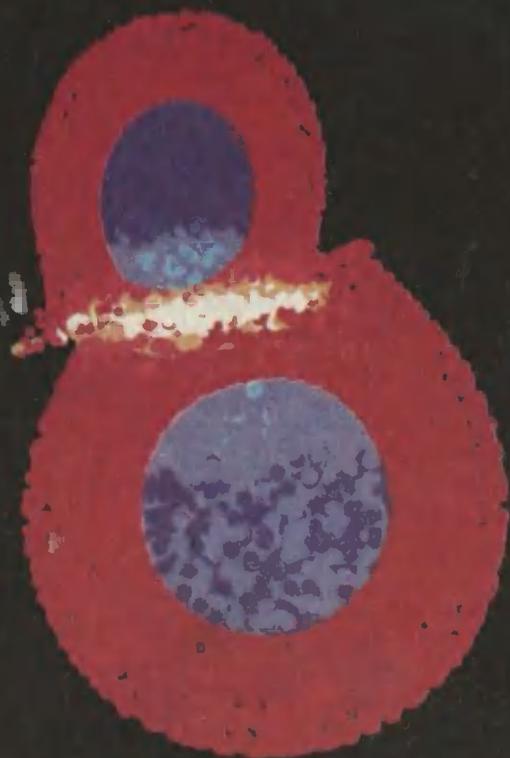


ISSN 0032 - 874X

ПРИРОДА

3'94



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 (ответственный секретарь), 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, член-корреспондент РАН С.С.ГЕРШТЕЙН (физика), доктор географических наук Н.Ф.ГЛАЗОВСКИЙ (география), академик Г.С.ГОЛИЦЫН (физика атмосферы), академик Г.В.ДОБРОВОЛЬСКИЙ (почвоведение), академик В.А.ЖАРИКОВ (геология), член-корреспондент РАН 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.КОРЮКОВИЧ (редактор отдела научной информации), академик Н.П.ЛАВЕРОВ (геология), Л.Д.МАЙОРОВА (редактор отдела геологии, геофизики и геохимии), доктор биологических наук Б.М.МЕДНИКОВ (биология), Н.Д.МОРОЗОВА (научная информация), доктор геологических наук Л.Л.ПЕРЧУК (геология), доктор технических наук Д.А.ПОСПЕЛОВ (информатика), член-корреспондент РАН В.А.СИДОРЕНКО (энергетика), академик В.Е.СОКОЛОВ (зоология), член-корреспондент РАН В.С.СТЕПИН (философия естествознания), академик В.Н.СТРАХОВ (геофизика), Н.В.УСПЕНСКАЯ (редактор редактор отдела философии, истории естествознания и публицистики), академик Л.Д.ФАДДЕЕВ (математика), доктор биологических наук М.А.ФЕДОНКИН (палеонтология), доктор биологических наук С.Э.ШНОЛЬ (биология, биофизика), О.И.ШУТОВА (редактор отдела экологии и химии), доктор физико-математических наук А.М.ЧЕРЕПАЦУК (астрономия, астрофизика).

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Начальная стадия грандиозного столкновения двух протопланет. Численные расчеты показывают, что в его результате образуется планетная система с параметрами системы Земля – Луна. См. в номере: Камерон А.Г.У. Образование Луны. Теория гигантского столкновения.

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Луна и Земля. Фотография М.Коллинза (NASA), находившегося в командном модуле "Аполлона - 11" в то время, когда Н.Армстронг и В.Олдрин совершали первые шаги по Луне. См. в номере: Земля и Луна.



Всероссийское объединение издательских, полиграфических и книоторговых предприятий «Наука»

© Российская академия наук
журнал «Природа» 1994

В НОМЕРЕ

3 ЗЕМЛЯ И ЛУНА

Происхождение Земли и Луны всегда было одной из тех проблем, которые составляют «кинтригу» научного знания. Как именно произошел акт творения нашей планеты и ее спутницы? Докладный ответ на этот вопрос составляет одну из заветных целей науки.

Козенко А. В. ИСТОРИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ЛУНЫ (4)

Маракушев А. А. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛУНЫ И ДРУГИХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ (12)

Шилов С. Я. ИЗБЫТОК АСТЕРОИДОВ ВБЛИЗИ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ—ЛУНА (27)

Камерон А. Г. У. ОБРАЗОВАНИЕ ЛУНЫ. ТЕОРИЯ ГИГАНТСКОГО СТОЛКНОВЕНИЯ (31)

Бялко А. В. ВЕЛИКОЕ СТОЛКНОВЕНИЕ: ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ (39)

ДРЕВНИЕ ПЛЕМЕНА И НАРОДНОСТИ

48 Дэллет Е. Г. МАЙЯ: НОВЫЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОТКРЫТИЯ В ИСТОРИИ ДРЕВНЕЙШЕЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ

54 Гладышев А. И., Новикова Н. М. АМУДАРЬИНСКИЕ ТУГАИ: ОХРАНА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Зарегулирование стока Амударьи и Сырдарьи привели к деградации уникального природного комплекса — тугайной экосистемы. От полного уничтожения ее может спасти только рациональное водопользование во всем бассейне Аральского моря.

65 Галачян Г. А. ЗВУК УПРАВЛЯЕТ ПЛАЗМОЙ

Звуковые волны — составная часть природы, они повсюду. Оказываясь, звуком можно гасить газовый разряд, изменять электрическое поле, энергию и плотность электронов, температуру газа в плазме.

72 Никонов А. А. ЦУНАМИ ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ

Мало кто знает, что в этих внутренних морях случаются поднятия уровня, вызванные землетрясениями. В XX в. такие явления были редкими и незначительными, но на протяжении нашей эры цунами накатывало на берега не меньше 20 раз, а высота волн иногда достигала 3—4 м.

78 Карасев Б. В. РАДИОАКТИВНЫЙ ЙОД И «ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ БОЛЕЗНЬ»

80 Терновский Д. В., Терновская Ю. Г. ПРИРОДНАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГИБРИДИЗАЦИЯ ЖИВОТНЫХ

В экспериментах по скрещиванию животных семейства кунных не только получены новые гибриды с роскошным мехом, но и уточнен систематический статус, выявлены закономерности их размножения, роста и развития.

86 Вирин Л. И., Суворов Б. А., Торняк В. П., Хейфец Л. И. ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В РЕКАХ МОСКВЫ

88 Баранов С. П. ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ С УСКОРИТЕЛЯ «ГЕРА»

93 Сосновский А. В., Гохман В. В. «ФАКЕЛЬНЫЙ» МЕТОД ОПРЕСНЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ

98 Темирджаро С. В. ОСТАНЦЫ РАСТАЯВШЕЙ АРКТИДЫ

Пронизанные мощными жилами льда плато и возвышенности на побережье северной Якутии и прилегающих островов некогда входили в состав единой протяженной суши, располагавшейся в ледовитых морях.

108 Викторова А. Г. ПОЛИПЛОИДИЯ У ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ

111 Никитин С. А. ПОЛЕТЫ ПО ПРОГРАММЕ «СПЕЙС ШАТТЛ»: ЯНВАРЬ — ИЮНЬ 1993 Г.

114 НОВОСТИ НАУКИ (47)

КОРОТКО (110)

128 НОВЫЕ КНИГИ (71)

IN THIS ISSUE

3 THE EARTH AND THE MOON

The Origin of the Earth and the Moon have been always one of the problems producing «intrigue» in science. The conclusive answer to this question is one of the cherished aims of science.

Kozenko A. V. BACKGROUND OF CONCEPTIONS ON THE MOON'S ORIGIN (4)

Marakushev A. A. ORIGIN OF THE MOON AND THE OTHER SOLAR SYSTEM SATELLITES (12)

Shilov S. Ya. THE EXCESS OF ASTEROIDS NEAR BY THE EARTH — MOON SYSTEM (27)

Cameron A. G. W. THE GIANT IMPACT THEORY FOR THE FORMATION OF THE MOON (31)

Byalko A. V. GREAT COLLISION: GEOPHYSICAL CONSEQUENCES (39)

ANCIENT TRIBES AND PEOPLES

48 Devlet E. G. MAJA: NEW ARCHAEOLOGICAL DISCOVERIES IN THE HISTORY OF ANCIENT CIVILIZATION

54 Gladyshev A. I., Novikova N. M. THE AMU DARYA'S TUGAI: ITS PROTECTION AND USE

The regulation of the flow of the Amu Darya and the Syr Darya caused the degradation of the unique natural complex — tugai ecosystem. Only the rational water consumption in the Aral Sea Basin can save it.

65 Galechyan G. A. PLASMA MANIPULATED BY SOUND

Acoustic waves — the constituent of nature, they are everywhere. It appears that sound can extinguish the gas discharge, change the electrostatic field, energy and density of electrons, gas temperature in plasma.

72 Nikonov A. A. TSUNAMI IN THE BLACK SEA AND THE SEA OF AZOV

Only few people know that there occur elevations of the level in these epeiric seas due to earthquakes. In the 20th Century such phenomena were infrequent and insignificant, but over A. D. tsunami rolled on shores more than 20 times, wave's height sometimes mounted up to 3—4 m.

78 Karasev B. V. RADIOACTIVE IODINE AND «CHERNOBYL ILLNESS»

80 Ternovskiy D. V., Ternovskaya Yu. G. NATURAL AND EXPERIMENTAL ANIMAL HYBRIDIZATION

The experiments carried out for interbreeding of the martens resulted not only in the appearance of new hybrids with splendid fur, but also helped to specify the systematic status and find the regularities in reproduction, growing and development of these animals.

86 Virin L. I., Suvorov B. A., Tornyak B. P., Kheifets L. I. ORGANIC COMBINATIONS IN MOSCOW RIVERS

88 Baranov S. P. FIRST DATA FROM THE «HERA» COLLIDER

93 Sosnovskiy A. V., Gokhman V. V. A «FLAME» METHOD FOR WATER PURIFICATION AND DESALINISATION

98 Tomirdiario S. V. REMNANTS OF THE MELTED ARCTIDA

Plateau and uplands on the coast of the North Yakutia and adjacent islands covered with massive layers of ice once were a part of united extended dry land located in icy seas.

108 Viktorov A. G. EARTHWORMS' POLYPLOIDY

111 Nikitin S. A. FLIGHTS UNDER SPACE SHUTTLE PROGRAM: JANUARY — JUNE 1993.

114 SCIENCE NEWS (47)

NEWS IN BRIEF (100)

128 BOOK REVIEWS (71)

Земля и Луна



Происхождение Земли и Луны всегда было одним из тех вопросов, которые составляют «синтригу» науки, — этот круг проблем имеет свою внутреннюю движущую силу. Как именно произошел акт творения нашей планеты и ее спутницы! Вместе или по отдельности! Захватом уже готовой, самостоятельно родившейся Луны или совместным процессом, оставившим геологический след на обоих телах! При взрыве или мягком слипании малых тел! Разгадка, доказательный ответ на эти вопросы составляет одну из тех заветных целей, ради которых и существует наука. Разработка этих проблем не столько зависит от «источников финансирования», сколько, напротив, зачастую сама определяет затраты общества, формально малополезные, но по сути самые необходимые. Разве не одной идеи ради был осуществлен проект «Аполлон», высадка человека на Луне! Намеренно упрощая, можно сказать: утилитарный результат этого проекта — всего лишь набор лунных камней, которые к тому же доставлялись на Землю и автоматическими системами. Но само осознание (и даже осозание) возможности пройти по поверхности иного небесного тела не только дало мощный толчок планетологии, но надолго очертило пределы достижимого человечеством.

Предлагаемая подборка о происхождении Луны состоит из четырех статей и близких к теме научных новостей. Статья А. В. Козенко напоминает читателю историю взглядов о происхождении Луны. Во второй статье академик А. А. Маракушев рассказывает о фактическом материале сравнительной геологии Земли, планет и их спутников. По сути он остается при этом на позиции раздельного образования Земли и Луны из общего роя малых тел — позиции, принимаемой большинством российских специалистов (возможно, и мировое геологическое сообщество приняло бы сегодня именно эту точку зрения). В третьей статье представлена контрверсия: изложены результаты, которые получили за прошедшее десятилетие американские планетологи У. Бенц и А. Камерон (с участием У. Слэттери и Х. Меллоша), развивая гипотезу образования системы Земля—Луна в едином акте гигантского столкновения двух протопланет. Эти представления в целом известны в профессиональных кругах, но не были еще представлены широкой научной общественности. Сегодня вопросы столкновений небесных тел привлекают особое внимание ввиду приближающегося столкновения одной из комет с Юпитером (см.: «Природа». 1993. №№ 8, 12). Кроме статей, непосредственно излагающих взгляды на образование Луны, в подборку входят новые данные о малых астероидах, обнаруживаемых при их сближении с Землей. Их возможное отношение к проблеме образования Луны обсуждается, в частности, в общем комментарии, где приводятся дополнительные аргументы в пользу теории гигантского столкновения. Однако проблема Земля—Луна далека от окончательного решения, Впрочем, читатель может сделать собственные выводы.

А. В. Бялко

История представлений о происхождении Луны

А. В. Козенко



Александр Васильевич Козенко, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Объединенного института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. Область научных интересов — естественные спутники планет, история науки. Член Королевского астрономического общества (Великобритания).

ЛУНА — второе по яркости небесное тело на небосклоне Земли. Неудивительно поэтому, что еще в незапамятные времена она обратила на себя внимание людей, назвавших ее ночным светилом в противоположность Солнцу — дневному светилу. Нашим далеким предкам казалось, что Солнце и Луна движутся по небу как живые. И уж совсем очевидным представлялось им, что при затмениях Солнце и Луну заглатывают какие-то неведомые чудовища. А еще им хотелось понять и как-то объяснить особенности движения Луны по небесной сфере (вблизи эклиптики) и изменчивость ее лика (смена лунных фаз). Наверное, поэтому в фольклорном наследии почти каждого народа есть немало мифов о Луне и других небесных светилах, имеющих

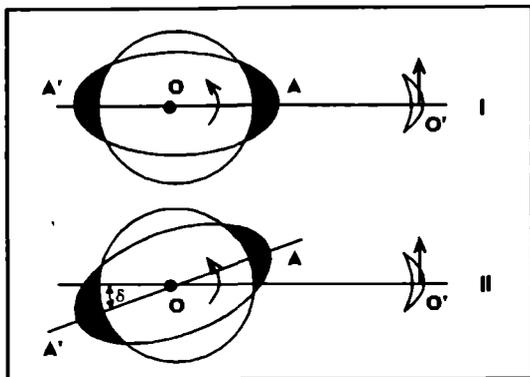
© Козенко А. В. История представлений о происхождении Луны.

анимистическую направленность. В более позднее время поклонение звездам привело к зарождению астрологии, согласно которой светила являются божествами и влияют на судьбы людей.

Предоставим, однако, анализ этих представлений фольклористам и специалистам по культурной антропологии. А сами попытаемся разобраться, какую версию происхождения Луны можно назвать первой научной гипотезой.

Началом научной космогонии принято считать 1755 год, когда великий немецкий философ И. Кант выдвинул предположение об образовании Солнца и планет путем конденсации диффузной материи. Он полагал, что сгустки пыли и газа росли посредством аккреции и образовали планеты и их спутники, а из оставшейся части туманности сформировалось Солнце. К сходным предположениям пришел П. Лаплас, разработавший в 1796 г. небулярную гипотезу. Не излагая подробно эту гипотезу, которая стала называться теорией Канта — Лапласа и пользовалась всеобщим признанием вплоть до начала XX в., отметим следующие ее моменты. Вследствие вращения формирующегося Солнца от него в экваториальной плоскости отделялись концентрические газопылевые кольца. В них формировались протопланеты, которые затем вследствие взаимного притяжения объединились в сферическую горячую массу — планету, обращающуюся вокруг Солнца. И так в каждом кольце, образованном солнечной атмосферой.

Примечательно, что в теории Канта — Лапласа образование спутников планет, в том числе и Луны, считается аналогичным образованию самих планет из колец, отделяющихся от планетных атмосфер. Вот как описывает Лаплас формирование особенностей обращения Луны: «...Луна в паробразном состоянии, благодаря мощному притяжению Земли, представляла собой вытянутый сфероид, большая ось которого непрерывно направлялась к этому светилу из-за той легкости, с которой пары уступают самым малым силам, приводящим их в движение. Земное притяжение, продолжая действовать так же, как и в то время, когда Луна была в состоянии флюида, непрерывно сближая два движения этого спутника, с течением времени должно было заставить их разность попасть в пределы, в которых начинается установление их точного равенства. Затем это притяжение должно было постепенно уничтожить колебания, вызванные этой разностью в большой оси сфероида, направленной к Земле.



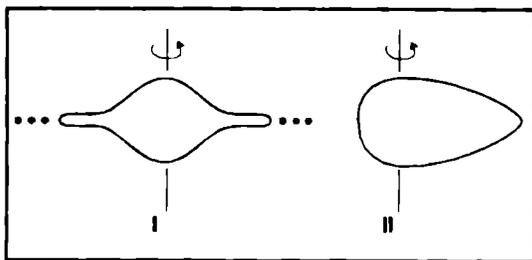
Приливной выступ для идеально упругой планеты [I] и для Земли [II].

Именно так флюиды, покрывающие эту планету, разрушили своим трением и сопротивлением первоначальные колебания ее оси вращения, которой теперь присуща только нутация, происходящая от действия Солнца и Луны. Легко убедиться, что равенство вращения и обращения спутников должно было препятствовать образованию колец и вторичных спутников из атмосфер этих тел. Наблюдения также до сих пор не обнаружили ничего подобного¹.

И хотя механизм образования спутников в теории Канта — Лапласа с современных позиций неправдоподобен, как, впрочем, и сам механизм формирования планет, эта теория очень интересна в методологическом отношении. В ней впервые выдвинута идея формирования Солнца и планетной системы в едином процессе, а также высказана мысль об образовании спутников планет в околопланетном доспутниковом диске.

Основная трудность небулярной гипотезы — это малый момент количества движения Солнца по сравнению с орбитальными моментами количества движения планет. Солнце, содержащее более 99,8 % массы, обладает менее чем 2 % общего момента количества движения Солнечной системы. Очень сложно представить себе механизм такого глобального перераспределения момента количества движения. На эту трудность первым обратил внимание Э. Рош в 1854 г. Он пытался решить ее, введя предположение о туманности, в которой

¹ Лаплас П. С. Изложение системы мира. Л., 1982. С. 330—331.



Ротационная неустойчивость быстровращающейся конфигурации: I — истечение вещества с экватора; II — формирование неустойчивой грушевидной фигуры.

практически вся масса концентрируется в центре, а обширная оболочка имеет пренебрежимо малую массу (модель Роша). Несколько позже, в 1861 г., Ж. Бабине указал, что общий момент количества движения Солнечной системы, по-видимому, недостаточен для системы, распавшейся вследствие вращения. К подобным заключениям склонялся и М. Фуше (1884 г.).

Кроме катастрофических теорий происхождения Солнечной системы, в которых для решения этой проблемы допускалось столкновение Солнца с другой звездой (или близкое их прохождение с сильным приливным взаимодействием), существовали теории захвата. Так, О. Ю. Шмидт предполагал, что Солнце захватило газопылевое облако, обладающее соответствующим моментом количества движения². Существуют аналогичные гипотезы захвата Луны.

Но как раз в случае системы Земля — Луна дело с моментом количества движения обстоит не столь драматично.

Изучая приливы, английский астроном Дж. Г. Дарвин (сын знаменитого Ч. Дарвина) пришел к выводу, что они должны влиять на динамику системы Земля — Луна. И действительно, поскольку Земля не является идеально упругим телом, приливная деформация в данной точке будет отставать от силы ее вызывающей на некоторый угол δ . В результате максимальная деформация в данной точке будет возникать несколько позже, чем максимальное напряжение, направленное вдоль линии, соединяющей центры Земли и Луны. Так как Земля вращается вокруг своей оси быстрее, чем Луна вокруг Земли, приливной выступ выносятся

вращением Земли вперед относительно линии центров.

Таким образом, из-за отклонения земных недр от идеальной упругости и из-за трения морских приливных волн о дно в мелководных морях на Земле возникает эффект приливного трения (угол запаздывания для Земли $\delta \sim 2-4^\circ$). Так как приливной выступ А ближе к Луне, чем А', возникает момент сил, направленный навстречу вращательному моменту Земли, т. е. тормозящий ее вращение. Поскольку выступ А ближе к Луне, чем А' и к тому же вынесен вперед, он стремится увеличить орбитальный момент количества движения Луны³.

Орбитальный момент пропорционален произведению скорости Луны v на расстояние до нее a . Скорость же убывает с расстоянием пропорционально $1/\sqrt{a}$. Таким образом, рост орбитального момента Луны ($\sim \sqrt{a}$) приводит к росту среднего расстояния до нее (a), а также к убыванию скорости обращения Луны ($\sim a^{1/2}$) и периода ее обращения ($\sim a^{-3/2}$).

Еще в 1878 г. Дж. Дарвин, проследив историю системы Земля — Луна до весьма отдаленных времен (54 млн. лет назад), заключил, что, когда Луна была на расстоянии всего 10 тыс. км от поверхности Земли, ее период обращения вокруг Земли совпадал с периодом вращения Земли в ту эпоху и составлял 5 ч 36 мин. Он писал: «Эти результаты с неизбежностью приводят к заключению, что если Луна и Земля были когда-либо расплавленными вязкими массами, то они составляли тогда части одной общей массы.

Мы, таким образом, подошли к проблеме, как и почему планета распалась. Условия устойчивости вращающихся жидких масс, к сожалению, неизвестны, и поэтому невозможно представить большее, чем спекуляцию по этому предмету⁴.

Тем не менее в то время, когда Дарвин писал это, теория фигуры жидких вращающихся масс была уже довольно продвинута. Она стала развиваться после публикации в 1743 г. книги французского математика А. К. Клеро «Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики». (В прошедшем году исполнилось 250 лет этому выдающемуся труду, положившему начало новому научному направлению — теории фигуры небесных тел.)

² Подробнее о решении этой проблемы в современных космогонических сценариях см. например: Витязев А. В., Козенко А. В. // Земля и Вселенная. 1988. № 2. С. 25—32.

³ Жарков В. Н., Трубицын В. П. Физика планетных недр. М., 1980.

⁴ Darwin G. H. // Phil. Trans. Roy. Soc. 1879. V. 170. N 447. P. 535—536.

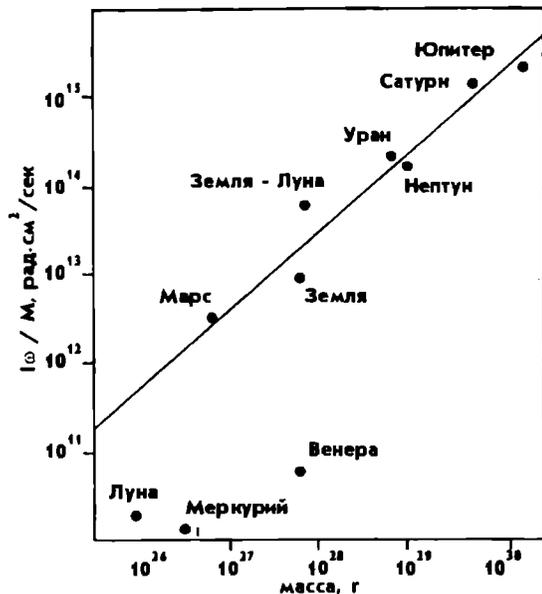
Стало ясно, что вращающаяся самогравитирующая жидкая масса приобретает фигуру сплюснутого у полюсов сфероида вращения.

После того как К. Маклорен развил теорию на случай быстрого вращения, было показано, что при возрастании угловой скорости вращения тела (из несжимаемой жидкости) до значения, соответствующего $\omega^2/\pi G\rho=0,4493$, сжатие достигает предельного значения⁵, которое соответствует эксцентриситету 0,93. При большей скорости вращения сфероидальных фигур равновесия уже не будет. Однако еще до достижения критического значения ω вращающаяся конфигурация становится неустойчивой. Это происходит при значении ω , соответствующем $\omega^2/\pi G\rho=0,3742$ и эксцентриситету 0,8127.

В этот момент, называемый точкой бифуркации, от последовательности сфероидов Маклорена «отвечается» последовательность эллипсоидов Якоби (у которых все оси различны), открытая им в 1834 г. Интересно, что последний сфероид Маклорена является первым эллипсоидом Якоби с двумя экваториальными осями одинаковой длины.

В 1885 г. А. Пуанкаре показал, что в точке бифуркации устойчивость переходит к эллипсоидам Якоби. Им же было установлено, что при продолжении серии Якоби будет достигнута следующая точка бифуркации, с которой берет начало другая серия конфигураций, получивших название грушевидных. Пуанкаре предположил, что новая серия должна обладать устойчивостью.

Неудивительно, что Дарвин также заинтересовался проблемой устойчивости вращающихся тел, особенно в свете своей гипотезы об образовании системы Земля — Луна вследствие деления единой быстровращающейся массы. Он пришел к заключению об устойчивости грушевидных фигур. И хотя деление быстровращающейся грушевидной конфигурации путем разрыва сужения стало представляться маловероятным, это не помешало Дарвину придерживаться своей точки зрения об отделении Луны от протоземли. Он показал, что если бы Луна была единым целым с Землей, то их общий момент количества движения привел бы к вра-



Зависимость удельного вращательного момента планет от их массы.

щению протоземли с периодом $\sim 3-4$ ч (в этом случае период солнечных приливов был бы равен $\sim 1,5-2$ ч).

Одновременно Дарвин рассчитал период собственных колебаний Земли, аппроксимируя ее однородным жидким шаром с плотностью, эквивалентной средней плотности Земли. По его данным, он составляет ~ 1 ч 34 мин. Учитывая неопределенность этой оценки из-за неоднородности Земли, Дарвин допустил возможность возникновения резонанса. В этом случае высота прилива должна была увеличиваться до тех пор, пока от Земли не отделилась бы масса, впоследствии ставшая Луной⁶.

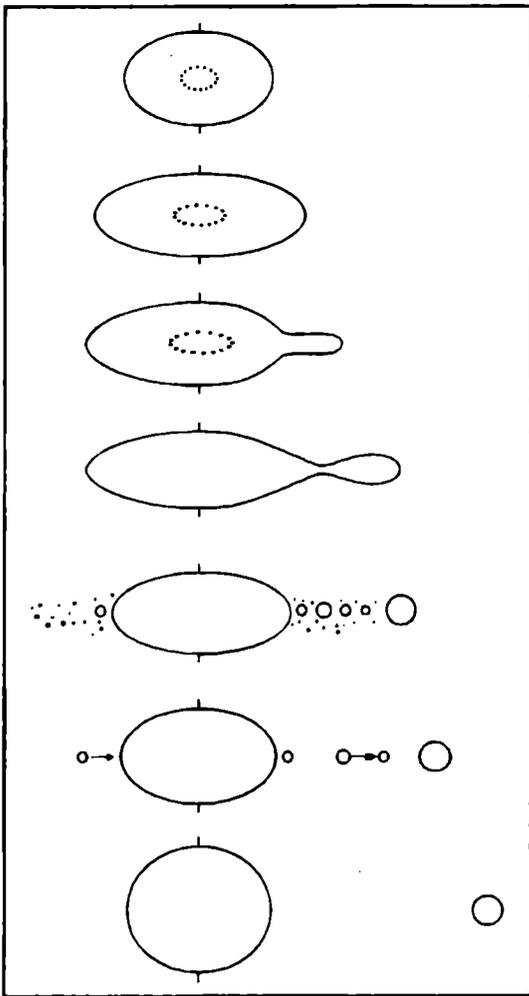
В прошлом веке гипотеза Дарвина представлялась весьма правдоподобной. На Земле, казалось, даже сохранился след такого отделения — Тихий океан. Кроме того, гипотеза хорошо объясняла более низкую среднюю плотность Луны по сравнению с Землей, так как образующаяся Луна не должна была включать в себя даже часть железного ядра Земли.

Однако с современных позиций эта гипотеза не выдерживает критики. Дело даже

⁵ Здесь ω — угловая скорость вращения, G — гравитационная постоянная, ρ — плотность; сжатие $a =$

$\frac{a-b}{a}$, где a и b — экваториальный и полярный радиусы; эксцентриситет $e = [(a^2 - b^2)/a^2]^{1/2}$.

⁶ Дарвин Дж. Приливы и родственные им явления в Солнечной системе. М., 1965.



Последовательность форм, принимаемых Землей, в процессе образования ядра, когда ее вращение привело к неустойчивости (по Д. Уайзу, 1963).

не в том, что основной период собственных колебаний Земли составляет примерно 55 мин и никакого резонанса с приливами не получается. Если даже допустить возможность резонанса для протоземли, обладавшей некими гипотетическими характеристиками, то, как показал еще в 1930 г. Г. Джеффрис, внутреннее трение должно было помешать приливному выступу вырасти до требуемых размеров. Критическая высота прилива не превышала бы $1/17$ радиуса планеты, и разрыв не мог бы возникнуть⁷.

⁷ Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение. М., 1960.

Основной недостаток гипотезы Дарвина состоит в допущении, что Земля сначала как-то образовалась и только после завершения этого процесса приливное воздействие стало действенным, т. е. нет четких начальных и граничных условий.

Новый импульс гипотеза отделения получила в самом начале XX в., когда возникли сомнения в устойчивости грушевидных конфигураций. В 1905 г. русский математик А. М. Ляпунов, который даже раньше Пуанкаре открыл грушевидные конфигурации, пришел к заключению об их неустойчивости. Через десять лет Дж. Джинс провел исследование с точностью до третьего порядка малости по эксцентриситету и также пришел к выводу о неустойчивости грушевидных фигур⁸. Не обсуждая эту проблему подробно, отметим только, что в 1924 г. Е. Картан пришел к такому же выводу на основе строгого математического исследования.

Несмотря на трудности модели отделения Луны от быстро вращающейся Земли вследствие ротационной неустойчивости, во второй половине нашего века был предложен ряд новых ее механизмов. В отличие от классических работ, в которых рассматривались в основном однородные конфигурации, в 1964 г. американский астроном Р. А. Джеймс исследовал ротационную неустойчивость быстро вращающихся политроп. Политропа — это тело, в котором распределение плотности ρ связано с давлением P следующим соотношением: $P = k\rho^{1+1/n}$, где k — постоянная, n — показатель политропы, характеризующий концентрацию плотности к центру тела. Очевидно, что все реальные вещества сжимаемы, и поэтому плотность в большей или меньшей степени должна возрастать в небесных телах при движении к их центральным областям.

Джеймс получил, что ротационная неустойчивость проявляется по-разному в зависимости от значения n . При $n > 0,8$ (когда безразмерный момент инерции $< 0,28$) при достижении критической угловой скорости вращения должно начаться истечение вещества с экваториальной области в тонкий диск. А при $n < 0,8$ (и соответственно, безразмерном моменте инерции $> 0,28$) конфигурация переходит через серию трехосных эллипсоидов в грушевидную фигуру, которая распадается на две неравные части. Понятно, что первый тип неустойчивости к Земле неприменим. Второй тип более правдоподобен, но и здесь имеется ряд принципиальных затруднений.

⁸ Козенко А. В. Джеймс Хопвуд Джинс. М., 1985.

Наиболее существенное заключается в том, что система Земля — Луна не обладает достаточным моментом количества движения. Для наступления ротационной неустойчивости он должен был бы в три-четыре раза превышать существующий ныне. Однако в этом случае удельный вращательный момент протоземли ω/M был бы не менее $2 \cdot 10^{11}$ рад·см²/с, что не соответствует установленной Г. Макдональдом эмпирической зависимости удельного момента от массы планеты (момент количества движения не должен сильно превышать $2 \cdot 10^{13}$ рад·см²/с).

Чтобы обойти это затруднение, необходимо допустить какой-либо механизм потери «лишнего» вращательного момента за время эволюции системы Земля — Луна. Кроме того, в модели Джеймса отделяющаяся часть очень массивна — более 10 % массы центрального тела. Поэтому Луне необходимо как-то избавиться от лишней массы (ее истинное значение в 81,3 раза меньше массы Земли). Но более всего непонятно, как в предложенной модели массивный выступ сможет вытянуться на расстояние, превышающее предел Роша. Ведь если разделение произойдет под пределом Роша, то образовавшийся спутник планеты будет разорван приливными силами. Впрочем, это общее затруднение для всех моделей отделения Луны. Ф. Нольке также отметил, что отделявшаяся Луна должна была создавать такой приливной эффект, который немедленно вернул бы ее к Земле: период обращения Луны оказался бы меньше периода вращения Земли, и, следовательно, ее вращение тормозилось бы.

