактики инфекционных болезней. Пермь, 1993. Т.1. С.279—292.

³ Jennings H.J., Lugowski C. // J. Immunol. 1981. V.127. P.1011.

т.д. Результаты проведенных испытаний конъюгированных вакцин внушают надежду: эти препараты оказались более иммуногенными, т.е. способными индуцировать большее количество антител у исследуемых животных. Кроме того, такое дополнительное введение белка позволило переключить иммунный ответ организма на выработку антител не только IgM, но и IgG класса, что очень важно для создания устойчивого иммунитета. Полевые испытания такой вакцины в районах с эпидемической ситуацией были включены в программы ВОЗ в 1990 г., работы в этом направлении сейчас продолжаются.

В-МЕНИНГОКОККОВАЯ ВАКЦИНА

Начиная с конца 70-х годов во вспышках менингококковой инфекции начали лидировать именно менингококки серогруппы В. За последние 10—15 лет зарегистрирован относительный рост заболеваемости, обусловленной штаммами этой группы, в США, европейских странах, а также Аргентине, Бразилии, Колумбии, Кубе и Уругвае. В России заболеваемость менингококковой инфекцией серогруппы В в 1984 г. достигла 76,8%, а за последнее десятилетие снизилась (в частности в Москве до 56%). Однако нет оснований для благоприятных прогнозов, тем более что эта менингококковая инфекция протекает с особенно серьезными осложнениями, например, у 64% больных детей сильно нарушается неврологический статус. Полисахарид менингококка серогруппы В, как и С-полисахарид, представляет собой гомополимер N-ацетил-О-ацетилнейраминаевой кислоты, но имеет другую пространственную структуру. В-полисахарид менингококка оказался непригодным для приготовления вакцины из-за своей низкой иммуногенности, обусловленной особенностями его структуры. Поэтому в течение последних 15 лет ведутся интенсивные поиски других эффективных антигенов для конструирования поливалентных вакцин. В частности, учитывается тот факт, что у больных, перенесших менингококковый менингит серогруппы

В, обнаруживались антитела в основном IgG класса, к индукции которых, как правило, способны белковые антигены. Эти антитела обладали ярко выраженной бактерицидной активностью, т.е. способностью лизировать (разрушать) менингококки соответствующего штамма. Поэтому взоры ученых обратились к изучению различных белков менингококка с целью их использования в качестве протективных антигенов для приготовления менингококковой вакцины. Существуют три основных направления, по которым ведется конструирование менингококковой В-вакцины:

— выделение высокоиммуногенного трехкомпонентного комплекса на основе белка, полисахарида и липополисахарида (этот комплекс присутствует в наружной мембране живой клетки менингококка, поэтому делаются попытки выделить его в максимально ненарушенном, нативном, состоянии и испытать в качестве вакцины);

— выделение нативного комплекса, состоящего только из белков наружной мембраны менингококка в виде везикулярных образований с помощью «мягкой» экстракции детергентами;

— выделение в индивидуальном, высокоочищенном состоянии не самого комплекса, а его отдельных компонентов и использование последних в различном сочетании для приготовления комбинированной вакцины.

Слабые стороны первого подхода связаны с трудностями выделения и хранения трехкомпонентного комплекса из-за нестабильности его состава. При разрушении такого комплекса может появляться свободный полисахарид серогруппы В. Это весьма нежелательно, поскольку он способен перекрестно реагировать с некоторыми антигенными образованиями в организме хозяина и потенциально индуцировать аутоиммунные антитела. Второй и третий подходы — наиболее перспективны; в последнее время они приобретают много сторонников. Так, группа американских и кубинских ученых во главе с К.Фрашем получила препарат, который

оказался эффективным во время эпидемии менингита на Кубе в 1990 г. Вакцина содержала белки из наружной мембраны менингококка серогруппы В и С-полисахарид. Однако этот препарат защищал только от возбудителей, содержащих белки лишь вакцинного штамма. Группа европейских ученых недавно создала вакцинные препараты на основе белковых везикул, экстрагированных из наружной мембраны менингококка с помощью детергента — дезоксихолата натрия. По сравнению с кубинской вакциной эти препараты обладали более высокой иммуногенностью, широким спектром действия, но недостаточной эффективностью в отношении детей⁴.

Таким образом, к настоящему времени еще не создана эффективная вакцина к менингококку серогруппы В. Поэтому продолжают активные поиски оптимальных антигенов для ее конструирования.

БЕЛКОВЫЕ АНТИГЕНЫ

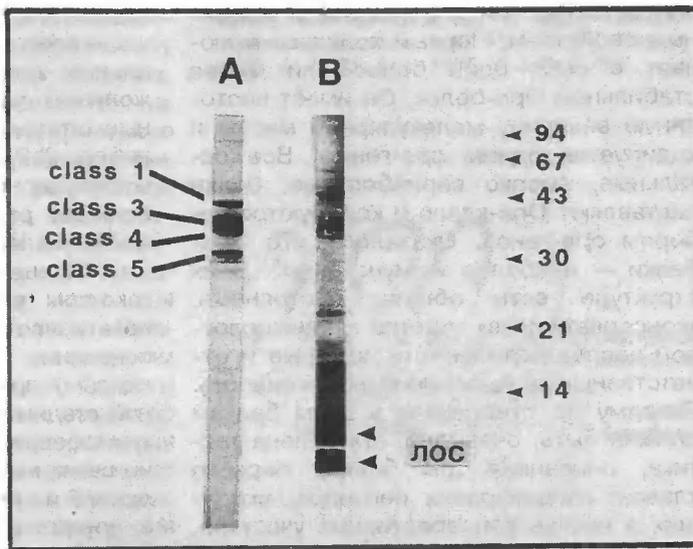
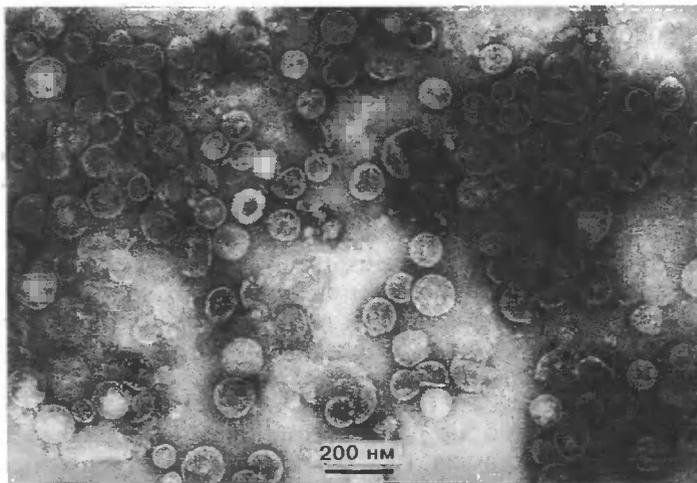
Наружная мембрана менингококка содержит большое количество различных белков. Их можно разделить на две группы: основные (количественно преобладающие) и минорные белки. В зависимости от величины молекулярной массы основные белки разделяют на пять классов. Примечательно, что содержание белков второго и третьего классов (их молекулярные массы лежат в пределах 37 000—42 000) достигает 50% от общего количества всех основных белков менингококка. Их называют типовыми, так как именно по ним проводят типирование данного штамма. Сейчас насчитывается 18 серотипов менингококка, которые определяются специфичностью типового белка. Предполагается, что это порины — белки, образующие водные каналы в наружной мембране бактерии, по которым осуществляется транспорт молекул и ионов, необходимых для питания. Поскольку они

количественно преобладают по сравнению со всеми другими белками наружной мембраны и играют важную роль для жизнедеятельности микроба, первые вакцинные препараты на основе белковых антигенов преимущественно содержали именно эти белки. Однако они оказались не достаточно эффективными. Ведь идеальный белковый антиген для конструирования вакцины должен прежде всего обладать высокой иммуногенностью, т.е. индуцировать в организме человека усиленный синтез антител, причем антител бактерицидных, способных разрушать вторгшиеся в организм микробные клетки и защищать его от инфекции. Антитела к серотиповым поринам менингококка обладают защитным действием в незначительной степени, хотя, по последним данным, они могут быть важны для создания иммунологической памяти. Кроме того, серотиповой порин индуцирует только специфичные для данного штамма менингококка антитела, поэтому вакцина будет защищать именно от него. В связи с этим сейчас внимание исследователей привлекают белки менингококка первого, пятого классов и так называемые железорегулируемые.

Белки первого класса, как и серотиповые белки, — порины. По своей структуре они представляют собой тример, т.е. состоят из трех отдельных полипептидных цепей, образующих как бы связанные друг с другом «клубки» — домены. Молекулярная масса каждого домена колеблется в пределах 44 000—50 000. Хотя порины первого класса индуцируют антитела с достаточно высокой бактерицидной активностью, они обладают высокой антигенной изменчивостью. Поэтому, если включать такие белки в состав вакцины, она должна содержать набор поринов первого класса, выделенных из разных штаммов, т.е. быть «мультивалентной». Но есть и другой выход. Оказалось, что внутри полипептидной цепочки белков первого класса есть несколько консервативных участков, повторяющихся независимо от штамма менингококка. Располагаясь на

⁴ Ley P. van der, Biesen J. van der, Poolman J.T. // *Vaccine*. 1995. V.13. P.401—405.

Электронная микрофотография белковой везикулярной вакцины (вверху) и электрофореграмма белков, входящих в состав везикул. Справа приведены молекулярные массы белков-маркеров (кДа); А — окрашивание электрофореграммы красителем Кумаси, В — азотнокислым серебром (по: Fredriksen J.H. et al. // NIPH Annals. 1991. V.14. № 2. P.72—73).



поверхности мембраны, такие идентичные участки (эпитопы) индуцируют одинаковые антитела. Таким образом, белки первого класса содержат ряд консервативных эпитопов, причем антитела к ним обладают бактерицидными свойствами⁵. Поэтому, расшифровав точный химический состав пептидов, образующих такие эпитопы, можно получить их путем химического синтеза и использовать в качестве компонентов вакцины. Однако, чтобы

такие пептиды начали вырабатывать соответствующие антитела, они должны иметь характерную петлеобразную структуру, как и в природной, нативной, молекуле белка. Кроме того, следует связать пептид с какой-нибудь высокополимерной молекулой, так как иммуногенностью обладают только большие полимерные молекулы. Таким образом, белки первого класса представляют большой интерес как потенциальные кандидаты для приготовления вакцин.

Не меньший интерес в этом отношении представляют белки пятого клас-

⁵ Ley P.A. van der, Poolman J.T. // Infect. Immune. 1991. V.60. P.3156.

са (молекулярные массы 26 000—32 000), обладающие очень высокой иммуногенностью. В сыворотках больных менингококковым менингитом содержание антител к таким белкам значительно повышено. Кроме того, у больных в стадии выздоровления в сыворотках присутствуют только эти антитела. Таким образом, по всем параметрам белки пятого класса — подходящие кандидаты на роль компонентов вакцины против менингококка. У них лишь один, но очень существенный недостаток — их вариабельность, т.е. изменчивость, причем они изменяются не только в зависимости от штамма, но даже внутри одного и того же штамма. Все белки пятого класса можно разделить на два основных подкласса, которые различаются по генетическим, биохимическим и иммунным свойствам. Первый подкласс включает в себя один более или менее стабильный Орс-белок. Он имеет постоянную величину молекулярной массы и кодируется одним орс-геном. Все остальные, высоко вариабельные, белки составляют Ора-класс и кодируются набором ора-генов. Оказалось, что Ора-белки — наиболее иммуногенны⁶. В их структуре есть общие, постоянные, «консервативные» участки аминокислотной последовательности, которые и ответственны за высокую иммуногенность. Поэтому по отношению к этим белкам должна быть, очевидно, применена тактика, описанная для белков первого класса: расшифровка пептидов, входящих в состав консервативных участков, последующий синтез и, наконец, «привязка» к подходящей высокомолекулярной основе.

Другими белками, представляющими не меньший интерес, оказались железорегулируемые белки (ЖРБ) менингококка. Клеткам менингококка, как и большинству других микроорганизмов, необходимо, чтобы в среде, где они растут, содержалось железо. Его источниками для менингококка в человеческом организме могут быть лактоферрин,

трансферрин и гемоглобин. Но в них железо очень прочно связано: в среднем из 10^{30} белковых молекул только одна распадается с образованием свободного, несвязанного иона железа. Иными словами, в условиях человеческого организма менингококк находится в очень стесненных обстоятельствах. Для того чтобы обеспечить себя необходимым для размножения и роста количеством железа, микроб начинает интенсивно синтезировать специальные конкурентноспособные белки-рецепторы, которые связывают свободное железо, транспортируют через мембрану и усваивают его. Такие белки и называются железорегулируемыми. Интенсивный синтез *in vitro* можно вызвать культивированием менингококка с низким содержанием железа. Подобное обеднение чаще всего создается введением специальных добавок, которые образуют с железом хелатные комплексы. Различные штаммы менингококка синтезируют набор ЖРБ, которые отличаются по молекулярной массе, свойствам и выполняют различные функции по усваиванию железа клеткой.

Процесс утилизации железа менингококком сложен и многостадийен, нам пока известно о нем очень немного. На основании целого ряда экспериментов сделано предположение, что на начальной стадии процесса усвоения железа из трансферрина действуют два комплексно-связанных белка: молекулярная масса одного из них (ТврА) постоянна (98 000), а другого (ТврВ) — варьирует в разных штаммах (65 000—85 000). Связав трансферриновое железо в тройной комплекс, эти белки передают его другому, периплазматическому белку с постоянной молекулярной массой (37 000), задача которого — перенос железа через периплазматическое пространство далее, к цитоплазматической мембране.