Несмотря на приведенные здесь возражения, в последние десятилетия было сделано еще несколько попыток реанимировать гипотезу отделения Луны. В 1963 г. Д. Уайз предложил свой вариант того, как Земля могла сформироваться в условиях ротационной неустойчивости⁹. Аккреция, формирующая планету и задающая ей вращательный момент на однородное тело, вращающееся вблизи предела устойчивости, а также внутренняя дифференциация планеты на плотное ядро и более легкую мантию, уменьшившая ее момент инерции, могли увеличить скорость вращения Земли до состояния ротационной неустойчивости.

Сходные модели предлагали многие исследователи: в 1964 г. А. Камерон, у которого Луна отделилась не сразу и целиком, а сформировалась путем аккреции малых

порций вещества Земли, отрывавшихся от ее экваториальных областей; в 1966 г.— Дж. О'Кифи, также связывающий образование Луны и земного ядра; в 1970 г.— А. Е. Рингвуд, по сценарию которого вещество Луны испарилось с Земли, образовало диск из планетезималей, которые затем коагулировали и сформировали Луну; в 1977 г.— А. Б. Биндер. В ряде предложенных моделей сценарий отделения комбинируется с другими сценариями, например с образованием Луны на околоземной орбите.

Пожалуй, именно модель образования Луны на околоземной орбите в процессе роста самой Земли — модель, основанную на идеях О. Ю. Шмидта, можно считать сейчас общепринятой. В этой модели, разрабатываемой с начала 60-х годов Е. Л. Рускол, предполагается образование околоземного спутникового роя на стадии активной аккумуляции Земли, когда масса планеты составляла от $2/5$ до $2/3$ ее современной массы¹⁰. Образование околопланетного доспутникового диска рассматривается как закономерный результат аккумуляции планеты: согласно современным моделям формирования планеты, часть падающего вещества может быть захвачена на околопланетную орбиту.

В общих чертах перенос вещества и момента в околопланетных доспутниковых дисках схож с таковым в аккреционных околозвездных дисках, однако имеются и значительные отличия. Так, расчеты Рускол показали, что спутниковый рой Земли представлял собой небольшое образование с размерами порядка 0,01 а. е., а наиболее плотная его часть, где могла происходить аккумуляция спутника, была на порядок меньше. Первоначально какая-то доля частиц, сталкиваясь, собиралась в довольно крупные тела, которые впоследствии образовали несколько крупных спутников — «протолун». Из них-то вследствие приливной эволюции и сформировалась Луна.

Таким образом, приливным силам и в этом сценарии отводится решающая роль в формировании единого крупного спутника Земли. Когда из-за недостатка момента движения рой сжимался и его внутренняя часть выпадала на Землю, у поверхности планеты на расстоянии 3—5 ее радиусов образовывался спутник размером около 100—150 км. Благодаря воздействию приливных сил этот спутник стал постепенно удаляться от Земли, поглощая вещество спутникового роя и набирая массу. В рое, как уже отмечалось, было

⁹ Wise D. U. // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. P. 1547—1554.

¹⁰ Рускол Е. Л. Происхождение Луны. М., 1975.

несколько «протолун» на разных расстояниях от Земли, но ближайшая двигалась быстрее и, догоняя другие, сталкивалась и объединялась с ними. Поэтому у Земли, в отличие от планет-гигантов, нет системы регулярных спутников, а только один крупный спутник — Луна.

Подобная модель образования спутников должна, казалось бы, встретить и возражения. Как, например, в ее свете объяснить отсутствие спутников у Венеры, по большому числу параметров очень похожей на Землю, или у Меркурия? Дело в том, что если бы у Венеры и Меркурия и сформировались спутники, то в результате приливного воздействия со стороны самих планет и Солнца они упали бы на эти планеты.

Вместе с тем приведенная выше модель образования Луны встречается с двумя очень сложными проблемами. Во-первых, трудно объяснить различие в химическом составе Луны и Земли, которое довольно детально изучено благодаря американским полетам на Луну и доставке на Землю образцов лунного грунта. Во-вторых, не находит пока объяснения и большое по сравнению с другими планетными системами отношение масс спутника и планеты.

Существенные отличия химического состава лунных пород от земных (коровых и мантийных) являются весомым аргументом против гипотезы отделения Луны от Земли. Однако близкий изотопный состав кислорода в лунных и земных породах можно считать указанием на то, что Земля и Луна сформировались в одной зоне протопланетного облака, — это делает весьма проблематичной концепцию захвата¹¹.

Необходимо также учитывать, что железные и каменные частицы обладают различными ударными свойствами. При высокоскоростных соударениях железные частицы преимущественно «свариваются», образуя более крупные, а силикатные — дробятся в мелкую пыль. Но мелкие частицы сталкиваются друг с другом намного чаще, чем крупные, поэтому в протоспутниковый рой захватываются преимущественно мелкие частицы. Расчеты Ф. Гербера, проведенные в 1986 г., подтвердили это предположение. Он назвал процесс отсортировки силикатов, значительно уменьшивший содержание в рое железа, композиционным фильтром.

Еще труднее в обсуждаемом сценарии объяснить большую относительную массу Луны в системе Земля — Луна. Расчеты,

проведенные А. В. Витязевым, показывают, что путем неупругих столкновений захватывается не больше чем 10^{-4} — 10^{-5} часть массы планеты. Этого вполне достаточно для формирования спутниковых систем планет-гигантов, но не спутника Земли.

Последняя проблема отпадает, если обратиться к гипотезе захвата Луны в «готовом виде» или к ее комбинации с другими моделями. К этой гипотезе, казалось бы, подводили и работы по эволюции лунной орбиты. В 1955 г. немецкий астроном Х. Герстенкорн впервые после классических работ Дарвина предпринял попытку исследовать эволюцию лунной орбиты. Полученная им орбита, предшествующая наиболее тесному сближению тел в системе, оказалась очень вытянутой и наклоненной к экватору Земли — она напоминала траекторию случайно сближавшегося с планетой тела. Гипотетический захват Луны Землей и катастрофические его проявления на Земле в виде гигантских приливных волн даже получил собственное название — «событие Герстенкорна».

Позднее в этой работе были обнаружены неточности, и в последующих работах как самого Герстенкорна, так и других авторов, среди которых прежде всего следует назвать Г. Макдональда, П. Голдрайха, У. Каулу, Х. Альвена, С. Сингера и Р. А. Литтлтона, концепция захвата уточнялась и развивалась. Не имея здесь возможности вдаваться в сложные проблемы небесной механики, отметим лишь, что во всех предложенных моделях вероятность захвата очень мала. Объект, сближающийся с Землей по независимой гелиоцентрической орбите, описывает около нее гиперболическую траекторию, а затем переходит на другую независимую гелиоцентрическую орбиту.

Чтобы произошел захват, объект должен затормозиться до момента сближения с Землей, т. е. его кинетическая энергия должна быть каким-то образом истрачена. Были предложены различные механизмы потери энергии. Литтлтон, например, предложил падение вещества на Луну и Землю с гелиоцентрических орбит, что в принципе возможно на стадии аккумуляции планет. В сценарии Юри и Макдональда для этого используется вещество на геоцентрических орбитах, поэтому последний нельзя считать чистой гипотезой захвата. В классических гипотезах такого рода механизмом потерь энергии является приливное взаимодействие между Землей и Луной.

Новые расчеты Герстенкорна дают начальное расстояние в перигее в 1,5 радиуса Земли, что, однако, представляется неве-

¹¹ Жарков В. Н., Козенко А. В. // Изв. вузов. Сер. «Геодезия и аэрофотосъемка». 1983. № 1. С. 11—16.

роютным, поскольку Луна при этом была бы разорвана приливными силами. Следует подчеркнуть, что в любом случае захват целой Луны — это практически невероятное событие, так как слишком узок интервал значений орбитальных элементов, при которых медленно действующее приливное трение могло бы обеспечить достаточную диссипацию энергии.

И еще один важный момент. Эволюция лунной орбиты в основном определяется диссипативной функцией Земли $Q \approx 1/2 \delta$. Основная трудность этой задачи связана с неопределенностью функции угла запаздывания земных приливов $\delta(t)$ в прошлом. Если принять $\delta(t) = \text{const}$, то время отодвигания Луны до современного расстояния от Земли получается порядка $(1,9 - 0,95) \cdot 10^9$ лет. Такая слишком короткая шкала приливной эволюции указывает на то, что в прошлом значение $\delta(t)$ было меньше современного. Очевидно, пытаясь реконструировать эволюцию лунной орбиты, необходимо принимать во внимание геофизические соображения, моделирующие диссипацию энергии приливов. Впрочем, здесь получены только самые предварительные результаты.

Неудивительно поэтому, что множатся гипотезы происхождения Луны, модифицирующие основные идеи — захват, деление или аккумуляцию в протоспутниковом рою — или же комбинирующие их. Например, в сценарии Е. Эпика Луна формируется из кольца планетезималей на околоземной орбите, а само кольцо он связывает с разрушением крупного тела, подошедшего к Земле ближе предела Роша.

Группа японских исследователей, возглавляемая С. Хаяши, полагает возможным захват Луны «в готовом виде», если допустить, что планеты земной группы сформировались в присутствии газовой компоненты протопланетного облака. Тогда эти планеты должны были захватить и мощные газовые атмосферы. Именно в такой первичной атмосфере Земли «застряла» Луна. Но тормозясь в ней все больше и больше, Луна в конце концов должна была бы упасть на Землю.

Другой способ набрать гигантскую массу, необходимую для формирования такого крупного спутника, как Луна, предлагает концепция «мегаимпакта», или гигантского столкновения. В ней предполагается возможность столкновения Земли с телами размером в тысячи километров. Для объяснения происхождения Луны эта концепция была предложена в 1975 г. У. Хартманом и Д. Дэвисом из Института планетных исследований в Тусоне (США).

Совсем недавно американские историки науки Ф. Спера и Л. Старк из Калифорнийского университета опубликовали заметку, несколько смещающую приоритеты¹². Они доказывают, что впервые идея образования Луны вследствие разделения протоземли, инициированного соударением с планетоидом, была высказана Р. А. Дали в 1933 г.¹³ Интересно, что, в первом издании этой его книги (1914) идея образования Луны вообще не обсуждалась. Таким образом, гипотеза возникновения Луны вследствие «мегаимпакта» зародилась между 1914 и 1933 гг., т. е. более 60 лет назад. Возможно, это произошло под влиянием катастрофической гипотезы происхождения Солнечной системы, высказанной Г. Джеффрисом в монографии «Земля, ее происхождение, история и строение», опубликованной в 1924 г.

В заключение стоит, наверное, добавить, что на последней конференции, посвященной происхождению Луны (она прошла в 1984 г. на Гавайях), из всех предложенных моделей поддержку получили модели «мегаимпакта» и образования из околоземного протоспутникового роя. Эти модели, вернее, их комбинации, рассматриваются и сейчас как наиболее вероятные, хотя сложнейшая проблема образования Луны все еще далека от решения.

¹² Spera F. J., Stark L. E. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N. E2. P. 3087.

¹³ Daly R. A. Igneous Rocks and the Depths of the Earth. N. Y., 1933.

Происхождение Луны и других спутников планет Солнечной системы

А. А. Маракушев



Алексей Александрович Маракушев, академик РАН, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, руководитель лаборатории термодинамики минералов Института экспериментальной минералогии РАН. Автор большого числа работ по физико-химической петрологии. Неоднократно публиковался в «Природе».

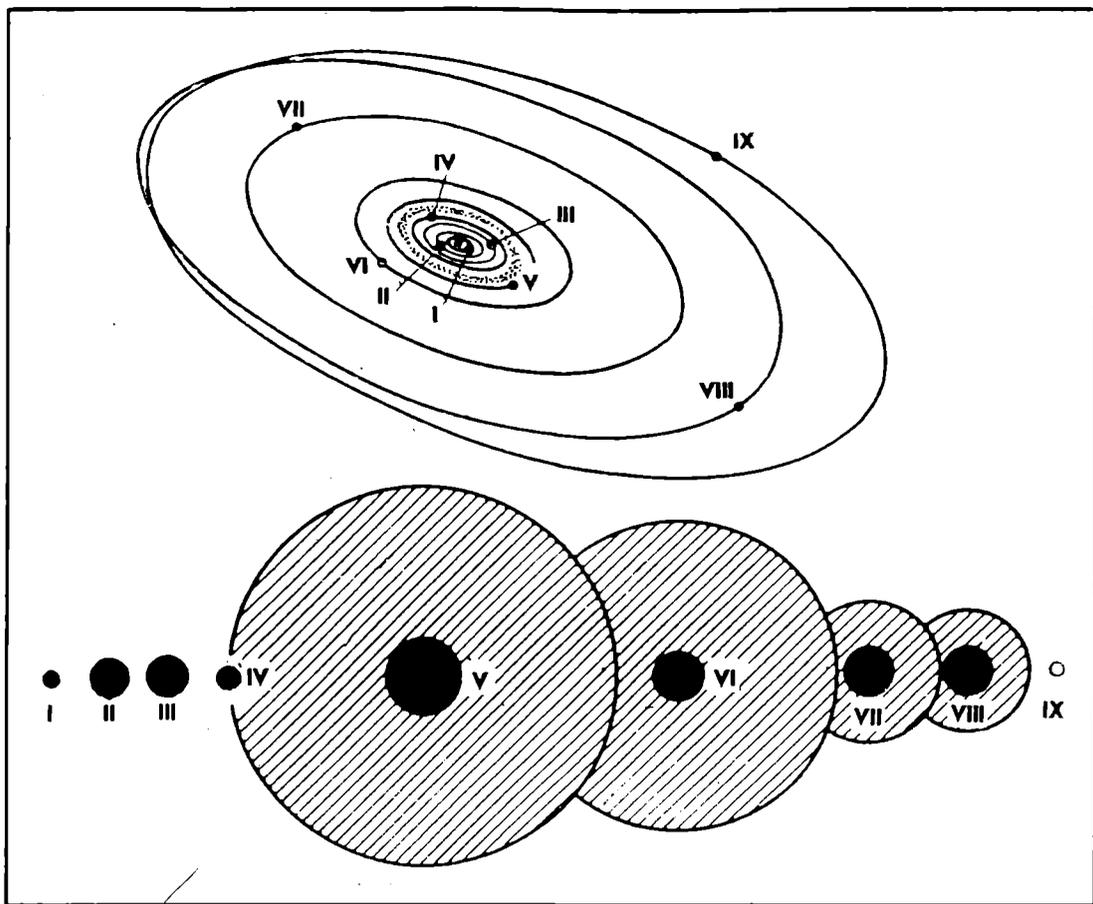
СПУТНИКИ и кольца обломочного материала являются естественным порождением планетных систем — об этом можно судить по их положению приблизительно в экваториальных плоскостях планет и обращении вокруг планет, согласным с их собственным вращением (редкие исключения будут отмечены особо). Поэтому судить о формировании спутников можно лишь на основе знаний о происхождении самих планет, которое во многом еще остается гипотетическим.

Общепринятым является представление об образовании планет в результате аккреции (гравитационного стяжения, аккумуляции) твердого космического вещества, образующего первичные скопления — планетезимали. Однако принципиально различны представления о природе этого первичного вещества: было ли оно железокосаменным, сходным с веществом метеоритов, или же представляло собой ледяные скопления, аналогичные по составу кометному веществу? Соответственно различаются метеоритные и кометная гипотезы происхождения планет Солнечной системы.

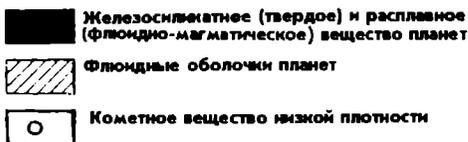
Метеоритные гипотезы исходя из представления о метеоритах (углистых и других хондритах) как первичных конденсатах протосолнечной небулы, образующих планетезимали, из которых и формируются путем аккреции железокосаменные массы планет. Согласно одной из этих гипотез, планеты и их спутники формируются в вакууме космического пространства после сосредоточения на Солнце газов протосолнечной небулы (туманности)¹. Согласно другой метеоритной

© Маракушев А. А. Происхождение Луны и других спутников планет Солнечной системы

¹ Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафронов В. С. Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция. М., 1990; Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., 1969; Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Происхождение Луны и ее влияние на глобальную эволюцию Земли. М., 1989; Шмидт О. Ю. // Докл. АН СССР. 1944. Т. 40. № 6. С. 245—248; Он же. О происхождении Земли и планет. М., 1962.



Солнечная система с Солнцем в центре и планетами, вращающимися по своим орбитам: I — Меркурий; II — Венера; III — Земля; IV — Марс; V — Юпитер; VI — Сатурн; VII — Уран; VIII — Нептун; IX — Плутон (между Марсом и Юпитером находится пояс астероидов). Внизу — схема, отражающая вещественный состав планет.



гипотезе², аккреция планет происходила в плотной протосолнечной небуле и сопровождалась образованием мощной газовой оболочки вокруг растущих планет, препятствующей

потере ими аккреционного тепла. В результате температура в планетных массах становилась достаточно высокой для того, чтобы осуществилось их полное расплавление, которое способствовало внутреннему расслаиванию планет на железное ядро, мантию и кору.

В последующий период максимальной активности Солнца Земля подверглась дегазации с поверхности и потеряла первичную газовую оболочку. После этого у Земли сформировалась новая атмосфера в результате дегазации ее недр. Данные представления несомненно прогрессивны, однако, оставаясь в рамках метеоритных гипотез происхождения Земли, они не в состоянии объяснить магматическую активность, обусловленную колоссальными запасами водорода и других летучих компонентов, сосредоточившихся в ее расплавленном ядре, и находящаяся в противоречии с результатами петрографического изучения метеоритов.

По петрографическим данным, все ти-

² Hayashi C., Nakazawa K., Nakagawa Y. // Protostars and planets. Tucson, 1985. Pt. 2. P. 1100—1151; Ozima M. Gejhistory. Heidelberg, 1987.

пы метеоритов, в том числе и хондриты, являются магматическими образованиями, возникшими при развитии уже сформировавшихся железокаменных планет. Они сложены в основном уже дегазированным веществом, и только редкие их разновидности (углистые хондриты, уреилиты) обогащены летучими компонентами в результате вторичных процессов окисления и гидратации первичных (магматических) минеральных ассоциаций, представленных форстеритом, пироксенами, никелистым железом, троилитом. Вторичные процессы вызывались воздействием углеводородных растворов, с окислением которых связано вторичное обогащение метеоритов углистым веществом ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$), сопровождающее гидратацию их первичных минералов. Этим определяется и название метеоритов — углистые хондриты. Фактором окисления является миграция водорода, как наиболее подвижного компонента флюидов, из материнских планетных тел форстеритовых хондритов.

Представление о формировании планет путем аккреции метеоритов неоправдано еще и потому, что этот процесс должен был сопровождаться дальнейшей дегазацией вещества при разогреве растущих таким путем планет за счет аккреционного тепла. Это в конечном итоге привело бы к образованию тел, не содержащих летучих компонентов и неспособных к дальнейшему развитию (расслаиванию и т. д.) и проявлению магматической активности. Следовательно, требуется более совершенная модель формирования планет, возможности разработки которой возникли только в последние годы благодаря достижениям в исследованиях планет и их спутников во внешней области Солнечной системы (Юпитера, Урана, Нептуна) межпланетными станциями «Вояджер-1 и -2», а также изучению вещества кометы Галлея. Эти данные наряду с результатами изучения космической пыли, метеоритов, лунных пород позволяют приблизиться к общей генетической систематике космического вещества и понять положение в ней Земли и других железокаменных планет земной группы.

В противоположность указанным метеоритным гипотезам нами разрабатывается кометная гипотеза происхождения планет³, согласно которой первичные планетезимали состояли из ледяного кометоподобного вещества с рассеянным в нем пылевидным

железосиликатным материалом, представленным высокотемпературными конденсатами протосолнечной небулы.

Конденсация начинается с тяжелых тугоплавких элементов и ведет к образованию мельчайших (пылевидных) оксидных и железосиликатных частиц.

Исследование высокотемпературной конденсации вещества в силикатных системах⁴ особенно наглядно отражает ее резко неравновесный характер, определяемый совместным образованием оливинов с различной долей фаялитового компонента и формированием ассоциаций форстерита и кварца (или кристобалита). Выпадение минералов из газовой фазы приводит к образованию крайне тонкозернистых агрегатов низкой плотности благодаря их «рыхлой» структуре. Это принципиально отличает минеральные конденсаты из газа от метеоритного вещества, кристаллизовавшегося из расплавов.

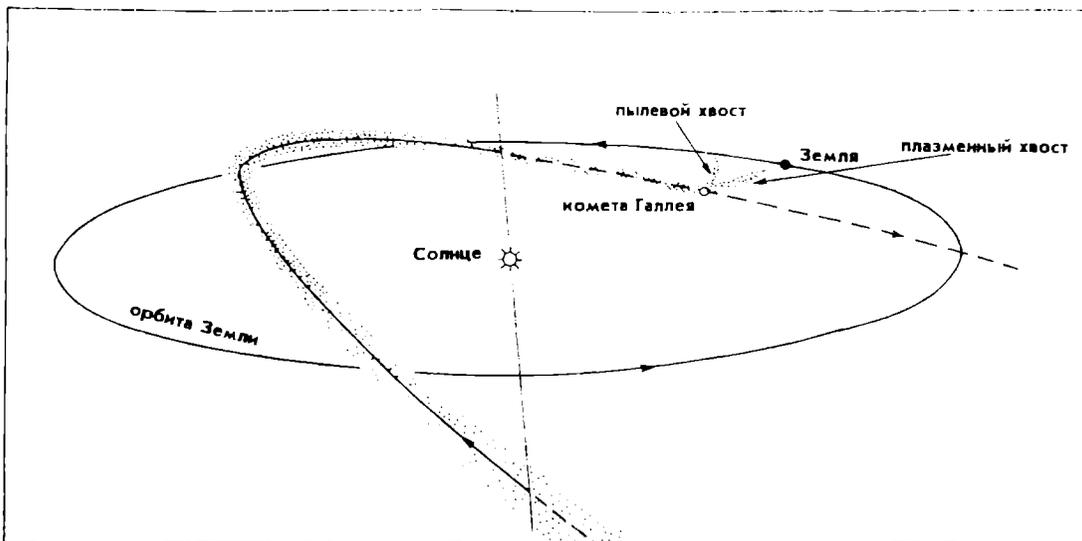
Дальнейшее охлаждение приводит к образованию ледяных масс, содержащих тонкую вкрапленность железосиликатных пылинков. Эта стадия эволюционного развития космического вещества фиксируется в кометных телах, сложенных ледяной фазой, в которой преобладает H_2O и содержится тонкораспыленный железосиликатный материал. Кометы ближайшего окружения Солнечной системы (гипотетического Облака Оорта) периодически вторгаются в нее и, разрушаясь под воздействием Солнца, приносят пылевидные частицы. Их улавливание в стратосфере Земли представляет, по видимому, единственную возможную петрографическую изучение первичных конденсатов космического вещества.

В последние годы был достигнут большой прогресс в изучении комет благодаря использованию межпланетных автоматических станций, особенно во время максимального приближения к Земле кометы Джакобини — Циннера (1985 г.) и кометы Галлея (1986 г.).

Самым важным следствием посещения кометой Галлея внутренних областей Солнечной системы является образование в ней широкого шлейфа относительно крупных (более 1 мкм) пылевидных частиц. Через этот метеорный поток кометы Галлея Земля проходит два раза в год, когда в ее атмосфере возникают метеоритные дожди: Ориониды в октябре и Акварииды в мае. Наблюдение метеорных потоков и математи-

³ Маракушев А. А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М., 1992.

⁴ Nagahara H., Kushiro I., Mysen B. O., Mori H. // Nature. 1988. V. 331. N 6156. P. 516—518.



Положение кометы Галлея при сближении ее с Землей в марте 1986 г. На схеме показаны направления плазменного и пылевого хвостов кометы.

ческое моделирование наблюдаемого торможения твердых частиц при вхождении их в атмосферу Земли показали их принципиальное отличие от метеоритного вещества. Только 15 % из их числа по своему поведению обнаруживают некоторое сходство с плотным метеоритным веществом, тогда как подавляющая их масса представлена «рыхлыми комочками пыли», рассыпающимися при вхождении в атмосферу на очень больших высотах⁵. Принципиальное отличие рыхлой космической пыли от плотного метеоритного вещества наглядно доказывается характером воздействия на акустические и пробойные датчики, устанавливаемые в искусственных спутниках Земли. Она представлена чрезвычайно рыхлыми комочками вещества, сравнимыми по плотности с пухом. «Такие каменные пушинки должны обладать очень низкой пробивной способностью, но они хорошо регистрируются акустическими датчиками»⁶. Существенна обогащенность их углеводородным веществом.

Пылевидная составляющая кометы Галлея, по данным межпланетных станций «Джотто» и «Вега», приблизительно на 30 %

представлена частицами, богатыми углеводородным веществом. Пылевидные частицы сложены в основном силикатами. Они отличаются от вещества хондритов низким содержанием железа (с преобладающей железистостью $[Fe]/([Fe]+[Mg])$ от 0 до 0,5), рыхлым сложением и наличием неравновесных минеральных ассоциаций. Эти продукты первичной газовой конденсации представляют собой, в отличие от хондритов, самый низкий (примитивный) уровень эволюции космического вещества, когда Солнечная система, включая кометы, начала зарождаться примерно 4,6 млрд. лет назад⁷.

Представления о принципиальном различии метеороидов и комет не являются новыми. «Уже к 1960 г. эти представления признавались почти всеми и рассматривались как доказательство того, что метеороиды — продукт дробления астероидов, а метеороиды — комет»⁸.

В общей системе планет, окружающих Солнце, только самая периферическая небольшая планета Плутон непосредственно может сопоставляться с кометами и по составу, и по состоянию вещества. «Если Плутон представляет собой скопление кометного вещества, т. е. смеси льда и пыли, то его плотность может находиться в пределах 1,0—1,8 г/см³, а диаметр — в пределах

⁵ Лебединец В. Н., Галкина И. В. // Матер. XI Всесоюз. метеоритной конф. М., 1990. С. 123.

⁶ Лебединец В. Н. // Наука и жизнь. 1991. № 12. С. 20—24.

⁷ Балсигер Г., Фехтинг Х., Гайс И. // В мире науки. 1988. №11. С. 48—55.

⁸ Лебединец В. Н. Органические полимеры в межпланетном пространстве // Природа. 1991. № 3. С. 89—96.

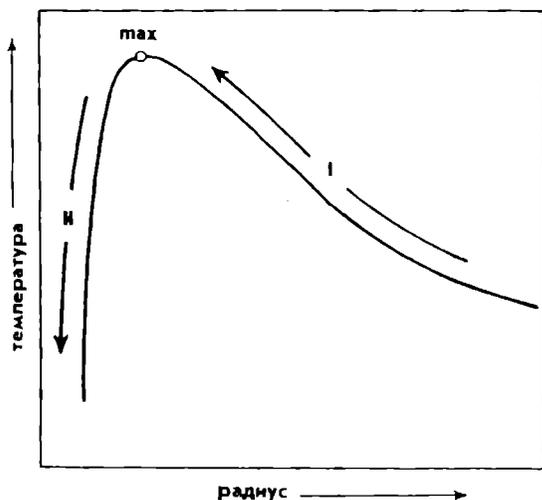


Схема эволюции флюидных планет (по У. Хаббарду, 1987): I — прогрессивная стадия разогрева вещества в результате первоначального коллапса; II — регрессивная стадия охлаждения и внутреннего расслаивания планет [max — максимум температуры в их недрах].

3200—2600 км»⁹. По последним данным, плотность Плутона еще ниже (0,9—1,12 г/см³), а его диаметр больше (2400—3600 км). По расчетам, он состоит, как и кометы, из железозакаменного вещества (около 21 %), водяного льда (74 %) и метана (5 %).

Орбита, по которой движется Плутон, не лежит в плоскости эклиптики, как орбиты других планет Солнечной системы, а пересекает ее под углом 17°. Это дополнительно подчеркивает сходство Плутона с кометами, обращающимися вокруг Солнца независимо от плоскости обращения планет. Плутон входит в двойную систему со своим спутником Хароном, который, как и Плутон, сложен кометоподобным ледяным веществом со средней плотностью около 1 г/см³ и имеет диаметр 1200—1400 км.

Другие периферические планеты (Нептун и Уран) аналогичны кометам только по общему (среднему) составу, но, в отличие от комет, они испытали полное плавление, глубокую флюидно-магматическую дифференциацию (расслаивание) и имеют сложное строение, определяемое наличием у них железозакаменного расплавленного ядра, водной оболочки и небольшой по мощности метаново-аммиачной, содержащей водород

атмосферы. Эти планеты сложились в результате аккреции ледяного кометоподобного материала и первоначально были однородными, но затем расслоились на железозакаменное ядро и мощную водную оболочку. С гравитационным притяжением газовых компонентов небулы связано образование небольших, содержащих водород атмосфер планет.

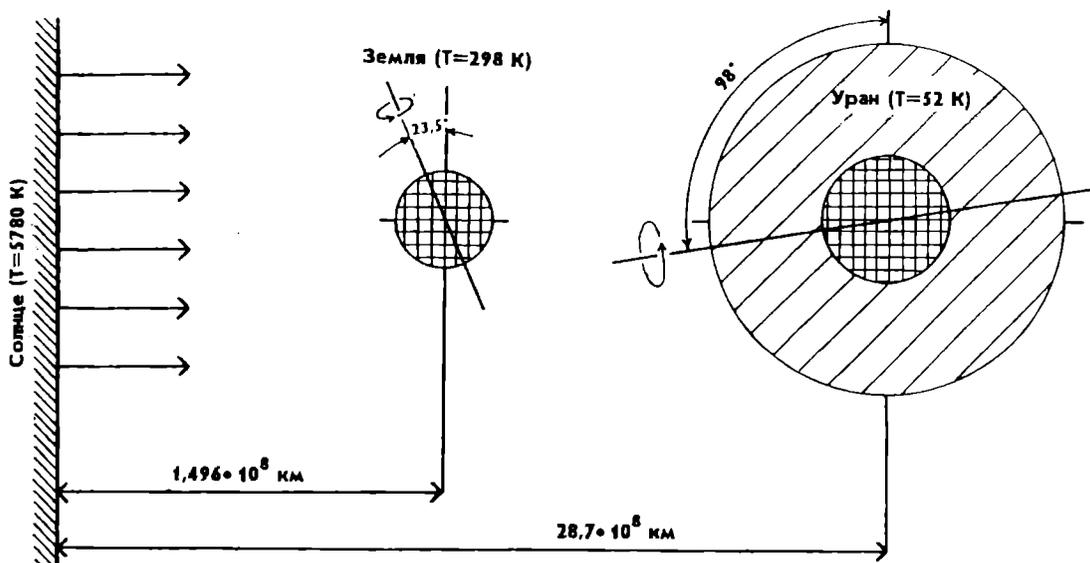
Сходство общего состава Нептуна и Урана с кометами особенно подчеркивается преобладанием в их составе воды. По последним данным¹⁰, газ, выделявшийся из ядра кометы Галлея, состоял из водяного пара (80 %), монооксида углерода (10 %), диоксида углерода (3 %), метана (2 %), аммиака (1,5 %) и цианисто-водородной кислоты (0,1 %). Пылеударные анализаторы на борту космических кораблей анализировали состав многих тысяч пылевых частиц диаметром от 0,1 до 10 мкм, состоящих из смеси легкого ледяного вещества и тяжелого каменистого материала, сложенного в основном магнием, кремнием, железом и кислородом в пропорции, типичной для космического вещества. Это соответствие состава позволяет заключить, что планетезимали, в результате аккреции которых образовывались периферические планеты Солнечной системы, по составу мало отличались от ледяного вещества комет.

Состав и строение Урана и Нептуна «соответствуют их происхождению из начальной агломерации низкотемпературных конденсатов, богатых летучими веществами, такими как вода и другие льды»¹¹. В ходе формирования в их недрах сосредоточился запас тепла, обусловленный освобождением громадной энергии при их аккреции из кометоподобных (ледяных) планетезималей и гравитационном сжатии вещества. Подъем температуры в результате первоначального коллапса сопровождался полным плавлением и гомогенизацией вещества, нарастанием светимости планет (излучения их тепловой энергии) до некоторого максимума температуры, зависящего от массы протопланеты и ее состава. С переходом через максимум и падением температуры планетных недр происходило дальнейшее, уже незначительное, уплотнение вещества, которому препятствовало внутреннее расслаивание планет на железозакаменные расплавленные ядра и окружающие их мощные флюидные оболочки.

¹⁰ Kissel J., Sagdeev R. Z., Bertaux J. L. et al. // Nature. 1986. V. 321. N 6067. P. 280—282.