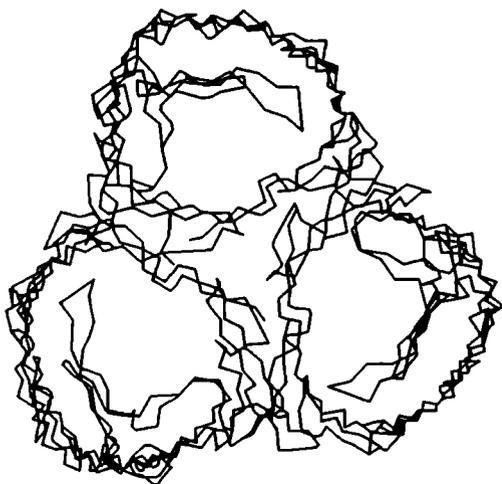
Этот белок (ЖРБ-37) экспрессируется всеми штаммами не только менингококка, но и гонококка. Он относительно хорошо изучен по сравнению с другими ЖРБ, для него разработаны достаточно простые и доступные методы выделения⁷. Недавно удалось приоткрыть тайну его функционального центра, пред-

⁶ Rosingvist E., Hoiby E.A., Wedege E., Kusecek B., Achtman M. // J. Infect. Dis. 1993. V.167. P.1065.

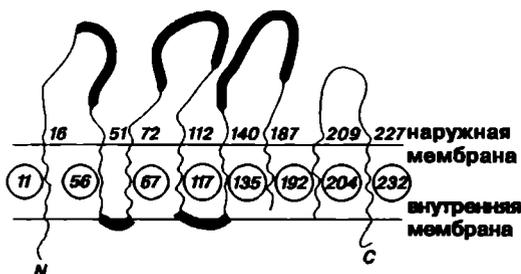
назначенного для связывания железа. Оказалось, что он идентичен функциональному центру молекулы трансферрина беспозвоночных, в нем участвуют два остатка тирозина, гистидина и бикарбонатный анион. Как и трансферрин, ЖРБ-37 связывает железо обратимо и с очень высокой аффинностью (средством). Предположили, что этот белок составляет как бы половину молекулы трансферрина, состоящего из двух доменов. Этому столь заманчивому предположению противоречит только сравнительно малая гомология аминокислотных последовательностей ЖРБ-37 и трансферрина.

Большой интерес представляет изучение иммунных свойств ЖРБ-37, так как это открыло бы широкие перспективы для создания вакцины не только против менингококковой, но и гонококковой инфекции. Антитела к этому белку обнаруживаются в сыворотках больных, но пока нет подробных статистических данных. Любопытно, что специфические антитела к нему регистрировались лишь в антименингококковых сыворотках мышей и кроликов, но не в антисыворотках к другим патогенным и условно-патогенным микроорганизмам. Очевидно, этот белок специфичен лишь для патогенных представителей рода *Neisseria*⁸. Многообещающим кандидатом для создания вакцины может быть и упомянутый трансферриновый рецептор TbpV, молекулярная масса которого для большинства штаммов составляет около 70 000. Этот белок индуцирует бактерицидные антитела, консервативен для некоторых штаммов, и антитела к нему обнаружены у большинства больных менингококковой инфекцией⁹.

Интересные данные получены недавно в нашем институте¹⁰. Выяснилось, что один из упоминавшихся ЖРБ с молекулярной массой 70 000 и



Стереодиаграмма белка-порины из бактерии *Rhodobacter rolini* — типичного тримера. Видно, что он состоит из трех одинаковых пептидных доменов (по: Weis M.S., Wacker T. et al. // FEBS Lett. 1990. V.267. P.268).



Модель белка из наружной мембраны гонококка, аналогичного белкам пятого класса менингококка. Петлеобразные участки белковой молекулы, выступающие на поверхности мембраны, содержат наиболее иммуногенные эпитопы. Жирными линиями в них показаны гипервариабельные районы белка. Цифрами обозначены номера аминокислотных остатков (по: Stephens D.S., McGee Z.A. // J. Inf. Dis. 1983. V.147. P.282—292).

серотиповой белок с молекулярной массой 40 000 имеют общие эпитопы с белками *Branhamella catarrhalis* — микроба, вызывающего отиты, конъюнк-

⁷ Mietzner T.A., Bolan C. et al. // J. Exp. Med. 1987. V.165. P.1041; Филатова Т., Гамзулина Л.Н. // Журн. микробиол., эпидемиол., иммунол. 1997. № 2. С.24.

⁸ Филатова Т. Н., Гамзулина Л. Н. // Цит. соч.

⁹ Ala' Aldeen D.A. // J. Med. Microbiol. 1996. V.44. P.237—243.

¹⁰ Гончаренко А.В., Филатова Т.Н., Батуро А.П., Падюков Л.Н. // Журн. микробиол., эпидемиол., иммунол. 1998. Т.1.

тивиты и инфекции респираторного тракта. Следовательно, если удастся расшифровать и синтезировать общие эпитопы, то принципиально возможна разработка вакцины против комплекса тяжелых инфекционных заболеваний.

ЛИПОПОЛИСАХАРИДНЫЙ АНТИГЕН

Известно, что липоолигосахарид (ЛОС) клеточной стенки менингококка обладает иммуногенностью и содержит антигенные детерминанты, одинаковые не только у разных штаммов менингококка, а, как предполагается, и у других грамотрицательных бактерий. ЛОС менингококка рассматривается как перспективный антиген для конструирования менингококковой вакцины. Однако липоолигосахарид высокотоксичен за счет липидной части молекулы. Если удалить липид А из молекулы ЛОС, токсичность молекулы резко снижается, но — увы! — одновременно снижается и его иммунная активность. Поэтому сейчас разрабатываются другие способы нейтрализации токсичного действия липида А. Один из них — попытка включения его в липосомы, которые связывают именно липидную часть молекулы ЛОС менингококка. Эксперименты, проведенные на животных, это подтвердили, и оказалось, что токсичность связанного липосомами ЛОС снижалась в несколько раз, а его иммуногенность даже несколько увеличивалась, например, появлялась способность вырабатывать антитела не только IgM, но и IgG класса¹¹. Эти многообещающие данные сейчас уточняются, работы ведутся на биотехнологическом уровне в плане синтеза лишенных токсичности компонентов ЛОС, изучения иммунного ответа и оптимальной конструкции липосом.

* * *

Почти 30 лет ученые упорно сражаются с возбудителем менинго-

кокковой инфекции, но, к сожалению, — эффективной вакцины, способной надежно защитить человека от этого заболевания, пока не создано. Сейчас существуют только вакцины, направленные против штаммов менингококка серогрупп А, С, Y, W-135. Оказалось, что наши знания об основных антигенах менингококка недостаточно. Необходимо еще изучить связь между структурными и функциональными особенностями белков, входящих в состав наружной мембраны микроба, определить и охарактеризовать их иммуногенные эпитопы и т. д.

Нельзя не согласиться с мнением голландского ученого Я.Пульмана, считающего, что В-менингококковая вакцина должна быть многокомпонентной и в ближайшем будущем ее можно будет приготовить на основе трех основных антигенов: нативных белковых везикул (содержащих в основном два наиболее иммуногенных белка первого и пятого классов), лишенного токсичности липополисахарида и железорегулируемого белка менингококка с молекулярной массой 70 000. Все это очень разумно и не вызывает возражений, за исключением предложения ввести в вакцину только один ЖРБ — рецептор трансферрина. Нам кажется, что для расширения защитных свойств в вакцину следует включить аналогичные рецепторы лактоферрина и какой-нибудь из низкомолекулярных трансферриновых рецепторов. Видимо, такая многокомпонентная вакцина может быть использована и для профилактики гонококковой инфекции. Кроме того, если включить очищенные ЖРБ в уже существующие полисахаридные вакцины, можно усилить их эффективность и расширить действие на В-менингококковые штаммы. Дальнейшие пути совершенствования вакцины, очевидно, связаны с применением новых биотехнологических методов для создания синтетических вакцин. Будем надеяться, что в XXI в. эта проблема будет решена.

¹¹ Закиров М.М., Петров А.Б., Бурханов С.А. и др. // Журн. микробиол., эпидемиол., иммунол. 1995. Т.1. С.49—53.

Гигантский буревестник

В. И. Булавинцев,

кандидат биологических наук

Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова
Москва

ОТ ЮЖНОПОЛЯРНОЙ станции «Беллингаузен» до гнездовья гигантских буревестников минут 30 хода морем на моторной лодке. Гнездовье большое — более 100 птиц нашли себе приют на диких, выветренных скалах морского залива.

Гигантский буревестник (*Macronectes giganteus*) — крупная, обычно буровато-серая, изредка почти белая птица (существуют два типа окраски). На земле она неуклюжа, передвигается, переваливаясь с боку на бок. Есть в ее походке что-то гусиное. У птиц большой желтоватый клюв, уплощенный и крючковатый на конце, с парой ноздревых трубок у

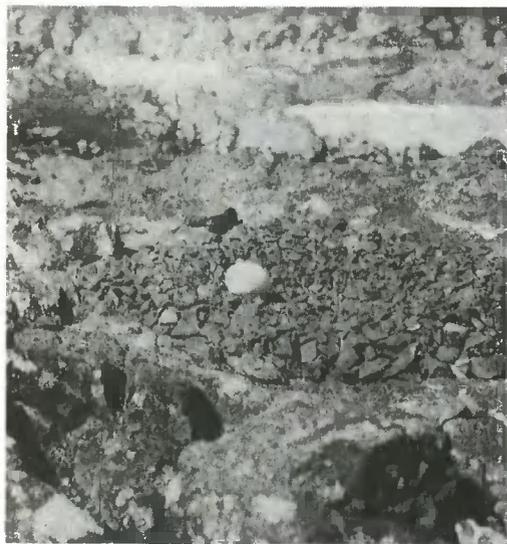
основания, за что и относят их к семейству трубконосых. Глаза у взрослых — светло-серые. От взгляда этих не по-птичь осмысленных глаз, внимательно, хмуро-настороженно следящих за каждым вашим движением, становится жутковато, не по себе.

Голос у гигантского буревестника грубый — смесь гусиного гогота с орлиным клекотом. Неуклюжие на земле, в воздухе птицы преобразуются. Почти не шевеля огромными, до двух метров в размахе, узкими, как лопасти ветряных мельниц, крыльями, скользят они бесшумными серыми тенями над мрачными скалами и синевой морского залива, высматривая пищу: погибших или обессиленных зверей и

птиц, головоногих моллюсков и рыб. Вглядываясь в угловато-сутулые, чуть горбатые силуэты птиц, невольно вспоминаешь картины из фантастических романов о затерянном мире, читанных в детстве, описания зловонных ущелий с парящими над ними птеродактилями.

Действительно, есть в этих птицах что-то зловеще-первобытное. Не знаю, может быть, дело не в птицах. Сами эти скалы, обильно поросшие мхами и лишайниками, нехоженые, великолепные в своей угрюмой первозданности, рожают в душе ощущение первобытной мощи природы, суровой ее красоты.

Начало антарктического лета. Птицы насиживают



Непритязательное гнездо с яйцом.
Здесь и далее фото автора



Насиживание кладки.

крупные белые яйца, по одному в гнезде, положенные без подстилки, в ямки, вырытые в мелком щебне, устилающем плоские вершины скал.

Дней через сорок, к декабрю, в гнездах появляются птенцы: светло-серые комочки пуха с непомерно большими, тяжелыми клювами. Первое время родители обогревают беспомощных потомков, берегут от нападения назойливых и нахальных поморников, но вскоре начинают оставлять одних. Птенцы при опасности защищаются от обидчиков маслянистой, отвратительно пахнущей жидкостью, выплевывая ее на расстояние до двух метров.

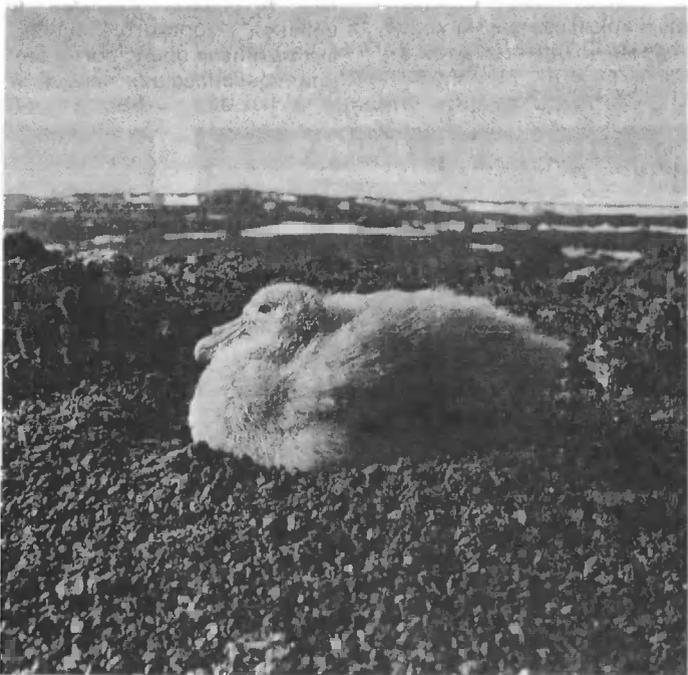
Птенцы надолго сохраняют свой роскошный, почти страусиный наряд из длинного нежнейшего пуха. Для них он совершенно необходим, иначе не выжить на сильных, сырых, холодных ветрах. Подростшие пуховики, размером с крупную курицу, издали видны как белые комья пуха, а вечером, подсвеченные лучами осевшего к горизонту солнца, кажутся огромными серебристыми одуванчиками.

Задолго до вылета родители перестают кормить птенцов, успевших накопить значительные запасы подкожного жира. Расходуя его, они оперяются и в марте самостоятельно вылетают из гнезд, уносясь на распластанных, неподвижных крыльях все дальше и дальше в Южный океан, покидая на долгие годы берег своего детства.

И кто знает, кому из них, повзрослевших и готовых к продлению рода, суждено найти себе пару и однажды весной вернуться к родным скалам Антарктики.



Первое время родители оберегают птенцов от непогоды и хищников.



Птенец в начале самостоятельной жизни.

Как Черное озеро стало Черным морем

К. Н. Несис,

доктор биологических наук
Москва

УЖЕ стояли стены Иерихона, но еще 2 тыс. лет оставалось до строительства первых египетских пирамид, когда на юге тех стран, что много позже станут называться Россией и Украиной, плескались волны Черного озера. Его береговая линия находилась на 100 с лишним метров ниже современного берега Черного моря, но оно все равно было самым глубоким пресноводным озером в мире. 7150 лет назад оно что называется в одночасье (всего, быть может, года за три) стало морем и залило более 100 тыс. км² суши между Черным озером и современным Черноморским побережьем.

Эту драматическую страницу истории нашей планеты выяснила в 1993 г. в экспедиции на маленьком российском научном судне «Акванавт» международная группа ученых: У.Райан, У.Питмен и К.Мейджор (Геологическая обсерватория им. Ламонта и Дозрти при Колумбийском университете, штат Нью-Йорк), К.М.Шимкус и В.Н.Москаленко (Южное отделение Института океанологии РАН, Геленджик), Г.Джоунс (Техасский сельскохозяйственно-механический университет), П.Димитров (Институт океанологии Болгарской АН, Варна), Н.Горюр, М.Сакинч и Х.Юдже из Стамбула¹. Их нужно перечислить всех хотя бы потому, что если бы еще лет десять назад кто-нибудь предложил ученым из стран

НАТО и социалистического блока работать вместе, исследуя историю Черного моря, такому крамольнику пришлось бы поближе познакомиться с КГБ.

Но ближе к делу. Начать нужно с начала. А начало было в разгар ледникового периода, 18 тыс. лет назад. Ледники занимали тогда громадные площади на севере и юге планеты, включая верховья рек бассейна Черного моря. Уровень Мирового океана стоял на 120—140 м ниже нынешнего. Черное и Мраморное моря тогда были пресными разобщенными озерами, а с гряды, существовавшей на месте Босфора, стекали две реки, одна из которых впадала в Черное озеро, а другая — в Мраморное. Дарданеллы тоже были рекой.

10 тыс. лет назад основная часть ледников растаяла, но уровень океана оставался все еще ниже нынешнего, хотя и продолжал медленно повышаться. Повышалась и температура. Около 9 тыс. лет назад наступил теплый и сухой бореальный период, а через полтора тысячелетия — теплый и дождливый атлантический. Но дождливым он был на севере Европы, потому что с последним ледниковым потеплением пути циклонов переместились с юга на север, в бассейн Северного, Балтийского и Белого морей. На юге Европы воцарилась засуха. Бессточное Черное озеро начало пересыхать, подобно Аралу. К началу атлантического периода его уровень упал на 150 м ниже современного. Береговая черта проходила по кромке нынешнего черноморского шельфа. Устье Дуная находилось где-то у современной Болгарии;

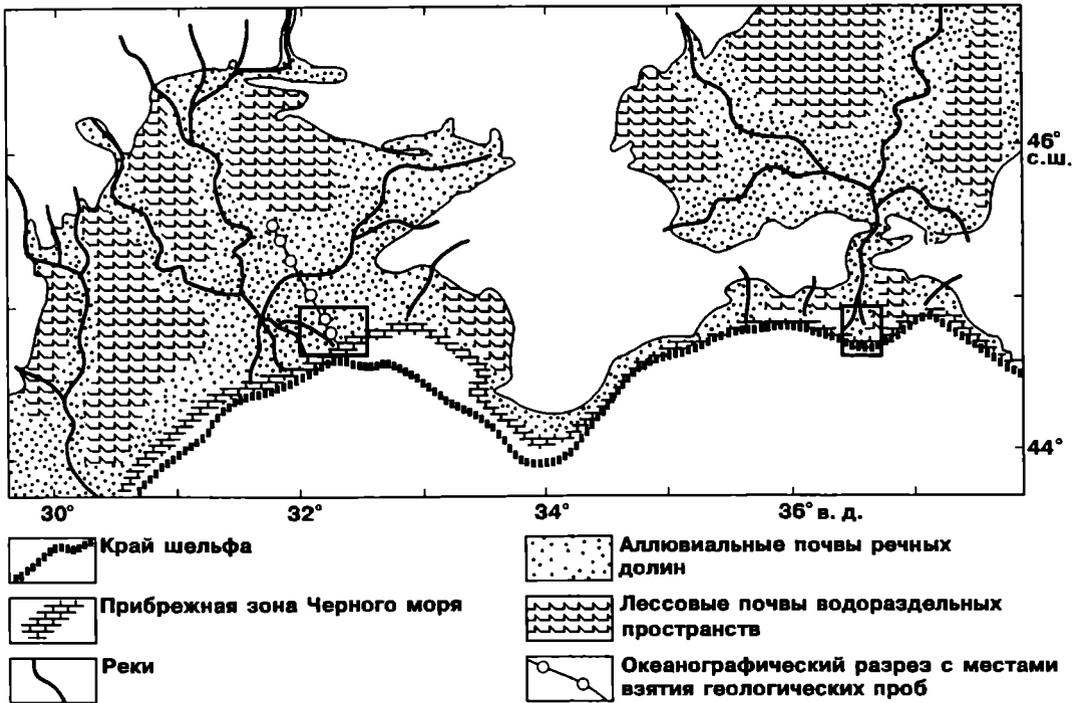
между Дунаем и Крымом впадала река Днестро-Буго-Днепр, а по Керченскому проливу протекали слившиеся Дон и Кубань. По долинам рек простирались плодородные аллювиальные (наносные речные) почвы, а в междуречьях — сухие местности с лессовыми почвами, образовавшимися из принесенной ветрами в ледниковый период пыли.

А Мировой океан по-прежнему наступал. Приблизительно 7400 лет назад Мраморное море — уже море! — подошло к нынешнему Стамбулу². Наконец, 7150 лет назад море достигло седловины Босфора, самого мелкого его участка (глубина 36 м), расположенного в 3.5 км от южного входа в пролив. Бурлящий поток морской воды обрушился в Черное озеро с высоты без малого полутора сотен метров. Почти настоящий морской водопад! Сейчас на Земле есть лишь один морской водопад — узенький поток воды в Карабогазском проливе, текущий из Каспийского моря в залив Карабогаз-Гол, да и тот несколько лет назад был перекрыт дамбой, затем, правда, снова пробитой. Но 5 млн лет назад существовал морской водопад куда повыше. Тогда открылся Гибралтарский пролив, и атлантическая вода хлынула в чуть ли не целиком высохшее Средиземное море. Высота Гибралтарского водопада была около 800 м, немногим меньше, чем водопада Саль-

© К.Н.Несис

¹ W.B.F.Ryan et al. // *Marine Geology*. 1997. V.138. № 1/2. P.119—126.

² E.Gökçeşen et al. // *Marine Geology*. 1997. V.140. № 1/2. P.183—199.



Северное Причерноморье перед прорывом Босфора 7150 лет назад (прямоугольники — районы исследований экспедиции на «Акванавте».

то-Анхель в Венесуэле, а это «чемпион» мира — 979 м!

Могучий поток Босфора размывал дно, сечение пролива возрастало, а вместе с этим увеличивался расход воды — положительная обратная связь! Уровень Черного — уже не озера, еще не моря — мог вырастать на десятки сантиметров в день, а его берега — наступать на несколько километров в месяц, поглощая за год территорию, сравнимую с Голландией или Бельгией!

Однако Босфорский водопад, как и Гибралтарский, существовал очень недолго. Через немногие годы Черное озеро стало морем, хотя и вдвое преснее Средиземного, и уровни обоих морей

сравнились. В Босфоре установилась типичная система течений, описанная в 1881—1882 гг. С.О.Макаровым: поверху опресненная вода вытекает из Черного моря в Мраморное, а понизу ей навстречу течет соленая мрамороморская. (Впрочем, за двести лет до этого именно такую схему течений описали местные рыбаки итальянскому ученому, основателю физической океанографии, графу Марсильи.)

Нечего и говорить, что вся пресноводная флора и фауна Черного озера погибли, и лишь их остатки сохранились в устьях рек и лиманах. По-видимому, именно тогда появился мощный слой сероводорода, ныне заполняющий всю толщу вод Черного моря глубже 150—200 м. Его основа — сгнившие остатки организмов, заселявших пресноводный бассейн. И если в Черном озере жизнь, пусть и скудная, могла существовать до наибольших

глубин, то в Черном море ниже верхней границы сероводорода обитают лишь бактерии да немногочисленные круглые черви.

Вот такой всемирный потоп местного значения. Основанием для библейской легенды о всемирном потопе, скорее всего, был не он, а послеледниковое затопление нынешнего Персидского залива. Там за время таяния ледников море продвинулось, хоть и не так быстро, как в Причерноморье, и не на 200 км (если считать от тогдашнего устья Днестро-Буго-Днепра до нынешней Одессы), а на 1000 с лишним, а главное: с началом потепления на засушливую местность с редкими зимними дождиками внезапно обрушились громохочущие летние муссонные ливни. «Окна небесные открылись; и лился на землю дождь сорок дней и сорок ночей... И усилилась вода на земле чрезвычайно» (Бытие, 7). Да и «горы Араратские»,

куда причалил ковчег Ноя, поближе к Месопотамии, чем к Северному Причерноморью.

Тем не менее «Великий черноморский потоп», возможно, сыграл немаловажную роль в истории ойкумены. В VI тысячелетии до н.э. земледелие и неразрывно связанный с ним оседлый образ жизни уже были широко распространены в Восточном Средиземноморье: сооружения из камня и

сырцовых глиняных кирпичей — в Израиле (Иерихон), на юге Турции (Мерсин), на Кипре (Кирокития), в Междуречье и кое-где в Причерноморье. Но лишь позднее земледелие распространилось на запад, в Европу и Закавказье. Не исключено, что толчком для этой волны переселения неолитических земледельческих народов стало исчезновение под волнами Черного моря плодо-

родных аллювиальных земель, столь пригодных для возделывания. Бежавшие от потопа люди несли с собой новую, более высокую культуру. А Северное Причерноморье надолго застыло на стадии Дикого поля с кочевым пастушеским населением и редкими вкраплениями (да и то лишь с середины I тысячелетия до н.э.) приморских древнегреческих колоний.

ОБЪЯВЛЕНИЕ

КОНКУРС НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ РАБОТ среди держателей грантов РФФИ

1. Российский фонд фундаментальных исследований объявляет конкурс научно-популярных статей по результатам исследований, поддержанных грантами РФФИ. Объем статьи: до 0.5 авт. листа (12 машинописных страниц, 20 Кб текстового файла), до 8 иллюстраций. Среди авторов статьи должен быть руководитель гранта. Кроме рукописи представляются стандартные формы РФФИ 1, 2, а также дискета с файлами form1.txt, form2.txt и файлом статьи в текстовом или винвордовском формате. Если иллюстрации выполнены в компьютерном виде, они также должны быть приведены на дискете (формат произволен).

В статье должен содержаться краткий обзор состояния области науки к моменту начала исследований по гранту, четко очерчены цели исследований и наглядно представлены их результаты. Статья должна быть доступна читателям с университетским образованием (физик должен понять геолога, биолог — химика).

На конкурс могут быть представлены статьи, опубликованные в научно-популярных журналах в 1997 и 1998 гг. или их переработанные варианты.

2. По каждому из семи отделов РФФИ (математика, физика, химия, биология, науки о Земле, общественные науки, информатика) будут присуждены шесть премий в размере 6000 рублей.

3. Премированные статьи после редактирования будут изданы в виде сборника.

4. Конкурсная комиссия формируется на основе экспертных советов РФФИ совместно с представителями ведущих научно-популярных журналов.

5. Сроки представления заявок: с 18 мая по 15 сентября 1998 г. включительно. Объявление результатов — 1 декабря.

Рекомендации редакции

Объявленный РФФИ конкурс в значительной мере аналогичен проводившемуся в 1996 г. конкурсу научно-популярных работ среди держателей грантов Международного научного фонда (МНФ). Коллектив редакции журнала «Природа» участвовал в подготовке издания книги «Российская наука: выстоять и возродиться», в которую вошли 45 статей лауреатов конкурса МНФ. Часть этих работ была опубликована в нашем журнале в №10 за прошлый год. Тем, кто собирается участвовать в конкурсе, можно посоветовать ознакомиться со структурой и стилем этих публикаций.

Nota bene

Археология. Антропология

Искусственному зубу — две тысячи лет

Целесообразность имплантации искусственных зубов, целиком (с корнем) замещающих настоящие, служит предметом постоянных дискуссий среди стоматологов. Тем временем поистине удивительную находку сделали недавно французские антропологи — Э.Крюбези и его коллеги (Crubezy E. et al.; Университет г.Тулуза III).

При раскопке Гальско-Римского некрополя в Шантамбре (Эссонн, Франция) в захоронении, относящемся к концу I — началу II в. н.э., был найден череп мужчины, который умер в возрасте немногим старше 30 лет. В верхней челюсти вместо второго правого премоляра у него был обнаружен искусственный зуб, целиком сделанный из железа (или нелегированной стали). Снаружи зуб сильно поврежден коррозией, но, как показала рентгеноскопия, его «корень», тесно примыкающий к стенкам альвеолы, хорошо сохранился. По всей вероятности, искусственным зубом его владелец активно пользовался по крайней мере в течение года до своей смерти.

Тот, кто изготовил протез, взял в качестве модели настоящий зуб, а имплантация была произведена вскоре после его утраты — иначе

не было бы такого хорошего обрастания «корня» тканями альвеолы. Исследователи не знают, почему проведена подобная операция, но поскольку с левой стороны верхней челюсти зубы уже давно отсутствовали, не исключено, что путем имплантации «стоматолог» (кавычки,

может быть, в данном случае и неуместны) хотел сохранить функционирующими зубы правой стороны.

Медики подчеркивают, что вживление зуба-имплантата в I в. н.э. отражает не только потенциал медицины того времени, но и правильность общих принципов имплантации, которые подвергаются сомнению врачами, занимающимися традиционным протезированием.

Nature. 1 January 1998. V.391. № 6662. P.29 (Великобритания).

Фото черепа с правым вторым премоляром в челюсти и рентгеновский снимок сохранившихся зубов и имплантата.