¹¹ Хаббард У. Внутреннее строение планет. М., 1987.

⁹ Уилл Ф. Л. Семья Солнца. М., 1984.



Схема, иллюстрирующая сходство Земли по размеру и составу с железосиликатным ядром Урана (густая штриховка), генерирующим магнитное поле, подобное геомагнитному. Редкой штриховкой выделена флюидная оболочка Урана, стабильность которой обеспечивается крайне низкой температурой поверхности этой планеты. Под воздействием Солнца Земля потеряла свою флюидную оболочку, которая в отличие от водной оболочки Урана имела водородный состав.

Можно полагать, что расплавленные ядра планет первоначально были близки по составу к хондритам (ат. % металлов): Si=36,3; Mg=33,2; Fe=21,8; Al=3,45; Ca=1,78; Na=1,59; Ni=0,99; Cr=0,28; Mn=0,25; P=0,18; K=0,12; Ti=0,089, но затем произошло их расслоение на богатые железом и никелем ядерные части (аналоги палласитов и железных метеоритов) и силикатные (ахондритовые) оболочки. Обособление в планетах расплавленных железных ядер сопровождалось генерацией магнитных полей планет, которые у Нептуна и Урана близки по напряженности к земному.

Нарисованная здесь схема приложима и к планетам, находящимся ближе к центру Солнечной системы, — Сатурну и Юпитеру, хотя эти планеты принципиально отличаются от существенно водных периферических планет водородно-гелиевым составом, сходным с составом не комет, а Солнца. Это соответствует общим закономерностям строения Солнечной системы, в центральной области которой температура опускалась почти

до абсолютного нуля и в твердые конденсаты входили почти все газы протосолнечной небулы, включая водород, преобладающий в составе Солнца, Сатурна и Юпитера.

Сатурн и Юпитер — огромные флюидные планеты, вращающиеся вокруг своих осей с периодом около 10 ч, — расслоены на гелиево-водородные оболочки и железокаменные расплавленные ядра, генерирующие их магнитные поля (с осями, близкими к осям вращения). Радиометрия и изучение инфракрасной светимости планет показывают, что в их недрах заключены мощные запасы тепла, образовавшегося в ходе аккреции и гравитационного сжатия. Тепло выносится к поверхности планет из их недр восходящими флюидными потоками с образованием вертикальной конвекции и турбулентных вихрей.

Сатурн — самая легкая планета Солнечной системы — содержит расплавленное тяжелое железокаменное ядро. Юпитер сложен более плотным веществом, и в нем заключено более массивное железокаменное ядро. С приближением общего состава планеты, сопоставимой по размеру с Юпитером, к солнечному составу расчетная масса ее железосиликатного ядра уменьшается и при достижении солнечного состава становится близкой к массе Земли. «Хотя имеются некоторые неопределенности с химией (например, включать ли серу в ядро, или считать, что она в основном сосредоточена в водородной оболочке в виде H_2S),

в результате всегда получается около 1,0—1,5 земной массы»¹².

Солнце и звезды на стадии их развития в виде глобул во многом сходны с водородными планетами-гигантами, когда их излучение, как и излучение планет, имеет тепловую природу. «Внутреннее строение Солнца определяется по существу теми же уравнениями, что и строение планет»¹³. Согласно астрофизическим расчетам, после образования Солнца потребовалось 10^7 лет, чтобы оно достигло максимальной активности и стало подобно ярким звездам типа Т Тельца (названным так по их прототипу, открытому в созвездии Тельца).

Такие звезды обладают ярким излучением в инфракрасном диапазоне, поскольку они окружены газопылевыми дисками, поглощающими видимый свет, разогревающимися и испускающими инфракрасное излучение. Особенно плотные диски окружают молодые звезды, возраст которых не превышает 3 млн. лет. У более старых звезд (возраста до 10 млн. лет) диски обычно отсутствуют, что связано с их рассеянием под действием яркого излучения. Некоторые звезды типа Т Тельца окружены кольцевыми уплощенными дисками, имеющими форму «бублика», в котором более горячие внутренние области относительно пусты и заполненными остались только холодные внешние области. Они в наибольшей степени имитируют строение Солнечной системы, где интенсивной дегазации («расчистке») подверглась только внутренняя область в непосредственном окружении Солнца, тогда как во внешней холодной области дегазация вещества практически не происходила. В этой внутренней, предельно дегазированной области располагаются Земля и аналогичные ей железокремниевые планеты. В стадию, предшествующую активному воздействию Солнца, их формирование и развитие было обусловлено аккрецией ледяных планетезималей, аналогично другим флюидным планетам Солнечной системы.

Формирование протопланет земной группы, Юпитера и Сатурна происходило при низкой температуре, одновременно с аккумуляцией солнечной массы путем аккреции кометоподобных ледяных твердых тел существенно водородного состава. Последующее развитие протопланет протекало по обычной схеме, включающей сжатие, полное плавление и развитие в планетах

водородосиликатной жидкостной несмеси-мости, ведущей, с одной стороны, к обособлению железосиликатных ядер (будущих планет земной группы), а с другой — к формированию спутниковых и кольцевых систем. На этой стадии планетного развития находятся в настоящее время Сатурн и Юпитер — ближайшие аналоги протопланет земной группы. В дальнейшем, с развитием в Солнце термоядерных реакций в период его максимальной активности, под воздействием мощного солнечного ветра (примерно в 10^4 раз превышающего современный¹⁴) началась поверхностная дегазация протопланет земной группы, и они полностью потеряли флюидные (водородные) оболочки, превратившись в систему железокремниевых планет. Миграция водорода происходила даже с поверхности Юпитера, несмотря на удаленность его от Солнца ($7,78 \cdot 10^8$ км). Об этом можно судить по его аномально высокой средней плотности ($1,31$ г/см³) Юпитера, почти вдвое превышающей плотность Сатурна ($0,69$ г/см³). Сатурн же благодаря большой удаленности от Солнца ($14,27 \cdot 10^8$ км) сохранился в первоначальном состоянии. Поэтому он может служить эталонным состоянием окосолнечных протопланет до того, как их поверхность подверглась дегазации. Особенно очевидна аналогия с Землей, которая по размеру и магнитным характеристикам соответствует расплавленному железокремниевому ядру Сатурна.

Формирование Земли на начальной стадии происходило, таким образом, аналогично всем другим планетам Солнечной системы. Она обособилась в виде железосиликатного (хондритового) расплавленного ядра под покровом водородной оболочки ее материнской планеты в результате водородо-железосиликатной жидкостной несмеси-мости в ее недрах. В дальнейшем, в период максимальной активности Солнца, протоземля подверглась поверхностной дегазации, потеряла водородную оболочку, и Земля появилась на свет в виде железокремниевой планеты.

Поскольку железосиликатное расслаивание происходило под большим влиянием водородной оболочки, в железном ядре Земли сосредоточился огромный запас водорода и других флюидных компонентов, определивший магматическую активность, продолжающуюся около 4,6 млрд. лет. Вначале эта активность носила крайне эксплозивный (катастрофический) характер, обус-

¹² Там же. С. 260.

¹³ Там же. С. 20.

¹⁴ Ozima M. Op. cit.

ловленный большим перепадом внутреннего и внешнего давления, возникшим в результате миграции водородной оболочки планеты. Первичная поверхность Земли покрывалась слоем обломочного (пирокластического) материала, подобного лунному регалиту, и катастрофически быстро сформировались атмосфера и гидросфера Земли.

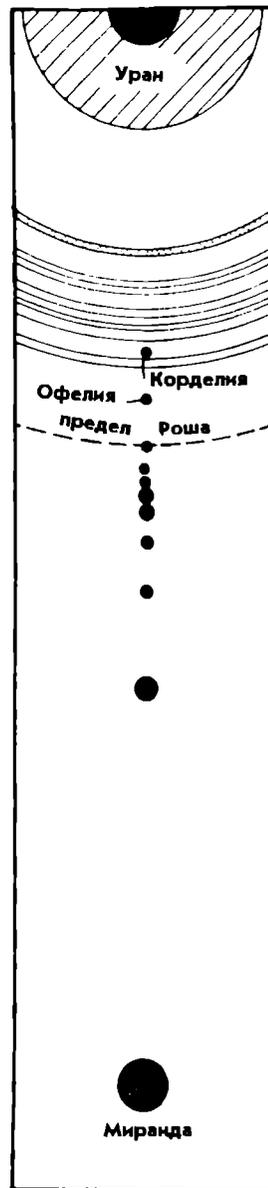
СПУТНИКИ И КОЛЬЦА ПЛАНЕТ — ГИГАНТОВ

Небулярная теория хорошо объясняет фундаментальные черты строения Солнечной системы, где все планеты находятся практически в одной плоскости, называемой эклиптической, которая проходит через экваториальную плоскость Солнца. Они обращаются вокруг Солнца в том же направлении, в котором вращается и само Солнце. Из этого следует, что Солнце и все планеты сформировались единообразно в общей дисковидной структуре (протосолнечной небуле), которая была динамически упорядоченной и обладала во всем объеме унифицированным типом движения.

Однако оси вращения планет, как правило, не перпендикулярны эклиптике и имеют достаточно произвольное положение. У планеты Уран, например, ось вращения лежит почти в плоскости эклиптики, Венера же, вообще, имеет обратное вращение относительно других планет Солнечной системы. Произвольность положения осей вращения планет свидетельствует об их возникновении не в ходе аккреционного образования совместно с Солнцем в единой динамической системе общего коллапса протосолнечной туманности, а позднее — в процессе их автономного развития.

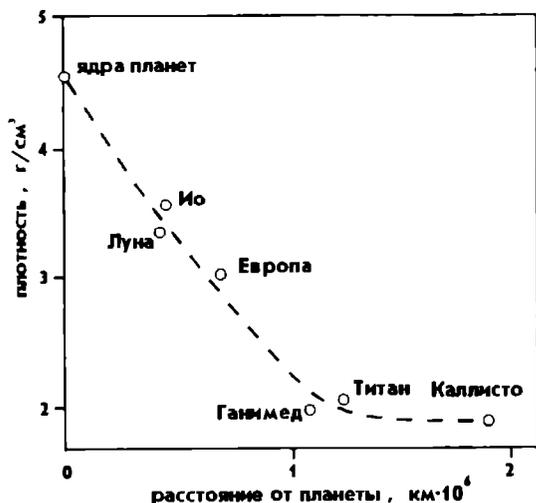
Возможно, первоначально планеты вращались единообразно, а наблюдаемое в настоящее время произвольное вращение возникло в ходе формирования в их недрах тяжелых железокремнистых ядер. Оно породило в них центробежные силы, стимулировавшие отделение спутников, расположившихся в экваториальной плоскости каждой из планет. Эти спутники обращаются вокруг них в том же направлении, в котором вращаются и сами планеты вокруг своих осей. Вывод об автономной генерации осевого вращения флюидных планет-гигантов, обусловленного их внутренним расслаиванием, позволяет подойти к объяснению обратного вращения внешних спутников, наблюдаемого у Юпитера (четыре спутника), Сатурна и Нептуна (по одному спутнику). Оно связано с двухэтапным формированием тяжелых ядер планет, порождающим об-

Система колец и спутников Урана, отражающая переход от внешней области, где находятся крупные спутники (один из них Миранда, расположенный на расстоянии $13 \cdot 10^4$ км), к множеству мелких спутников, примыкающих к кольцам Урана. При построении схемы радиус Урана (26 тыс. км) принят за единицу [по: Кузи Дж. Н. // В мире науки. 1987. № 9. С. 26—33].



ратное и прямое вращение их гигантских флюидных оболочек.

Спутники (в ходе отделения от планет) и их материнские планеты (в результате потери ими флюидных оболочек) попадали в напряженное состояние благодаря запасам флюидных компонентов в их недрах. Наиболее явно это выражено в бурном развитии эксплозивного вулканизма на всех планетах и их спутниках (на спутнике Юпитера



Изменение плотности вещества в системе «массивные спутники — железокремнистое ядро» для Юпитера и Сатурна [в пересчете на нулевое давление]. Для сравнения показана система Луна—Земля, поскольку Луна первоначально сформировалась в виде тяжелого расплавленного ядра в недрах ее материнской планеты.

Ио вулканизм продолжается и в настоящее время).

Кольца планет впервые были обнаружены у Сатурна, который отличается наиболее развитой их системой. У других планет кольца выражены не так наглядно. Их удалось обнаружить только путем специальных астрономических наблюдений с Земли (кольца Урана) и по снимкам межпланетных станций (кольца Юпитера и Нептуна).

Главный вклад в изучение колец и спутников планет внесли автоматические межпланетные станции «Пионер-11» (1979), «Вояджер-1» и «Вояджер-2» (1977—1989 гг.). С их помощью было обнаружено множество мелких спутников у Нептуна, Урана, Юпитера и Сатурна. Выяснилось также, что системы колец свойственны всем этим планетам, но различаются по масштабам, строению и составу.

Железосиликатные расплавы, концентрировались во внутренних частях планет в виде тяжелых ядер и способствовали быстрому вращению планет. В противоположность им более легкие силикатные и флюидно-силикатные расплавы, обособившиеся в периферических частях планет, подвергались воздействию центробежных сил и выбрасывались за их пределы, формируя спутниковые системы. С этих позиций процессы об-

разования ядер планет («примерно земного состава») и формирования их каменных спутников имеют сходную природу. Они отражают общую тенденцию развития флюидно-силикатной неоднородности планет. Такая аналогия особенно очевидна для спутников, богатых каменным материалом, формирующихся на начальной стадии расщепления планет (обособления в них железокремнистых ядер).

Спутники планет Солнечной системы привлекают внимание исследователей со времен Галилея, который в 1609 г. впервые направил в небо сконструированный им телескоп и обнаружил у Юпитера четыре спутника — Каллисто, Ганимед, Европу и Ио, получивших в дальнейшем название галилеевых. В этом ряду плотность спутников (в г/см³) последовательно возрастает: 1,8—1,9—3,1—3,5, приближаясь к предполагаемой плотности железокремнистого ядра планеты — около 4,5 г/см³ при приведении его к нулевому давлению.

Эта корреляция наглядно отражает взаимосогласованность формирования тяжелого железокремнистого ядра и массивных спутников планет, образование которых связано с общим развитием флюидно-силикатной неоднородности в их недрах.

«Вояджером-1 и -2» были исследованы массивные спутники всех четырех флюидных планет, составляющих группу Юпитера. При этом выявились многие особенности, раскрывающие их генезис. В частности, было установлено, что все они в прошлом были эндогенно-активными планетами и характеризовались развитием на их поверхности взрывного вулканизма.

Хотя массивные спутники порождены флюидными планетами с низкой средней плотностью (0,7—1,7 г/см³), они в основном являются каменными планетами, причем их плотность в общем возрастает с приближением к материнским планетам и становится сопоставимой с плотностью железокремнистых ядер планет. Из этих соотношений следует вывод, что обособляющиеся в оболочках планет силикатные расплавы выбрасывались из их недр в виде огромных капель под действием центробежных сил и образовывали массивные спутники. Они консолидировались с периферии, что сопровождалось возрастанием флюидного давления в их недрах и создавало напряженное состояние спутниковых планет, которое усиливалось приливными явлениями. Для некоторых из них это кончалось взрывным распадом, который порождал особые спутники, представляющие собой обломки планет и имеющие

неправильную форму. Таковы, например, Гиперон ($410 \times 260 \times 220$ км, орбита — $1,48 \cdot 10^6$ км) в системе Сатурна или Амальтея ($270 \times 170 \times 150$ км, орбита $1,81 \cdot 10^5$) в системе Юпитера. На уцелевших же планетах напряженное состояние реализовалось в развитии эндогенной активности.

Из галилеевых спутников Юпитера наиболее интересна Ио, представляющая собой каменную планету диаметром 3640 км. «Вояджер-1» обнаружил на Ио восемь действующих вулканов. Семь из них оставались активными в течение 4 мес. после пролета «Вояджера-2». Эксплозивная активность вулканизма на Ио необычайно сильна: выбросы пирокластического материала достигают высоты 70—280 км над поверхностью планеты и покрывают ее плащом обломочных отложений, сходных с лунным реголитом.

Все это возможно только при быстром подъеме к поверхности сильно сжатых в ядре планеты флюидов. С подъемом флюидных потоков принято связывать плавление ее силикатных облочков и образование очагов вулканизма. «Образование вулканов, вероятно, связано с расплавлением силикатных масс в недрах Ио, содержащих небольшое железное ядро. Это заключение подкрепляется значением средней плотности, которая равна $3,53$ г/см³ или немного больше плотности Луны ($3,34$ г/см³). Под видимой корой лежит неоднородный подкоровый силикатный слой, который в очень немногих областях малой протяженности выходит на поверхность в виде гор высотой не более 10 км»¹⁵. Лавовые потоки на поверхности Ио прослеживаются на протяжении нескольких сот километров.

Ударные кратеры с диаметром, превышающим разрешение изображений (приблизительно 600 км), на Ио не обнаружены. Из этого следует, что скорость отложения осадков на поверхности планеты превышает 0,1 мм/год и определяется выбросами пирокластики, потоками лавы и поверхностной эрозией, связанной с вулканической активностью. Планету Ио, как и другие массивные каменные спутники флюидных планет, по существу, следует относить к планетам земной группы, для которых характерна высокая плотность их вещества.

Число спутников у планет-гигантов последовательно увеличивается с переходом от периферии к центральной части Солнечной системы: Нептун — 2, Уран — 5, Сатурн — 11, Юпитер — 14. Из этой зако-



Зарисовка с фотографии Ио (спутника Юпитера), сделанной «Вояджером-1» с расстояния 490 тыс. км. Четко вырисовывается эксплозивное вулканическое извержение, поднимающееся на высоту 160 км.

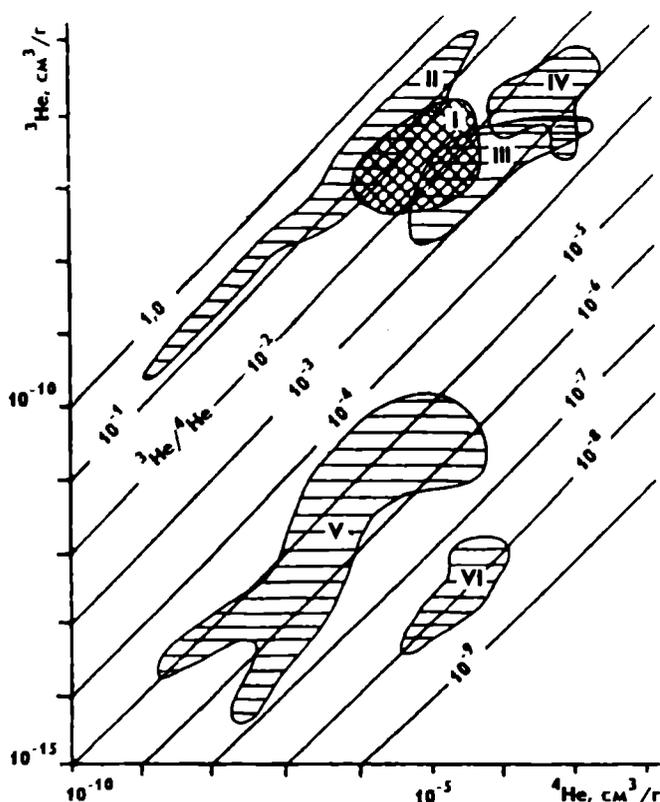
номерности можно сделать вывод о еще более развитых спутниковых системах, которые были у флюидных материнских планет земной группы, составлявших непосредственное окружение Солнца. Однако в дальнейшем эти планеты в ходе поверхностной дегазации, эти планеты почти полностью утратили свои спутниковые системы.

СПУТНИКИ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

К этой группе относятся дегазированные планеты непосредственно окружающие Солнце: Меркурий, Венера, Земля и Марс. Они сложены железокремнистым веществом, средняя плотность которого (приведенная к нулевому давлению) варьирует в пределах $5,3$ — $3,9$ г/см³. Предполагается, что она близка к средней плотности вещества железокремнистых ядер флюидных планет группы Юпитера ($4,5$ г/см³).

Характерно, что спутники планет сложены веществом меньшей плотности, которая, как отмечалось, убывает с увеличением радиусов их орбит, точнее, расстояния до планеты, вокруг которой вращается

¹⁵ Уиппл Ф. Л. Цит. соч.



Характеристика метеоритов и горных пород Луны и Земли по изотопному составу гелия: I — хондриты; II — железные метеориты, палласиты и уреилиты; III — диогениты, говардиты и закриты; IV — лунные базальты; V — земные базальты и перидотиты; VI — земные граниты и гнейсы.

тот или иной спутник. Например, в системе Юпитера плотности распределены следующим образом: Ио — 3,53 г/см³, Ганимед — 3,0, Европа — 1,9, Каллисто — 1,8 г/см³. В эту систему изменения плотности вещества планет и их спутников закономерно вписывается и спутник Земли (4,5 г/см³) Луна (3,34 г/см³), являющаяся аналогом Ио по расстоянию от планеты, размеру и плотности вещества.

Интерпретация данных по спутниковой планете Ио с этой точки зрения была дана П. Н. Кропоткиным: «Снимки спутника Юпитера Ио, сделанные с «Вояджера-1» в марте 1979 г. и спустя четыре месяца — с «Вояджера-2», показали нам, на что могла походить Луна в геологическом прошлом. Ио является почти точной копией Луны по своим размерам (диаметр Ио равен 1,048 диаметра Луны) и плотности (1,057 плотности Луны). Кальдеры на поверхности Ио очень многочисленны, расстояние между ними обычно не больше 300 км, их размеры достигают 35—100 км. Кальдеры диаметром больше 20 км встречаются в среднем в количестве более 5 на

1 млн. км (их более 200 на всей поверхности Ио). В целом аналогия между несомненно вулканическим рельефом Ио и рельефом сильно кратерированных областей Луны напрашивается сама собой»¹⁶.

Уникальное по своему значению открытие действующих вулканов на планете Ио позволяет нам со всей наглядностью представить, что происходило на Луне 4 млрд. лет назад в период расцвета на ней эксплозивного вулканизма. Однако аналогия Ио с Луной касается только их внутренних параметров и эндогенной активности. Условия на поверхности этих планет совершенно различны из-за разной удаленности их от Солнца.

Планета Ио в пять раз дальше от Солнца по сравнению с Луной, и крайне низкие температуры на ее поверхности способствуют конденсации и замерзанию газов, извергающихся из недр в резуль-

¹⁶ Ваганов В. И., Иванкин П. Ф., Кропоткин П. Н. Взрывные кольцевые структуры щитов платформ. М., 1985.

тате вулканизма, тогда как на Луне происходила более полная дегазация продуктов извержения. С помощью инфракрасного спектрометра, установленного на борту «Вояджера-1», и наблюдений с Земли в продуктах извержений на поверхности Ио выявлены сера, ее различные соединения и водород, но воды не обнаружено. Поверхностными серными отложениями в депрессиях между выходами скальных пород объясняется пестрая окраска планеты (красные, оранжевые, желтые, коричневые, черные и белые цвета). Однако существенной роли эти флюидные замерзшие отложения в строении планеты Ио не играют, как можно судить по ее плотности, превышающей плотность Луны. Это типично каменная, самая плотная планета (с флюидно-магматическим ядром) в системе спутников Юпитера.

Отличие планет земной группы от планет группы Юпитера определяется прежде всего их неодинаковым положением относительно Солнца, под воздействием которого Меркурий, Земля, Венера и Марс подвергались дегазации с поверхности и потеряли свои флюидные оболочки. Это произошло, когда Солнце достигло самой активной стадии формирования и было подобно ярким звездам типа Т—Тельца.

Формирование Земли началось более 4,6 млрд. лет тому назад в виде железосиликатного (хондритового) расплавленного ядра под покровом водородной оболочки ее материнской планеты. Одновременно в водородной оболочке планеты формировались гигантские капли флюидно-силикатных расплавов, которые под воздействием центробежных сил выбрасывались за пределы флюидной планеты на различные расстояния, формируя ее спутниковую систему, где Луна занимала примерно такую же позицию, как Ио в системе Юпитера. В дальнейшем под воздействием Солнца в период его максимальной активности материнская планета Земли подверглась поверхностной дегазации и потеряла водородную оболочку, что сопровождалось уменьшением силы ее гравитационного поля и потерей спутниковой системы (сохранилась лишь Луна).

Проводимая аналогия систем Земля — Луна и железосиликатное ядро Юпитера — Ио не касается их возраста. Земля и Луна относятся к очень древним образованиям. Расцвет вулканизма на Луне имел место 3,2—4,6 млрд. лет назад, когда Луна обладала сильным магнитным полем (именно с ним связана остаточная намагниченность образцов). Продолжая аналогию с Луной, флюидного запаса которой хватило пример-

но на 1,5 млрд. лет ее эндогенной активности, можно полагать, что современная вулканическая активность на Ио свидетельствует об относительной молодости спутниковой системы Юпитера, хотя сам он, как и другие планеты, имеет, по-видимому, древний возраст (4—5 млрд. лет).

У Луны нет массивного железного ядра (ее средняя плотность близка к плотности силикатов), и на ней не происходят тектонические процессы¹⁷. Представления о Луне как об однородном, внутренне неактивном теле получили подтверждение в сентябре 1959 г., когда советским аппаратом «Луна-2» у нее не было обнаружено заметного магнитного поля. Однако при изучении образцов лунного грунта, доставленного на Землю кораблями серии «Аполлон», начала вырисовываться иная картина. Некоторые образцы пород оказались намагниченными. Из этого следует, что во время формирования породы находились под воздействием магнитного поля, причем весьма сильного. Важны также выводы о миграции магнитных полюсов Луны относительно стабильной оси ее вращения¹⁸. Следующим моментом, связанным с анализом древнего магнитного поля Луны, является предположение о наличии у нее небольшого железного ядра, в котором в тот период, когда на поверхность Луны извергалась лава (3,2—4,6 млрд. лет назад), могло поддерживаться магнитное поле. Для этого ядро должно было находиться в жидком состоянии. В расплавленном материале ядра должна была возникнуть конвекция, т. е. такая циркуляция, при которой расплавленное железо должно работать как динамо, создавая магнитное поле таким же образом, как создается современное магнитное поле. Многие другие планеты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) имеют поля, которые генерируются в их жидких ядрах, состоящих из электропроводящего материала. По такому же механизму создается магнитное поле Солнца.

На поверхности Луны 3,2—4,6 млрд. лет назад развивался интенсивный базальтовый вулканизм, имеющий крайне эксплозивный характер, особенно на раннем этапе, когда формировались массы обломочного материала (вулканической тефры), покрывающие возвышенные пространства. Они выделяются относительно высокой отражательной способностью (светлой окраской)

¹⁷ Галкин И. Н. Внеземная сейсмология. М., 1988.

¹⁸ Ранкорт С. К. // В мире науки. 1988. № 2. С. 18—27.

благодаря обилию плагноклаза в базальтовых породах ранних извержений. На конечном этапе вулканизм приобрел спокойный характер, и извергавшиеся лавы базальтов, богатых железистым пироксеном и ильменитом, заполняли огромные депрессии на лунной поверхности, которые визуальнo выделяются темной окраской. При взрывных вулканических извержениях раскаленные стекловатые базальтовые частицы выбрасывались в глубокий вакуум на лунную поверхность. При этом на их краях происходила миграция кислорода и восстановление химических элементов, вплоть до самородного (металлического) состояния.

Горные породы на Луне, относящиеся к древнейшей формации (4,6 млрд. лет), слагают возвышенные части лунной поверхности, покрытой реголитом — стекловатыми пирокластическими лейкократовыми образованиями типа вулканической тefры. Реголит и массивные стекловатые породы частично изменены под действием метеоритных ударов — первичные стекла передроблены и переплавлены при очень высокой температуре, способствующей дегазации расплавов. В результате первичные вулканические стекла, богатые водородом и другими летучими компонентами, в значительной мере заместились на лунной поверхности импактными дегазированными стеклами, в которых они содержатся в виде реликтов¹⁹.

Флюидный характер магматизма Луны доказывает обилие пирокластических пород, что отражает высокую эксплозивность вулканизма. Показательно образование пузырьков газов в лунных базальтах, несмотря на высокую восстановленность флюидов, состоящих в основном из водорода, обладающего высокой миграционной способностью. Вследствие этого лунные базальты, кристаллизовавшиеся из бедных летучими компонентами магм, представлены преимущественно высокотемпературными (1200—1300 °C) стекловатыми пижонитовыми эвкритовыми базальтами, плагриобазальтами, долеритами и микроанортозитами, которые образуют лавы и стратифицированные пирокластические отложения.

Продукты кристаллизации остаточных магм, обогащенные калием, редкими землями, титаном и фосфором, а также кислые их производные, связанные с ликвационным расщеплением этих магм, играют

в лунном петрогенезисе незначительную роль. Древнейшие лунные породы по своему нормативному составу образуют анортит-пироксеновый тренд магматической дифференциации, продолжение которого можно проследить в ряду близких по возрасту (4—5 млрд. лет) ахондритов: эвкриты — гвардиты — диогениты. Этот ряд лунных пород и хондритов представляет первичные основные коры планет земной группы, подстилаемые ультраосновным мантийным веществом, о котором можно судить по лунным перидотитам.

В ходе первичного расслоения планет флюидные компоненты концентрируются преимущественно в их внутренних частях (ультрамафических, богатых железом). Поэтому консолидация планет, развивающихся от их внешних оболочек к центральным частям, должна сопровождаться возрастанием внутреннего флюидного давления и периодически приводить к миграции флюидных компонентов. Их восходящие потоки стимулируют развитие магматизма и обновление коры и мантии. На Луне это предстало в начальной стадии — образование вулканических депрессий на поверхности этой планеты (с возрастом 3,2 млрд. лет), наложенных на ее более древнюю кору (4,6 млрд. лет) в виде зон рассеянного спрединга.

Древняя кора в вулканических депрессиях утончается (с 60 до 20 км в наиболее крупных структурах) в результате внедрения ультраосновного вещества мантии, которое фиксируется аномалиями силы тяжести — масконами. Образование вулканических депрессий — ярко выраженное проявление эндогенной активности Луны на стадии, когда наружные оболочки ее консолидировались, а недра оставались еще в расплавленном (флюидно-магматическом) состоянии. Скорость вращения Луны вокруг оси совпадает с угловой скоростью обращения вокруг Земли, так что Луна всегда повернута к Земле одним и тем же полушарием — это видимая сторона Луны. Здесь в основном сосредоточены вулканические депрессии, занимающие почти половину поверхности. Их впервые в телескоп наблюдал Галилей. На фоне светлых возвышенных областей темные депрессии казались ему морями, заполненными водой, что и определило укоренившееся за ними название (Море Спокойствия, Море Ясности, Море Холода, Море Дождей и др.). В действительности же это огромные плоские равнины, сложенные базальтовыми лавами и лишённые воздуха и воды, как и вся поверхность Луны.

¹⁹ Ашимхина Н. А., Богатиков О. А., Фрих-Хар Д. И. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1985. № 8. С. 12—19.

В ряду крупнейших депрессий отметим Море Дождей (диаметром 1100 км), Море Ясности (700 км) и др. Наряду с обширными, изометричными в плане депрессиями прослеживаются протяженные рифтовые структуры (например, Альпийская долина), особенно наглядно фиксирующие процессы растрескивания и растяжения первичной коры Луны под напором флюидных базальтовых расплавов, поднимающихся из ее недр. Древние первичные коры Луны морфологически отличаются от плоских базальтовых равнин, слагающих депрессии и рифтовые долины, гористым рельефом и очень большим количеством крупных и мелких кратеров. Эти древнейшие лунные структуры условно называются «материками» (в противоположность «морям»), хотя в действительности ничего общего не имеют с материковыми структурами Земли. Как вся поверхность Луны, они сформировались в результате необычайно интенсивного эксплозивного вулканизма.

Перечисленные структурные элементы свойственны видимой стороне Луны, тогда как обратная ее сторона, по данным межпланетных станций «Луна-3», «Лунар орбитер» и «Аполлон», почти полностью представлена первичной сильно кратерированной корой и содержит только одну вулканическую депрессию диаметром 350 км (Море Москвы) и одну желобную структуру протяженностью 240 км. Обратная сторона Луны была, следовательно, значительно более пассивной по сравнению с обращенной к Земле, на которой вулканическая деятельность усиливалась гравитационным полем Земли.

Развитие формации богатых железом меланократовых базальтов, заполняющих депрессии, прекратилось около 3 млрд. лет назад. Произошло это в результате консолидации Луны — потери запаса летучих компонентов, сосредоточенных в ее недрах. Одновременно прекратило существование и магнитное поле Луны. С тех пор поверхность Луны изменялась только под действием метеоритной бомбардировки. «Два крупных метеорита весом более 1 т, упавшие на Луну 13 мая и 17 июля 1972 г., сыграли выдающуюся роль в сейсмических исследованиях. Первый помог открыть границу кора-мантия, второй — астеносферу»²⁰.