Астрономия

«Комета-астероид»

До недавних пор астрономы могли четко указать отличие астероидов от комет: кометы движутся по вытянутому, произвольно ориентированному орбитам, а с приближением к Солнцу окутываются обширной атмосферой (комой) и «отрачивают» гигантские газопылевые хвосты; астероиды движутся по значительно более круговым орбитам, лежащим вблизи основной плоскости Солнечной системы, и состоят из тугоплавких веществ, не испаряющихся даже при сближении с Солнцем. Однако эта простая классификация больше не годится: обнаружены объекты со свойствами, характерными как для астероидов, так и для комет.

Первые два из них были найдены в 1996 г. В Европейской южной обсерватории (ESO) открыли объект P/1996 № 2 (Elst-Pizarro): имея кометный хвост, он двигался по типично астероидной орбите. А найденный американскими астрономами объект 1996 PW, хоть и был лишен хвоста, но двигался по очень вытянутой орбите, как комета. Наконец, в 1997 г. европейские астрономы добавили к ним третью «комету-астероид», получившую из-за своего хвоста кометное обозначение P/1997 T3.

Открытие состоялось в ходе исследования астероидов, которые двумя группами сопровождают Юпитер в его орбитальном движении вокруг Солнца: одна группа на 60 градусов опережает Юпитер, другая на столько же отстает от него. Эти области орбиты называют точками Лагранжа L4 и L5; вместе с Солнцем и Юпитером они образуют равносторонние

треугольники. По традиции обнаруженным там астероидам присваивают имена героев Греции и Трои, сражавшихся в знаменитой Троянской войне. Детальное изучение района точки L4 недавно начали Г.Хан, С.Моттола, М.Лундстрем и У.Карсенти (G.Hahn, S.Mottola, M.Lundström, V.Carsenty; Институт планетных исследований, Берлин) и К.-И.Лагерквист (C.-I.Lagerkvist; Упсальская обсерватория, Швеция).

Изучая фотографии области вокруг точки L4 Юпитера, покрывшие 900 квадратных градусов небесной сферы, Лагерквист нашел около 400 астероидов, большинство из которых не были известны ранее. К их изучению обратились и другие астрономы. В октябре 1997 г. А.Натуес с помощью 60-сантиметрового телескопа обсерватории Ла-Силья (Чили) получил изображение одного из новых астероидов 19-й звездной величины, на котором Карсенти обнаружил у объекта небольшой хвостик. Детально изучив находку с помощью 3,5-метрового Телескопа новой технологии (NTT), астрономы убедились, что это — направленный в сторону Солнца пылевой хвост длиной 1,5 угловых мин, а ядро объекта окутано слабой пылевой комой. Его орбита оказалась умеренно вытянутой (эксцентриситет 0,36) со средним расстоянием от Солнца 6,67 а.е. (1 млрд км) и периодом около 17 лет. Таким образом, это — не «троянец», поскольку Юпитер движется вокруг Солнца на расстоянии 5,2 а.е. с периодом 11,86 лет.

Возникло немало вопросов. Например, почему эта странная комета имеет только направленный к Солнцу аномальный хвост, состоящий из крупных пылинки, нечувствительных к давлению солнечных лучей. Где же

обычный для комет газовый хвост, повернутый от Солнца? И что представляют из себя другие астероиды, движущиеся по вытянутым орбитам: быть может, при рассмотрении в мощный телескоп типа NTT у них тоже обнаружатся хвостики и кома? Пока совершенно не ясны строение и эволюционный статус «комет-астероидов»: особые ли это тела или под поверхность многих астероидов находятся залежи льда, который при сильном нагревании или соударении с другим астероидом имитирует кометное поведение? Нужны новые наблюдения и открытия.

ESO Press Release, PR 11/97, 24 November 1997.

Астрономия

Третий хвост кометы Хейла-Боппа

В конце апреля 1997 г., когда комета Хейла-Боппа уже удалялась от Земли, итальянский астроном Г.Кремонезе (G.Cremonese; Падуанская обсерватория) обнаружил у нее еще один хвост, отличающийся от всех известных прежде кометных хвостов. При наблюдениях, которые он проводил вместе с коллегами на телескопе им.Ньютона (Обсерватория Ла-Пальма, Канарские о-ва, Испания), было зафиксировано огромное — 50 млн км в длину и 60 тыс. км в ширину — образование, состоящее из атомов натрия.

Ранее было известно, что комета Хейла-Боппа, как и другие подобные тела, обладала пылевым и плазменным хвостами¹, возник-

¹ См.: Чилингарян И.В. Незабываемая комета // Природа. 1997. № 8. С.52—53.

шими при ее приближении к Солнцу. Присутствие в составе комет натрия также ранее наблюдалось, но никогда — в форме хвоста.

«Традиционные» хвосты комет образуются испарившимся с ее поверхности газом и унесенными в его потоках пылинками. Ионизованные ультрафиолетовым излучением Солнца молекулы газа взаимодействуют с магнитным полем солнечного ветра и образуют плазменный хвост. А мелкие пылинки под напором солнечного света выстраиваются в пылевой хвост. Оба типа хвостов — пылевой и плазменный — обычно имеют заметно изогнутую форму.

Третий хвост кометы Хейла-Боппа оказался ярким желтым, состоящим из атомов натрия. Он был прямым, а не изогнутым, как другие, и, в отличие от них, узким. Существование этого уникального образования подтвердили изображения, полученные с борта искусственного спутника Земли «Polar» еще в конце марта 1997 г., но обработанные лишь в мае.

К сожалению, новооткрытый хвост светился слишком слабо для наблюдений невооруженным глазом. Сам же его цвет горожанину знаком: он имеет те же желтые тона (спектральный дублет с длиной волны вблизи 589 нм), что и натриевые лампы, применяемые для уличного освещения. Но так светятся только нейтральные атомы натрия, неспособные взаимодействовать с магнитным полем солнечного ветра. Чем же тогда объяснить появление натриевого хвоста?

Астрофизик М.А'Хирн (M.A'Hearn; Университет штата Мэриленд, Колледж-Парк, США) указывает, что атомы натрия не только излучают, но и охотно погло-

щают желтый свет, которого очень много в спектре Солнца. Поэтому нейтральные атомы натрия должны сильно взаимодействовать с излучением Солнца и испытывать мощное отталкивание силой светового давления.

Оппонентом М.А'Хирна выступает М.Р.Комби (M.R.Combi; Университет штата Мичиган, Анн-Арбор, США), считающий, что световое давление не обладает для этого достаточной силой. Причина возникновения хвоста — солнечный ветер. Именно он «выталкивает» содержащие натрий ионизованные молекулы в хвост, после чего натрий отделяется от транспортировавших его молекул.

Дискуссия о происхождении необычного хвоста продолжается.

Circular of the International Astronomical Union. 18 April 1997; Nature. 1 May 1997. V.387. № 6628. P.23 (Великобритания).

Планетология

Объект 1993 SC из пояса Койпера

Прошло почти полвека с тех пор, как американский астроном голландского происхождения Дж.Койпер (G.Kuiper) выдвинул гипотезу, согласно которой непосредственно за орбитами Нептуна и Плутона находится входящее в состав нашей Солнечной системы скопление сравнительно мелких небесных тел, получившее наименование пояса Койпера. Автор гипотезы и его британский коллега А.Э.Эджворт (K.E.Edgeworth) предположили, что эти тела — своего рода остатки того «строительного материала», который не был «использован» в ходе образования

Солнечной системы. Однако проверка этого предположения долгое время оставалась невозможной ввиду удаленности объектов и их малых размеров.

Постепенное совершенствование астрономических приборов и методов позволило за последние годы открыть в поясе Койпера более 40 объектов размерами до нескольких сотен километров (или чуть менее). Полагают, что весь этот пояс содержит свыше 10^8 тел диаметром более 10 км каждое.

Вступивший сравнительно недавно в строй самый большой в мире Оптический телескоп им.У.М.Кека (Гавайские о-ва) позволил американскому астроному Д.П.Крукшенку (D.P.Cruikshank; Исследовательский центр НАСА им.Эймса, Моффет-Филд, штат Калифорния) со своими коллегами из Лаборатории по изучению Луны и планет при Университете штата Аризона в Тусоне и Лаборатории реактивного движения в Пасадене (Калифорния) провести уникальные наблюдения одного из тел в поясе Койпера.

Этот объект, обозначенный 1993 SC, имеет диаметр около 300 км. Проанализировав отраженное им излучение в близкой инфракрасной части спектра (1.42—2.40 мкм), ученые установили, что поверхность 1993 SC образована замерзшими углеводородами. Этот не совсем обычный для Земли лед состоит из CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 или C_2H_2 . Некоторые спектральные характеристики 1993 SC указывают, что там могут присутствовать и довольно сложные органические молекулы, о чем говорил известный американский астрофизик К.Саган (C.Sagan).

Очень важно, что почти такой же состав веществ

(мощный слой CH_4) был ранее обнаружен на поверхности планеты Плутон и спутника Нептуна — Тритоне, не входящих ныне в пояс Койпера.

Астрономы видят в этом открытии подтверждение гипотезы, что в свое время планета Плутон и «луна» Нептуна Тритон были крупнейшими телами пояса Койпера, а затем их «небесные пути» разошлись, тогда как 1993 SC «остается верен» этому поясу и поныне.

Science. 1997. V.276. № 5314. P.873, 937 (США).

Химия атмосферы.
Охрана окружающей среды

Кислотность сухой атмосферы

До сих пор считалось, что кислотные дожди выпадают в тех случаях, когда содержащие серу газы растворяются в каплях влаги, состоящих по меньшей мере из 200 молекул воды. Как известно, главная составляющая кислотного дождя — диоксид серы, образующийся при сжигании ископаемых топлив. В атмосфере этот газ окисляется — возникает газообразный триоксид серы. В присутствии влаги здесь и появляется серная кислота. В относительно крупных скоплениях воды, например в дождевых каплях, превращение триоксида серы в серную кислоту происходит очень быстро. Но когда молекулы обоих веществ пространственно распределены в атмосфере, для этого требуется какое-то время. Процесс ускоряется, если в нем участвуют две молекулы воды, соединенные водородной связью (димер). Димер образует с молекулой триоксида серы

нестойкое соединение, которое, разлагаясь, и дает серную кислоту. Однако и в таком случае реакция идет намного медленнее, чем в крупной капле.

Группа специалистов по химии атмосферы во главе с К.Уайтхедом (С.Whitehead; Манчестерский университет, Великобритания) детально изучила эти процессы. Сначала было прослежено, что происходит с молекулой триоксида серы в капле воды, состоящей примерно из 200 молекул. Математики Э.Мастерс и А.Хильер (А.Masters, I.Hillier) вычислили скорость взаимодействия триоксида серы с водой в каплях меньших размеров. Результаты показали: даже при участии всего десятка молекул воды серная кислота образуется почти так же легко, как и в большой капле. По-видимому, первые две молекулы катализируют процесс, а остальные играют роль растворителя.

Все это позволяет объяснить, почему серная кислота легко появляется даже в условиях относительно сухой атмосферы. Такое обстоятельство необходимо учитывать при попытках дать прогноз состояния атмосферы, а также растительности и других элементов окружающей среды, которые сильно страдают от кислотных дождей.

Chemical Communications. 1997. P.707 (США); New Scientist. 1997. V.154. № 2080. P.20 (Великобритания)

Физика.
Охрана окружающей среды

Сохранить природный ядерный реактор

В 1972 г. французские физики с удивлением обнаружили, что в некоторых

образцах урановой руды из района Окло (Габонская Республика, Западная Африка) отношение ^{235}U к ^{238}U значительно ниже средних значений для естественной смеси. Дальнейший анализ показал, что большое количество ^{235}U «сгорело» в ходе реакций деления ядер под действием нейтронов. Этот процесс, аналогичный тому, что имеет место в атомных реакторах, здесь, в естественных условиях, идет уже в течение 2 млрд лет.

Изучение такого явления дает редчайшую возможность понять и описать поведение радиоактивных актинидов и продуктов их распада в геологической системе. Полученные результаты могут использоваться для анализа состояния материалов при аналогичных процессах в промышленных атомных реакторах, а также способствовать усовершенствованию методов изоляции радионуклидов в хранилищах атомных отходов. Наконец, естественные реакторы предоставляют специалистам информацию о процессах, в ходе которых природная система может достичь состояния с самоподдерживающейся цепной реакцией деления.

За исключением одного, все эти «реакторы» расположены в горнорудном бассейне Франсвилль (центральный Габон) и активно разрабатываются франко-габонской горнодобывающей компанией. Лишь на небольшом месторождении урана в районе Бангомбе (30 км от Окло) добыча руды до сего времени не ведется. Глубина залегания природного реактора Бангомбе — всего 12 м, и на него могло бы повлиять поверхностное выветривание, однако предварительное обследование показало его хорошую сохранность. В мае 1997 г. компания объявила о

намерении приступить к разработке и этих залежей.

Технический комитет Европейской исследовательской программы «Окло—природный аналог», возглавляемый Ф.Готье-Лафайе (F.Gauthier-Lafaye; Центр по изучению геохимии почв, Страсбург, Франция), опубликовал обращение к мировой общественности с призывом воспрепятствовать этому намерению, поскольку на всей планете вряд ли найдется еще один подобный объект. Для того чтобы реакции ядерного деления приобрели цепной характер в природной смеси изотопов, необходимо совпадение довольно экзотических условий: урановые породы должны быть древнее 1 млрд 800 млн лет, когда отношение изотопов $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ в рудах было еще достаточно высоким (период полураспада первого составляет 700 млн лет, а второго — около 4.5 млрд лет); конгломерат отложения должен быть разбавлен легкими элементами, служащими замедлителями нейтронов деления (водой, углеродом); содержание поглощающих нейтроны элементов (бора, кадмия, ванадия) должно быть небольшим; вместилищем отложенный урана должен быть высокостабильный бассейн, защищенный от влияния возможных геологических событий. Насколько известно, нигде более на Земле подобные условия в совокупности не встречаются.