Луна, как и все массивные спутниковые планеты, эндогенно развивалась благодаря запасу флюидных компонентов,

захваченных ею при отделении в виде расплавленной силикатной массы от водородной оболочки материнской планеты.

Земные породы сходны с лунными по изотопным характеристикам кислорода, что определяет генетическую связь Земли и Луны с общим для них типом хондритового вещества (НН). Однако во всех других отношениях породы земной коры совершенно специфичны. В результате эволюции, длящейся более 4,6 млрд. лет, первичная кора Земли полностью заместилась новообразованными корами (континентальной и океанической), которые представляют самый высокий уровень эволюционного развития внешних оболочек планет. Аналоги слагающих их пород отсутствуют на примитивно развитых планетах, таких как Луна и материнские планеты метеоритов. Это особенно наглядно устанавливается путем анализа распределения изотопов гелия между метеоритами, лунными и земными породами. Земные породы отличаются крайне низким содержанием легкого изотопа гелия (10^{-10} — 10^{-15} см³/г) как от лунных пород, так и от метеоритов, в которых его содержание отвечает хондритовому уровню (10^{-6} — 10^{-7} см³/г). Лунные породы с этой точки зрения больше сходны с метеоритами, чем с земными горными породами.

Кратеры (и вообще кольцевые структуры) на поверхности Луны подразделяются на эндогенные, связанные с вулканической деятельностью взрывного характера, и космогенные, обусловленные падением на лунную поверхность метеоритов. Они различаются прежде всего морфологически, на что впервые обратил внимание П. Н. Кропоткин²¹, использовавший для своих выводов корреляционные графики глубины и диаметра кратеров, выведенные А. Т. Базилевским и др.²² Кратеры подразделяются на два типа: небольшие чашеобразные кратеры, характеризующиеся быстрым возрастанием глубины с увеличением их диаметра (космогенные, по П. Н. Кропоткину), и блюдцеобразные кратеры, глубина которых незначительно увеличивается с ростом диаметра (кратеры эндогенной природы).

Формирование последних сопряжено с развитием плоских вулканических структур, общей деструкцией и обновлением на Луне древней коры. Это большей частью

²¹ Кропоткин П. Н. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 7. С. 3—14.

²² Базилевский А. Т., Иванов Б. А., Флоренский К. П. Ударные кратеры на Луне и планетах. М., 1983.

²⁰ Галкин И. Н. Цит. соч.

крупные образования диаметром 20—200 км, разделяющиеся по размеру на несколько типов: Дауэс (15—28 км), Ремер (25—50 км), Коперник (40—90 км) и Тихо (32—200 км). Подобными кратерами фиксируются зоны растяжения и утончения коры, а также направления подъема к поверхности Луны магматических масс, формирующих огромные вулканические депрессии — Море Дождей (диаметр 1100 км), Море Ясности (700 км) и др. Большая часть этих депрессий сосредоточена на стороне Луны, обращенной к Земле.

Марс имеет два небольших спутника — Фобос (27,0×21,4×19,2 км) и Деймос (15,0×12,0×11,0 км), вращающихся синхронно с планетой по круговым орбитам радиусом 6 и 20 тыс. км соответственно. Это тела неправильной формы с сильно кратерированной поверхностью, сложенные породами небольшой плотности (в г/см³): Фобос — 1,9 и Деймос — 1,4. На Фобосе наряду с множеством мелких отмечаются крупные кратеры диаметром 5—10 км. На Деймосе размер кратеров не превышает 2 км. Часть кратеров на Фобосе расположена вдоль борозд, определяющих его полосчатое сложение. В общем эти спутники Марса существенно отличаются от мелких спутников неправильной формы, обычно формирующихся в непосредственной близости от материнских планет при их нормальном развитии. В прошлом спутники входили в обломочное кольцо, окружавшее Марс вместе с другими спутниками, давно утраченными. Они обращаются так, что их оси всегда указывают на планету. Оба спутника имеют почти одинаковый серый цвет, но на Деймосе слой обломочного материала — реголита — значительно толще, чем на Фобосе. Фобос больше, чем Деймос, и находится ближе к Марсу, вследствие чего он подвержен более сильным приливным эффектам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель формирования планет и их спутников, основанная на кометной гипотезе, позволяет подоить к объяснению самых общих закономерностей строения Солнечной системы, которые определяются водородным составом ее центральных тел и водным составом периферических объектов: Солнце — планеты с водородными оболочками (протопланеты земной группы, Юпитер, Сатурн) — планеты с водными оболочками (Уран, Нептун) — Плутон и кометы.

Система Солнца, планет и комет сложилась в результате конденсации газов и

развития гравитационной неустойчивости, которая определила неравномерное распределение в ней железосиликатных частиц: более тяжелые, богатые железом частицы протосолнечной небулы стягивались гравитационными силами к центру системы, а относительно легкие силикатные частицы, богатые магнием и кремнием, в основном оставались на ее периферии. По данным А. К. Лаврухиной и Р. А. Мендыбаева²³, состав Солнца отличается более высокими отношениями Fe/Si (1,32) и Fe/Mg (1,23) от состава углистых хондритов (0,99 и 0,85), соответствующего планетам, и особенно от состава комет (0,28 и 0,52), которые представлены веществом, относительно бедным железом.

В общем образование комет, планет и Солнца представляло собой единообразный процесс конденсации и аккреции вещества протосолнечного диска: различие возникающих объектов определялось только их массой. Кометные тела неправильной формы небольшого размера остались на примитивной стадии первичной конденсации небулы. В планетных телах сосредоточивалась масса ледяного вещества, достаточная для ее плавления за счет тепла аккреции и гравитационного сжатия. В результате эти тела приобретали сферическую форму и распадались на железосиликатные хондритовые ядра («примерно земного состава») и флюидные оболочки вследствие развития флюидно-силикатной жидкостной несмешиваемости. Железокаменное расплавленное вещество концентрировалось в ядрах планет под действием гравитации в динамике быстрого вращения планет, в результате которого в планетах устанавливалось некоторое соотношение гравитационных и центробежных сил. Под действием последних каплеобразные обособления силикатных и флюидно-силикатных расплавов, отделяющиеся по периферии гигантских флюидных оболочек, не перемещались к центру (не поглощались ядрами), а отбрасывались центробежными силами и образовывали спутниковые системы планет.

Солнце, как и планеты, сформировалось в результате аккреции кометоподобных ледяных тел, но в нем сосредоточилась очень большая (звездная) масса вещества, определившая дальнейшую эволюцию благодаря развитию термоядерных реакций горения водорода и гелия. По достижении в этой эволюции стадии Т Тельца (максималь-

²³ Лаврухина А. К., Мендыбаев Р. А. // Матер. XI Всесоюз. метеоритной конф. М., 1990. С. 117—118.

ной светимости) Солнце интенсивно воздействовало на водородные планеты его ближайшего окружения, которые подверглись поверхностной дегазации и потеряли флюидные оболочки, превратившись в планеты земной группы (обнажились их железокремниевые ядра). Однако жидкостное расслаивание этих ядер происходило еще под давлением их флюидных оболочек, благодаря чему в железных ядрах планет сосредоточились запасы флюидных компонентов (преимущественно водорода). С их восходящими потоками связана длительная эндогенная активность планет, а также распад хондритовых планет в поясе астероидов.

Аналогичную природу имеет и эндогенная активность спутников. Она обусловлена запасом в них флюидных компонентов, захваченных при отделении в виде расплавленных масс от флюидных оболочек планет. Наиболее ярким выражением этой активности служит эксплозивный вулканизм, развитие которого в прошлом или настоящем устанавливается на всех планетах и их массивных спутниках. На Земле эндогенная активность, обусловленная потоками водородных флюидов, поднимающихся из ее недр, продолжается уже 4,6 млрд. лет. У планет меньшего размера эндогенная активность была менее длительной (у Луны она длилась около 1,5 млрд. лет).

Таким образом, порождение планетными каменными спутниками (в том числе Луны), является естественным отражением их расслаивания на железокремниевые ядра и ги-

гантские флюидные оболочки, приобретающие при этом быстрое вращение. Данная модель образования спутников, как нам кажется, не имеет альтернативы. Во всяком случае, в рамках общепринятой в настоящее время метеоритной гипотезы происхождения планет проблема образования спутников планет не находит удовлетворительного решения: «...в настоящее время признается, что наиболее подходящим местом для образования спутников является протоспутниковый рой тел вокруг планеты. Но определенной точки зрения на способ формирования роя пока нет»²⁴. Это особенно ярко проявилось на конференции по происхождению Луны (Гавайи, 1984 г.), на которой естественным процессам происхождения спутников в результате эволюции планетных систем почти не уделялось внимания. Центральное место на конференции занимали доклады, посвященные идее образования Луны в результате мегаимпакта — столкновения Земли с космическим телом («крупнее Марса»). Эта идея, связывающая происхождение Луны со случайным и мало вероятным катастрофическим явлением, вообще, как нам кажется, не заслуживает внимания, так как порождение эндогенно-активных каменных спутников, подобных Луне, свойственно всем планетам Солнечной системы, хотя и происходит на различных стадиях их эволюции.

²⁴ Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафонов В. С. Цит. соч.

Избыток астероидов вблизи системы Земля—Луна

С. Я. Шилов

Московская обл.

В ЯНВАРЕ 1991 г. ученые впервые увидели с помощью телескопа небольшой астероид, орбита которого близка к орбите Земли. С тех пор вблизи Земли обнаружено более 40 астероидов, причем у 13 из них диаметр меньше 50 м. Проведя расчеты,

американский исследователь Д. Л. Рабинович и его коллеги пришли к выводу, что вблизи системы Земля—Луна существует избыток (от 10 до 100 раз) астероидов диаметром менее 50 м. На основании своих расчетов ученые утверждают, что эти небольшие объекты, характеризующиеся малым эксцентриситетом, широким диапазоном наклонений и необычным спектром, образуют вбли-

зи Земли неизвестный ранее пояс астероидов (параметры некоторых из них приведены в табл. 1).

Откуда же появились эти астероиды? По мнению той же группы исследователей, они переместились на новые орбиты из главного астероидного пояса под воздействием гравитационного пояса Юпитера. Все эти мелкие астероиды могут быть либо фрагментами рас-

С. Я. Шилов. С. Я. Избыток астероидов вблизи системы Земля—Луна.

Таблица 1

Диаметры малых астероидов и основные элементы их орбит

Название астероида	Дата открытия	Большая полуось, а. е.	Эксцентриситет орбиты	Наклонение орбиты, град	Диаметр астероида, м	Перигелий, а. е.	Афелий, а. е.
1991 BA	18.01.91	2,243	0,682	1,96	7	0,72	3,77
1991 TT	6.10.91	1,193	0,161	14,76	28	1,00	1,39
1991 TU	7.10.91	1,416	0,333	7,68	8	0,94	1,89
1991 VA	1.11.91	1,429	0,352	6,52	17	0,93	1,93
1991 VG	6.11.91	1,047	0,076	0,25	13	0,97	1,13
1992 DU	26.02.92	1,160	0,175	25,26	44	0,96	1,36
1992 JD	3.05.92	1,034	0,032	13,59	44	1,00	1,07
1992 YD3	27.12.92	1,169	0,139	27,75	55	1,01	1,33
1993 BD3	26.01.93	1,618	0,369	0,87	28	1,02	2,22
1993 DA	17.02.93	0,936	0,093	12,33	21	0,85	1,02
1993 FA1	28.03.93	1,432	0,292	20,57	28	1,01	1,85
1993 HD	20.04.93	1,445	0,664	5,74	44	0,49	2,40
1993 HP1	27.04.93	1,921	0,493	7,78	17	0,97	2,87
1993 KA	17.05.93	1,257	0,199	6,10	28	1,01	1,51
1993 KA2	21.05.93	2,227	0,775	3,18	6	0,50	3,95

коловшихся комет, либо глыбами грунта и обломками скал, выброшенными в космос с поверхности Луны или Марса в результате столкновения этих планет с крупными небесными телами.

Случаи раскола комет известны, но могут ли попасть в космос грунтовые глыбы или обломки скал с какой-либо планеты? Несколько лет назад специалисты ответили бы на этот вопрос отрицательно. Но за последние годы с помощью изотопных исследований удалось выяснить, что некоторые метеориты имеют лунное или марсианское происхождение.

Поскольку при извержении вулканов выбрасываемое вещество не может достичь скорости, достаточной для выхода из сферы притяжения планеты, ученые предположили, что такой выброс происходит при столкновении планеты с крупным небесным телом. Согласно их расчетам, вещество, находящееся на поверхности планеты, достигает нужной скорости (2,4 км/с — для Луны и 5,0 км/с — для Марса), если давление в ударной волне составляет не менее 440 кбар на Луне или 1,5 кбар на Марсе.

При таком высоком давлении выбрасываемое вещество должно либо размельчиться,

либо расплавиться. Однако петрографическое исследование лунных метеоритов показало, что их выброс сопровождался давлением, не превышающим 200 кбар. Для марсианских же метеоритов давление при их отрыве не превышало 300—400 кбар, а в отдельных случаях — 50—100 кбар.

Чем же объясняется такое несоответствие? Рассчитав ряд моделей, описывающих столкновение планеты с метеоритами, ученые предложили следующее объяснение. В результате удара метеорита возникает ударная волна, давление в которой быстро падает по мере удаления от места столкновения. Вблизи этого места скорость выброса грунта высокая, а по мере удаления она уменьшается. Большая часть выброшенного вещества заполняет кратер и оседает поблизости.

Однако вблизи места столкновения возникает так называемая интерференционная зона (ИЗ), в которой происходит разрежение грунта и давление составляет всего около 1% от давления в месте столкновения. При этом скорость выброса в ИЗ самая высокая. (Необходимо отметить, что 1% — расчетное значение. Как показали петрографические исследования, а также судя по экспериментальным и другим

данным, о которых речь пойдет ниже, давление в ИЗ составляет 5—10% от давления в месте столкновения.) Толщина ИЗ вблизи места столкновения составляет около 20% радиуса «снаряда» (в нашем случае — метеорита) и увеличивается по мере удаления от него. Из всего выбрасываемого с поверхности планеты вещества на долю ИЗ приходится около 10%. Но именно вещество, выбрасываемое из этой зоны, достигает скорости выхода из сферы притяжения планеты.

Эти теоретические расчеты подтвердил эксперимент, который провели американские ученые Э. Дж. Гратц, У. Дж. Неллис и Н. А. Хинсей¹. Главная особенность эксперимента — селективный отбор и захват вещества, выбрасываемого из ИЗ (в реальных условиях вещество, выбрасываемое из различных зон, смешивается).

Суть эксперимента состоит в следующем. Из газовой пушки длиной 6,5 м выстреливали круглую алюминиевую пластинку толщиной 3 мм и диаметром 19 мм со скоростью 4,0 км/с. Мишенью служил неподвижный гранитный диск

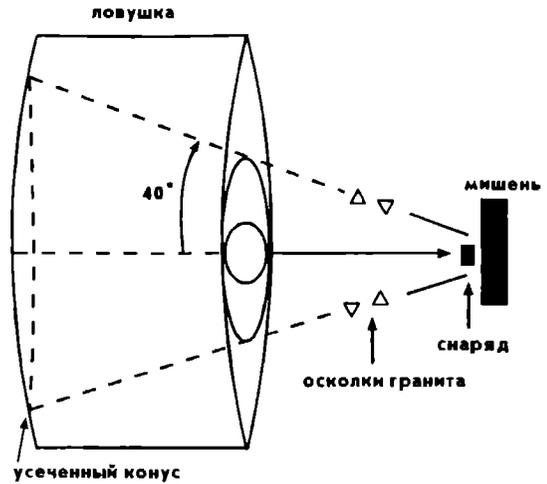
¹ Gratz A. J., Nellis N. J., Hinesy N. A. // Nature. 1993. V. 363. N 6429. P. 522—524.

диаметром 150 мм и толщиной 100 мм. «Снаряд» двигался по трубе, проходящей в центре огромного пенопластового цилиндра, и поража л мишень. Этот же цилиндр служил «ловушкой» для вещества, выбрасываемого из ИЗ.

В момент столкновения «снаряда» с мишенью давление в месте удара составило 430 кбар. Удар привел к выбросу из ИЗ гранитного диска вещества, которое попало в ловушку. При этом давление в ИЗ не достигло и 50 кбар. Множество осколков гранита размером от 0,1 до 4 мм, летящих со скоростью 1 км/с, вонзились в цилиндр и буквально вырезали в нем усеченный конус.

Расчеты показывают, что при характерных для метеоритов скоростях — от 15 до 30 км/с (при этом давление в месте столкновения превышает 100 ГПа) — возможен выброс с поверхности Луны фрагментов размером от 4 до 40 м, а с Марса — до 1 м. Кстати, в Швейцарии были обнаружены обломки пород размером около 20 см, выброшенных при падении метеорита на юге Германии 15 млн. лет назад. Они пролетели около 200 км со скоростью 1,4 км/с. Согласно экспериментам, эти осколки известняка были выброшены из

Установка для селективного отбора и захвата вещества, выбрасываемого из интерференционной зоны.



ИЗ под давлением в 10 кбар, в то время как давление в месте столкновения достигало 220 кбар.

Наконец, возникает еще один очень важный вопрос: не представляет ли находящийся вблизи Земли астероидный пояс опасности для нашей планеты? Обстоятельный ответ на него дает сотрудник НАСА К. Ф. Чибя². Он рассмотрел 12 астероидов диамет-

ром менее 50 м и, используя элементы их орбит, рассчитал для каждого вероятность столкновения с Землей и скорость этого столкновения. В зависимости от состава он разделил астероиды на четыре типа: 1 — железные; 2 — каменные; 3 — состоящие из углеродсодержащих веществ; 4 — представленные осколками комет. Поскольку астероиды 1-го типа обычно достигают поверхности Земли, он рассматривает их отдельно. Затем, учитывая для 2-го, 3-го, 4-го типов астероидов альbedo (0,186; 0,048; 0,048),

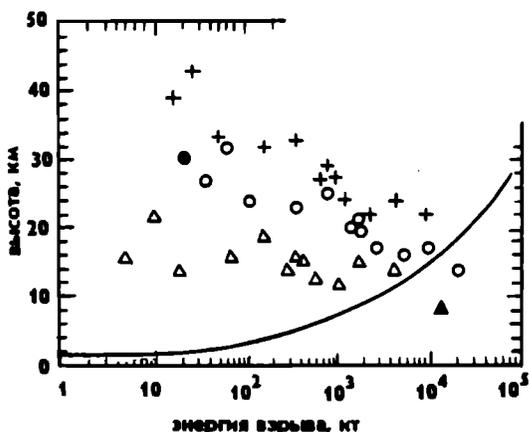
² Chyba C. T. // Nature. 1993. V. 363. N 6431. P. 701—706.

Таблица 2

Вероятность* столкновения с Землей астероидов разных типов

Название астероида	Диаметр, м	Скорость удара, км/с	Вероятность, Глет ⁻¹	Астероиды 2-го типа			Астероиды 3-го типа			Астероиды 4-го типа	
				радиус, м	энергия, кт	высота, км	радиус, м	энергия, кт	высота, км	энергия, кт	высота, км
1991 BA	7	21,2	7,1	2,5	9,6	22	4,9	57	32	26	43
1991 TT	28	13,9	49	10	300	14	20	1 600	20	720	27
1991 TU	8	13,7	11	2,9	4,7	16	5,6	35	27	16	39
1991 VA	17	13,9	11	6,1	66	16	12	360	23	160	32
1991 VG	13	11,4	4210	4,6	18	14	9,1	110	24	49	33
1992 DU	44	17,8	7,2	16	1900	15	31	10 000	17	4500	24
1992 JD	44	13,3	115	16	1100	12	31	5 600	16	2500	22
1992 YD3	55	18,6	6,8	20	4400	14	39	21 000	14	9600	22
1993 BD3	28	15,7	59	10	400	16	20	2 000	20	920	28
1993 DA	36	12,9	46	13	580	13	25	2 900	17	1300	24
1993 FA1	26	16,5	2,6	9,3	350	16	18	1 800	21	810	29
1993 HP1	18	19,3	2,4	6,4	160	19	13	810	25	370	33

* Здесь вероятность — количество столкновений, возможных за 1 млн. лет.



Зависимость высоты взрыва астероида от его энергии. Для сравнения приведены данные о взрывах метеоритов над Тунгуской и Ревелстоком.

плотность (3,5; 2,2; 1,0 г/см³) и прочность (10⁸; 10⁷; 10⁶ дин/см²), Чиба рассчитал радиус взрыва для каждого астероида.

Пока не установлено, к какому типу принадлежит тот или иной астероид. Но радиусы астероидов, как известно, связаны зависимостью с их альбедо. И поскольку альбедо у 3-го и 4-го типов астероидов одинаково, то и радиусы этих астероидов должны быть одинаковыми. Поэтому радиус в восьмой колонке (табл. 2) относится к 3-му и к 4-му типу астероидов. Диаметр, указанный во второй колонке, рассчитан для альбедо 0,0945.

Итак, для каждого астероида существует определенная вероятность того, что он войдет в плотные слои атмосферы и взорвется. Насколько же эти взрывы, если они произойдут, будут опасны?

Американские ученые Дж. Г. Хиллс и М. П. Годе, ссылаясь на неопубликованные результаты испытаний воздушных ядерных взрывов, пред-

ставленные им Дж. Соленом, предложили формулу для нахождения радиуса зоны на поверхности Земли (r_1), в которой избыточное давление (Δp) приводит к вывалу леса и превышает 27 кПа:

$$r_1 = 2,09 h - 0,449 h^2 E^{-1/3} + 5,08 E^{1/3},$$

где E — эквивалент взрывчатого вещества (в мегатоннах), h — высота взрыва (в километрах).

Центром этой зоны является проекция центра взрыва на поверхность Земли. Меньшие значения Δp также вызовут какие-то разрушения на земной поверхности, но $\Delta p \approx 27$ кПа представляется этим ученым наиболее подходящей величиной, характеризующей «значительную» опасность для земной поверхности. Подставив в формулу значения E (10—20 Мт) и h (8—9 км), ученые получили величину r_1 , соответствующую зоне вывала леса, которая образовалась при взрыве Тунгусского метеорита (правда, без боковых долей, напоминающих «бабочку», — наличие этих боковых долей, вероятно, обусловлено баллистической волной на конечном участке движения метеорита перед его взрывом).

Астероиды:

△ 2-го типа

○ 3-го типа

+ 4-го типа

▲ Тунгусский метеорит

● Метеорит, взорвавшийся над Ревелстоком

Принимая $r_1 = 0$ и подставляя в приведенную выше формулу различные значения, Чиба вычислил соответствующие значения высот $h_1 = 6,42 E$. Физический смысл этих высот в следующем: если взрыв метеорита, обладающего энергией E , произойдет на высоте h_1 или выше, то этот взрыв не будет представлять опасности для земной поверхности. Таким образом, Чиба получил кривую безопасных высот, нанесенную на графике сплошной линией.

Проведя эти вычисления, Чиба сделал вполне утешительный для землян вывод: ни один малый астероид, обладающий энергией менее 10 Мт (такой энергией может обладать астероид 2-го типа радиусом около 32 м, движущийся со скоростью 13,3 км/с), не представляет угрозы для земной поверхности.

Рассмотрим, наконец, последний вариант, когда часть астероидов относится к 1-му типу. Согласно наблюдениям, около 8 % всех метеоритов относятся к 1-му типу, а в главном астероидном поясе — около 6 %. Но Чиба утверждает, что среди малых астероидов, образующих пояс вблизи Земли, астероидов 1-го типа гораздо меньше. В противном случае на Земле каждые пять лет происходил бы взрыв мощностью 20 кт, а каждые 50 лет — мощностью 700 кт. К счастью, этого не наблюдается.

Более того, малые астероиды, встречающиеся вблизи системы Земля—Луна, — действительно продукты выбросов с поверхности Луны или Марса, то среди них вообще не должно быть астероидов 1-го типа. Спектральные исследования подтверждают тот факт, что малые астероиды существенно отличаются от других известных астероидов. Поэтому будет крайне интересно сравнить их спектры со спектрами лунных и марсианских метеоритов.

Образование Луны. Теория гигантского столкновения

А. Г. У. Камерон



А. Камерон — выдающийся американский планетолог, работает в Гарвард-Смитсоновском астрофизическом центре в Кембридже, штат Массачусетс. Его таблицы распространенности химических элементов в Солнечной системе являются на сегодня общепризнанным эталоном. С начала 80-х годов Камерон развивает теорию ударного образования Луны.

В ИСТОРИИ человечества, письменной и устной, Луна всегда была предметом удивления, а иногда и обожествления. Но только в прошлом столетии ученые попробовали сформулировать теории, объясняющие как Луна образовалась. В первых попытках такого рода происхождение Луны рассматривалось как отдельная задача, изолированная от более общих вопросов образования Солнечной системы. Только в последние годы образование Луны стали рассматривать как элемент общего процесса аккумуляции планет.

Ранние теории образования Луны основаны на трех разных идеях.

Теория «отделения» постулировала, что Земля вращалась вокруг своей оси настолько быстро, что планета деформировалась и приняла форму груши. Затем материал узкого конца груши отделился от утолщенной части и перешел на орбиту вокруг нее. Но такая система должна иметь намного больший угловой момент, чем современная система Земля — Луна, и никому не удалось найти механизм, позволяющий избавиться от лишнего углового момента.

Теория «совместного рождения» постулировала, что Земля и Луна образовались одновременно, на единой орбите вокруг Солнца. Однако строение Луны совершенно отлично от земного: ее железное ядро очень мало. И никто еще не придумал такой механизм аккумуляции, который собирал бы почти все железо только в одно из двух соседних тел.

Теория «захвата» предполагает, что Луна образовалась самостоятельно где-то в Солнечной системе, а затем она случайно сблизилась с Землей и была ею захвачена. Опять же никто не смог объяснить, каким образом планетное тело может сформироваться настолько непохожим на остальные планеты земной группы — без значительного

железного ядра. Но кроме этого, те исследователи, которые пытались понять, как именно проходил захват по законам небесной механики, испытывали непреодолимые трудности.

Примерно такой была ситуация в начале 60-х годов, когда правительство США приступило к выполнению проекта «Аполлон», поставившего целью высадить человека на Луну и благополучно вернуть его на Землю. Были различные мотивировки этой программы, но ее научной задачей было разрешение вопроса, какая именно из трех теорий верна.

В программе «Аполлон» участвовал психолог Я. Митрофф из Питтсбургского университета. Он многократно опрашивал «лунных ученых» и старался определить их взгляды на происхождение Луны в момент каждого опроса, надеясь при этом, что он станет свидетелем блестящей демонстрации научного метода. Ему представлялось, что по мере поступления результатов анализа лунных образцов и данных приборов, установленных на лунной поверхности, ученые, как люди логики, изменят свои взгляды и воссоединятся в признании правильной теории. Но этого не произошло. Когда данные были собраны, Митрофф заметил, что взгляды ученых существенно не изменились. Никакого воссоединения не было. Митрофф написал книгу, в которой он пришел к заключению, что «лунные ученые» — упрямые люди, неспособные распознать очевидную научную истину. Однако он не сказал нам, какая из теорий правильная.

Ошибка Митроффа была в предположении, что правильной непременно должна быть признана одна из трех классических теорий образования Луны. В данной ситуации справедливо было бы добавить в его опросник четвертую формулировку: «ни одна из трех». Все возражения против трех теорий, которые возникали до «Аполлона», так и остались возражениями. Более того, при анализе множества новых данных возникли дополнительные возражения. Исследователи Луны были очень огорчены тем, что ее происхождение так и осталось загадкой. Через несколько лет поток данных от приборов, оставленных на Луне пресекался, количество анализов лунных образцов постоянно снижалось...

В 1984 г. на о. Кона (Гавайи) состоялась конференция по вопросам образования Луны. Организаторы этой встречи с удивлением обнаружили, что большое число представленных работ посвящено идее формирования Луны при столкновении между Землей и другим планетным телом, по величине по

крайней мере равным Марсу. Это и было рождение теории Гигантского, или Великого, столкновения (по-английски — Giant Impact или Megaimpact).

ГИГАНТСКОЕ СТОЛКНОВЕНИЕ. ПЕРВЫЕ ШАГИ

Как это часто бывает при возникновении новой теории, основные идеи теории Великого столкновения первоначально были сформулированы или неверно, или неадекватно. В середине 70-х годов независимо развивались две идеи, которые предшествовали этой теории.

В Институте Луны и планет в Тусоне (штат Аризона) У. Хартман и Д. Девис разрабатывали теорию планетной аккумуляции¹. Изучая, как меняется распределение планетарных тел по размерам при их общем росте, они обнаружили, что при взаимных столкновениях среди всех тел выделяется единственное тело наибольшего размера, а количество остальных непрерывно растет с уменьшением их размеров. Они также заметили, что когда наибольшее из тел становится сравнимым по массе с Землей, то столкновение с ним может привести к полному испарению налетающего тела. Поэтому они предположили, что при одном из крупных столкновений могло испариться огромное количество скального материала. Этот «каменный пар» остывал, отброшенный на большие расстояния, а затем, возможно, часть его сконденсировалась на околоземной орбите, образовав Луну. Но в своем сценарии они не смогли предложить явного механизма для перераспределения углового момента системы Земля — Луна (в то время, когда Земля и Луна приближены друг к другу, наибольшая часть углового момента системы должна содержаться в земном вращении).

В это же время в Кембридже (штат Массачусетс) У. Уард и я размышляли, каким образом поместить угловой момент системы Земля — Луна во вращение одной Земли². Мы задались вопросом, какого порядка должна быть при этом масса тела, ударяющего Землю со второй космической скоростью касательно вблизи экватора. Оказалось, по массе оно должно быть примерно равным Марсу (и это минимальная масса, неущая необходимый момент, поскольку чем

¹ Hartmann W. K., Davis D. R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 504—515.

² Cameron A. G. W., Ward W. R. The origin of the Moon // *Lunar Planet Science*. 1976. V. VII. P. 120—122.

Один из вариантов численного моделирования Великого столкновения.

Две протопланеты с отношением масс 8:2 и суммарной массой, примерно на 1% превосходящей суммарную массу Земли и Луны, сталкиваются с таким прицельным расстоянием, что угловой момент двух тел равен 1,72 от современного углового момента системы Земля—Луна. Скорость сближения тел соответствует нулевой начальной (на бесконечном удалении) скорости; как показывают другие варианты расчетов, это не принципиальный параметр. Избыток углового момента будет унесен осколками столкновения (избыточным 1% массы), которые приобретут скорости, превышающие вторую космическую скорость 11 км/с.

Каждое из тел представлено набором из 5000 частиц двух сортов: более плотных (железных) и менее плотных (каменных). Поскольку каждая из частиц ударника по массе в четыре раза меньше частиц протоземли, они изображаются кружочками с радиусами, различающимися в 2,5 раза — это дает возможность на любой стадии столкновения видеть первичный источник каждой массы. Все частицы взаимодействуют между собой гравитационно. Кроме того, примыкающие соседние частицы взаимодействуют согласно уравнениям состояния, которые моделируют поведение железа и камня (дунита) в широком диапазоне температур и давлений. Каждая из частиц обладает внутренней энергией, которую можно выразить как ее температуру. Средние начальные температуры сталкивающихся тел взяты равными 2000 К, что отражает их разогрев в процессе предыдущей аккумуляции.

На рисунках представлена последовательность кадров, отражающих состояние системы в разные моменты времени. Линейный масштаб на большинстве кадров одинаков, однако несколько кадров для лучшего разрешения внутренней структуры сливающихся масс даны с небольшим увеличением масштаба. Все частицы изображаются в проекции на плоскость симметрии. Те из них, которые помещаются в последовательных кадрах, изображаются кружками (двух размеров) одним из восьми цветов, отражающих четыре градации температуры (внутренней энергии). Наиболее холодные каменные частицы темно-красные; с возрастанием температуры их цвет становится розовым, желтым и белым. Каменные частицы наносятся на рисунок первыми, затем изображаются кружки железных частиц, которые таким образом, частично маскируют каменную компоненту ядер. Самые холодные железные частицы даны темно-синим цветом; с повышением температуры их цвет последовательно меняется на светло-синий, темно-зеленый и светло-зеленый.

Численные расчеты начинаются (в момент времени $t=0$) незадолго до столкновения, когда становится уже существенной деформация сталкивающихся тел под действием взаимных приливных сил.