Авторы обращения предлагают сохранить этот уникальный объект для координированного и междисциплинарного изучения гидрохимических и геохимических процессов, связанных с миграцией радионуклидов. Месторождение содержит всего лишь 100—200 т урана, имеющего коммерческую ценность, и крайней необхо-

димости в его разработке нет. Зато оно незаменимо и достойно сохранения, как и ценные образцы лунных и марсианских пород.

Nature. 22 May 1997. V.387. № 6631. P.337 (Великобритания); Final Report EUR 16857: Oklo-Natural Analog, Office for Official Publications of the European Communities. 1996.

Физика

«Самозахват» белого света

Даже такой узкий и почти параллельный световой пучок, как луч лазера, при распространении в оптически однородной линейной среде из-за дифракции неизбежно расширяется в поперечном измерении — пучок становится расходящимся. (Термин «линейная среда» означает в данном случае, что ее коэффициент преломления для света с данной длиной волны постоянен и не зависит от того, сколько различных электромагнитных волн и с какой частотой и интенсивностью распространяются одновременно в рассматриваемой области.) Один из способов устранить расходимость пучка — искусственно нарушить оптическую однородность. Так, в волоконно-оптических световодах, широко используемых, например, в линиях связи, коэффициент преломления сердцевинки кварцевой нити делают выше, чем на ее периферии. Световые лучи внутри такого волокна распространяются хотя и не прямолинейно, но и не расходясь, оставаясь в тонком оптическом канале.

Другая возможность избежать расширения пучка — пустить его в такой нелинейной среде, коэффициент

преломления которой специальным образом зависит от амплитуды световой волны (фоторефракция). На оси пучка коэффициент должен быть выше, чем на периферии, где амплитуда волны меньше. Это обеспечит самофокусировку лучей. Свет в этом случае сам формирует в среде световод, вдоль которого и распространяется.

Особый случай самофокусировки — «самозахват» (self-trapping)¹. Взаимопротивоположные тенденции расходления и самофокусировки света в точности компенсируют друг друга, позволяя создать в среде практически параллельный пучок.

До сих пор процессы самозахвата в оптически нелинейных средах наблюдались только с использованием лазерного излучения, которое характеризуется высокой монохроматичностью и когерентностью. М.Митчелу и М.Сегеву (M.Mitchel, M.Seggev; Принстонский университет, США) удалось продемонстрировать самозахват белого света. Они фокусировали пучок видимого света от галогенной лампы накаливания на поверхности фоторефракционного кристалла $\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$. Диаметр входящего пучка составлял 14 мкм.

Для точной взаимной компенсации сходимости и расходимости требовалась тонкая подстройка нелинейности, которую осуществляли, прикладывая к кристаллу постоянное напряжение в 600 В. В некоторых случаях необходима была дополнительная подсветка всего кристалла широким свето-

¹ В русской литературе встречается термин «самоканализация». См.: Тарасов Л. Физические основы квантовой электроники. М., 1976. С.340.

вым пучком с длиной волны 488 нм, но иногда электрического поля было достаточно.

Без тонкой подстройки световой пучок, пройдя сквозь пластину, расширился до 80—100 мкм. Изображение и положение выходного пятна регистрировали телевизионной камерой. После подачи напряжения и включения подсветки широкое пятно постепенно сужалось, несколько смещаясь в поперечном направлении. Примерно через 3 ч (время, которое определяется медленной релаксацией диэлектрических свойств) пучок на выходе сузился до 12 мкм. Достигнутое состояние было стационарным и сопровождалось лишь незначительными флуктуациями формы и положения пятна, которые авторы объясняют колебаниями температуры материала.

Самозахват некогерентного и немнохроматического излучения открывает возможности для оптической передачи и обработки информации с использованием недорогих и малогабаритных источников света (ламп, светодиодов). Одновременно он затрагивает и некоторые аспекты фундаментальной физики, в частности, для процесса самозахвата требуется описать связь между статистикой излучения и его когерентностью и интенсивностью.

Nature. 31 July 1997. V.387. № 6641. P.854—855, 880—883 (Великобритания).

Химия

Анализатор гептила

С развитием космонавтики, ростом числа искусственных космических объек-

тов в окружающей среде увеличивается количество широкоиспользуемого компонента ракетных топлив — несимметричного диметилгидразина (НДМГ), обычно называемого гептилом. В отработанных первых ступенях космических ракет остается до 2 т этого компонента: в районах запуска ракет его количество, поступающее в окружающую среду за счет случайных проливов, составляет 300 т; общая загрязненная им территория бывшего СССР достигает 1 млн га.

Гептил высокотоксичен, опасен при любом поступлении в организм: через желудочно-кишечный тракт, органы дыхания, кожу, слизистую оболочку. Проявляет нервно-паралитическое, удушающее действие, канцерогенен и при окислении может образовывать еще более токсичное вещество — нитрозодиметиламин. Неограниченная растворимость в воде способствует его миграции, а стабильность в почве и растениях — накоплению в цепях питания. Поскольку эффективных способов обезвреживания гептила не существует, а сильно зараженные территории должны быть выведены из обращения, нужны надежные и безопасные экспресс-методы определения его концентрации.

Группа ученых Института нефтехимического синтеза и Института геохимии и аналитической химии РАН создала для оценки концентраций паров гептила в воздухе физико-химический анализатор на основе кварцевых весов. Это — малогабаритный прибор весом около 2 кг, работающий как от сети, так и от автономных источников питания. В нем использована зависимость частоты колебаний пьезоэлектрика (кварца со специальным покрытием) от количества поглощенного гептила. Покры-

тие, играющее роль химического сенсора, представляет собой полимерный комплекс меди, избирательно и обратимо взаимодействующий с этим токсичным веществом. Аналитическим сигналом, позволяющим делать вывод о загрязненности территории, в этом случае служит скорость изменения частоты колебаний пьезоэлектрика, что повышает чувствительность прибора и диапазон измерений концентрации.

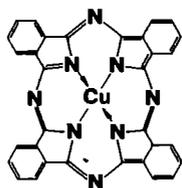
Удобство метрологических характеристик сконструированного анализатора (в области давлений пара НДМГ 0.3—300 ррт сенсор обладает линейной концентрационной зависимостью) и высокая скорость определения вещества (1 мин) обеспечат его широкое применение.

© Л.Е.Ледина,
кандидат химических наук
Москва

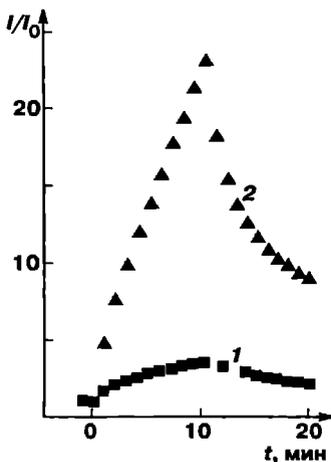
Химия

Фталоцианины как анализатор диоксида азота в атмосфере

Фталоцианины известны как синтетические красители, а кроме того, они хорошие поглотители различных газов, в частности таких загрязнителей атмосферы, как диоксид азота. Тонкие пленки фталоцианинов могли бы служить рабочими частями малогабаритных химических анализаторов-сенсоров, а также применяться как хромофоры в оптике и оптоэлектронике, если бы не главный их недостаток — низкая прочность. Возможное решение проблемы — получение ультрадисперсий фталоцианинов в полимерной основе, но



Фталоцианин меди (пигмент голубой фталоцианиновый).



Отклик на диоксид азота пленок осажденного в вакууме фталоцианина меди (1) и композита полимер-фталоцианин, полученного в плазме (2). I/I_0 — отношение тока I в пленке, находящейся в смеси сухого воздуха и NO_2 , к току I_0 в пленке, находящейся в воздухе без диоксида азота.

этому препятствует плохая растворимость, а также сложность очистки получаемой композиции от растворителя.

А.Е.Почтенный и его коллеги (Белорусский государственный технологический университет, Минск) предлагают способ получения ультрадисперсии фталоцианина меди в полимерах (полиимиде-5 или полимочевине) «сухим» методом. Фта-

лоцианин «замешивают» в полимер из газовой фазы в высокочастотной плазме тлеющего разряда, проводя одновременно газофазный синтез полимера.

В синтезированных «сухим» методом композита реализуется прыжковый механизм проводимости, а чувствительность электропроводности полученного материала к поглощенному им диоксиду азота даже выше, чем у обычной пленки фталоцианина, осажденного на полимер в вакууме. Полученные «сухим» способом композиты могут применяться для увеличения чувствительности химических сенсоров. Кроме того, метод дает возможность вводить фталоцианин в полимерную основу в форме, удобной для использования его фотопроводимости (микрористаллиты) или для реализации нелинейных оптических эффектов (отдельные молекулы). Таким образом, метод расширяет перспективы применения фталоцианиновых материалов.

Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1997. Т.39. № 7. С.1199—1204 (Россия).

Химия

Фуллерены помогут получить этилен

Высокая устойчивость фуллеренов¹ в широком интервале температур и их влияние на химические связи углеводородов позволяют создавать на их основе катализаторы высокотемпе-

¹ Подробнее о фуллерегах см.: Чернозатонский Л.А. Лауреаты Нобелевской премии 1996 г. По химии — Р.Керл, Г.Крото, Р.Смоли // Природа. 1997. № 1. С.96—99.

ратурных превращений этого класса соединений.

С.Д.Куц, А.П.Моравский, В.Е.Мурадян и П.В.Фурсиков (Институт химической физики РАН, Черноголовка) использовали именно эти свойства фуллеренов и применили фуллереновую чернь (остаток фуллереновой сажи после экстракции части фуллеренов каким-нибудь растворителем) для ускорения пиролиза метана. В ее присутствии процесс протекает при 600°C, что на 250°C ниже его порогового значения без катализаторов и на 100—200°C ниже температуры пиролиза в присутствии таких известных катализаторов, как графит, активированный уголь. С ростом температуры дегидрогенизационная активность фуллереновой черни росла так сильно, что единственным газообразным продуктом процесса при 900°C становился водород. Накопление продуктов реакции (в частности, пироуглерода) снижало активность черни, и в системе начинал выделяться этилен.

Конверсия метана при этом невелика — 4%, но она остается стабильной даже при 1000°C, пироуглерод при этом не образуется, а главное, при достаточном разбавлении водородом метана, пропускаемого над фуллереновым катализатором, доля этилена в продуктах реакции составляет 90—94%. Этилен, как известно, является мономером самого крупнотоннажного полимера — полиэтилена. Таким образом, появляется возможность получать этилен именно этим способом, используя особенности пиролиза метана в присутствии фуллереновой черни.

Фуллереновая чернь отличается от обычных катализаторов (саж, активированных углей, графита), единственный базисный структур-

ный элемент которых — плоские двумерные молекулы, образованные смежными шестиугольниками. Кривизна поверхности, возникающей при «сборке» пяти- и шестичленных циклов фуллереновой черни, по-видимому, и является причиной ее высокой реакционной способности.

Поскольку влияние водорода на каталитическое действие фуллереновой черни обратимо, можно предположительно описать механизм обнаруженного каталитического процесса: введенный в больших концентрациях водород блокирует активные центры дегидрогенизации на поверхности фуллереновой черни, что приводит к повышенному выходу этилена.

Нефтехимия. 1997. Т.37. № 2. С.116 (Россия).

Зоология

Пауки в бамбуке

Недавние исследования открыли удивительный мир членистоногих, населяющих междуузлия бамбука¹. Многие обитатели этого необычного биотопа проводят в нем всю свою жизнь.

Биологию одного из таких обитателей бамбука описали специалист по паукам М.Жабка из Высшей сельскохозяйственно-педагогической школы в Седльцах (Польша) и эколог Д.Ковач из Зенкенбергского института (Германия)². Прежде всего выяснилось, что этот бамбу-

ковый паук-скакунчик относится к новому виду и роду — *Paracyrba wanlessi* из подсемейства *Spartaeinae*.

Спартеины были известны необычным поведением: многие формы, используя агрессивную мимикрию, забираются в сети других пауков и поедают их хозяев³. Но парацирба чужих пауков почти не трогает, вероятно потому хотя бы, что очень редко с ними контактирует. Весь жизненный цикл этого вида проходит внутри междуузлий бамбука. Экспериментально показано, что парацирбы неплохо заселяют свободные камеры, но самки и молодые паучки проявляют территориальность, т.е. прогоняют или съедают пришельцев своего же вида.

Самое же удивительное — это спектр питания парацирбы. Оказалось, что половина ее жертв — личинки комаров и другие обитатели воды! В крупных стволах бамбука лужицы встречаются очень часто. Когда паук ловит водное насекомое, он неподвижно стоит у края воды, иногда даже ставит часть ног на ее поверхность. И ноги не тонут!

Ранее питание водными насекомыми среди пауков-скакунчиков, несмотря на многочисленные исследования их биологии, отмечено не было. Новый тип охоты — яркое свидетельство того, что эволюция пауков идет по линии развития и разнообразия именно поведенческих реакций, а не внешней морфологии. Даже внутри одного подсемейства спартеин разные формы охотятся совершенно по-разному!

По-видимому, дальнейшие исследования фауны пауков бамбука откроют другие, не менее удивительные адаптации.

© К.Г.Михайлов,
кандидат биологических наук
Москва

Биоокеанология

Брахиоподы силурийских гидротерм

Хотя древних местонахождений гидротерм известно более тысячи, всего лишь в нескольких из них содержатся окаменелые остатки гидротермальных животных. В частности, такие окаменелости обнаружены в девонских и силурийских отложениях на Южном Урале¹.

Таксономическая обработка силурийских (около 400 млн лет назад) окаменелостей еще продолжается, и последние ее результаты² весьма любопытны. Кроме трубок полихет и вестиментифер — животных, обычных и для современных гидротермальных сообществ, — были обнаружены многочисленные остатки брахиопод и моллюсков-моноплакофор, которые на современных гидротермах не отмечены. находка оказалась настолько неожиданной, что поначалу была принята за обломки других животных — вроде двустворок-везикомиид, подобных современным гидротермальным калиптогенам.