Первый кадр соответствует моменту времени 169 мин после начала расчетов. Тела соприкоснулись со скоростью, близкой к 10 км/с, что выше скорости звука вблизи поверхности тел.

Второй кадр ($t=189$ мин). Ударная волна полностью деформировала оба тела. Два железных ядра соприкоснулись, началось их слияние, которое, однако, не может произойти очень быстро, этому препятствует значительный угловой момент. Несколько каменных частиц, происходящих в основном из ударника, с большой скоростью удаляются из системы. Интересно отметить, что в своем большинстве это достаточно холодные частицы.

Их движение еще можно проследить на следующем кадре, соответствующем моменту времени 208 мин. Это сопоставление позволяет «увидеть» направления их скоростей. Скорости направлены примерно от точки первого соприкосновения, т. е. их продолжение далеко от центра масс системы — это и говорит о том, что убегающие частицы уносят значительную долю углового момента, хотя их полная масса относительно мала.



ближе прицельное расстояние к центру Земли, тем большая масса для этого нужна). Для нас было также очевидно, что при столкновении образуется гигантское облако пара. Это облако должно сформироваться из смеси материалов Земли и ударяющего тела, но скорость его центра масс должна оказаться меньше, чем вторая космическая скорость (возможно, она близка к орбитальной скорости). Мы понимали, что градиенты давления вызовут расширение облака. Поэтому мы предположили, что часть этого облака окажется достаточно далеко и это позволит Луне сконденсироваться из него и аккумулироваться на орбите. Масса Луны при этом оказывалась равной примерно $\frac{1}{8}$ массы Марса. Такая схема автоматически обеспечивает распределение углового момента между вращением Земли и движением облака испаренного камня. Однако в дальнейшем стало понятно, что градиенты давления менее эффективны, чем мы полагали вначале, и что главную роль играют гравитационные силы, а градиентами давления можно даже пренебречь.

Все эти идеи вроде бы не производили большого впечатления на тех, кто в то время занимался планетологией. Но они оказались заразительны: как мы видели, на конференции на о. Кона было представлено много работ, разрабатывающих в том или ином виде идею Великого столкновения. И все же эта конференция была по сути «победой идеи над материей»: на ней было представлено крайне мало количественного материала, описывающего Великое столкновение. Люди настолько воодушевились самой возможностью выдвинуть альтернативу трем классическим теориям, что были не слишком критичны к деталям. Я покинул конференцию с убеждением, что следующим шагом должен стать численный расчет моделей Великого столкновения с использованием суперкомпьютеров.

ГИДРОДИНАМИКА СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Для численного расчета моделей Великого столкновения (а также иных взрывов) нужно иметь компьютерный код, который позволит рассматривать непрерывную среду как набор дискретных параметров. Традиционный способ организации таких вычислений следующий: пространство разделяется на набор дискретных ячеек; затем рассчитывают, как жидкость протекает сквозь каждую ячейку под действием внешних сил. При Великом столкновении выделяющаяся

энергия настолько велика, что весь материал ведет себя как жидкость или газ при высоком давлении. Но при этом все, что остается вне заданного набора ячеек, оказывается потерянным для дальнейших расчетов. Это затрудняет численное выполнение законов сохранения.

Однако в последние годы возникла альтернативная схема численной гидродинамики. Она называется гидродинамикой гладких частиц (лучше сказать — сглаженных): smooth particle hydrodynamics — SPH. В этой схеме дискретизируется не пространство, а масса: весь имеющийся материал представляется как набор сферических частиц, которые могут перекрывать друг друга. Распределение плотности в каждой из частиц зависит от радиуса и по форме напоминает колокол: плотность почти не меняется в центре частицы и резко спадает к нулю на конечном расстоянии от центра. При увеличении давления средняя плотность материала, представленного набором таких частиц, увеличивается за счет перекрывания «атмосфер» соседних частиц. Поскольку плотность становится достаточно однородной, это приближение неплохо представляет сплошную среду. Далее рассчитывают движение каждой частицы под действием ее ближайших соседей и гравитационных сил, вызванных остальными частицами системы. Все законы сохранения соблюдаются, поскольку ни одна из частиц не теряется, как бы далеко она ни ушла.

Каждая из частиц обладает своей собственной внутренней энергией (температурой), но такие свойства, как плотность и давление, определяются совокупностью соседних частиц, их перекрывающимися распределениями плотности. Эти коллективные характеристики имеют смысл только в тех случаях, когда во взаимное перекрывание вносят вклад как минимум несколько десятков частиц.

В наших расчетах Великого столкновения мы использовали код SPH для частиц равной массы и постоянной длины сглаживания, но отличающихся своим составом и средней плотностью. Было показано, что результаты, полученные с помощью таких расчетов, достаточно надежны для внутренних частей сталкивающихся планет. Но у частиц, улетающих при взрыве в окружающей пространство, распределения плотности перестают перекрываться и они становятся изолированными, поэтому эта часть вычислений, конечно, не могла представить истинное распределение материала на больших расстояниях.

РАСЧЕТЫ ВЕЛИКОГО СТОЛКНОВЕНИЯ

Как уже говорилось, для того чтобы суммарный угловой момент двух соударяющихся тел был примерно равен современному угловому моменту системы Земля — Луна, это столкновение должно происходить с достаточно большим прицельным расстоянием. Скорость, с которой происходит сближение двух тел, в любом случае превосходит вторую космическую скорость (11 км/с), а ее наиболее вероятное значение лежит в интервале 11—15 км/с. При таком сверхзвуковом ударе заметная часть скального материала испаряется. Поэтому градиент давления образовавшегося каменного пара выталкивает часть материала на орбиту вокруг Земли, образуя диск³. Диссипация энергии в этом диске при вязком трении перераспределяет материал так, что становится возможным образование Луны вне полости Роша, т. е. на расстоянии, превышающем 2,89 земного радиуса⁴. Этот сценарий был затем уточнен Д. Ственсоном⁵ и изучался нами при многократных численных расчетах вариантов гипотетического Великого столкновения⁶.

В этих работах рассчитывалась эволюция 3008 сглаженных частиц в трехмерном пространстве. Расчет каждого варианта столкновения на относительно дешевых компьютерах АТ-486 занимает примерно шесть недель. Оказалось, что величина начальной скорости (при бесконечном удалении сталкивающихся тел) несущественна для результатов, поэтому теперь мы не варьируем этот параметр, считая начальную скорость сближения близкой к нулю. Отношение масс

протоземли и налетающего тела (будем называть его для краткости «ударник», это близко к оригинальному — Impactor) варьировалось в расчетах от 5:5 до 8:2. Суммарный угловой момент соударяющихся тел в каждом из этих расчетов принимался несколько большим современного углового момента системы Земля — Луна, поскольку некоторая его часть уносится с той малой долей общей массы, которая приобретает достаточные скорости, чтобы покинуть систему. Часть расчетов была сделана для варианта с фиксированным отношением масс 8:2, но с изменяющимся начальным угловым моментом.

При первых расчетах всем частицам приписывалась одинаковая масса и одинаковая длина сглаживания, но теперь размеры частиц не являются обязательно равными, поскольку У. Бенц разработал компьютерный код, позволяющий варьировать массы и длины сглаживания. И все же для того чтобы иметь возможность сравнивать расчеты при разных начальных условиях, на первых стадиях проводились расчеты с одинаковыми частицами. Результаты⁷ достаточно надежно описывают динамику самого столкновения и условия в недрах тел — там, где происходит сильное перекрытие оболочек частиц. Но мы сознавали, что частицы на внешних орбитах, а также те, которые покидают систему, становятся изолированными, поэтому эти расчеты не отражают истинного взаимодействия этих частиц с теми градиентами давления, которые влияли бы на движение, если часть их массы была бы газообразна.

Сейчас проводится серия новых расчетов с 10 000 частиц, которые поровну распределены между протоземлей и ударником. Сглаживание длины этих частиц варьируется таким образом, чтобы каждые несколько десятков частиц перекрывались в любых условиях. Это делает возможным описание газа внешних атмосфер образующихся тел.

Кроме того, первые серии расчетов мы проводили для достаточно горячих сталкивающихся тел. Предполагая, что предыдущая история протоземли и ударника включала в себя многочисленные столкновения при аккумуляции этих тел, мы приписывали обоим телам среднюю начальную температуру 4000 К. При новом компьютерном коде такая высокая температура приводит к интенсивному испарению скального материала, поэтому она была понижена нами до 2000 К.

³ Cameron A. G. W. Formation of the prelunar accretion disk // *Icarus*. 1985. V. 62. P. 319—327.

⁴ Ward W. R., Cameron A. G. W. Disk evolution within the Roche limit // *Lunar Planetary Science*. 1978. V. IX. P. 1205—1207; Thompson A. C., Stevenson D. J. Two-phase gravitational instabilities in thin disks with application to the origin of the Moon // *Lunar Planetary Science*. 1983. V. XIV. P. 787—788; Thompson A. C., Stevenson D. J. Gravitational instability in two-phase disks and the origin of the Moon // *Astrophys. J.* 1988. V. 333. P. 452—481.

⁵ Stevenson D. J. Origin of the Moon: the Collision Hypothesis // *Annual Review Earth Planetary Science*. 1987. V. 15. P. 271—315.

⁶ Benz W., Slatery W. L., Cameron A. G. W. The origin of the Moon and the single impact hypothesis I // *Icarus*. 1986. V. 66. P. 515—535; Id. The origin of the Moon and the single impact hypothesis II // *Icarus*. 1987. V. 71. P. 30—45; Benz W., Cameron A. G. W., Melosh H. J. The origin of the Moon and the single impact hypothesis III // *Icarus*. 1989. V. 81. P. 113—131.

⁷ Cameron A. G. W., Benz W. The origin of the Moon and the single impact hypothesis IV // *Icarus*. 1991. V. 92. P. 204—216.



Продолжение численного моделирования, $t=228$ мин,
 $t=266$ мин, $t=305$ мин.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Опишем основные процессы, происходящие при моделировании Великого столкновения. Еще до столкновения ударник (т. е. тело меньшей массы) под действием приливных сил теряет сферическую симметрию, становится вытянутым. После удара большая часть его массы сливается с протоземлей, и прежде всего это касается его центрального железного ядра, которое погружается сквозь каменную мантию протоземли, стремясь к ее тяжелому ядру. Часть каменной оболочки ударника, наиболее удаленная от точки первого соприкосновения, имеет общую тенденцию выхода на орбиты вокруг Земли. В наших расчетах большая часть этой массы на орбитах оказывается представленной индивидуальными сглаженными частицами, хотя там присутствуют и перекрывающиеся клубы (рои) частиц. Важный (и неожиданный) факт, выяснившийся при моделировании, состоит в том, что железное ядро ударника не мгновенно сливается с ядром протоземли. Даже в вязкой среде тяжелые ядра не могут сразу погасить свой угловой момент, и заметное время внутри протоземли существует вращающаяся железная перемычка между этими ядрами. Вращение этой «гантели» порождает мощный момент сил, воздействующий на клубы частиц вне протоземли, включая и те частицы, которые затем останутся на устойчивых орбитах. Когда железная «гантель» успокаивается, сливаясь в ядро Земли, остатки внешней каменной части ударника вытягиваются в спиральный хвост, раскручивающийся от Земли.

Продолжение численного моделирования, $t=343$ мин, $t=382$ мин, $t=420$ мин. Часть материала, выброшенного при столкновении, объединяется в массивную группу. Однако ее орбита пересекает протоземлю, что приводит к вторичному столкновению.

Современная программа для вычислений на АТ-486 выводит данные для каждого момента времени как распределение цветных точек в пространстве. Внутренняя энергия частиц представлена четырьмя разными цветами для железа и четырьмя — для скального материала (дунита): использование всего восьми цветов при наблюдении за движением оказывается зрительно наиболее эффективным.

Самые горячие частицы изображались нами как белые. Оставляет поразительное впечатление, когда на последовательных кадрах расчетов видишь, как при любом варианте столкновения разогревается материал небесных тел — облако горячих частиц возникает над местом удара и затем распределяется, окружая протоземлю. Для отношений масс, равных 8:2 или 7:3, частицы ударника изображаются кружочками существенно меньшего радиуса по сравнению с частицами протоземли, поэтому можно заметить, что большинство частиц «белого облака» раньше входили в состав ударника. Горячее облако всегда плотнее вблизи поверхности планеты и разрежается при удалении от нее так же, как это происходит с атмосферой. Это явление не могло быть обнаружено в наших первых вычислениях, поскольку в них нельзя было правильно смоделировать испарение малого числа внешних частиц и образование атмосферы при фиксированной длине сглаживания.

Финальные стадии эволюции Земли, следующие после всевозможных вариантов столкновения, оказываются удивительно схожими. Поэтому достаточно проиллюстрировать их только для одного случая (выбрано отношение масс 8:2).



ОБСУЖДЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВ

Мы пришли к достаточно простой картине последствий Великого столкновения. При ударе образуется очень горячая магма, которая испаряется и образует горячую силикатную атмосферу вокруг протоземли. Эта атмосфера поддерживается частично гидростатически, частично центробежными силами. Ее средняя температура превосходит 4000 К на расстоянии примерно в 8 земных радиусов и 2000 К на расстоянии в 20 земных радиусов. Из этой «каменной» атмосферы мы получаем Луну правильной средней плотности на такой орбите, которая дает верную величину суммарного углового момента Земли и Луны.

Такое описание применимо практически к каждому варианту Великого столкновения, если масса ударника превосходит 10 % массы Земли. Ограничения на массу ударника налагаются также необходимостью обеспечить современное значение углового момента системы Земля — Луна и средние плотности этих тел. В наших первых работах было показано, что масса ударника должна составлять по меньшей мере 14 % массы Земли, чтобы его железное ядро было «проглочено» Землей и на Луне не оказалось слишком много железа. Из нашего моделирования следует, что любое отношение масс ударника и протоземли, превосходящее 15:85, может воспроизвести необходимый конечный набор условий.

Но как будут эволюционировать подобные сценарии в дальнейшем, при физическом уточнении картины? Используемый нами компьютерный код пока не позволяет включать в расчеты излучение и его перенос. Конечно, у нас были основания опустить из рассмотрения эти важные процессы, пока время, покрываемое расчетами, ограничивалось несколькими часами, максимум двумя днями. Учет излучения приведет к охлаждению атмосферы каменного пара и ее конденсации на меньших расстояниях. Однако доля массы в каменной атмосфере за порогом Роша в этот момент может оказаться еще слишком мала, чтобы ее хватило на современную Луну. В этих условиях приходится предположить вариант, при котором значительная доля Луны образуется из части ударника, выброшенной на очень высокие орбиты. Однако многие геохимики выражают тревогу при мысли, что придется принять такой сценарий.

Есть, впрочем, еще один способ переноса масс и углового момента в атмосфере каменного пара, который также может внести радикальные изменения в картину. Такая возможность существует в механизме, предложенном С. Бальбусом и Дж. Холи⁸. Они показали, что в дифференциально вращающейся системе с магнитным полем, ориентированным близко к оси вращения, возникает неустойчивость, которая развивается в направленный наружу поток массы и углового момента в экваториальной плоскости. Этот процесс способен извлечь лунную массу с малых расстояний и перенести ее за предел Роша, где конденсация сделает ее доступной для формирования Луны. Но детальное рассмотрение эффекта Бальбуса — Холи будет непростым предприятием.

Мы также не должны упустить из виду те остатки ударника, которые были выброшены на высокие орбиты вокруг Земли и на свободные орбиты вокруг Солнца непосредственно после Великого столкновения или же при ускорении, полученном от асимметричной «гантели» сливающихся железных ядер. Значительная доля этого материала снова выпадет на Луну (и Землю).

Образование Луны при процессах, следующих за Великим столкновением, все еще остается гипотезой. Пока основная часть работ описывала внутренние воздействия Великого столкновения на Луну и Землю. Мне представляется, что понимание эволюции внешней области (особенно тех масс, которые становятся гравитационно несвязанными) — это то направление, где нас ждут наиболее интересные результаты.

© Перевод с английского А. В. Бялко

⁸ Balbus S. A., Hawley J. F. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I // *Astrophys. J.* 1991. V. 376. P. 214—222; Hawley J. F., Balbus S. A. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. II. Nonlinear evolution // *Astrophys. J.* 1991. V. 376. P. 223—233; Balbus S. A., Hawley J. F. Is the Oort A-value a universal growth rate limit for accretion disk shear instabilities? // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 662—666; Hawley J. F., Balbus S. A. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. III. Long-term evolution in a shearing sheet // *Astrophys. J.* 1992. V. 400. P. 595—609; Balbus S. A., Hawley J. F. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. IV. Nonaxisymmetric Perturbations // *Astrophys. J.* 1992. V. 400. P. 610—621.

Великое столкновение: геофизические следствия

(Вместо послесловия)

А.В. Бялко

РАССМАТРИВАЯ высказанные взгляды на происхождение Луны, интересно заметить, что зачастую одними и теми же фактами подкрепляются противоположные взгляды. Вообще-то, это нормально для научной дискуссии в условиях вынужденно неполной информации — научное знание не становится всемогущим только потому, что оно верно, и не сразу истина становится просто сильной. Новые идеи всегда медленно прорастают сквозь предубеждения и замалчивание. Конечно, среди них могут быть и ложные. Но тут уж, как говорил Менделеев: «Демонстрируй!» Согласись, статья А.Г.У. Камерона, как бы ни относиться к ее сути, — яркий пример именно демонстрации идеи, которая, как видно из статьи А.В.Козенко, и новой-то может считаться только условно.

У читателя, заинтересованного проблемой, могут возникнуть вопросы, непосредственно относящиеся к теме, но не затронутые в предыдущих статьях этого номера. Кроме того, новая концепция образования Луны порождает ряд следствий, представляющих интерес для геологии, астрономии, физики Солнца и климатологии, а возможно, и для проблемы происхождения жизни.

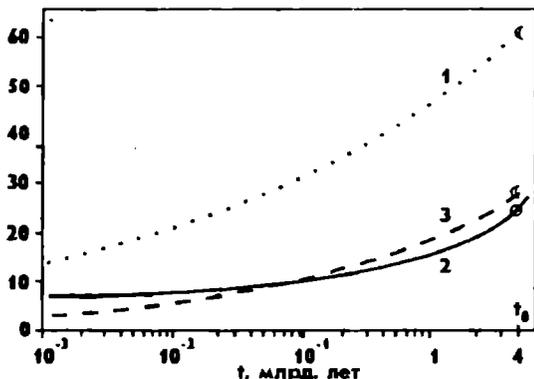
ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ-ЛУНА

Прежде всего, следует пояснить некоторые вопросы, возникающие при первом знакомстве с теорией Великого столкновения, которые к сожалению, не освещены в статье Камерона. Эти положения достаточно очевидны для планетологов, но для представителей других профессий их пояснения, возможно, не будут излишними. В расчетах Камерона Луна образуется на расстоянии 3-4 радиусов современной Земли, однако сегодня она удалена от центра Земли на 60.3 ее радиуса. Кроме того, как всем известно, Луна обращена к Земле одной стороной (т.е. вращается с той же угловой скоростью, с которой обращается вокруг Земли), однако объяснение этого факта тоже остается как бы за рамками теории Великого столкновения.

На самом деле оба эти отличия результатов расчетов от реальности вполне оправданы. В любой теории образования Луны необходимо

получить два гравитационно связанных тела с массами, близкими современным массам Земли ($5.97 \cdot 10^{24}$ кг) и Луны ($7.3 \cdot 10^{22}$ кг), причем так, чтобы их общий угловой момент был в точности равен суммарному угловому моменту системы Земля-Луна $3.4 \cdot 10^{34}$ Дж·с. Именно эти три величины сохраняются при дальнейшей эволюции. После образования системы Земля-Луна массы могли возрасти лишь в третьем-четвертом знаках за счет столкновений с крупнейшими астероидами. Но оба угловых момента (а следовательно, и суммарный) при столкновениях астероидов с Землей и Луной изменяются так же слабо, и кроме того, каждый раз — равновероятно в произвольную сторону. Иных физических причин изменения суммарного момента не существует — ни Солнце, ни другие планеты не могут воздействовать на его величину.

Сегодня суммарный угловой момент системы Земля-Луна складывается из двух векторов, угол между которыми 23.5° : момента вращения Земли $0.546 \cdot 10^{34}$ Дж·с и орбитального движения Луны, равного $2.85 \cdot 10^{34}$ Дж·с. Вклад медленного вращения Луны в суммарный момент ничтожен. Вектор земного момента прецессирует вокруг суммарного с периодом 26 тыс. лет, но по величине он с высокой точностью постоянен. Однако малый обмен угловым моментом между Землей и Луной тем не менее



Зависимости от времени, обусловленные обменом угловым моментом между Землей и Луной: 1 — расстояние до Луны a (в земных радиусах), 2 — продолжительность суток (в сутках), 3 — длительность лунного месяца (в современных сутках). Расчеты проведены в предположении постоянства диссипативных характеристик земной поверхности и океана, при этом высота прилива пропорциональна a^{-3} .



Продолжение численного моделирования (иллюстрации и статья Камерона).

Кадр 10 соответствует моменту времени $t=458$ млн с начала расчетов. Начинаясь вторичное столкновение.

На 11-м и 12-м кадрах, соответствующих моментам $t=497$ млн и $t=535$ млн с начала расчетов, видно, как железные ядра окончательно сливаются в ядро Земли. Вращение железной «гантели» происходит со значительным переносом углового момента от центральных областей и каменным осколком, движущимся по орбитам вокруг формирующейся Земли. При этом незначительная часть осколков ускоряется настолько, что становится гравитационно не связанной с Землей и выходит на орбиты вокруг Солнца. С ними уносится примерно 1% полного углового момента системы Земля—Луна.

существует. Он вызван инерцией земных приливов и диссипацией ими энергии. Приливы тормозят вращение Земли и увеличивают среднее расстояние до Луны, а вместе с ним и ее орбитальный момент. Полная энергия системы Земля—Луна из-за приливов не сохраняется с той же строгостью, как суммарный угловой момент.

Среднюю скорость обмена угловым моментом экспериментально определить не просто. По сути мы можем только оценить ее как 10^{24} Дж·с/год (лунный угловой момент увеличивается, а земной уменьшается). Характерное время изменения земных суток, соответствующее такому обмену угловым моментом, равно $5 \cdot 10^9$ лет (это число есть отношение периода вращения Земли к скорости его изменения) — заметьте, оно того же порядка величины, что и возраст Солнечной системы. Удаление Луны, связанное с обменом угловым моментом, происходит со скоростью около 1 см/год.

Сложность определения величины обмена угловыми моментами состоит в том, что угловая скорость вращения Земли, измеряемая сегодня с очень высокой точностью, действительно в среднем замедляется, но это происходит, во-первых, очень медленно (за год угол отставания составляет в среднем всего лишь $0.05''$), во-вторых, на фоне значительных сезонных колебаний, вызванных вариациями снегового покрова Северного полушария, и в-третьих, отнюдь не регулярно (временами Земля ускоряет вращение вследствие уплотнения масс в недрах и уменьшения своего момента инерции). Поэтому вековое замедление вращения Земли с наибольшей достоверностью устанавливается не по высокоточным, но пока недолгим измерениям скорости вращения, а по историческим данным солнечных затмений древности¹. В перспективе ве-

¹ Б я л к о А. В. Наша планета — Земля. М., 1989.

Продолжения численного моделирования (иллюстрации к статье Камерона).

Кадр 13 соответствует моменту времени $t=632$ млн с начала расчетов. Почти все железные точки уже слились в ядро Земли.

На 14-м кадре, соответствующем моменту $t=839$ млн, часть каменных осколков образует два заметных слившихся роя, но достаточно много меньших обломков все еще находится на околоземных орбитах.

На 15-м кадре к моменту $t=1142$ млн с начала расчетов остается только один большой рой каменных частиц — это небесное тело — наш будущий спутник Луна.

личину обмена угловым моментом можно будет получить, обрабатывая многолетние ряды лазерных измерений расстояния до Луны.

В прошлом, когда Луна была ближе к Земле, приливные горбы были выше, следовательно, и обмен угловым моментом более интенсивным. Из-за отсутствия полных данных об истории земной атмосферы и океана, а также о прошлом распределении масс в недрах планеты моделирование замедления земного вращения и удаления Луны не удастся провести настолько уверенно, чтобы достоверно «сшить» результаты расчетов Камерона с современным положением Луны. Но принципиальных затруднений на этом пути нет.

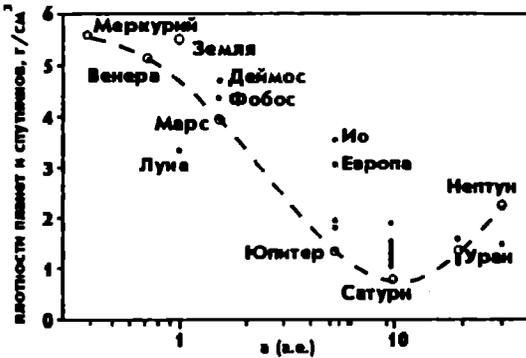
Естественно объясняется и отсутствие относительного вращения Луны. Ее остановка произошла, по-видимому, на достаточно ранней стадии, вскоре после Великого столкновения и объединения масс, вышедших на орбиты вокруг Земли. Аналогично торможению вращения Земли от приливов, вызванных лунным тяготением, полная остановка вращения Луны относительно Земли произошла под действием приливов ее еще не остывшей массы.

ПЛОТНОСТИ И ПОВЕРХНОСТИ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Обратимся теперь к противоречиям в высказанных точках зрения. Камерон пишет, что Луна — небесное тело, уникальное по малому содержанию железа. Напротив, А.А.Маракушев подчеркивает подобие масс и размеров Луны и Ио, ближайшего спутника Юпитера.

Прежде чем обратиться к сравнению Луны и Ио, выскажу еще более сильное утверждение: не только Луна, но сама Земля представляет собой планетное тело с существенной аномалией плотности. Это хорошо видно из графика зави-





Средние плотности планет Солнечной системы и их крупнейших спутников в зависимости от их расстояния a от Солнца. Не приведена плотность Плутона, она известна недостаточно точно. Штриховая кривая — это интерполяция средней плотности планет Солнечной системы за исключением Земли. Эта зависимость оказывается весьма регулярной, монотонно убывающей до Сатурна, а затем возрастающей. Плотность нашей планеты на 17% выше, чем у точки на регулярной кривой: если исходить из интерполяции, на этом расстоянии от Солнца средняя плотность должна быть равна 4.70 г/см^3 . Плотности большинства крупных спутников заметно выше, чем плотности их планет, однако Луна представляет собой заметную аномалию.

симости средних плотностей планет и их спутников от расстояния до Солнца. Обратите также внимание, что плотности всех спутников планет от Марса до Сатурна включительно заметно выше, чем плотности их планет. Всех, кроме Луны. Ее плотность не только ниже плотности Земли, но на 30% ниже плотности условной «Земли» — точки на регулярной кривой.

Но именно такое перераспределение масс и дает теория Великого столкновения. Две протопланеты на близких орбитах, сформировавшиеся таким же образом, как и остальные, имели средние плотности в диапазоне от 4.5 до 4.9 г/см^3 . При их столкновении происходит слияние железных ядер и потеря части каменной оболочки, но главное, проходит интенсивная гравитационная дифференциация: из рыхлых железокосменных ядер протопланет образуется расплавленное, более плотное железное ядро Земли. По плотности (5.52 г/см^3) оно превосходит более близкую к Солнцу Венеру.

Конечно, для того чтобы выводы из сравнения плотностей были убедительными, нужно не только провести интерполяцию, но и пояснить, чем вызвана регулярность зависимости плотности планет от расстояния. А также хотя бы качественно разобрать, почему спутники планет должны быть плотнее своих хозяев.

Достаточно легко понять регулярность убывания плотности, наблюдаемую у планет от Меркурия до Сатурна включительно. Труднее объяснить, почему далее, от Сатурна к Нептуну (и по-видимому, далее к Плутону, данные для кото-

рого недостаточно надежны), плотность начинает возрастать.

Плотность небесных тел определяется их химическим (элементным) составом и размерами. При этом от размеров планет плотность зависит довольно слабо, потому что с ростом размера одновременно растет и среднее давление в недрах (с его ростом плотность возрастает), и средняя температура недр (с ее ростом плотность убывает). Что же касается химического состава, то он, конечно, и должен регулярно изменяться при удалении от Солнца. Причин этих изменений как минимум две:

а) равновесная радиационная температура поверхностей тел зависит от среднего расстояния a от Солнца, как $a^{-1/2}$;

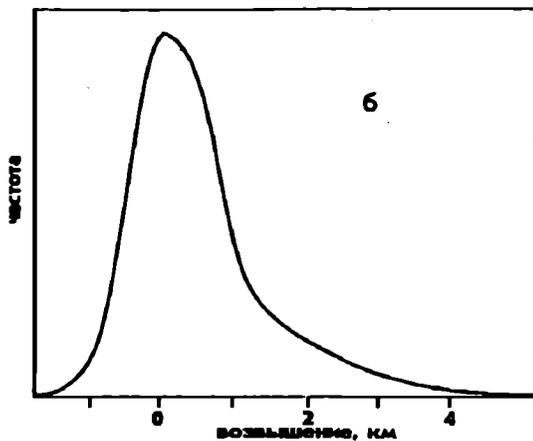
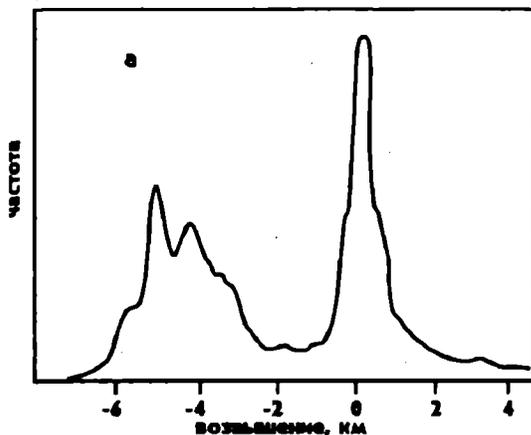
б) средняя кинетическая энергия единичной массы, а следовательно, и энергия взаимных столкновений с планетами падают, как a^{-1} . Это, впрочем, не относится к окрестностям планет-гигантов, которые сами, своей большой массой определяют энергии подлетающих к ним тел.

Можно сказать, что все планеты, их спутники, астероиды и кометы сделаны из одного — солнечного — вещества, а разница химического состава определяется относительной дегазацией материала как под действием постоянного разогрева солнечными лучами, так и в результате редких взаимных столкновений.

Что касается Ио, то не видно никаких ее аномалий по сравнению с другими спутниками Юпитера. Плотность Ио относительно высока потому, что любое небесное тело, комета или астероид, разогнанный Юпитером, при столкновении с Ио имеет минимальную скорость 25 км/с. При столкновении с такой скоростью выделяющаяся энергия достаточна для того, чтобы легкие молекулы аммиака и воды, как принадлежащие кометам, так и еще остающиеся у поверхности Ио, приобрели скорости, превышающие вторую космическую скорость Ио (2.5 км/с), и покинули ее. Естественно, при этом происходит преимущественное испарение в космос легких летучих компонент, поэтому плотность Ио стала значительно выше средней плотности Юпитера.

Энергия столкновений небесных тел со спутниками планет-гигантов убывает с увеличением радиуса орбит этих спутников, поэтому их плотности и падают с ростом расстояния. Этот эффект действителен только для близких спутников планет-гигантов, при увеличении среднего расстояния скорость пролетающих комет убывает и становится наконец настолько малой, что баланс вещества на поверхности начинает определяться уже не редкими столкновениями, а температурой поверхности, разогреваемой солнечным излучением.

Постоянная бомбардировка кометами Ио не оставляет кратеров на ее поверхности (посмо-



Распределение относительных высот поверхности Земли (а) и Венеры (б). Земные высоты отсчитаны от уровня океана, венерианские — от среднего уровня поверхности Венеры. Гауссов вид распределения высот Венеры говорит о том, что ее поверхность сформировалась в результате большого числа случайных событий с однородной дисперсией. Напротив, двугорбый характер распределения земной поверхности есть свидетельство необычности геологической истории. Два максимума земного распределения высот отвечают суше и океанскому дну. Поскольку суша и океан распределены по поверхности весьма неравномерно (и мы знаем, что в прошлом эта неравномерность была еще значительней), то следует серьезно рассмотреть гипотезу, объясняющую такую асимметрию начальным распределением пород после Великого столкновения: базальтовой расплава на дне суперратера и гравитный отвал на противоположной стороне планеты.

трите на фотографию Ио, полученную «Вояджером-1»). Это, по-видимому, происходит потому, что под ее тонкой затвердевшей корой находится расплав, разогреваемый падающими телами.

Покрытая кратерами поверхность Луны также может стать источником информации, подтверждающим или опровергающим гипотезу Великого столкновения. Обратите внимание на последние абзацы статьи Камерона: в них содержится программа дальнейших исследований. Первоначальные орбиты всех осколков, пересекают орбиту Земли (и Луны), поэтому вероятность дальнейших столкновений с ними оказывается довольно велика. Если будет известно распределение по массам малых осколков столкновения, вышедших на орбиту вокруг Солнца, с ним можно будет сравнить распределение лунных кратеров по диаметрам. Аномалия распределения лунных кратеров отмечена уже давно², число кратеров с диаметрами от 30 до 300 км несколько избыточно по сравнению со степенной аппроксимацией. С этим обстоятельством, возможно, связан избыток околоземных астероидов, отмеченный в статье С.Шилова.

ЕЩЕ ОБ УНИКАЛЬНОСТИ ЗЕМЛИ

Вернемся к Земле. Еще одно существенное отличие Земли и Венеры можно получить, сравнивая статистики высот их твердых поверхностей.

² Carr M. H., Saunders R. S., Strom R. G., Wilhelms D. E. // The Geology of Terrestrial Planets. NASA, Washington, 1984.

Удаленность каждой точки поверхности планеты от ее центра имеет регулярную составляющую, связанную с вращением (имеется в виду сплюснутость планет у полюсов). Естественно, фигуры Земли и Венеры различаются вследствие разной скорости вращения. Однако если вычестить эти регулярные составляющие, то для оставшихся относительных высот поверхности можно получить их распределение, т.е. вероятность высоты в каждом диапазоне. Сравнение этих распределений информативно для геологической истории планет. Наиболее естественным (определяемым случайными причинами) является распределение высот гауссового вида — именно таково, например, распределение высот волн на море. Близко к гауссовому и распределение высот поверхности Венеры³. Но для Земли оно принципиально иное, двугорбое: один горб отвечает суше, другой — дну океана. Суша, с высотой 0.3 км над уровнем океана, и абиссали океанского дна с глубиной 5 км — две наиболее распространенные равнины на Земле.

Но ее уникальность не исчерпывается только аномально высокой средней плотностью и двугорбым распределением высот. Уникален земной океан. Резкой границы раздела жидкость—атмосфера нет ни на одной из планет. На Меркурии атмосфера вообще практически отсутствует, нет жидкости на поверхности Венеры и Марса. На планетах-гигантах газовая атмосфера непрерывно переходит в жидкость с плотностью

³ Nikolaeva O.V., Klose K.B. 23-d Lunar Planet Sci. Conf. Abstracts, 1992. P.993.



Фотография поверхности Ио, полученная «Вояджером-1». Вблизи лимба происходит вулканическое извержение. Тем не менее на поверхности не заметно вулканических конусов, так как на ней нет ни одного кратера. Отдаленные каменные образования прорезают равнину, покрытую, как было определено, застывшей серой. Не исключено, что под тонкой твердой корой находится расплавленная сера. Давление расплава может пошатываться вследствие сматывания охлаждающейся поверхности. При столкновении Ио с кометами расплава извергается через образовавшиеся отверстия в коре, а затем эти кратеры-жары бесследно заполняются расплавом и засыпаются пылью последующих извержений. Постоянная бомбардировка кометами поддерживает высокую геологическую активность Ио.

и температурой выше критической. Только на Титане, самом большом из спутников Сатурна, возможно, есть метановый океан.

Готов согласиться, что наличие океана можно объяснить чисто температурным фактором, обусловленным нашей «удачной» удаленностью от Солнца: у остальных планет температура или слишком высока для конденсации паров или слишком низка для жидкой воды. С некоторой долей условности можно считать, что океан есть на Европе, спутнике Юпитера, только вся его поверхность покрыта льдом. Допустим, дело в температуре. Но объясните в таком случае, почему в атмосфере Венеры так мало водяных паров? Их по массе менее 0.1%, что весьма удивительно, ведь на Земле масса океана в 266 раз больше массы атмосферы. Ускорение на поверхности Венеры почти такое же, как на Земле, и даже учитывая близость Венеры к Солнцу, нетрудно оценить, что она вполне могла бы удерживать в атмосфере в сотни раз больше воды, чем там обнаружено. Ответ, по-видимому, состоит в том, что большая часть венерианской воды кристаллически связана в ее горных породах — они не проходили ту стадию прогресса, которую претерпела Земля при Великом столкновении, как уже отмечалось, они несколько менее плотные, и очень вероятно, что именно за счет кристаллической воды (плотность всех кристаллов со связанной водой ниже, чем у обезвоженных).

Если заглянуть под осадочный слой, то окажется, что дно океана базальтовое, а суша лежит на гранитных подушках, т.е. принципиально различна геология этих двух образований. Кроме того, распределение суши и океана по земной поверхности оказывается весьма неравномерным. Даже на современном глобусе можно выделить океаническое и континентальное полушария, а все восстановления прошлой географии (до отделения Африки от Южной Америки) показывают еще большую неравномерность распределения суши и океана.

Как бы ни разогрелась Земля после Великого столкновения, точка первого соприкосно-

вения неизбежно вносит существенный элемент асимметрии во всю ее дальнейшую эволюцию. Поэтому логична следующая гипотеза: не только необычно высокая средняя плотность Земли, но и ее высокая гравитационная дифференциация (наличие океана, в частности), но и ее асимметрия, деление на океаническое и континентальное полушария, двугорбое распределение высот — все это прямые следствия Великого столкновения. Впрочем, есть и еще аргумент в его пользу.

ПАРАДОКС "МАЛОГО СОЛНЦА"

Уже около 20 лет климатологи и специалисты по физике Солнца обсуждают странное несоответствие между теорией эволюции звезд и палеоклиматом Земли⁴. Согласно теории звездного горения, подтверждаемой статистикой известных звезд, 4 млрд. лет назад радиус Солнца должен был быть примерно на 8% меньше современного, а температура его поверхности на 3-4% меньше. Возрастание светимости звезд солнечного типа есть неизбежное следствие изменения их средней атомной массы вследствие ядерных реакций, превращающих водород в гелий. Из этого следует, что светимость Солнца в то время была на треть меньше сегодняшней.

Эта в общем-то небольшая (за 4 млрд. лет) вариация светимости сильно сказывается на расчетах палеоклимата Земли. Дело в том, что радиационная температура Земли, вычисляемая по равновесию падающего на планету потока солнечного излучения и инфракрасного излучения самой планеты, оказывается при этом существенно отрицательной (в шкале Цельсия), из чего следует, что 4 млрд. лет назад наш океан на всех широтах должен был быть покрыт льдом, а большая часть суши — снеговым покровом. Вследствие высокого альбедо (среднего коэффициента отражения) снега и льда растопить этот изначальный белый покров планеты при возрастании солнечной светимости на 30% окажется уже невозможно. Однако по геологическим данным можно с уверенностью утверждать, что Земля никогда не была обледенелой целиком. Это и есть парадокс «малого Солнца».

Предлагалось несколько путей его разрешения⁵, но, насколько мне известно, все они сводились к разным способам усиления так называемого парникового эффекта — увеличением концентрации CO₂ в атмосфере или ее облач-

⁴ Sagan C., Mullen G. // Science. 1972. V.177, P.52; Newman M. J., Rood R. T., // Science. 1977. V.198, P.1035.

⁵ Owen T., Cess R. D., Ramanathan V. // Nature. 1979. V.277, P.640; Schneider S. H., Londer R. // The coevolution of Climate and Life. Sierra Club Books, San Francisco. 1984.

ности добиться уменьшения теплотерь планеты в прошлом.

Заметим теперь, что теория Великого столкновения совершенно естественно и полностью разрешает парадокс «малого Солнца». Как минимум через 1 млрд. лет после образования Земли современной массы и плотности тепловой поток из ее расплавленных недр, выносимый конвекцией расплавленной магмы и теплопроводностью тонкой коры, будет более чем достаточен для поддержания положительных температур на всей ее поверхности. Сегодня тепловой поток недр примерно в 400 раз меньше солнечного, поэтому его климатические следствия пренебрежимы. Но нужно, чтобы тепловой поток из недр был всего лишь на порядок больше современного, — этого достаточно для повышения равновесной средней температуры поверхности Земли на 10° — Мировой океан по крайней мере в тропиках уже не обледенеет. Конечно, для большей уверенности требуются подробные модельные расчеты теплового баланса планеты в прошлом. Не исключено, что они приведут к утверждению, что средняя температура земной поверхности проходила через минимум.

МОМЕНТ СТОЛКНОВЕНИЯ И ЕГО ВЕРОЯТНОСТЬ

Когда могло произойти Великое столкновение? Время существования системы Земля-Луна равно 4.0 ± 0.2 млрд. лет. Правильнее сказать, эта величина представляет собой минимальное время ее существования. Оно получено радиоизотопной датировкой образцов древнейших горных пород на поверхности Земли и Луны. Возрастом образца считается время, прошедшее с момента кристаллизации его минералов. Пределы ошибок показывают точность датировки образцов, но отнюдь не точность, с которой нам известно время существования системы. Поскольку остается заметный шанс найти еще более древние образцы пород, реальное время существования может оказаться несколько большим. Насколько большим — судить достаточно трудно, но решение этого вопроса принципиально возможно. Для этого следует проанализировать распределение датировок земных пород и убедиться, что левый (ранний) конец распределения убывает достаточно быстро, так что существует его конечный предел, заметно отличающийся от возраста Солнечной системы. Трудность однозначного нахождения этого предела, неопределенность всей процедуры проистекают из того, что статистические ошибки относительно велики как раз при малых числах, соответствующих самым древним породам.

Это время существования надо сравнивать с возрастом Солнечной системы 4.55 ± 0.05 млрд. лет. Возраст Солнечной системы определен не

по возрасту пород, а по возрасту самих изотопов, отсчитанному от момента нуклеосинтеза (взрыва сверхновой). Эти данные, найденные по разным группам изотопов для земных и лунных пород, а также для вещества различных метеоритов, в отличие от возраста последнего плавления пород, ложатся достаточно кучно. Разрыв между этими двумя возрастными невелик. Он лежит в пределах 3-4 статистических ошибок измерений, но, кроме того, минимальное время будет увеличиваться при расширении представительности данных. Поэтому по геохронологии можно с почти равной вероятностью принять одно из альтернативных утверждений: поверхности Земли и Луны сформировались (застыли) а) одновременно с другими телами Солнечной системы или б) через несколько сот миллионов лет после образования Солнечной системы.

И все же дальнейшее уточнение этих двух возрастов продуктивно: оно позволит отдать предпочтение одному из утверждений. Более того, допустим, нам стала бы известна датировка кристаллизации древнейших пород Марса или одного из астероидов, и она оказалась бы заметно ближе к отметке 4.5 млрд. лет, чем возраст Земли и Луны. Очевидно, это повысило бы вероятность второго утверждения, но само по себе не сделало бы его достоверным: слишком уж близки эти датировки.

Одним из сильных, на первый взгляд, возражений против гипотезы Большого столкновения является мысленная оценка его вероятности. Если формально рассмотреть распределение по массам существующих небесных тел Солнечной системы, то как бы мы ни экстраполировали это распределение в прошлое, вероятность существования на пересекающихся орбитах тел с массами Венеры и Марса окажется исключительно малой. Но можно ли отсюда сделать вывод, что такого столкновения принципиально не могло быть? — Нет, это было бы нарушением логики. Представим себе, что у нас есть информация обо всех планетных системах Галактики. Вполне возможно, что аналог системы Земля-Луна будет найден среди них лишь в нескольких исключительных случаях. Что ж, это будет свидетельствовать только о малой вероятности существования аналога планеты Земля, а возможно, и о малой вероятности жизни и разума во Вселенной. Но мы-то суть!

Перечислим преимущества гипотезы Великого столкновения перед остальными концепциями образования Луны. При этом, конечно, мы отдаем отчет, что часть перечисленных аргументов пока может служить лишь как постановка задач, высказанные утверждения требуют более детальных доказательств. Итак:

а) Эта гипотеза единственная из всех поддается численным расчетам, приводящим к близким отношениям масс и правильной величине полного углового момента системы Земля—Луна. Этот факт практически гарантирует то, что в результате дальнейшей эволюции система приходит к современным параметрам.

б) В результате столкновения двух тел промежуточной плотности, соответствующих интерполяции по остальным планетам Солнечной системы, образуется Земля с большим железным ядром и каменная, менее плотная Луна.

в) Гравитационная дифференциация Земли, ускоренная вследствие высокой температуры

недр, выделяет воду и может, таким образом, объяснить появление Мирового океана, отсутствующего на близкой по массе Венере.

г) Получают естественное объяснение высокая асимметрия Земли и двугорбый характер распределения высот ее поверхности.

д) Высокой температурой недр Земли качественно объясняется парадокс «малого Солнца» — расхождение теории звездной эволюции и палеоклимата Земли.

е) Малая вероятность начальных данных, приводящих к Великому столкновению, может дать новое объяснение большой удаленности очагов разумной жизни во Вселенной.

НОВОСТИ НАУКИ

Астрономия

«Веснушки» на Сатурне

Обычно поверхность Сатурна предстает глазам земного наблюдателя как лишенное каких-либо отличительных черт пространство, однако раз в 30 лет над его экватором с северной стороны появляется гигантское белое пятно. Просуществовав всего несколько месяцев, оно постепенно рассасывается, чтобы опять возникнуть примерно через треть столетия.

Астроном А. Санчес-Лавега (A. Sanchez-Lavega; Университет Паис Васко, Бильбао, Испания), проанализировав четыре таких периодических события, сделал заблаговременный прогноз, согласно которому в следующий раз пятно должно было появиться во второй половине 1990 г. Ему удалось убедить иностранных коллег, и к тому времени в сторону Сатурна были обращены, помимо испанского, еще один телескоп в Японии и три во Франции. Сделано это было не напрасно: за 48 бессонных ночей в сентябре — ноябре ученые накопили ценнейший ряд наблюдательных данных в широком диапазоне излучения — от

видимого до близкой инфракрасной части спектра; после тщательнейшей их обработки появилась возможность прояснить, чем вызвано появление пятна.

Очевидно, во всем повинно Солнце: ведь относительно теплый летний сезон на Сатурне наступает как раз каждые 29,46 земного года, когда Сатурн проходит около своего перигелия. Из-за довольно большого эксцентриситета (0,055) отношение освещенных Солнцем областей Сатурна, расположенных в ближайшей к Солнцу и наиболее удаленной от него точках орбиты, превышает 1,2. Однако образование пятна происходит со значительным сдвигом: в Северное полушарие поток тепла доходит лишь через 15 лет после того, как Сатурн пройдет свой перигелий. Тогда окутывающая планету оболочка из аммиачного льда местами разрывается и на видимую поверхность всплывает густок теплых газов. Он поднимается сквозь нижние слои атмосферы вверх и расширяется до гигантских размеров. Охлаждаясь, свежие кристаллы аммиака образуют ярко-белое пятно, хорошо различимое с Земли на фоне старого аммиачного льда, сильно загрязненного различными

Любопытно, что пятно сохраняет свою яркость в синей и фиолетовой частях спектра несмотря на то, что старые аммиачные облака в туманной атмосфере Сатурна способны активно поглощать излучение в этих диапазонах. Специалисты полагают, что чрезвычайно резкий перепад температур между верхними и нижними слоями атмосферы приводит к возникновению мощнейшей бури, в результате которой пятно оказывается поверх старых облаков.

К. Барнет (C. Barnett; Центр космических полетов им. Годдарда, Гринбелт, США) полагает, что аналогичные «веснушки» должны появляться и в районе 30-й южной параллели Сатурна: согласно математической модели этого процесса, здесь перепад температуры должен быть еще круче, чем в «классической» области возникновения пятен. Только кольца Сатурна скрывают это от нас. Для подтверждения или отрицания такой точки зрения соответствующее задание было передано на Космический телескоп им. Хаббла, а окончательные выводы можно ожидать после свидания с Сатурном какого-либо из автоматических посланцев Земли.

Science News. 1991. V. 140. N 14. P. 212 (США).

Майя: новые археологические открытия в истории древнейшей цивилизации

Е. Г. Дзвлет

Институт археологии РАН
Москва

150 ЛЕТ НАЗАД американский путешественник и писатель Дж. Л. Стефенс впервые увидел в джунглях Мексики великий город майя — Паленке. Через просветы между деревьями перед Стефенсом и его спутниками предстал фасад большого здания, богато украшенного изящной и замысловатой резьбой; ветки близко растущих деревьев проникали в дверные проемы, создавая впечатление экзотической и мрачной красоты. Романтические истории об испытаниях и сложностях, с которыми столкнулись путешественники, воплотились в двух бестселлерах, которые, вместе с зарисовками построек майя, выполненными Ф. Катервудом, открыли для широкой читающей публики Америки и Европы цивилизацию древних майя.

В истории майя — одной из наиболее ярких и высоко развитых цивилизаций Нового Света — и по сей день продолжает оставаться немало таинственного, несмотря на многолетние археологические исследования¹.

Как известно, индейские племена майя обитали на юге п-ова Юкатан, в богатых различными природными дарами горных областях. Примерно 3200 лет назад первые поселения майя стали осваивать и лежащие окрест равнинные зо-

ны. На юге — на территории центральной и северной Гватемалы и примыкающих районов Мексики, Белиза и Гондураса — под сенью влажных тропических лесов сохранились руины таких гигантских поселений, как Тикаль, Копан, Паленке. В древности эти места были центром страны майя. Напомним, что окончательный облик классической цивилизации майя оформился к 300 г. н. э., когда ею уже были достигнуты огромные успехи в архитектуре, ремесленной специализации, письменности, математике, астрономии, искусстве. В этих южных равнинных районах классическое общество майя процветало примерно до 900 г. н. э., но позднее в результате взаимодействия различных факторов множество расположенных здесь знаменитых центров пришли в упадок. Несколько дольше просуществовали поселения майя на севере п-ва Юкатан, где в холмистом районе Пуук классический период в развитии таких городов, как Ушмаль, Сайиль, Кабах, Лабна и Ошкенток, продолжался по крайней мере до 1000 г. н. э. Здесь расцвет цивилизации майя заканчивается около 1200 г. н. э. с гибелью Чичен-Ицы. Постклассический период в истории майя отмечен подъемом города Майяпан и его политического статуса между 1250 и 1450 гг. н. э.

Хотя некоторые поселения равнинных майя и были описаны испанскими конкистадорами, миссионерами и хронистами, все же до второй половины XIX в., до появления книг Стефенса и некоторых других авторов, эта цивилизация оставалась практически неизвестной.

Большинство ученых XIX в.

придерживались точки зрения, что корни американских цивилизаций следует искать в Старом Свете и что их создатели ведут свое происхождение из Египта, Индии или являются потомками одного из девяти колен Израилевых. Однако уже наблюдения Стефенса во время двух поездок в 1839—1840 и 1841—1842 гг. позволили ему уловить сходство между различными удаленными друг от друга памятниками на равнинах и высказать мнение, что на всей этой территории обитал единый народ. Стефенс проницательно разглядел в цивилизации майя местные корни — и этого мнения придерживаются все современные археологи. Однако Стефенс не приписывал значительной древности обнаруженным руинам, считая, что эти монументальные сооружения были воздвигнуты незадолго до конкисты.

Вплоть до последнего десятилетия XIX в. широко масштабных раскопок древностей майя не проводилось. Первые крупные работы на территории Гондураса в городе Копане осуществил Музей Пибоди Гарвардского университета. Многими специалистами раскопки Копана в 1891—1895 гг. рассматриваются как начало современного этапа исследований этой цивилизации Нового Света.

Копан в I тысячелетии н. э. был одним из процветающих городов-государств майя, но от его бывшего могущества до наших дней дошли лишь поросшие буйной растительностью живописные развалины. Благодаря грандиозным раскопкам были расшифрованы храмы, дворцы и резные стелы, составлен план города, сделаны подробные описания и великолепные фотографии. Американски-

© Дзвлет Е. Г. Майя: новые археологические открытия в истории древнейшей цивилизации.

¹ См., например: Гуляев В. И. Майя: закат великой цивилизации // Природа. 1987. № 6. С. 54—64; Он же. Древние майя. Загадки погибшей цивилизации. М., 1983.

ми и европейскими исследователями были предприняты попытки расшифровать иероглифические надписи майя, в том числе знаки, относящиеся к числам, календарю и богам (однако поистине блестящего успеха в прочтении оставленного майя письменного наследия добился наш соотечественник Ю. В. Кнорозов²). В итоге стали складываться подлинно научные представления об обществе майя и история археологического изучения этой цивилизации вышла за пределы первоначальной стадии.

Наиболее перспективной в археологическом отношении оказалась центральная часть Копана с остатками величественных пирамидообразных сооружений. Судя по надписям на стелах, центральная часть, «акрополь», сформировалась между 652 и 771 гг. н. э., а сам город существовал с 460 по 801 гг., хотя другие археологические материалы указывают, что он возник значительно раньше — еще во второй половине I тысячелетия до н. э.

Столетняя история изучения древнего Копана, о былом величии которого сегодня можно судить лишь по фрагментам, уцелевшим от разрушительного воздействия времени, отнюдь не исчерпала возможности новых открытий.

Сенсационные находки были сделаны в начале 1990-х годов совместной экспедицией Института антропологии и истории Гондураса и Иллинойского университета США под руководством Рикардо А. Фаскеле и Уильяма Л. Фаше³. Внутри неоднократно переобжитого культового сооружения археологам удалось обнаружить еще один храм, «захороненный» 1400 лет назад. Над этим храмом, названным археологами «Розалия», последовательно были воздвигнуты еще три здания. В целом такое наложение характерно для архи-



Территория обитания майя. С Копаном, одним из процветающих городов-государств майя I тысячелетия н. э., связаны последние археологические открытия.

тектуры майя: часто по окончании 52-летнего календарного цикла⁴ старые культовые со-

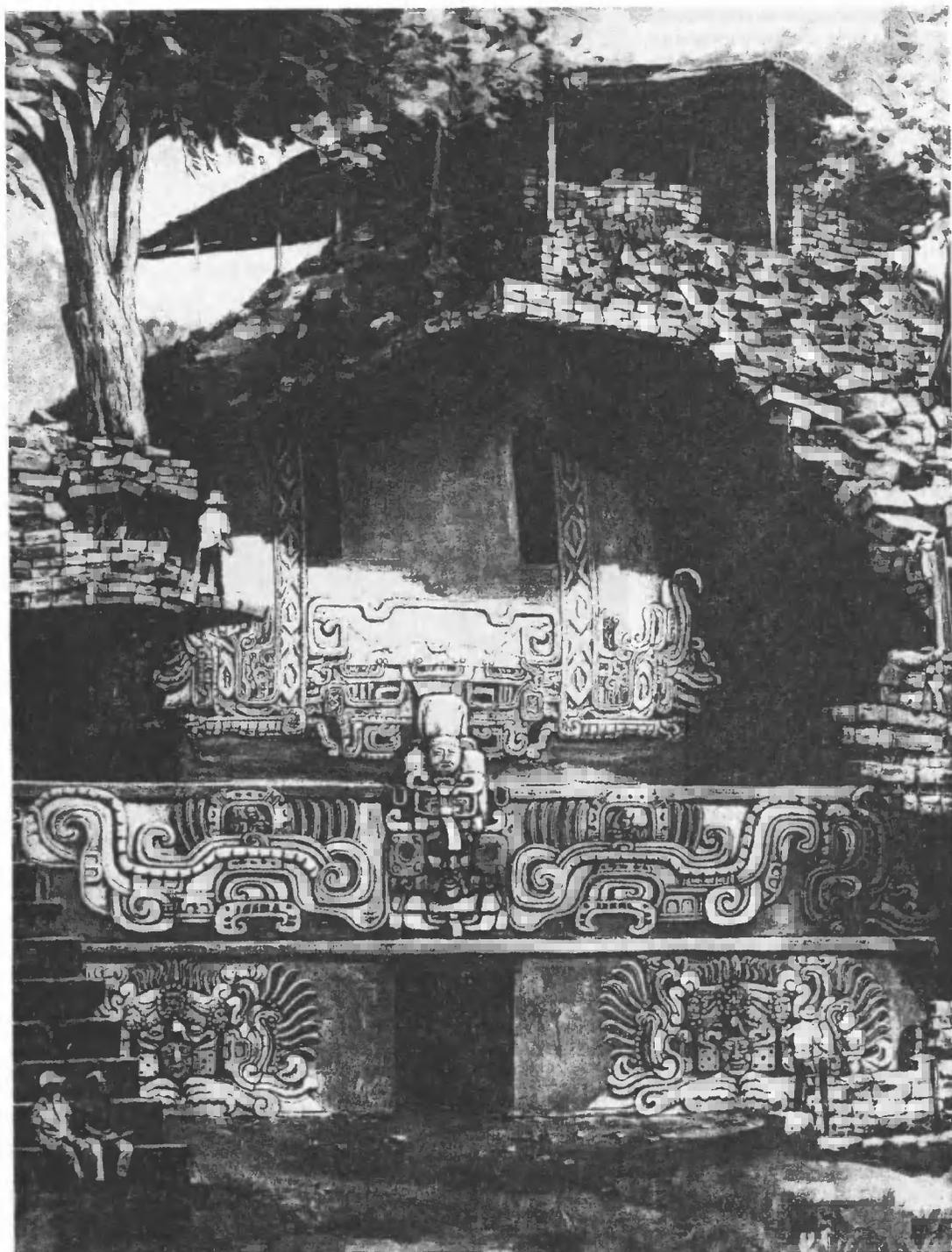
оружия подвергались ритуальному уничтожению, а на их месте воздвигались новые. 1400 лет назад, перед сооружением новой постройки, стены храма «Розалия» были покрыты слоем грубой штукатурки, благодаря чему резные украшения фасада уцелели и не расплылись.

Научная реконструкция всего внешнего облика храма «Розалия» была выполнена художником Национального географического общества США К. Клейном. Размеры храма составляли 18×12 м; дверной проем был расположен с западной стороны; второй этаж завершался характерным для архитектуры майя «гребнем», который впервые найден в Копане in situ. Обычно украшения фасада мастера майя вырезали из штука, на изготовление которого шел известняк, но позднее

² Кнорозов Ю. В. Письменность индейцев майя. М.—Л., 1963; Он же. Иероглифические рукописи майя. Л., 1975.

³ Fasquelle R. A., Fash W. L., Jr. Maya Artistry Unearthed // National Geographic. 1991. V. 180. N 3. P. 94—105.

⁴ Для календаря майя характерно сочетание циклов различной продолжительности. Период в 260 дней, так называемый «священный», представлял собой комбинацию 13-дневного цикла с 20-дневным. Из 18 месяцев по 20 дней складывался 360-дневный год. Календарный 52-летний цикл являл собой сочетание «священного периода» с 360-дневным годом; обозначения каждого дня на протяжении всего этого цикла не повторялись. Подробнее о календаре майя см.: Archaeoastronomy in Pre-Columbian America / Ed. Aveni A. Texas, 1975.



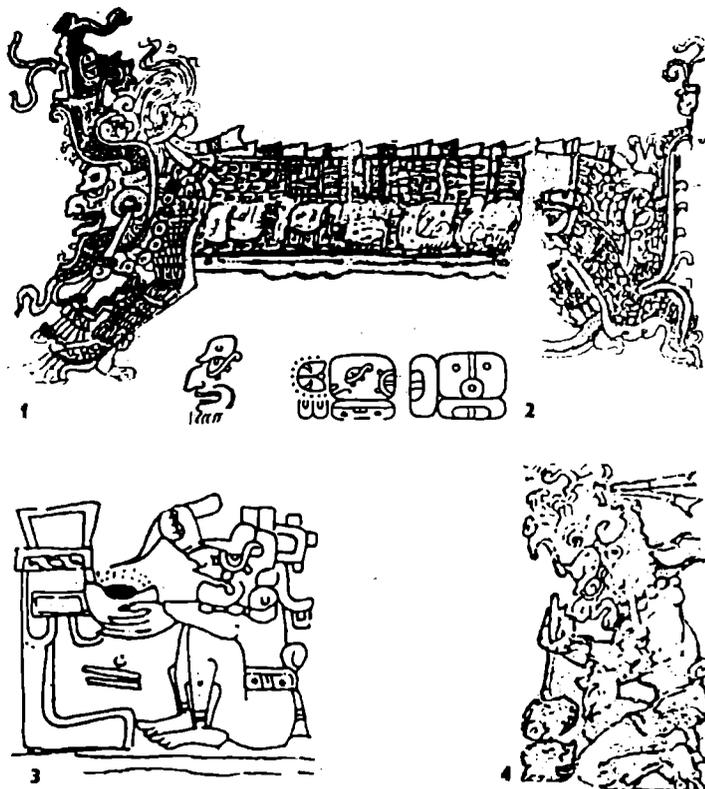
Реконструкция фасада храма «Розалия» [по К. Клейну // National Geographic. 1991. V. 160. N. 3. P. 99].
 Внизу справа и слева от дверного проема показан, по всей вероятности, старый бог Ицамна, один из наиболее почитаемых в пантеоне майя, появляющийся из клюва небесной птицы; над дверным проемом почти всю плоскость занимает изображение небесного ящера (каймана).

для строительных целей в Копане стал применяться андезит. Некоторые исследователи полагают, что дефицит строительного материала даже мог ускорить запустение этого крупного центра.

Украшения на фасадах общественных зданий, отражающие сложные космологические представления майя, почти всегда сильно стилизованы. В причудливом переплетении фигур и орнаментальных линий не всегда удается уловить замысел древних художников и соотнести эти изображения с богами и мифологическими персонажами, которые известны по письменным источникам (важнейшие из них — так называемые Дрезденская, Мадридская и Лейпцигская рукописи, получившие наименование по месту хранения).

Одним из главных богов в пантеоне майя был Ицамна, правивший в наиболее благоприятный календарный цикл. Часто Ицамна изображался в виде старца с горбатым носом, беззубым ртом и бородой. Нередко с образом Ицамны связаны представления майя о мироздании: Вселенная мыслилась в виде строения, стены которого образуются четырьмя монстрами-рептилиями и ориентированы по четырем сторонам света; поэтому Ицамна имел четыре ипостаси, каждая — определенного цвета. В этом случае Ицамна выступает в облике двухголового аллигатора, ящера или же змея. В одной из сохранившихся рукописей майя есть рисунок: небесный ящер (кайман) с лицом бога Ицамны в пасти. Вероятно, с Ицамной связано и название города Чичен-Ица, которое предлагалось переводить как «место колодца небесного ящера». Часто весь фасад храмов майя представлял собой стилизованное воплощение старого бога Ицамны, и лики, охраняющие вход в храм «Розалия» тоже, возможно, являются его изображениями.

Дверной проем храма «Розалия» вел в небольшое помещение, шириной около 2 м, где сохранились росписи ярко-красного цвета. Оно оказалось совершенно пустым, зато в следующем, отделенном от него стеной, был найден тайник — место ритуального жертвопри-



Прорисовка изображений Ицамны из Дрезденской и Мадридской иероглифических рукописей майя (по Ю. В. Кнорозову): 1 — небесный ящер (кайман) с головой бога неба в разинутой пасти; 2 — иероглиф майя, обозначающий Ицамну; 3 — Ицамна с кисточкой и сосудом с черной краской перед священной стелой; 4 — Ицамна, высверливающая палкой огонь.

ношения, по всей вероятности, связанный с перестройкой сооружения. В тайниках, которые создавались перед уничтожением старого и закладкой нового храма, обычно находят ракушки и всевозможные поделки из жадента. Но этот тайник оказался несравненно богаче: помимо трех кремневых ножей, птички из зеленого камня, раковин и акульих позвонков в нем хранились девять великолепных фигурок из кремня — необычайно крупных, отличающихся мастерской техникой обработки и изысканностью форм. Кремневые фигурки и

прежде находили в Копане, а также на других археологических памятниках майя. По мнению исследователей, они связаны с древними ритуалами: большинство таких фигурных кремневых изделий представляют собой профильные антропоморфные изображения, которые, возможно, прикреплялись к жезлам во время церемоний и символизировали таким образом сверхъестественную власть правителей. Интересно отметить, что часто они встречаются сериями по несколько штук. К примеру, в Пусульха — городе майя на юге Белиза — серийные кремневые поделки были найдены под стелами: как сами стелы, так и кремневые фигурки могли изображать древних правителей майя или же их жозетв.

Уникальность девяти профильных антропоморфных фигурок, найденных в храме «Розалия», состоит в том, что они наделены не только сложными головными уборами, но и индивидуальными чертами. Это едва



Одна из девяти профильных антропоморфных кремневых фигурок, возможно, изображающих властителей девяти подземных миров. Это мастерски выполненное кремневое изделие едва ли не самое крупное в мире. На фигурке сохранились остатки ткани, в которую ее тщательно обернули, прежде чем оставить в тайнике при ритуальном уничтожении храма «Розалия» и закладке новой культовой постройки.