¹ Kovac D. // Natur und Museum. 1994. Bd.124. S.119—136.

² Zabka M., Kovac D. // Senckenbergiana biologica. 1997. Bd.76. № 1—2. S.153—161.

³ Подробнее о спартеинах см.: Михайлов К.Г. Необычные пауки // Природа. 1991. № 3. С.108; Михайлов К.Г. Пауки охотятся на пауков // Природа. 1991. № 6. С.114—115.

¹ Кузнецов А.П. и др. // Докл. АН СССР. 1988. Т.303. № 6. С.1477—1481; Кузнецов А.П., Масленников В.В., Зайков В.В. // Изв. АН. Сер. Биол. 1993. № 4. С.525—534.

² Little C.T.S. et al. // Nature. 1997. V.385, № 6612. P.146—148.

Заметим, что брахиоподы, а тем более моноплакофоры, в современном океане крайне малочисленны и проходят по ведомству «живых ископаемых». Зато для силура это был обычный компонент морских сообществ (и отнюдь не только гидротермальных). Будучи многочисленными и разнообразными, эти животные пытались осваивать все новые и новые доступные им места обитания, проникая и в гидротермальные сообщества — как это ныне делает относительно молодая и процветающая в современном океане группа рачков-амфипод. Стоит отметить, что амфиподы в массе своей присутствуют на современных гидротермах отнюдь не на первых ролях, и только один или два вида (в первую очередь *Ventrella sulfuris*) могут претендовать на почетное место в списке массовых видов³. Они сумели проникнуть в гидротермальные экосистемы, но еще не успели надежно здесь закрепиться. Можно предположить, что с силурийскими брахиоподами дело обстояло аналогично.

Когда роль брахиопод и моноплакофор в морских сообществах снизилась, прекратилась и их экспансия в новые биотопы. Вероятно, проникнув, но не закрепившись в гидротермальных сообществах, «колониисты» из этих групп разделили судьбу иных своих сородичей. Возможно, в различные времена и другие массовые группы животных предпринимали подобные неудачные «похо-

ды в гидротермаль», но крайне фрагментарная палеонтологическая летопись не сохранила следов таких попыток.

И только сравнительно немногие группы животных, которые, подобно вестиментиферам, сумели весьма надежно включиться в гидротермальные сообщества, смогли продержаться там на лидирующих позициях в течение геологически долгого времени: от первых известных находок ископаемых гидротермальных сообществ до наших дней.

© Г. М. Виноградов,
кандидат биологических наук
Москва

Генетика

Как белок р53 убивает клетки

Белок р53 известен как негативный регулятор клеточного цикла и онкосупрессор. В ответ на ДНК-повреждение или другие стрессорные воздействия на клетку он способен активировать транскрипцию ряда р53-зависимых генов, что ведет к остановке клеточного роста, репарации ДНК или запрограммированной гибели клетки (апоптозу). Последняя функция кажется наиболее загадочной, поскольку известно мало р53-зависимых генов, способных индуцировать апоптоз. Решительный шаг в этом направлении сделали К. Поляк (К. Polyak) и его коллеги.

Они использовали опухолевую линию клеток, лишённую функционального р53 белка, и инфицировали ее аденовирусным вектором с р53 геном дикого типа. При сравнении видеоизмененных

клеток с родительскими удалось обнаружить целый ряд новых генных продуктов, прежде чем трансфицированные клетки гибли по механизму апоптоза.

Среди новых р53-зависимых генов имеется несколько предполагаемых индукторов запрограммированной гибели клетки. Их генные продукты контролируют окислительно-восстановительный статус клетки¹ и, следовательно, продукцию активных видов кислорода (ROS). Последние, как известно, являются мощными индукторами апоптоза.

Так, один из новых генов — PIG 3 (р53-induced gene) — является близким родственником гена TED 2 растительной НАДФ·Н-оксидоредуктазы, которая вовлечена в апоптотический процесс, необходимый для формирования растительных меристем. Близкий гомолог PIG 3 у млекопитающих — ген НАДФ·Н хиноноксидоредуктазы, которая является потенциальным генератором ROS.

Проведенный анализ ROS показал, что они действительно индуцировались после заражения клеток вектором с р53 геном дикого типа и их продукция постоянно возрастала при апоптотическом процессе.

Недавно заговорили еще об одной функции белка р53 — участии в процессах клеточного старения. Возможно, новая функция тоже связана со способностью этого белка стимулировать продукцию ROS.

Nature. 1997. V.389. № 6648. P.300, 237 (Великобритания).

³ Виноградов Г.М. Пути экспансии морских рачков // Природа. 1995. № 2. С.25—34; Амфиподы в сообществах гидротермальных полей и холодных высачиваний на дне океана // Океанология. 1995. Т.35. Вып.1. С.75—81.

¹ Подробнее см.: Скулачев В.П. Кислород в живой клетке: добро и зло // Природа. 1997. № 11. С.26—35.

Биотехнология

Биоинженерный хлопок — победа над вредителем или поражение?

В 1997 г. в США было засеяно 730 тыс. га хлопком, который после биоинженерного вмешательства в его наследственную структуру оказался способным вырабатывать вещество, ядовитое для коробочного червя (*Helicoverpa spp.*). Ранее этот токсин выделяли из почвенной бактерии *Bacillus thuringiensis* и использовали для уничтожения вредителя в уже собранном хлопке. Время обработки при этом составляло 96 час.

Член Союза обеспокоенных ученых Д.Митчелл (D.Mitchell; Union of Concerned Scientists, Вашингтон, США) утверждает, что столь крупномасштабное использование новой культуры хлопчатника опасно, поскольку контакт вредителя с токсином длится в этом случае в течение всего сезона (время жизни двух-трех поколений насекомых), а значит, и возможность возникновения устойчивых к токсину форм очень велика. Появление резистентных к токсину форм вредителя приведет к тому, что один из наиболее широко используемых против него инсектицидов станет неэффективным. Компании, производящие устойчивый к вредителю хлопчатник, утверждают: доза токсина в нем столь велика, что воспроизводство насекомых просто невозможно. Однако в эксперименте это пока не доказано.

Не исключено, что широкое внедрение биоинженерного хлопка может оказаться победой вредителя над специалистами по защите растений.

World Watch. 1997. V.10. № 4. P.6 (США).

Медицина

Старость как часть жизни

Всемирная организация здравоохранения пересматривает программу «Старение и здоровье»: в связи с продолжающимся старением населения забота о здоровье пожилых людей в следующем тысячелетии будет доминировать в работе ВОЗ. Ее усилия будут направлены на то, чтобы сохранить «долговременное» здоровье, поскольку недееспособные старики могут оказаться тяжким бременем для всего человечества.

Прежняя программа рассматривала эту возрастную группу отдельно от остальной части общества. Принятая в новой программе концепция — «старость как часть всего жизненного цикла человека» — означает, что активизация мероприятий, направленных на улучшение состояния здоровья лиц всех возрастов, должна повысить уровень жизнеспособности и пожилых.

Как известно, различные органы человека наращивают свои возможности от рождения, достигая максимального развития около 25-летнего возраста. Затем происходит снижение работоспособности каждого органа и его сопротивляемости заболеваниям. Активная жизнь кончается тогда, когда работа какого-либо органа опускается ниже порога его работоспособности. Это происходит как при низком положении максимума возможностей органа, так и при быстром его изнашивании, снижении уровня активности.

Часть мероприятий ВОЗ в новой программе будет связана с улучшением здоровья всего населения за

счет сохранения здоровья молодого поколения. Другие составляющие программы позволяют уменьшить крутизну спада людей среднего возраста к нездоровью. Большое значение здесь придается учету влияния различных культур, особенностей морали и традиций, существенных для положений индивида в обществе. И, наконец, значительная часть усилий будет направлена на повышение качества жизни тех, кто оказался за порогом трудоспособности.

Итак, главная идея новой программы — поднять уровень здоровья человечества в целом для сохранения активности престарелых. Статистика США показывает: если бы заботы о здоровье населения находились на уровне 1982 г. и образ жизни американцев сохранялся постоянным, то сейчас в стране было бы на 1.2 млн недееспособных людей больше, чем это наблюдается на самом деле.

World Health. July-August 1997. V.4. P.4—5 (Швейцария).

Медицина

Проблемы пересадки органов животных

Ксенотрансплантация — пересадка органов, тканей и клеток животных человеку — пока еще экзотическая область хирургии. Развивается она в ответ на постоянно растущую во всем мире потребность в органах человека, используемых для обычной трансплантации.

По инициативе Всемирной организации здравоохранения 25 специалистов из стран Африки, Америки,

Азии и Европы, представляющих различные научные направления и сферы деятельности (микробиологию, иммунологию, ветеринарию, этику, религию, юриспруденцию и др.), обменялись опытом применения ксенотрансплантации и обсудили возникающие в этой области медицинской технологии проблемы.

Эксперты сошлись во мнении, что ксенотрансплантация находится в стадии эксперимента и не вошла в клиническую практику, но ее потенциальные возможности исключительно велики.

Главное препятствие для замены человеческих органов на органы животных — отторжение донорских тканей реципиентом. Преодоление этой трудности возможно двумя путями. Один из них — применение новых препаратов и методик, позволяющих подавить иммунную реакцию пациента. Другой — получение трансгенных, клонированных и других генетически модифицированных животных, чьи органы обладали бы большей совместимостью с человеческими.

Участники обсуждения указали и на грозящие человечеству опасности: многие болезни животных пока еще неизвестны, их возбудители не выявлены, поэтому пересадка органов животных может стать причиной новых заболеваний человека.

Ксенотрансплантация не только биомедицинская проблема. Ее применение ставит социальные, культурологические, этические вопросы и требует пересмотра некоторых религиозных догм. Большая часть этих проблем может быть решена только в ходе публичных дискуссий, путем расширения доступной широкому кругу людей информации о новом методе —

просветительской деятельностью.

ВОЗ указывает, что методы, подобные ксенотрансплантации, основанные на последних достижениях науки, должны рассматриваться в медицинских программах государств наряду с привычными формами борьбы с инфекционными болезнями.

Press Release WHO. 80.30 October 1997 (Швейцария).

Геология

Откуда золото?

Часть геологов полагает, будто крупнейшие в мире золотые месторождения Витватерсрандского бассейна (ЮАР) сформировались около 2 млрд лет назад благодаря тому, что потоки воды сначала вымывали микроскопические частицы золота из содержащих их древних геологических пород, а затем, по мере того как реки выходили на равнинное плато и замедляли течение, несомые ими вещества осаждались на дно. В этих осадочных породах нижние слои под давлением затвердевали, и золото оказывалось «запертым» в жилах.

По мнению других специалистов, золото не могло попасть в трещины и образовывать жилы до тех пор, пока не сформировался весь бассейн. Они указывают, что район Витватерсрандского бассейна изобилует многочисленными разломами земной коры и постоянно происходящее в них трение слоев породы ведет к нагреванию содержащейся в породах влаги до 400°C. Из-за высокого давления вода не превращается в пар, и золото

выщелачивается. Когда же воды по трещинам поднимаются вверх, растворенное в них золото оседает в трещинах. С подтверждением правильности этой гипотезы выступил геолог Э.Барникот (A. Barnicoat; Лидсский университет, Англия) на конференции Британской ассоциации содействия развитию науки (Лидс, сентябрь 1997 г.).

Искусственно вызывая ударами вибрацию почвы, исследователи имитировали слабые землетрясения и регистрировали распространение сейсмических волн в земной коре. Это позволило построить карту разломов и трещин, простирающихся на глубину 4 км. Данные, полученные с помощью электронного микроскопа, показывают, что золото присутствует лишь в пределах сети мелких трещин, которые заполнены благородным металлом уже после формирования пород Витватерсрандского бассейна.

Эти выводы, помимо теоретического, имеют немаловажное прикладное значение: геологоразведчики компании «Англо-американ голд» (ЮАР), которая финансировала исследование, уже используют их в своей работе.

New Scientist. 1997. V.155. № 2099. P.25 (Великобритания).

Геотектоника

Запад США: новый взгляд на геологическую историю

До сих пор считалось, что история формирования западной части Северной Америки с ее высокими системами Сьерра-Невады и Скалистых гор связана с

непрерывным вздыманием огромных участков суши. К совершенно иному заключению пришел коллектив сотрудников, возглавляемый Дж.А.Уолфом (J.A.Wolf; Университет штата Аризона; Тусон, США). Их выводы основаны на изучении ископаемых остатков растительности, найденных в той части геологической провинции Большой Бассейн, которая находится на территории штата Невада и отделяет Сьерра-Неваду и Скалистые горы от плато Колорадо.

Эта провинция представляет собой средоточие высоких горных хребтов с плоскими долинами, дно которых лежит на высоте всего 1 тыс. м над ур.м. Хребты сложены кристаллическими породами; долины на плато прорезаны реками, в том числе Колорадо, образовавшей известной Большой Каньон — один из глубочайших в мире (до 1800 м; длина 320 км).

Для определения палеоклимата соответствующего района исследователи проанализировали различные характеристики ископаемых листьев (их форму, размеры, количество желобков, зазубрин и др.), которые были взяты из 12 пунктов западной Невады. Указанные характеристики обычно отражают условия данного места, что позволяет, в частности, судить о его положении над уровнем моря в отдаленные эпохи.

По утверждению Уолфа с коллегами, 16 млн лет назад провинция Большой Бассейн возвышалась примерно на 3 тыс. м над ур.м., а затем, к периоду, отстоящему от нас на 13 млн лет, опустилась до нынешнего положения. Возможно, более 16 млн лет назад этот регион представлял собой некое подобие современных Анд, отличаясь еще большей вы-

сотой. С той поры земная кора на территории Невады претерпела сильное растяжение, что и привело к сокращению ее мощности.