ли не самые крупные в мире художественные поделки из кремня — камня весьма специфичного и трудного в обработке (не случайно у майя даже было божество, покровительствующее кремню).

Вполне возможно, что эти фигурки соотносятся с властителями девяти подземных миров⁵. По представлениям майя и других народов Центральной Америки, Вселенная состояла из 13 небес (которыми повелевала группа богов Ошлахун-Ти-Ку) и 9 подземных миров (владыки которых именовались Болон-Ти-Ку). Властители преисподней враждовали с богами небес. Разрушение мира из-за вражды небожителей и обитателей преисподней — сюжет, присутствующий в мифологии многих народов. С этими представлениями связан и циклический календарь майя, в котором каждому периоду покровительствовал определенный бог. С группой небесных богов Ошлахун-Ти-Ку могла соотноситься 13-дневная неделя, тогда как 9-дневная неделя, тоже существовавшая в календаре майя, возможно, соответствовала девяти богам ночи. Высказывалась точка зрения, что с девятью властителями ночи, девятью слоями преисподней могла быть связана и девятиступенчатая структура многих храмовых построек майя, по-видимому, посвященных заупокойной культуре.

Этими находками художественных поделок из кремня уникальные открытия в храме «Розалия» не исчерпываются. На самих фигурках обнаружены кусочки ткани — впервые найденной в Копане. Судя по сохранившимся остаткам, каждую из поделок тщательно упаковывали, прежде чем положить в тайник, где были найдены также органические остатки: фрагменты дерева, ткани из древесных волокон, семена.

Пополнили коллекцию художественных изделий майя и предметы, найденные с внешней стороны храма. Из разрозненных фрагментов удалось восстановить семь глиняных статуэток; по всей вероятности, шесть из них — пары. По мнению археологов, производивших работы в Копане, они могут изображать стражей правителя Яш Кук Мо, который основал в V в. н. э. великую династию Копана и которому приписывается сооружение пирамиды.

Плодотворное сотрудничество археологов со специалистами других научных направлений привело в последние годы к существенному пересмотру представлений о цивилизации майя и значительно обогатило знания о ней. Прорыв в расшифровке иероглифов открыл новые аспекты в жизни этого древнего общества. Оказалось, что письменность не была связана исключительно с астрономией и математикой: в сохранившихся и расшифрованных надписях отражена также история правителей различных центров майя и их взаимоотношения. Эти надписи раскрывают картину политических событий, развернувшихся на мексиканских равнинах, свидетельствуя, в частности, о том, что майя далеко не были мирным народом: их история наполнена военными конфликтами.

Изучение доклассического и постклассического периода истории майя подтвердило, что эта цивилизация развивалась не на пустом месте и исчезла не бесследно. Археологические изыскания показали, что города

с огромными храмами (в том числе и самыми высокими постройками на равнинах), интенсивное земледелие и сложный религиозный символизм — все это появилось на несколько веков раньше того времени, которое традиционно считается классическим периодом. Это заставляет пересмотреть некоторые давние дискуссионные проблемы, касающиеся причин расцвета цивилизации майя, включая вопросы о роли войны, торговли и роста населения.

Значительно большее внимание археологи стали уделять жизни рядовых общинников: скрупулезно исследуются не только монументальные общественные сооружения, но и остатки деревянных и тростниковых хижин простых земледельцев, благодаря чему складывается новое представление о структуре и функционировании древнего общества майя. Стало очевидным, что вокруг храмовых центров существовали обширные постоянные поселения земледельцев. Соотнесение сформировавшихся на основе археологических работ представлений о социальной и экономической организации общества майя с расшифровкой надписей на резных стелах и другими письменными источниками — очередная важная задача исследователей.

Уже прошедшая зенит своего могущества и величия, цивилизация майя была уничтожена европейской конкистой, начавшейся вслед за открытием Америки Колумбом. Но сегодня руины величественных построек майя разрушаются кислотными дождями и грабительскими раскопками — в то самое время, когда потомки майя еще продолжают существовать, а новые археологические раскопки и научное осмысление их результатов открывают очередные страницы истории подъема и упадка этой великой цивилизации Нового Света.

⁵ Подробнее см.: Кинжалов Р. В. Культура древних майя. Л., 1971.

Амударьинские тугаи: охрана и использование

А. И. Гладышев, Н. М. Новикова

Экологические изменения, происходящие в поймах и дельтах рек Средней Азии, вызвали угрозу исчезновения тугайных экосистем. Для решения этой проблемы ЮНЕСКО с 1992 г. осуществляет Международный проект «Экологические исследования и мониторинг в дельтах рек Амударьи и Сырдарьи для обоснования реабилитации экосистем». Проект финансируется Министерством исследований и технологий Федеративной Республики Германии. Цель проекта — создание единой модели функционирования экосистем дельт Амударьи и Сырдарьи в условиях Аральского экологического кризиса. Авторы статьи, участники этого международного проекта, рассказывая о своеобразии амударьинских тугаев, пытаются привлечь внимание к их судьбе и показать, что возможность их сохранения существует.



Алексей Иванович Гладышев, доктор биологических наук, заведующий лабораторией растительных ресурсов Института ботаники АН Туркменистана. Область научных интересов — исследование современных тугайных биоценозов, практическое ресурсосведение.



Нина Максимовна Новикова, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем РАН. Область научных интересов — современная динамика природных процессов в связи с новейшими трансформациями водного режима аридных территорий.

РАЗМЫШЛЯ о трагедии Арала и чрезвычайной экологической обстановке, сложившейся в южном Приаралье, с сожалением констатируешь, что зарегулирование стока рек Амударьи и Сырдарьи и вызванные этим последствия привели к деградации уникального природного комплекса — тугайной экосистемы. Именно в низовьях Амударьи находятся известные тугайные урочища Кызылпрабат, Турпаккала, Сарымай, Кулатау, Аккамыш, Чалыш, Шабас-Тугай, Бийбазар, Базар-Тугай, Назархан и др.

Под «тугаем» понимается древесно-кустарниковая и высокотравная растительность в поймах рек Средней Азии. В древесно-кустарниковых тугаях, подобно галерейным лесам обрамляющим русла рек тропических и экваториальных районов Америки и Африки, плотно стоящие деревья и кустарники перевиты лианами и практически непроходимы. Под пологом леса полумрак, поэтому травяной покров сильно разрежен. Зато на полянах тугайное крупнотравье поднимается на высоту 2—4 м.

Доминантами в тугаях являются реликты третичных лесов саванноидного типа. В плиоцене при установлении аридного климата на равнинах Средней Азии они нашли убежище в речных долинах и сохранились здесь до настоящего времени. В этих лесных сообществах господство принадлежит тополям: разнолистному (*Populus diversifolia*), арийскому (*P. ariana*) и сизолистному (*P. pruinosa*). Их спутниками стали некоторые виды ивы — джунгарская и Вильгельмса (*Salix songarica*, *S. wilhelmsiana*), лох туркменский (*Elaeagnus turcomanicum*), чингиль серебри-

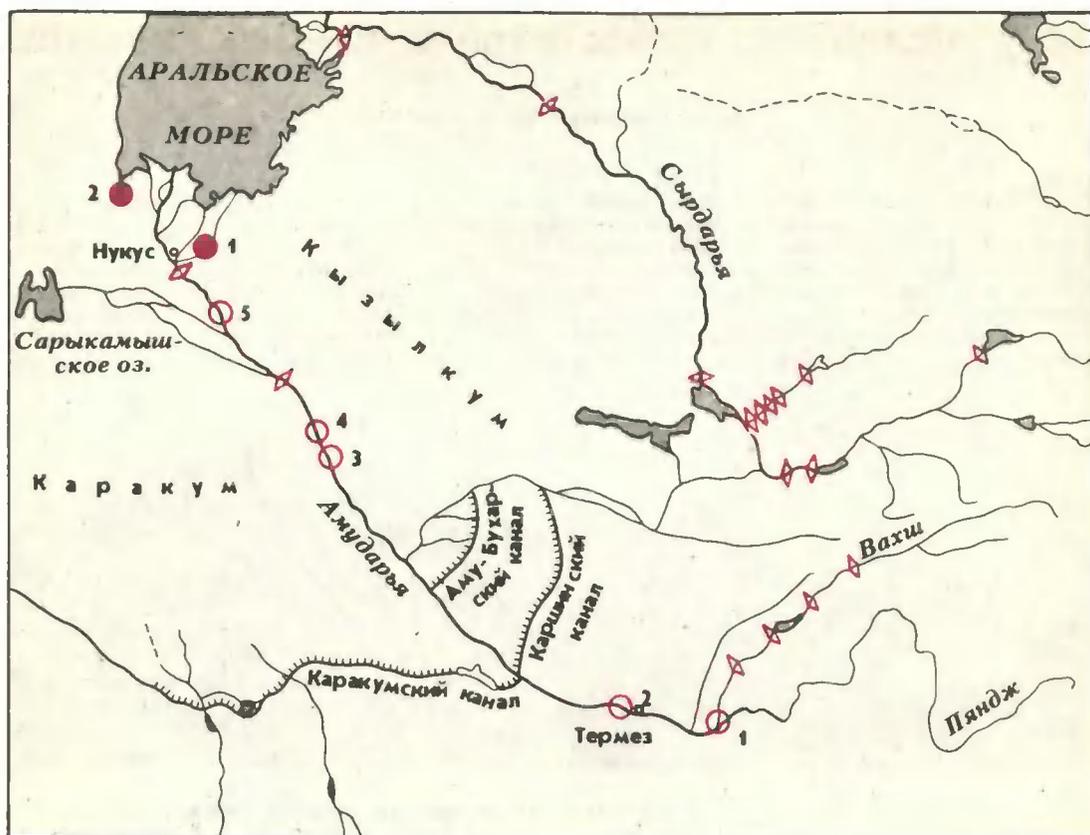


Схема расположения заповедных территорий в бассейне Амударьи.

- | | |
|------------------|--------------|
| ○ заповедные: | ● заказники |
| 1 Тигровая балка | 1 Нурумтубек |
| 2 Арал-Пайгамбар | 2 Дельтовый |
| 3 Амударьинский | ◇ гидроузлы |
| 4 Кызылкумский | |
| 5 Бадай-Тугай | |

стый (*Halimodendron halodendron*) и многие виды тамариксов (*Tamarix*). Травяные тугаи представлены гигантскими злаками — хорошо всем известным тростником обыкновенным (*Phragmites australis*) и тропическими видами — эриантусом равенским (*Eriantus ravennae*), сахарным тростником (*Saccharum spontaneum*) и императой цилиндрической (*Imperata cylindrica*). Пойменные сообщества гигантских трав в Средней Азии часто называют «джингили». Это трансформированное индийское «джунгли» образно передает нам

дикость и недоступность тугайных пойменных зарослей.

Тугайные сообщества состоят из высокоспециализированных видов, приспособившихся к совместному произрастанию в крайне контрастных условиях пойменных участков пустыни. Недаром о тополях говорят: «голова в огне, а ноги в воде». Но не только они, а и все тугайные растения хорошо переносят изнурительную летнюю жару — до 42—46 °С и зимние морозы, доходящие до —30 °С. Также контрастны и условия влагообеспеченности: длительное, в течение 2—3 мес., паводковое затопление сменяется сильным иссушением почв. Кроме того, к осени содержание солей в верхних почвенных горизонтах возрастает и может достигать 1,5—2 % — значений, при которых почвы уже попадают в разряд солончаковых. Важная особенность пойм пустынных рек — ежегодное отложение паводковыми водами нового аллювия, мощность которого на Амударье составляет 10—15 см в год, а иногда и до 1,5 м.

Поразительна приспособленность тугайных растений к столь своеобразным усло-



виям. Во время паводка они не страдают от недостатка кислорода, так как имеют специальные эфемерные корешки, благодаря которым кислород поглощается из верхних слоев почвы. В засушливый летний период тугайные виды, в отличие от типичных растений пустыни, не останавливаются в развитии, так как почти все они — фреатофиты, т. е. растения с корневой системой, способной черпать влагу из грунтовых вод с глубины 1,5—5 м. В этот период вода необходима растениям в основном для охлаждения, а не только для роста. Интенсивно испаряя влагу (одно дерево тополя за день расходует до 40 ведер воды), они тем самым снижают температуру на поверхности листьев и под их пологом на несколько градусов. Корневая система тугайных видов имеет многоярусное строение за счет образовавшихся придаточных корней и корневищ, помогающих им закрепляться и осваивать толщу вновь отложенного грунта.

Практически все тугайные растения способны к вегетативному размножению — образованию нового растения не из семян, а из частей веточек, стволов, корневищ или придаточных почек, расположенных на корнях. Это тоже помогает им осваивать вышедшие из-под воды прирусловые отмели, вновь

образованные острова. Унесенные в паводок вниз по течению реки куски корневищ тростника, веточки ив, тополей, попадая на новообразованную сушу, приживаются и дают начало новому тугайному сообществу.

Плодоношение тополей, ив, тамарисов и других видов приходится на время, когда спадает паводок и обнажаются участки вновь отложенного аллювия. Всхожесть семян сохраняется недолго, всего несколько недель, пока поверхность аллювия остается влажной. У молодых растений сильнее всего развивается корневая система (у годовалого тамариска длина корня может достигать 1,5 м, а высота надземной части — не более 5—10 см), она проникает в глубь почвы вслед за иссушением горизонта.

С крайне жесткими условиями обитания связана относительная бедность видового разнообразия тугаев: в пойме среднего течения Амударьи всего 96 видов высших цветковых растений¹, в то время как на восточном чинке (обрывистых склонах) плато Устюрт — 302 вида². Многоярусные пышные

¹ Кербабаяев Б. Б. Джангильская растительность поймы Амударьи // Тр. Ин-та биологии АН ТССР. Ашхабад, 1954. Т. 1. С. 22—74.

² Сарыбаев Б. Флора и растительность восточного чинка Устюрта: Дис. ... канд. биол. наук. Л., 1973.

**Туранговый тугай осенью.
Здесь и далее
фото А. И. Гладышева**

▶
**Рогоз слоновый. В пределах Сред-
ней Азии он произрастает только в
пойме среднего течения Амударьи.**



**Туранговые тополя — наиболее ти-
пичные представители древесных
тугаев в пойме Амударьи.**



тугайные заросли деревьев и трав, как правило, образованы не более чем 3—5 видами, широко распространены и одновидовые сообщества.

Тугайные сообщества сформированы растениями, произрастающими только в речных долинах: 35 видов связаны с речными долинами Средней и Центральной Азии, Джунгарии, южного Турана и Ирака. В их числе, помимо упомянутых, кендырь шероховатый (*Trachomitum scabrum*), карелиния каспийская (*Karelinia caspia*), тахлак обыкновенный (*Vexibia alopecuroides*), кермек узколистный (*Limonium otolepis*) и др. Из них 18 видов — эндемики Средней Азии.

Единообразие среды в долинах пустынных рек способствует расселению уже адаптированных видов, но не формированию новых, эндемичных. Поэтому во флоре амударьинских тугаев лишь один эндемичный пойменный вид — зулофия туркестанская (*Eulophia turkestanica*), травянистый многолетник из семейства орхидных. Растет она на первой заливаемой террасе в дерновинах эриантуса и встречается крайне редко, известны лишь ее единичные находки.

Разнообразны в пойме низшие растения, включая напочвенный ярус споровых. На молодых аллювиальных субстратах развиваются пионерные сообщества печеночников. В тугайных сообществах, где ежегодно накапливается до нескольких тонн опада на гектар, широко представлены грибы (около 320 видов и форм), более половины из них — сапрофиты.

В тугаях среднеазиатских рек произрастает 150 видов лекарственных растений. Из них в дельте Амударьи (по данным А. Б. Бахиева, известного каракалпакского ботаника) встречаются 32 вида, обладающие вяжущими, кровоостанавливающими, слабительными, противовоспалительными, отхаркивающими, ранозаживляющими, сосудорасширяющими и другими свойствами³. Упомянем лишь солодку голую (*Glycyrrhiza glabra*), многолетнее растение из семейства бобовых, корень которого обладает исключительной целительной силой и широким спектром действия. Любопытно, что из семи видов рода *Glycyrrhiza*, произрастающих в Средней Азии, целебными свойствами обладает только этот вид (как показали данные лабораторных анализов, наиболее ценное

солодковое сырье получают в климатических условиях Каракалпакии — в низовьях Амударьи). Свойства корня солодки хорошо известны за рубежом, и экспортная потребность в нем не ограничена. В естественных условиях она образует одновидовые заросли, площадь которых достигает нескольких десятков гектаров, что позволяет собирать ее в промышленных масштабах. Однако изменения речного стока в последние десятилетия подорвали естественную сырьевую базу этого растения, поэтому солодку начали возделывать в культуре. Хорошие результаты по выращиванию получены Институтом ботаники АН Туркменистана и Лабораторией геоботаники Института естественных наук Каракалпакского филиала АН Узбекистана: на четвертый год возделывания с гектара собирают до 20—25 т корня.

Помимо лекарственных растений в тугаях распространены технически ценные виды: канатник теофраста (*Abutilon theophrasti*), кендырь шероховатый (сырье для получения природных волокон высшего качества), тростник и рогоз, используемые для получения строительных материалов — камышитовых плит и кирпича-сырца.

В амударьинских тугаях произрастают предки культурных растений — люцерна хмелевидная (*Medicago lupulina*), лохи, ива джунгарская.

Под пологом деревьев, кустарников и высоких трав создается свой микроклимат, отличный от климата окружающей пустыни: колебания температуры здесь сглажены, дневная жара ниже на 2—3 °С и влажность воздуха повышена.

Неповторим и оригинален животный мир тугаев Средней Азии — 60 видов млекопитающих, более 300 видов птиц, 20 видов земноводных и более 800 видов членистоногих. В низовьях Амударьи обитают 28 видов млекопитающих и 91 вид птиц, из которых 18 — зимующих⁴. Стаи, насчитывающие по несколько тысяч птиц, при полете останавливаются на дельтовых озерах среди тугаев. Даже небольшой участок тугайного леса среди окружающей пустыни становится прибежищем многим обитателям, в том числе ценным охотничье-промысловым видам — кабану, зайцу-толаю, барсуку, лисице, хивинскому фазану и др.

Хозяйственное использование ресурсов древесно-кустарниковых тугаев связано с выпасом домашних животных, заготовкой древесины для строительства и на топливо, охотой на промысловых зверей и птиц. Травя-

³ Бахиев А. Экология и смена растительных сообществ низовьев Амударьи. Ташкент, 1985.

⁴ Реймов Р. // Вестн. ККФ АН УзССР. 1982. № 3. С. 28—32.

ные тугаи — прекрасные кормовые угодья (урожайность наиболее высоких тростниковых сообществ составляет 35—40 ц/га), используемые как для сенокосения, так и под выпас скота.

Благодаря высокой продукции зеленой массы (в древесных — 144 т/га, а в травяных — 203 т/га) тугайные экосистемы ежегодно вовлекают в биологический круговорот значительные количества элементов минерального питания, особенно азота, кальция, калия, кремния, магния, а также натрия и хлора. По этим показателям тугаи аридных областей субтропического пояса значительно превосходят тугаи суббореальных пустынь⁵.

Граница массового распространения среднеазиатских тополей и сопутствующих им видов в пределах речных пойм Ирана, Средней и Центральной Азии очерчивает и область развития тугайных сообществ. Однако ареал тугаев довольно ограничен и, к сожалению, на всем его протяжении, в настоящее время сильно нарушен человеком. По свидетельству известного ботаника М. П. Петрова, именно амударьинские тугаи имеют лучшую сохранность и наибольшее видовое разнообразие⁶. Около 60 % площади всех среднеазиатских тугаев составляют амударьинские, именно в них находятся компактные и обширные лесные массивы.

Тугаи не одинаковы на разных участках русла Амударьи. Это объясняется большей протяженностью реки с севера на юг: ее дельта располагается в подзоне северных пустынь бореального климатического пояса, а пойма — в подзоне южных пустынь субтропического. Различия в количестве тепла и осадков влияют на видовой состав и структуру тугайных сообществ, так в джунглях дельты Амударьи господствует тростник, который здесь, видимо, находится в области экологического и фитоценотического оптимума. Распространен он практически повсеместно (от болот до солончаков), но только при залипании речной водой слоем не более 50 см образует моноценозы и достигает в высоту 4—7 м. При большей или меньшей влагообеспеченности он не столь высок, в составе сообществ появляются виды лугового разнотравья и галофиты, но тростник по-прежнему остается доминантом. Выдерживает он и очень сильное засоление

почв, но при этом листья становятся очень мелкими и жесткими и он принимает стелющуюся форму.

К югу от вершины дельты, южнее г. Нукуса, вблизи границы бореального и субтропического климатических поясов, и ему на смену приходят тропические злаки — эриантусы и императы. В разных частях амударьинской долины также меняется состав лесных сообществ: в дельте Амударьи доминирует тополь арийский, в более южных районах — тополь сизый. Кроме того, в пойменных тугаях, расположенных в субтропическом климате появляется ярус плотно стоящих злаков, имеющих ограниченный период вегетации. Это эфемеры и эфемероиды — однолетники и многолетники, цветение и колошение которых длится не более 2—3 недель весной или в начале лета. Остальную часть года, несмотря на то, что их развитие закончилось, они продолжают стоять плотным ковром, заплывая пространство между деревьями и кустарниками.

Река дает жизнь тугаю, и она же приводит к его гибели. Данные о продолжительности существования тугайных сообществ на одном месте весьма противоречивы. Из научных публикаций известно, что тополя к 20 годам из проростков формируют зрелые сообщества, а в 40—50 лет отмирают. Примерно такая же продолжительность жизни у сообществ, сформированных ивами или лохом. Если принять во внимание способность этих видов к порослевому возобновлению, и жизнеспособность поросли на протяжении трех-четырех генераций, такой срок жизни для них очень мал, он должен быть как минимум 160—200 лет. И, как подтверждение этому, в тугае Бадай-Тугай были встречены девяностолетние туранговники. Действительно, наблюдаемая в реальности небольшая продолжительность жизни тугая обусловлена непостоянством реки. Пустынные реки выносят из гор на равнину огромное количество взвешенного в воде материала — песка, ила. Один кубический метр амударьинской воды содержит 3—4 кг взвешенных частиц, отчего вода в реке похожа на какао. Наносы откладываются в русле реки и со временем заполняют его, река сама себе преграждает путь и вынуждена изменить русло. Это и определяет судьбу тугаев. В дельте цикл формирования и отмирания проток составляет примерно 50 лет. С уходом реки сезонные изменения среды превращаются в стабильные: грунтовые воды все более уходят вглубь и становятся недоступными растениям; в почвах накапли-

⁵ Гладышев А. И. Тугайная растительность Амударьи. Современное состояние, экология, продуктивность, охрана и рациональное использование. Ашхабад, 1991.

⁶ Петров М. П. Сравнительная характеристика тугайной растительности р. Амударьи и р. Тарим (Южный Синьцзянь) // Тр. Ташкентского ун-та. Вып. 187. Биол. науки. Кн. 38. Ботаника. 1961. С. 128—145.



ваются соли, и они превращаются в солончаки. Тугайные сообщества гибнут, а им на смену приходят галофиты. Именно солончаквая стадия считается завершающей в пойменном цикле смен тугайных сообществ. Однако эволюция пойменных и дельтовых ландшафтов продолжается дальше. На смену солончакам приходят такыры — глинистая пустыня, ее начинают засыпать пески.

Мы обрисовали схему смены тугайных сообществ пустынными для того, чтобы можно было почувствовать неустойчивость и зависимость этих природных образований от реки.

Тугайные массивы иногда называют природными оазисами. Эта аналогия вполне справедлива, поскольку человек в Средней Азии строит свои оазисы по образу и подобию природного тугая: обеспечивает паводковое затопление речной водой, лишнюю воду отводит с помощью дренажной сети за пределы оазиса. Благодаря более комфортным, в сравнении с пустыней, климатическим условиям, плодородию почвы, обилию животных и полезных растений тугаи издавна привлекали внимание человека, что дало основание считать их антропогенно

трансформированными⁷. Однако воздействие человека до последнего времени не носило трагического характера. Начиная с 60-х годов развитие водного хозяйства в районах Средней Азии, строительство каналов и гидроузлов в бассейне Аральского моря вызвали серьезные изменения речного стока и природной среды не только на водоразделах, но и в долинах рек.

По характеру водного питания и режиму стока Амударья относится к Тяньшаньскому типу — рекам ледниково-снегового питания с длительным весенне-летним половодьем и устойчивой меженью. Ледники, вечные и сезонные снега дают около 84 % годового стока Амударьи, составляющего (в районе г. Керки, при выходе на равнину) в среднем 1970 м³/с, или 78,2 км³/год. Далее Амударья на расстоянии 1175 км не принимает ни одного притока и, пронося свои воды через пустыню, достигает Аральского моря.

Широкое развитие ирригации в бассейне Амударьи, начиная с 60-х годов, потребовало строительство ряда водохранилищ и безвозвратного изъятия из реки больших масс воды на орошение полей и промывку

⁷ К о р о в и и Е. П. Растительность Средней Азии и Казахстана. Ташкент, 1961. Кн. 1.

Сахарный тростник [дикий] — прекрасное сырье для изготовления высших сортов бумаги.



▶ **Солянкоколосник Белаянже вместе с тамариксами представляет голофитную тугайную флору по всей долине Амударьи.**

Тамарикс щетинистоволосистый, как и многие представители тугаев, очень декоративен во все сезоны вегетации.



почв от солей, ежегодно накапливающихся на полях. Современные отборы и потери воды в Амударье оцениваются в объеме 56,9 км³, и лишь 6,7 км³ воды (менее 1/10 ее прежнего объема) достигает дельты. Только Каршинский, Аму-Бухарский и Каракумский каналы, забирают более 20 км³ амударьинской воды в год, а впадают в Амударью коллекторы из Бухарского, Чарджоуского, Эликалинского и других оазисов, несущие отработанные (коллекторно-дренажные) воды, содержащие огромные массы ядохимикатов и солей. Общий объем коллекторных вод в бассейне Амударьи достигает 18—20 км³/год. В результате произошло снижение уровня воды в реке; уменьшение высоты, объема и изменение сроков прохождения паводка, увеличилась минерализация речной воды. Причем все эти изменения нарастают вниз по течению и достигают своих максимальных значений в дельте, где начиная с 1970 г. паводковые разливы прекратились совсем. Русло реки ниже Тахиаташской плотины в отдельные годы оставалось сухим. Иссущение дельты было ускорено падением уровня Аральского моря и уменьшением его смягчающего влияния на климат.

Таким образом, тугайные сообщества на всем протяжении долины Амударьи и ее притоков оказались в условиях, к которым они не были приспособлены, стали погибать и замещаться сообществами галофитов.

В современной дельте Амударьи сокращение площади, занятой тугаями, началось с 30-х годов, с развитием земледелия в этом районе. В военные и послевоенные годы, в течение 18 лет, было уничтожено 120 тыс. га тугайных лесов не только под пашню, но и на топливо⁹. В 1950 г. площадь тугайных лесов составляла около 100 тыс. га, к 70-м — 52 тыс. га и к настоящему времени не превышает 15—20 тыс. га. Полностью погибли известные урочища Шаббас, Куянчик, Аккамыш, Кулатау, Койбак и др. Изменение условий среды в последние десятилетия привело к тому, что в некоторых тугайных массивах сухой достигает от 50 до 85 %. Специалисты не без основания считают, что в дельте Амударьи возникла реальная угроза исчезновению тугайных сообществ как типа растительности¹⁰.

В долине среднего течения Амударьи площадь под тугаями с 1960 по 1985 г. сократилась более чем в два раза и составляет

в настоящее время около 40 тыс. га. Это в основном травяные и кустарниковые сообщества, сохранившиеся в виде узкой полосы по берегу реки и на островах в ее русле.

Мероприятия, проведенные по восстановлению тугаев, не дают ощутимого эффекта как из-за недостаточного масштаба их проведения, так и из-за недостатков в технологии воспроизводства и несоблюдения установленных норм ухода и полива.

Широкая представленность флоры среднеазиатских тугаев в тугайных массивах амударьинской поймы и дельты, высокое флористическое разнообразие позволяет считать их хранителями генофонда тугайных видов и сообществ. Признанием этого являются организованные здесь заповедники и заказники. В некоторых из них были поставлены и удачно завершены эксперименты по воссозданию популяции утраченного здесь ранее бухарского оленя (*Cervus elaphus bactrianus*). Однако искусственное изменение речного стока создало угрозу гибели тугайных сообществ даже на охраняемых территориях.

В верховьях Амударьи, на юго-западе Таджикистана, там где сливаются реки Пяндж и Вахш, расположен один из старейших наших заповедников — Тигровая Балка, организованный в 1938 г. Это единственный в мире резерват, где сохраняется пустынно-тугайный комплекс зоны сухих субтропиков. Название заповедника связано с некогда обитавшим здесь представителем фауны хищных млекопитающих — туранским тигром, последний след которого на территории охраняемой зоны видели в 1953 г.

Строительство Нурекской ГЭС и ирригационное освоение прилегающих территорий, в частности создание первой очереди Карадумской оросительной системы, нарушили естественные условия произрастания тугаев. Начиная с 1962 г. (времени начала заполнения Нурекской ГЭС) высокие паводки прекратились. Это привело к изменению водно-солевого баланса почв, заглублению грунтовых вод и возрастанию их минерализации на всей территории заповедника. Начиная с 1977 г. грунтовые воды перестали участвовать в почвообразовательном процессе, почвы перешли в автоморфный режим увлажнения, которое сопровождается

⁹ Трешкин С. Е. Структура и динамика древесно-кустарниковых сообществ тугайных лесов низовья Амударьи в связи с антропогенным воздействием. Дис. ... канд. биол. наук. М., 1990.

¹⁰ Мамутов Н. Трансформация луговой растительности дельты Амударьи в условиях аридизации. Дис. ... канд. биол. наук. М., 1991; Новикова Н. М. Динамика растительности дельтовых равнин аридных районов вследствие антропогенного преобразования речного стока. М., 1985. С. 31—40.

накоплением солей в верхнем, корнеобитаемом слое почв и приводит к прогрессирующему опустыниванию тугайных комплексов. На территории заповедника наблюдаются различные стадии усыхания туранги. Наиболее глубокие изменения происходят под изреживающимся пологом древесных видов, в травяном ярусе. Отмирание эриантуса способствует широкому распространению на их месте типичных видов эфемерового разнотравья и галофитов.

Примерно в 90 км ниже по течению Амударьи, в районе Термеза (Южный Узбекистан), расположен следующий тугайный заповедник — Арал-Пайгамбар (в переводе с узбекского — остров пророка). Заповедник действительно расположен на острове, на середине реки. Здесь сохраняются наиболее типичные тугайные сообщества, они занимают более половины его площади (около 1600 га). Кроме хорошо развитого тугайного комплекса заповедник известен тем, что здесь оседло живет краса тугаев — черно-золотистый фазан и обитает одно из самых маленьких насекомых во всей мировой фауне — белозубка-малютка, вес которой не превышает 1,5—2 г. Здесь в естественном режиме поддерживается численность одной из самых крупных популяций бухарского оленя.

В долине среднего течения Амударьи, на территории Туркменистана, между населенными пунктами Дейнау и Дарган-Ата на трех крупных островах и участке прилегающей к пойме пустыни располагается Амударьинский заповедник, а несколько ниже по течению реки, на территории Хорезмской области Узбекистана — Кызылкумский заповедник. В этих заповедниках довольно разнообразно представлены флористический и фаунистические тугайные комплексы.

Самый северный из заповедников — Бадай-Тугай. Многие годы он служил эталоном экосистем низовий Амударьи. Флористический комплекс заповедника насчитывал 136 видов. Из них три эндемика — тополя арийский и сизый, спаржа персидская. В заповедник был интродуцирован и дал хорошее потомство обитавший здесь прежде бухарский олень. Антропогенное сокращение стока Амударьи отрицательно сказалось на тугайных биоконкомпсах. Особенно ощутимые изменения произошли после строительства Тюя-Муюнского гидроузла. Уровень воды в реке снизился почти на 1,5 м, уменьшилась высота паводковых разливов, уровень грунтовых вод упал с 1,5 до 2,5 м, возросла их минерализация. Это явилось причиной развития опустынивания тугаев фактически на всей территории заповедника, распола-

гающейся выше первой надпойменной террасы. Без дополнительного обводнения они обречены на гибель. Молодые тугаи, возникшие семенным путем, занимают незначительные площади на небольших островках, появившихся в русле реки в последние 10—12 лет. Здесь они находятся в оптимальных условиях, сложившихся в соответствии с изменившимся режимом реки.