Интересно, что аналогичный вывод сделал годом ранее Б.Вернике (B.Weg-peske; Калифорнийский технологический институт, Пасадена, США). Изучая строение Сьерра-Невады, он отметил, что большинство горных хребтов имеет мощные коровые основания, «плавающие» поверх мантии. Недавние сейсмические исследования показали, что толщина коры в Сьерра-Неваде не превышает и 30–40 км, что не в состоянии объяснить современную высоту этих гор. Отсюда Вернике сделал вывод, согласно которому Сьерра-Невада и Большой Бассейн некогда были выше, чем ныне, опираясь на более мощную кору, которая за последние 20 млн лет стала значительно тоньше.

Таким образом, гипотеза о том, что этот регион постоянно только воздымался, подверглась обоснованным опровержениям в результате двух независимых исследований. Дальнейшее изучение проблемы связано с планируемыми Вернике работами в районе каньонов Сьерра-Невады.

Science. 1997. V.276. № 5319. P.1672 (США).

Геофизика

Почему смещаются полюсы Земли?

Проводящиеся в течение многих десятилетий наблюдения на станциях Международной службы движения полюсов Земли (до 1961

г. именовалась Международной службой широты; была создана в 1899 г.), а также 20-летние измерения с помощью геодезических спутников указывают, что тело планеты, а значит, географическая ось Земли, отклоняется от оси ее вращения (неизменной в пространстве) со скоростью около 10 см/год, т.е. примерно на 1° в 1 млн лет. Однако оценки истинного смещения в масштабах миллионов лет очень неопределенны. Предполагается, что за эпоху кайнозоя (последние 65 млн лет) этот дрейф составил около 10°, причем последние 10 млн лет его скорость достигает 0.5° в 1 млн лет.

Постоянное смещение географических полюсов раньше объяснялось главным образом таянием ледников: потоки втекают в Мировой океан и тем самым изменяют общее распределение масс в теле Земли, на что она реагирует сменой характера своего вращения. Но это справедливо лишь относительно последних веков и не объясняет процессы, происходившие в предшествующие миллионы лет.

Недавно новое объяснение предложили геофизики Б.Штайнберг (B.Steinberg; Институт метеорологии и геофизики при Франкфуртском университете, Германия) и Р.Дж.О'Коннелл (R.J.O'Connell; Гарвардский университет, Кембридж, штат Массачусетс). Они построили модель геоида (для эпохи кайнозоя) с учетом движений в мантии Земли, соответствующих топографическим аномалиям, а также движений литосферных плит; были вычислены величины адекции в мантии с ее неоднородностями плотности (т.е. горизонтальное перемещение масс, вызывающее изменение их физических свойств).

Можно считать более или менее установленным, что основная причина аномалий в распределении масс Земли, отвечающих за отклонения от идеальной сферы, — это холодные и высокоплотные плиты коры, погружающиеся в пределах глубоководных желобов в земные недра.

В результате удалось создать правдоподобную картину того, как должны были смещаться географические полюсы нашей планеты в течение последних 65 млн лет. Эта картина оказалась весьма сходной с той, которая воссоздается по данным палеомагнетизма на основе реконструкции местоположения плит земной коры относительно неподвижных горячих мантийных струй, поднимающихся к поверхности Земли.

Nature. 1997. V.387. № 6629. P.131, 169 (Великобритания).

Палеонтология

Свидетельствует «вилочка» динозавра

У всякой птицы есть вилочка — дугообразная кость между крыльями, которая служит им как бы пружиной, помогающей в полете. По предположению некоторых палеонтологов, птицы произошли от динозавров. Если это верно, таким устройством должны были обладать и ископаемые ящеры. Однако до сих пор вилочку у динозавров никто не обнаружил; в редких случаях, когда находили нечто похожее, скептики ука-

зывали, что косточка лежит «не в том месте скелета» и вообще сильно повреждена.

Но вот осенью 1997 г. палеонтолог во главе с М.Нореллем (M.Norell; Американский музей естественной истории, Нью-Йорк) сообщили о своей удаче: работая на территории Монголии, которая всегда славилась кладбищами ископаемых животных, они впервые обнаружили отлочно сохранившуюся V-образную кость в 1 см длиной, идентификация которой с вилочкой не вызывает сомнения. Более того, она лежала точно на своем месте — в плечевой области динозавра велоцираптора.

Эта тоненькая «деталь» (она выглядит «субтильнее», чем у нынешних пернатых) подтверждает, что у некоторых динозавров тоже была вилочка.

Nature. 1997. V.389. № 6650. P.447; New Scientist. 1997. V.155. № 2102. P.23 (Великобритания).

Палеонтология

Крупнее — не значит удачливее

Прошло 125 лет с тех пор, как американский зоолог и палеонтолог Э.Д.Коп (E.D.Cope), профессор Пенсильванского университета, установил биологическую закономерность, названную «законом Копа»: все живые существа имеют тенденцию к укрупнению своего тела; эволюция в геологических масштабах времени приводит к увеличению размеров организма, так как якобы крупное

животное легче, чем маленькое, может защититься от хищника, обеспечить себя пищей и территорией... Закон Копа все это время стоял непоколебимо и был вписан во все учебники по эволюции живого. Однако недавно правильность его поставил под серьезное сомнение палеонтолог Д.Яблонски (D.Jablonski; Чикагский университет, штат Иллинойс, США).

Прежде чем заявить о своем несогласии, Яблонски в течение 10 лет изучал образцы ископаемых моллюсков, которые населяли Североамериканское побережье Атлантики и берега Мексиканского залива в период между 81 и 65 млн лет назад. Он измерил и подверг статистической обработке крупнейшие из доступных науке экземпляров этих животных, принадлежавших к 1086 видам (что можно считать своего рода научным подвигом). Объединив моллюсков по родовым принадлежностям в 191 группу, он проследил, как со временем менялись их размеры.

Закон Коп гласил, что в каждой родовой группе организмы становились все большими как среди исходно мелких, так и среди изначально крупных. Ничего подобного анализ Яблонского не подтвердил. Действительно, от 27 до 30% моллюсковых форм веками возрастали по размерам, зато от 26 до 27% становились все мельче. Примерно 25—27% этих животных как бы «поляризовались»: мелкие становились еще мельче, а крупные увеличивались в размере.

Science News. 1997. V.151. № 5. P.72 (США).

Вселенная Артура Эддингтона

В. Г. Сурдин,

кандидат физико-математических наук
Москва

ЭТА книга появилась весьма своевременно. Разрушая тоталитарное общество, мы нуждаемся в примерах того, как сочетать высокий профессионализм с широким философским взглядом на мир, как совместить религиозное воспитание и стремление к прогрессу. Именно эти и еще многие другие важные качества были присущи великому английскому астроному Артуру Эддингтону, имя которого известно у нас довольно широко, но жизненный путь и личные качества до сих пор обсуждались редко и неохотно.

О заслугах Эддингтона перед наукой можно сказать кратко: как основатель теоретической астрофизики он известен каждому студенту-астроному. Измерив отклонение лучей звездного света Солнцем во время его полного затмения 1919 г., Эддингтон получил первое убедительное доказательство справедливости теории тяготения Эйнштейна. И он же в 1923 г. написал одну из первых монографий в этой области — «Математическая теория относительности», фактически открыв эту теорию научному миру. По его просьбе для проверки расчетов У.С.Адамс измерил гравитационное красное смещение линий в спектре белого карлика Сириус В, что стало подтверждением еще одного предсказания общей теории относительности. Но в зрелом возрасте Эддингтон с трудом воспринимал новые веяния. Известна его отрицательная роль в судьбе моло-



А.В.Козенко. АРТУР СТЕНЛИ ЭДДИНГТОН (1882—1944). М.: Наука, 1997. 145 с.

дого С.Чандрасекара¹. Тем не менее великий индус стал Нобелевским лауреатом.

Широко известен анекдот, рассказанный Чандрасекаром. После одного из заседаний к Эддингтону подошел коллега и сказал: «Профессор Эддингтон, вы, должно быть, один из трех человек в мире, которые понимают общую теорию относительности», — и, почувствовав замешательство собеседника, добавил: «Не скромничайте, Эддингтон». На что Эддингтон ответил: «Напротив, я стараюсь понять, кто этот третий человек...» Эта история пересказывалась неоднократно, в разных вариантах, но только теперь, прочитав ее точное

изложение в книге А.В.Козенко (с.33), я понял истинный юмор ситуации: ведь к Эддингтону обратился не случайный любопытствующий, а Людвиг Зильберштейн — критик и толкователь теории относительности, очевидно, считавший себя ее знатоком.

Хотя жизнь Эддингтона лишена эффектных внешних коллизий (он работал в Гринвичской обсерватории, был директором обсерватории в Кембридже, президентом двух астрономических обществ — Королевского и Международного), все же в его биографии есть несколько моментов, которые кажутся мне нетривиальными. Карьера Эддингтона-астронома началась с юношеского увлечения звездами. Этим путем прошел не один выдающийся ученый, но далеко не всех увлеченных и талантливых юношей жизнь приводит в лоно науки: немало событий стоит на этом пути. И вот эпизод, определивший судьбу Эддингтона: «В десятилетнем возрасте Стенли с увлечением наблюдает небо в трехдюймовый телескоп, предоставленный ему директором школы» (с.10). Задумаемся, может ли сейчас (спустя век!) хотя бы одна наша школа так вот поддерживать увлечение ученика, отдав в его распоряжение телескоп, микроскоп или компьютер? Не менее важно и другое: Эддингтону удалось стать профессионалом. Выдающийся астроном современности Алан Сэндидж сказал как-то: «У каждого из нас есть кумиры, и, я думаю, эти люди стали кумирами потому, что достигли целей, казавшихся

¹ См.: Горн К.С. Черные дыры и искривление времени: дерзкое наследие Эйнштейна // Природа. 1994. № 1. С.90—103.

недостижимыми. Ну, а способны ли мы на это?»² Эддингтон смог взойти на уровень кумиров своей юности — из любителя он стал профессионалом, не потеряв при этом любовь к науке.

Еще одна веха на пути Эддингтона — это его талант популяризатора. В десятилетнем возрасте он начал «выступать» дома с «лекциями» по астрономии, при этом «его аудитория часто состояла из одного человека — старого слуги» (с.10). С первых шагов своей научной карьеры он пишет не только исследовательские, но также обзорные и научно-популярные статьи и книги; многие из них тогда же были переведены на русский и сыграли немалую роль в развитии отечественной астрофизики. Профессор Эддингтон ездил с лекциями, выступал в студенческих научных клубах, где однажды был представлен аудитории в качестве «профессора астрологии» (с.35).

Замечу, что для астронома такая путаница весьма оскорбительна. Автор этой рецензии недавно чуть не получил инфаркт, увидев на типографских упаковках со своей книгой «Астрономические олимпиады» ярлычок с надписью «Астрологические олимпиады». А когда несколько лет назад одна из московских газет опубликовала объявление о конкурсе «на замещение должности профессора МГУ по кафедре астрологии» — шуткам и издевательским звонкам в наш институт не было конца. Поэтому легко понять состояние Эддингтона, представленного аудитории в качестве астролога. Это был лишь один из многочисленных курьезов, связанных с его популяриза-

торской деятельностью.

Научная работа Эддингтона тоже не была безоблачной. Руководствуясь прежде всего данными наблюдений реальных звезд, он делал предположения, не имевшие в те годы надежного физического обоснования: например о термоядерном превращении водорода в гелий. Насмешки кавендишских физиков не смутили астронома, хотя вряд ли стимулировали его работу. На замечания коллег о том, что звезды недостаточно горячи для термоядерных реакций, «он с некоторым раздражением советовал им пойти поискать место погорячее» (с.68).

Разумеется, научный консерватизм оправдан, когда защищает нас от изобретателей вечного двигателя, но только до тех пор, пока он не перерастает в предрассудок, закрывающий перспективу поиска. В конце концов природа не обязана соответствовать нашей сегодняшней физике. Теперь это стало аксиомой для астрофизиков, возможно, лучше других представляющих все разнообразие возможностей Творца.

Кстати говоря, Эддингтон был религиозным мистиком. Квакерское воспитание наложило отпечаток на его мировоззрение. Он принимал модную у нас сегодня точку зрения, что существуют два способа постижения истины — научный и религиозный. Размышления Эддингтона о роли субъекта в процессе познания явились предтечей антропного принципа: теперь уже никого не удивляет, что факт наблюдения влияет на состояние микросистемы, а свойства Вселенной согласуются с фактом нашего бытия.

И хотя большинство из нас все же прямолинейные материалисты, мне кажется, многие согласятся со словами Эддингтона, проводящего

параллель между наукой и верой: «Мы ищем истину; и если некий голос скажет нам, что через несколько лет мы увидим конец путешествия, что облака сомнений рассеются и что мы овладеем полным знанием о физической Вселенной, эта новость будет никоим образом не радостной. В науке, как и в религии, истина сияет впереди, как маяк, указывающий нам путь; это наилучшее, что нам позволено найти» (с.97).

Не останавливаясь на литературных достоинствах, замечу, что собранный автором материал чрезвычайно интересен. Эта небольшая, но насыщенная книга дает пищу для размышлений специалистам разных дисциплин. Жизнь Эддингтона так тесно переплелась со многими судьбами и событиями эпохи «бури и натиска» в физике, что его биография — это фактически целый пласт замечательных дел и портретов того времени. Удивительно, но некоторые события начала века имеют продолжение в наши дни: например история холодного ядерного синтеза.

Я получил большое удовольствие от книги А.В.Козенко. При этом удивляет ее смехотворный тираж (360 экз.) — какому же избранному кругу она предназначена? (Книги самого Эддингтона даже в 20-е годы выпускались у нас тиражами, в десятки раз большими.) Нетрудно вообразить кропотливую работу автора, представившего нам поучительное жизнеописание личности неординарной, труд редакторов, наборщиков, верстальщиков и печатников — и все это ради того, чтобы три сотни экземпляров этой книги незримо расстались в библиотеках друзей автора и многочисленных удачливых покупателей, поспевших в один из московских магазинов?

² Croswell K. The Alchemy of the Heavens. New York, 1995. P.121.

История науки

С.И.Романовский. ЛЕОНИД ИВАНОВИЧ ЛАТУГИН (1864—1915). СПб.: Наука, 1997. 191 с. (Научно-биографическая литература.)

В зале Ученого совета Всероссийского геологического научно-исследовательского института имени А.П.Карпинского (ВСЕГЕИ) висят девять портретов выдающихся геологов, в разное время работавших в этом институте. Девятый портрет принадлежит Леониду Ивановичу Латугину — не академику, не члену-корреспонденту и даже не профессору. В Геологическом комитете он занимал скромную должность геолога, а в Петербургском горном институте, где преподавал, числился адъюнктом.

Леонид Иванович Латугин — это не просто выдающийся ученый, родоначальник отечественной угольной геологии, блестящий знаток геологии Донецкого бассейна, основоположник нового метода детального картирования (сегодня этот метод обретает новую жизнь), труды которого способствовали созданию фундаментальных основ геологической науки. Но он еще и наиболее яркий представитель радикального крыла русской интеллигенции начала XX в. Его «активность» в 1905 г. достигла такой степени, что им заинтересовался П.А.Столыпин. Это также нашло отражение в книге.

Автор не стал раскладывать жизнь Л.И.Латугина на составные части: биографию, научное наследие, общественную доминанту. Хронологическая последовательность вкюпе со строго выверенной документальностью — вот главные критерии, с которыми автор подошел к этой работе. В конце книги

он поместил оригинальное эссе, где высказал свои представления о законах биографического жанра.

Экология

В.Б.Чернышев. ЭКОЛОГИЯ НАСЕКОМЫХ. М.: Изд-во МГУ, 1996. 304 с.

В основе экологии всегда лежит жизнь отдельной особи, ее взаимоотношения с окружающей средой. Экология насекомых, с одной стороны — часть общей экологии, являющейся сложной биологической дисциплиной, а с другой — основа для решения важнейших практических задач в области сельского и лесного хозяйства, а также медицины.

Книга Чернышева представляет собой курс лекций, рассчитанный на студентов-энтомологов, знакомых с экологическими проблемами и имеющих представление о насекомых в целом. Она состоит из пяти глав, в которых рассматриваются абиотические факторы среды, биологические ритмы насекомых, их популяции и экосистемы, а также вопросы экологической эволюции. Большое внимание автор уделяет экологическим и физиологическим механизмам такого парадоксального явления, как лет насекомых на искусственные источники света. Дан обзор впервые обнаруженного влияния геомагнитной обстановки на поведение насекомых; рассмотрены суточные, сезонные, лунные и приливные ритмы и их влияние на экологическую адаптацию насекомых. Автор излагает свою концепцию о роли «времени потенциальной готовности» в подстройке ритмов к конкретным изменениям среды. Рассмотрены различные формы взаимосвязи между насекомыми и други-

ми организмами (теория экологических ниш и жизненных форм), а также роль насекомых в антропогенных экосистемах. Автор поднимает проблемы охраны насекомых и возможности использования их как индикаторов загрязнения среды.

Зоология

С.О.Петросян, О.С.Петросян. ООЛОГИЯ И НИДОЛОГИЯ ПТИЦ АРМЕНИИ. М.: Архитектура, 1997. 155 с.

Зоологические коллекции остаются до сих пор важнейшим источником фактических сведений. Основные хранилища коллекций — естественно-исторические музеи — одновременно представляют собой и исследовательские центры. Однако большое число коллекционных материалов находится в частном владении и далеко не всегда доступно для науки.

Та же участь могла постичь и коллекцию Петросянов, но ее владельцы решили опубликовать свой аннотированный каталог. Это богатое собрание содержит весьма ценные материалы по орнитофауне Армении и некоторых других регионов. Дело в том, что в современных этимологических справочниках по орнитологии данные о гнездах и яйцах птиц (нидо — гнездо, оо — яйцо), гнездящихся на территориях Армянского нагорья, практически не освещаются.

Каталог составлен очень подробно. Авторы приводят данные о биотопическом расположении гнезд и их размерах, сведения о весе и размерах каждого яйца кладки, степени их насыщенности. Для колониальных птиц нередко указывается численность колонии, из которой были взяты кладки, ее состав (в случаях, когда поселение

было не моновидовым), наличие и возраст птенцов.

Работа выходит за рамки формального каталога и представляет несомненный интерес для специалистов.

Экология

В.Е.Соколов, К.П.Филонов, Ю.Д.Нухимовская, Г.Д.Шадрина. ЭКОЛОГИЯ ЗАПОВЕДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ. М.: Янус-К, 1997. 576 с.

Настоящий труд представляет собой продолжение цикла исследований по заповедному делу. В нем авторы стремятся дать оценку территории заповедника как экологического и социального фактора особого значения, от которого зависит возможность и успешность сохранения всего разнообразия природных комплексов в конкретных условиях среды. В основу книги легли исследования, которые получены в заповедниках, расположенных на территории России: Воронежском, Дарвиновском, Приокско-Террасном и др. В книге использованы также материалы из заповедников стран СНГ, главным образом тех, что существуют длительное время и где ведутся исследовательские работы. Кроме этого, были широко использованы зару-

бежные литературные источники по результатам исследований в сфере территориальной охраны природы.

История науки

В.И.Вернадский. СТАТЬИ ОБ УЧЕНЫХ И ИХ ТВОРЧЕСТВЕ. М.: Наука, 1997. 364 с. (Библиотека трудов академика В.И.Вернадского.)

В книге — 86 названий. Это материалы, посвященные ученым, чей талант и вклад в науку Вернадский высоко ценил. Большинство работ увидело свет при жизни автора, 13 — после его кончины, и 23 статьи, сохранившиеся в Архиве Российской академии наук, публикуются впервые.

По жанру эти материалы различны: записки-представления на конкурсы и выборы, отзывы о трудах, экскурсии в историю науки и некрологи, но в каждой из них дается оценка научной деятельности ученого. Вернадский выступает здесь не только как всем известный ученый-энциклопедист, но и как благодарный ученик, помнящий всех своих учителей (В.В.Докучаева, Г.В.Хлопина, Ф.Ю.Левинсона-Лессинга). Он проанализировал многочисленные факторы, формирующие личность ученого, его взгля-

ды и интересы, взаимоотношения с окружающим миром. В работах Вернадского зачастую отражены не только его личные впечатления, но и та общественная атмосфера, которая окружала его друзей и коллег. Собрание этих статей — объемный исторический документ, свидетельствующий о том, как и в каких условиях развивалось естествознание в России на рубеже веков.

Текст в книге разделен на две части. В первой помещены работы о творчестве М.В.Ломоносова, И.Канта, И.В.Гете как натуралистов, во второй — о творчестве ученых-современников: А.Н.Краснова, П.А.Замятченко, Д.Н.Соболева, К.Д.Глинки и др. Все статьи расположены в хронологическом порядке как в целом, так и внутри серии работ, посвященных одному ученому. Для всех работ строго сохранена авторская структура: сам текст, ссылочный аппарат, список литературы. Публикуется по правилам современной орфографии.

Некоторые фактические материалы в авторском тексте устарели, но и в настоящее время сама постановка Вернадским проблем и задач представляет исключительный интерес.

Букет из Красной книги

Г. М. Виноградов,

кандидат биологических наук

Институт проблем экологии и эволюции им.А.Н.Северцова РАН

Т. Н. Виноградова,

Главный ботанический сад РАН

Москва

КОГДА заводят речь о профессиональной этике биологов, первым делом на ум приходят проблемы, связанные с генной инженерией или с экспериментами на животных. Реже вспоминают, что биологу, посвятившему себя изучению живого, более чем кому-либо другому должно быть зазорно нарушать природоохранные законы. И вроде бы все с этим согласны, но...

Каждую весну большие

© Г.М.Виноградов, Т.Н.Виноградова

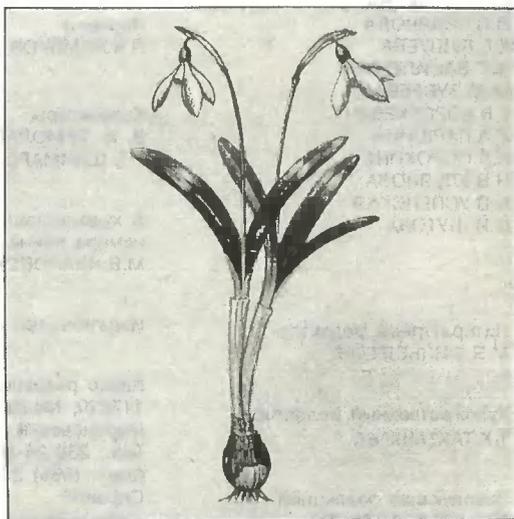
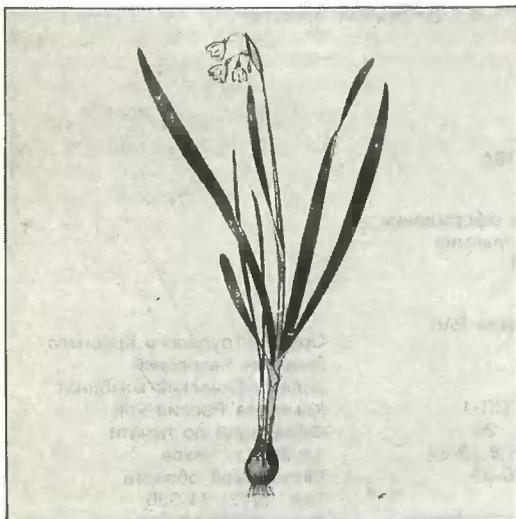
Подснежники: узколистный (слева) и широколистный (справа).

города наводняют торговцы очень трогательным на вид товаром — букетиками белых подснежников и фиолетовых диких цикламенов. Их привозят оттуда, где они уже успевают расцвести — с Кавказа, из Краснодарского края, из Крыма. Естественно, специально их торговцы не выращивают — рвут в лесах. Беда в том, что многие из продаваемых видов цветов включены в Красную книгу, другие пока не успели туда попасть, но тоже успешно вымирают. И главной причиной их исчезновения в природе оказывается именно массовый сбор букетиков для продажи. Между прочим Закон о Красной книге на 8 Марта никто не отменял. А если цветы приехали, ска-

жем, из Крыма (т.е. пересекли границу России), то их продавцы нарушают еще и международную конвенцию СИТЕС.

Позже подснежники и цикламены сменяются ландышами из лесов средней полосы. Они еще, слава Богу, не нуждаются в том, чтобы их заносили в Красную книгу, но возле больших городов их стало заметно меньше. В Москве и Московской области, например, они включены в региональный список охраняемых растений, а их сбор и продажа запрещены. Ландышей сменяют наши северные орхидеи — любки («ночные фиалки») и ятрышники — фигуранты того же списка.

Так что торговля дикими



цветами — нарушение не только неписанной морали, но и писаных законов. Покупая их, мы поощряем нарушителей. Полноценно образованный биолог должен об этом знать. Конечно, знать должны все, но если другим такое незнание не делает чести, то для биолога оно просто позорно.

Однако каждую весну купленные на улице букеты «краснокнижных» (или «всего лишь» охраняемых) цветов десятками появляются в сте-

нах биологических институтов и факультетов. Девушек с букетиками мы встречали даже на биофаке МГУ, в котором зарождалось когда-то студенческое природоохранное движение. Если спросить их обладателей, что они думают о сказанном выше, то в ответ последуют либо раздраженные комментарии о «зеленом экстремизме» (тут случай ясный), либо удивленное «так подарили же». Не мы рвем, не мы губители... И не желаем

понять, что, покупая или принимая эти цветы в подарок, становимся заказчиками преступления против природы. Повторяем: разумеется, сказанное относится не только к биологам, но и ко всем людям, просто в руках у биолога такой букет выглядит особенно удручающе.

Конечно, этические проблемы каждый решает для себя сам. Но нам хочется, чтобы над этим маленьким частным вопросом хотя бы задумались.

Над номером работали
Ответственный секретарь
Ю.К.ДЖИКАЕВ

Научные редакторы
И.Н.АРУТЮНЯН
О.О.АСТАХОВА
Л.П.БЕЛЯНОВА
Е.Е.БУШУЕВА
Ж.Г.ВАСИЛЕНКО
М.Ю.ЗУБРЕВА
Г.В.КОРОТКЕВИЧ
Л.А.ПАРШИНА
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
Н.В.УСПЕНСКАЯ
О.И.ШУТОВА

Литературный редактор
М.Я.ФИЛЬШТЕЙН

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор
Г.С.ДОРОХОВА

Компьютерный набор
Е.Е.ЖУКОВА

Перевод
П.А.ХОМЯКОВ

Корректоры
В. А. ЕРМОЛАЕВА
Р.С.ШАЙМАРДАНОВА

В художественном оформлении
номера принимал участие
М.В.ИВАНОВСКИЙ

Издательство «Наука» РАН

Адрес редакции:
117810, Москва, ГСП-1
Мароновский пер., 26
Тел.: 238-24-56, 238-23-33
Факс: (095) 238-26-33
Справки:
\http:\\www.riprn.net\\infomag

Подписано в печать 20.02.98
Бумага типографская № 1
Офсетная печать
Усл. печ. л. 10,32
Усл. кр.-отт. 67,8 тыс.
Уч.-изд. л. 15,1
Заказ 2716

Ордена Трудового Красного
Знамени Чеховский
полиграфический комбинат
Комитета Российской
Федерации по печати
142300, г. Чехов
Московской области
Тел.: (272) 71-336
Факс: (272) 62-536



Умение составлять адекватные математические модели реальных ситуаций — неотъемлемая часть математического образования. Успех приносит не столько применение готовых рецептов — «жестких» моделей, сколько математический подход к явлениям реального мира. Пример «жесткой» модели — таблица умножения, «мягкой» — принцип: «дальше в лес, больше дров». В статье выдающегося российского математика академика В. И. Арнольда на многочисленных примерах показано, как теория «мягких» моделей может применяться в экономических, экологических и социологических системах.

Арнольд В. И. «ЖЕСТКИЕ» И «МЯГКИЕ» МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