В дельте Амударьи до начала 80-х годов существовало два заказника — Амударьинский дельтовый на озере Судочьем, предназначавшийся для охраны гнездовой перелетных птиц, и Нурумтубекский, расположенный вдоль канала Куванышждарма — как резерват популяций кабана, барсука, зайца-толая и хивинского фазана. В 1985 г., когда истек срок заповедывания, Нурумтубекский заказник перестал охраняться и обширная территория тугайного массива практически прекратила свое существование из-за выжигания, сведения тугаев под пашню, постройки и т. д.

Как положительное явление следует отметить сопряженную охрану тугайных комплексов вместе с прилегающей пустыней, что обеспечивает благоприятные условия для обитания разнообразных групп животных. К примеру, пустынно-тугайный флористический комплекс заповедника Тигровая Балка насчитывает только насекомых около 5 тыс. видов, 13 из которых занесены в «Красную книгу СССР». Здесь также находится самая крупная популяция бухарского оленя, занесенного также в «Красную книгу Международного союза охраны природы». Помимо вышеуказанных видов в амударьинских заповедниках сохраняются многие краснокнижные виды млекопитающих: полосатая гиена и среднеазиатская выдра; птицы: змеяяд, сапсан, орлан-долгохвост, туркестанский черный аист, черно-золотистый фазан, пеликаны и др.; насекомые: махаон, пестрянка туркменская, богомол древесный, бражник туранский и др.; рептилии: серый варан, поперечнополосатый волкозуб, среднеазиатская кобра; рыбы: шип, аральский усач, лжелопатоносы и др.

Нет сомнений, не будь заповедников, тугайные экосистемы давно были бы утрачены — распаханы, вытоптаны, сожжены и т. д. Однако в настоящее время приходится признать, что сохранение тугайных комплексов только традиционным путем — огораживанием и охраной от прямого вмешательства занимаемой ими территории — уже не достигнет своей цели, поскольку основная причина гибели тугаев во всей Амударьинской пойме находится «вне» границ заповедников.

Она обусловлена неразумным водопользованием на всей территории Средней Азии. Это, в свою очередь, привело к изменению режима Амударьи и на дальнейшем этапе проявилось в ухудшении условий влагообеспеченности тугаев, в том числе и расположенных на территории заповедников¹⁰.

В то время как ученые осмыслили возникшую проблему и пытаются решить ее через государственные структуры, потребность в естественных кормах и стихийное понимание причины гибели тугаев уже заставило проводить на местах дополнительное их обводнение. Не имея специального оборудования, своими силами в заповеднике Бадай-Тугай были обводнены 250 га усыхающих тугаев. Это дало положительный результат уже в первый год — резко пошла в рост прикорневая поросль на усыхающих деревьях туранги и лоха: за один вегетационный период она достигла 1,5 м. На территории дельты Амударьи и Сырдарьи большая часть речной воды и вод коллекторно-дренажного стока из-за маловодности реки стала направляться на искусственное обводнение озерных котловин и межрусловых пространств для восстановления рыбного хозяйства и выращивания тростника на корм скоту. Однако знаний и опыта оказалось недостаточно, и в одних местах вместо бывшего здесь прежде тростника вырос плохо поедаемый рогуз, а в других — началось сильнейшее засоление почв. То же может произойти и на территории заповедников, если не опереться на разработанные специалистами программы и методики, включающие рациональные приемы мелиорации с учетом конкретных условий среды.

Однако этих «прямых» мер по гидро-мелиорации тугаев, проводимых непосредственно на их территории, также недостаточно. На более высоком уровне, в масштабе речных бассейнов Амударьи и Сырдарьи следует рассмотреть схемы рационального использования их водных ресурсов. Принципиально важно, чтобы среди участников водохозяйственных комплексов пойменные тугайные экосистемы выступали в качестве равноправных или приоритетных водопотребителей. Их потребности должны быть удовлетворены в первую очередь и не только в объеме речной воды, необходимом для паводкового затопления, но и в обеспечении определенного режима уровня и качества воды в реке в разные сезоны года. В требованиях к режиму и качеству воды

«интересы» тугайных экосистем и человека сходятся, поскольку река на всем ее протяжении является основным источником питьевого водоснабжения населения. Не только в интересах дикой природы, но и человека необходимо прекратить поступление вод коллекторно-дренажного стока в реку без предварительной очистки от ядохимикатов и солей.

В последний (1990-й) год существования СССР было принято постановление «О мерах по коренному улучшению экологической обстановки в районе Аральского моря, повышению эффективности использования и усилению охраны водных и земельных ресурсов в его бассейне». Этим постановлением предусмотрено сохранение Аральского моря в качестве природного объекта и установлены контрольные величины минимального притока к дельтам Амударьи и Сырдарьи. Как ни парадоксально, приток в речные дельты начиная с 1990 г. и в последующие три года действительно возрос. Это позволило не только обводнить значительные территории дельтовых равнин, но и часть речного стока направить в море. Однако, несмотря на положительный сдвиг, успокаиваться, видимо, нельзя. Причина увеличения притока речной воды к дельтам кроется не в выполнении указа, а скорее в изменении геополитической ситуации и климатических изменениях, обеспечивших увеличение водности рек в низовьях в последние годы. После распада СССР площадь хлопковых полей в Узбекистане была сокращена. Однако произошедшие изменения не решают проблемы сохранения амударьинских тугаев, ни, тем более, Аральской проблемы.

Фоновые изменения среды в бассейне Амударьи, обусловленные прогнозируемыми глобальными климатическими процессами, представляются нам благоприятными для тугайных сообществ. Повышение атмосферных осадков при некотором снижении летних температур даст положительный эффект для возрастания водности рек и общей увлажненности Среднеазиатского региона. Это, в свою очередь, будет способствовать стабилизации тугайных экосистем и расширению их площади внутри существующего ареала. Однако и проблемы восстановления тугаев, и решения Аральского кризиса не перестанут существовать.

Залогом восстановления амударьинских природных тугайных экосистем и сохранения биологического разнообразия тугайных видов и сообществ в заповедниках может быть только рациональное водопользование во всем бассейне Аральского моря.

¹⁰ Залетаев В. С. Экологически дестабилизированная среда. М., 1989.

Звук управляет плазмой

Г. А. Галечян



Георгий Ашотович Галечян, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института прикладных проблем физики Академии наук Армении. Область научных интересов — удержание плазмы в тороидальных магнитных ловушках, исследование плазмы электроотрицательных газов, разряда в потоке газа, взаимодействие акустических волн с плазмой.

ПЛАЗМА, которая в нашем сознании ассоциируется с изошренными физическими установками, термоядерными реакторами будущего и т. п., на самом деле представляет собой состояние вещества гораздо более обыденного. Оно используется в таких бытовых приборах, как лампы дневного света, рекламные лампы, наконец, газовые лазеры, которые можно встретить, например, в обычных стоматологических кабинетах. Следует упомянуть и о промышленном применении плазмы в магнетогидродинамических и плазмохимических генераторах, плазмотронах, дуговых печах и др. Вообще говоря, четвертое состояние вещества наиболее распространено, по крайней мере в нашей Галактике, — 99,7 % ее вещества находится в плазменном состоянии¹. Внешняя часть земной атмосферы, Солнце, звезды, ионизованные газовые туманности, межзвездный газ — все это плазма.

Исследование свойств плазмы и процессов ее взаимодействия с электромагнитными полями, электронными, ионными и другими пучками всегда были актуальны, в том числе и потому, что результаты многих научных исследований находили быстрое практическое применение. Наряду с этим относительно мало изучено влияние акустических волн на параметры плазмы. Интерес к этому вопросу возник в самые последние годы, и в этом направлении уже получены достаточно обнадеживающие результаты. Прежде чем привести их подробный анализ, перечислим некоторые из них.

Установлено, что звуковой волной, направленной вдоль положительного столба газового разряда, можно воздействовать на свойства плазмы и в достаточно широком диапазоне параметров управлять параметрами разряда. Так, увеличением интенсивности стоячей звуковой волны можно значительно понизить температуру газа в плазме, уменьшить радиальный градиент температуры га-

© Галечян Г. А. Звук управляет плазмой.

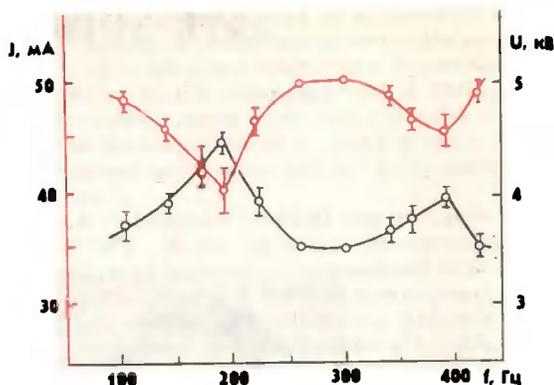
¹ Шкловский И. С. Физика плазмы и астрономия // Природа, 1978. № 5. С. 26.

за, повысить напряженность продольного электрического поля и температуру электронов, создать однородный, стабилизированный разряд при высоких давлениях газа, увеличить энерговклад при постоянном токе в разряде и др. Влияние звуковых волн на свойства плазмы начинается с того, что при слабых интенсивностях звука положительный столб газового разряда расслаивается и происходит модуляция его параметров.

РАССЛОЕНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА И МОДУЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ЗВУКОМ

Воздействие акустических волн на параметры плазмы осуществляется посредством ее нейтральной компоненты. Низкотемпературная плазма, которая используется в осветительных и рекламных лампах, газовых лазерах, плазмохимических реакторах и других приборах, состоит в основном из нейтральных частиц, и поэтому обычно ее называют частично ионизованной (степень ионизации $\approx 10^{-6}$ — 10^{-10} , что означает: на одну электрон-ионную пару приходится 10^6 — 10^{10} атомов или молекул). В связи с этим звуковая волна, распространяясь вдоль плазменного столба тлеющего разряда, образует уплотненные и разреженные слои, нарушая тем самым его продольную однородность².

Тлеющий разряд — это наиболее простое и исследованное плазменное образование. В пространстве между двумя электродами, расположенными на концах трубки, приложенное электрическое поле ионизирует газ, находящийся при низком давлении, создавая тем самым тлеющий разряд с протяженным положительно заряженным столбом. Газ в плазме находится в неравновесном состоянии, поскольку энергия электронов значительно превышает энергию ионов. Температуры нейтральных частиц и ионов примерно равны друг другу. Ионизация газа в плазме происходит при столкновении электронов с атомами или молекулами. При этом и том же значении электрического поля электроны на длине свободного пробега (среднее расстояние между двумя последовательными столкновениями) приобретут более высокую энергию в разреженном слое, нежели в уплотненном. Частота ν_i ионизации газа в плазме связана с энергией элект-



Зависимости разрядного тока J (цветная кривая) и разности электрического напряжения U в трубке длиной 100 см и внутренним диаметром 6 см от частоты f звука при интенсивности 83 дБ и давлении аргона 110 мм рт. ст. В отсутствие звука разрядный ток равен 50 мА, электрическое напряжение 3,5 кВ. Видна сильная зависимость разрядного тока и электрического напряжения от частоты при постоянной интенсивности звука, т. е. наибольшее отклонение рассматриваемых величин наблюдается при резонансных частотах 190 и 380 Гц, при которых в трубке образуются стоячие волны.

тронов экспоненциальной зависимостью:

$$\nu_i \sim A w e^{-\frac{B}{kT}},$$

где w — дрейфовая скорость электронов, T_e — температура электронов, k — постоянная Больцмана, A и B — эмпирические коэффициенты. Соответственно, скорость образования $1/\nu_i$ электронов и возбужденных атомов и молекул в разреженных слоях значительно выше, чем в уплотненных. Следовательно, концентрации электронов и возбужденных частиц в соседних слоях отличаются друг от друга, образуя при этом волны ионизации. Таким образом, звуковые волны вызывают модуляцию плотности газа, что влечет за собой модуляцию концентрации и температуры электронов, а также плотности возбужденных частиц³. С увеличением интенсивности звука резонансной частоты в разрядной трубке должна возрастать глубина модуляции параметров плазмы.

При атмосферном давлении и интенсивности звука 96 дБ глубина модуляции плотности газа соответствует примерно 0,03 % а в разряде при давлении азота ~ 100 мм рт. ст. и той же интенсивности

² Mkrtychyan A. R., Hatsagortsian K. Z., Galechian G. A., Divanian E. G. // *Acustica*. 1989. V. 64. P. 124.

³ Галечян Г. А., Диванян Р. Г. // *ЖТФ*. 1991. Т. 61. С. 205; Антинян М. А., Галечян Г. А., Тавакалян Л. Б. // *ТВТ*. 1991. Т. 29. С. 659.

глубина модуляции разрядного тока на частоте звука может быть порядка 30 %. Различие в 1000 раз. Это связано с тем, что столкновения молекул в соседних слоях сильно отличаются по частоте и тепловыделение от столкновительной безызлучательной релаксации возбужденных молекул в уплотненных слоях заметно выше, чем в разреженных, т. е. помимо модуляции плотности электронов должна происходить модуляция тепловыделения. Благодаря этим процессам глубина модуляции разрядного тока звуком в молекулярном газе может достигать 25—30 %. Величина температуры электронов и продольного электрического поля также подвергается модуляции звуком: определенные опытным путем, они при интенсивности 96 дБ соответственно имеют порядок ~ 15 и $0,5 \text{ \AA}$.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

Для проведения экспериментальных исследований взаимодействия акустических волн с плазмой были разработаны две схемы создания звука в газовом разряде⁴. В первом случае к одному из торцов трубки герметически крепится электродинамический излучатель звуковых волн, а в противоположном торце (за анодом) устанавливается микрофон для контроля параметров звуковой волны. Частота звука может быть изменена с помощью низкочастотного генератора синусоидальных колебаний; амплитуда — посредством усилителя.

Во втором подходе акустическая волна возникает в самой трубке при наложении переменного тока на постоянный разрядный ток. Увеличение и уменьшение переменного тока сопровождается возрастанием и убыванием тепловыделения в трубке и, соответственно, колебанием давления. Параметры звуковой волны в трубке варьируются изменением частоты или амплитуды переменного тока. Наибольшее воздействие акустических волн на параметры плазмы происходит при резонансных частотах, когда амплитуда звука в трубке приобретает наибольшее значение и образуются стоячие волны. Разрядная трубка служит акустическим резонатором,

и при длине 100 см первый резонанс в аргоне (когда на длине трубки укладывается половина длины волны) соответствует 190 Гц, второй — 380 Гц и т. д.

ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА В ПЛАЗМЕ

Температура газа — один из основных параметров частично ионизированной плазмы. Она зависит от частоты упругих столкновений электронов с атомами газа, поскольку при этом часть энергии электронов, а именно $2m/M$ (m — масса электрона, M — атома), передается нейтральным частицам.

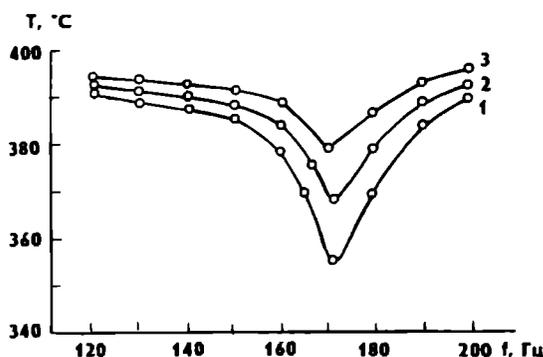
Увеличение разрядного тока сопровождается возрастанием концентрации электронов и частоты их столкновений, что приводит к повышению температуры газа в приосевой области разряда. Эти процессы вызывают рост радиального градиента температуры газа. Звуковая волна, распространяющаяся вдоль положительного столба, уменьшает температуру газа в плазме (при неизменном значении разрядного тока и давления) и позволяет достичь такого ее значения, которое необходимо для выполнения конкретной прикладной задачи или проведения соответствующего эксперимента. Проиллюстрируем это явление на следующем примере.

В разрядной кварцевой трубке с внутренним диаметром 9,8 см, длиной 52 см и расстоянием между сетчатыми электродами 27 см, при давлении аргона в трубке 180 мм рт. ст. и токе 60 мА температура газа на оси трубки в отсутствие звука соответствовала 600 К, на стенке — 300 К⁶. Температура газа измерялась двумя термометрическими датчиками. Один из них располагался на оси положительного столба на расстоянии 8 см от анода, второй — на стенке трубки на том же расстоянии от анода. Звуковая волна на первой резонансной частоте 170 Гц интенсивностью 92 дБ приводила к уменьшению температуры газа на оси разряда до 450 К, а на стенке температура газа повышалась до 325 К. В первом случае радиальный перепад температуры газа был равен 300 К, во втором — 125 К. Уменьшение перепада в 2,2 раза произошло вследствие возникновения акустических вихрей в стоячей звуковой волне при наличии узкого пограничного слоя. Турбулентное перемешивание газа вызвало повышение теплопередачи в радиальном направлении и, как результат,

⁴ Антиян М. А., Галечян Г. А., Тавакалян Л. Б. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 369; Антиян М. А., Галечян Г. А., Мкртчян А. Р., Тавакалян Л. Б. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. С. 1990.

⁵ Арамян А. Р., Галечян Г. А., Мкртчян А. Р. // Акуст. журн. 1991. Т. 37. С. 213.

⁶ Галечян Г. А., Карапетян Д. М., Тавакалян Л. Б. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 1084.



Температура газа T на оси разряда в азоте вблизи первого резонанса $f_1 = 170$ Гц в зависимости от частоты звука f при давлении 40 мм рт. ст., токе 40 мА и различных интенсивностях волны в трубке диаметром 9,8 см, длиной 52 см. Кривая 1 получена при интенсивности звука 95 дБ, 2 — 93 дБ, 3 — 90 дБ. Температура газа приобретает наименьшее значение при резонансной частоте звуковой волны.

понижение перепада газа. Этот эффект возрастает с повышением давления газа в трубке, разрядного тока и интенсивности звука.

Эффективность работы целого ряда газоразрядных приборов зависит от температуры газа в плазме. Например, чем ниже температура газа в плазме газоразрядных лазеров, тем выше эффективность оптических квантовых генераторов. Для поддержания высокой степени инверсии в активной части лазера на углекислом газе температура газа в плазме должна быть достаточно низкой. При температуре выше 450 К инверсия и, следовательно, лазерная мощность уменьшаются (так как происходит тепловое заселение нижних лазерных уровней), а при температуре в интервале 600—650 К генерация вообще прекращается. Именно поэтому обеспечение достаточно быстрого теплоотвода является необходимым условием работы лазера на углекислом газе.

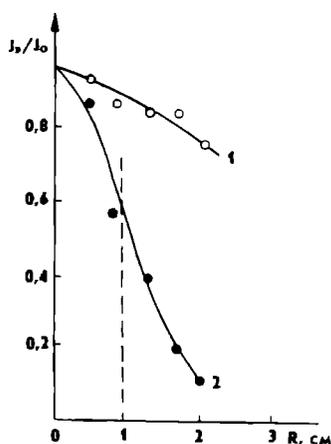
РАСШНУРОВАНИЕ РАЗРЯДА ЗВУКОМ

В газовом разряде при низком давлении (до 1 мм рт. ст.), когда длина свободного пробега атомов больше радиуса трубки, температура газа по сечению практически постоянна, плотность электронов падает в

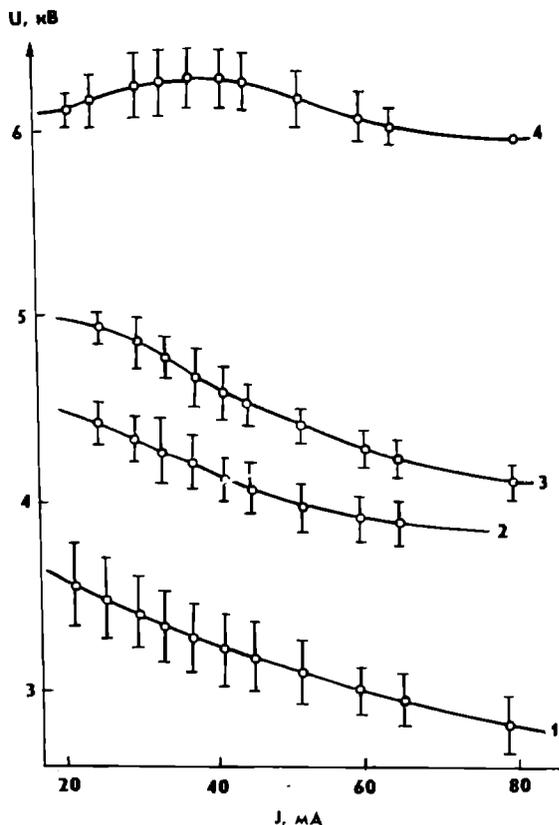
направлении, перпендикулярном оси, по закону параболы, а излучение формируется во всем объеме. При увеличении давления газа длина свободного пробега атомов уменьшается, становясь много меньше радиуса трубки. Электроны, диффундируя от оси к стенке трубки, испытывают большое число столкновений с атомами, теряют свою энергию и рекомбинируют, не доходя до стенки. Таким образом, с ростом давления газа (выше 10 мм рт. ст.) разряд все больше локализуется в приосевой области трубки, стягиваясь в тонкий яркий шнур с высокой температурой газа на оси разряда и с сильным радиальным градиентом температуры. В этом случае говорят, что устанавливается контрастированный разряд с колоколообразным распределением плотности электронов по диаметру трубки. Такой тип разряда абсолютно непригоден для некоторых типов газоразрядных лазеров, и уже на заре лазерной техники встала задача получения однородного по всему объему лазерной камеры неконтрастированного газового разряда при высоких давлениях. Проблема была решена следующим образом⁷.

Через разрядную область с высокой скоростью прокачивается газ. Возникающие в разряде турбулентности обеспечивают перемешивание газа в положительном столбе и создают однородный неконтрастированный разряд при высоких давлениях. Аналогичного результата можно достичь с помощью звука. Интенсивная звуковая волна, распространяясь вдоль положительного столба, вызывает в разряде акустические турбулентности, перемешивание которых приводит к увеличению теплопередачи газа между осью и стенкой, сопровождаемое расшнурованием разряда. При этом происходит увеличение диаметра видимой границы столба, который, расширяясь, заполняет весь объем трубки. Колоколообразная форма распределения концентрации электронов по диаметру плазменного столба в шнуrowанном разряде видоизменяется и становится параболической в расконтрастированном звуком разряде. Возникновение акустического вихревого движения и расшнурование разряда звуком наблюдаются визуально. Повышение давления газа создает более благоприятные условия для распространения звуковой волны и должно приводить к большему выравниванию вихревым движением радиального перепада температуры и установлению однородного неконтрастированного разряда.

⁷ Галечян Г. А. // Химия плазмы. 1983. Вып. 10. С. 73.



Распределение относительной плотности тока J_r/J_0 по радиусу R трубки с внутренним диаметром 6 см, длиной 100 см при давлении аргона 110 мм рт. ст., разрядном токе $J_0=70$ мА, интенсивности звука 85 дБ, резонансной частоте звуковой волны 190 Гц. Кривая 1 получена при отсутствии звука в плазме, 2 — при наличии звука. Под влиянием звуковой волны форма распределения плотности тока по радиусу разряда видоизменилась: из колоколообразной с диаметром видимой границы плазменного столба 2 см она стала параболической с заполнением разрядом всего объема трубки.



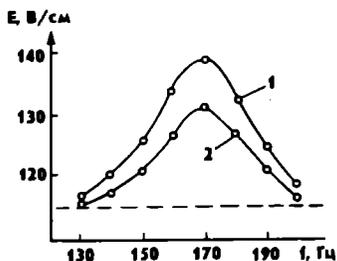
Вольт-амперные характеристики разряда в трубке с внутренним диаметром 6 см, длиной 100 см при давлении аргона 110 мм рт. ст. и различных интенсивностях звука (распространяющегося вдоль плазменного столба) с резонансной частотой 190 Гц. Из представленных графиков видно, что при постоянном токе с увеличением интенсивности звука разрядное напряжение возрастает. Кривая 1 получена при отсутствии звука в разряде, 2 — при 70 дБ, 3 — 74 дБ, 4 — 83 дБ.

ВЛИЯНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

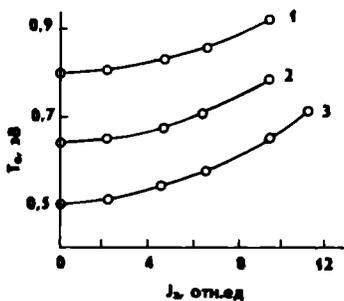
Электрическое поле определяет кинетические, плазмохимические и тепловые процессы в плазме. Исследование электрического поля позволяет понять кинетику рождения и гибели заряженных частиц в плазме, проследить за процессами сжатия и расширения плазменного столба под влиянием внешних воздействий. При сжатии положительного столба разряда в условиях постоянного давления газа происходит увеличение плотности тока в приосевой области и уменьшение продольного электрического поля, а при расширении разряда наблюдаются обратные явления.

Рост интенсивности звуковой волны, направленной вдоль разряда, вызывает, как мы уже видели, понижение температуры газа в плазме и уменьшение перепада температуры газа и одновременное увеличение диаметра положительного столба, вследствие чего возрастает электрическое поле. В частности, опытным путем установлено, что в трубке длиной 100 см, внутренним диаметром 6 см, расстоянием между электродами 85 см, при давлении аргона 100 мм рт. ст. создание звуковой волны интенсивностью 83 дБ приводит к увеличению разрядного напряжения на электродах с 2,8 до 6 кВ, т. е. более чем в два раза⁶. Эксперимент

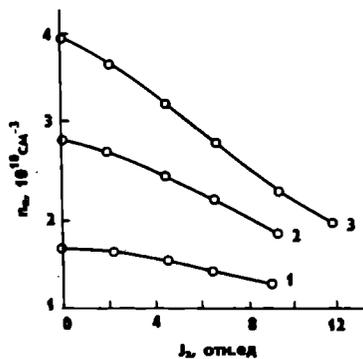
⁶ См. сноску 5.



Графики зависимости напряженности E продольного электрического поля в разряде азота от частоты f звуковой волны различной интенсивности [1 — 98 дБ, 2 — 96 дБ], направленной вдоль разряда, при давлении 40 мм рт. ст. и токе 40 мА в трубке диаметром 9,8 см, длиной 522 см. Штриховая линия соответствует значению электрического поля в разряде в отсутствие звука. Из графиков видно, что наибольшее значение электрического поля достигается при резонансной частоте 170 Гц.



Графики зависимости температуры T_e и концентрации n_e электронов на оси разряда в азоте, заполняющем трубку с внутренним диаметром 9,8 см, при частоте 170 Гц, токе 40 мА и различных давлениях от интенсивности J_e звука [кривая 1 получена при давлении 20 мм рт. ст., 2 — 30, 3 — 40; 2 отн. ед. соответствуют 84 дБ, 12 отн. ед. — 98 дБ]. С увеличением интенсивности звука температура электронов возрастает, а концентрация уменьшается.



выполнялся при первой резонансной частоте 190 Гц. Диаметр видимой границы разряда при этом увеличивался с 2 до 6 см и наступало полное расконтрагирование положительного столба. Температура газа на оси уменьшалась от 432 до 390 К, а на стенке трубки — повышалась от 305 до 335 К.

Увеличение электрического поля с ростом интенсивности звука связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, при этом происходит увеличение диаметра разряда со значительным уменьшением температуры газа на оси плазменного столба, радиального градиента температуры, плотности тока в приосевой области и повышение активного сопротивления разрядного промежутка. Помимо этого, электрическое поле в разряде с повышением интенсивности звуковой волны может возрасти вследствие того, что акустические вихри, возникающие в разряде, могут привести к установлению в плазме радиальной турбулентной диффузии заряженных частиц с их последующей гибелью на стенках трубки, которая превышает эффект классической амбиполярной диффузии. Для компенсации повышенной нейтрализации электронов и ионов, вызванной интенсивной звуковой волной, необходимо, чтобы возросла частота ионизации и увеличилась скорость рождения заряженных частиц. Это может произойти только при увеличении продольного электрического поля и температуры электронов в плазме.

ТЕМПЕРАТУРА ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ

Электроны в плазме выполняют самую ответственную роль, забирая у электрического поля в разряде энергию и перераспределяя ее по разным каналам. Они производят ионизацию газа, рождая себе подобных, возбуждают атомы и молекулы, излучение от которых используется для освещения, нагревают газ, передавая часть своей энергии при упругих столкновениях, заселяют лазерные уровни в газоразрядных оптических квантовых генераторах, осуществляют диссоциацию молекул, образуют отрицательные ионы и т. д. Значение средней энергии электронов в плазме зависит от природы газа, давления, а также частично от плотности тока или параметра E/N (E — напряженность электрического поля, N — концентрация атомов). С ростом плотности тока при постоянном давлении газа в разряде температура электронов уменьшается. Чем меньше давление газа, тем большую энергию приобретают электроны на длине свободного пробега. При низких давлениях (порядка 1 мм рт. ст. и ниже) энергия электронов достаточна для прямой ионизации при одном столкновении с атомом. С увеличением давления газа средняя энергия электронов уменьшается, и при давлениях, превышающих 10 мм рт. ст., преимущественно происходит ступенчатая ионизация, т. е. ионизация посредством многократных последовательных столкновений.

В ряде случаев может возникнуть необходимость независимым путем увеличить энергию электронов в разряде при постоянном токе и давлении газа. Например, изменяя энергию электронов в газоразрядных лазерах, можно добиться максимальной инверсной населенности в активной зоне и, как следствие, улучшить выходные параметры оптического квантового генератора. Такую возможность может обеспечить звуковая волна, направленная вдоль положительного столба разряда.

Увеличением интенсивности звука на резонансной частоте можно в широком диапазоне повысить температуру электронов. Об этом свидетельствуют детальные исследования зависимости температуры электронов в плазме от интенсивности звуковой волны при различных давлениях, разрядных токах и частотах звука вблизи резонансной частоты⁹. Измерения выполнялись в наполненной азотом при давлении 10—40 мм рт. ст. разрядной трубке длиной 52 см, внутренним диаметром 9,8 см и расстоянием между электродами 27 см. Температура электронов измерялась электрическим зондом на оси плазменного столба на расстоянии 4 см от анода. В отсутствие звуковой волны температура электронов при давлении 40 мм рт. ст. и токе 40 мА была равна 0,5 эВ. Увеличение интенсивности звуковой волны на резонансной частоте 170 Гц от 84 до 98 дБ приводила

к росту температуры электронов до 0,73 эВ, т. е. она повышалась примерно на 50 % от значения в «неозвученной» плазме. Возрастающее температуры электронов при увеличении интенсивности звука является следствием роста продольного электрического поля, которое, в свою очередь, вызвано уменьшением радиального перепада температуры газа и увеличением диаметра положительного столба разряда.

Мы проанализировали процессы влияния акустических волн на параметры плазменного столба. При этом, однако, происходит и обратный процесс, т. е. наблюдается изменение параметров звуковой волны: усиление и затухание звука в плазме, видоизменение его формы. Этим вопросам посвящено большое количество статей, в которых рассматриваются различные механизмы усиления звука в плазме. В частности, процессы усиления звуковой волны плазмы атомарных и молекулярных газов принципиально отличаются. Кроме того, усиление акустических волн в ионизованном газе может быть как линейным, так и нелинейным.

Не менее интересным является рассмотрение аналогии процессов в плазме, возникающих под влиянием звуковых волн и потока газа. Во многом схожи процессы возникновения вихрей в плазме, расконтрагирования разряда и др. Но эти вопросы выходят за рамки данной статьи.

⁹ См. сноску 4.

НОВЫЕ КНИГИ

Техника. Экология

В. И. Самойлов, В. И. Васильев. 2000 ГОД: СТАНЕТ ЛИ ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ «СВЯЩЕННОЙ КОРОВОЙ» ЧЕЛОВЕЧЕСТВА? В двух частях. М.: Политэкс, 1993. Ч. 1. 158 с.; Ч. 2. 128 с.

Слова «атомная бомба», «ядерное оружие» впервые появились в печати в 1938 г., а зловещую окраску приобрели в августе 1945 г., после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки. С тех пор название самого страшного вида оружия, когда-либо созданного на Земле, не сходит со страниц газет и массовых журналов. При этом, к сожалению, уро-

вень знаний политиков и журналистов не всегда соответствует особой важности обсуждаемого предмета. В какой-то мере это объясняется высокой степенью секретности, окружающей все, что связано с ядерным оружием (ЯО). В то же время довольно многое известно об истории его создания, поражающих факторах, защищенности, уязвимости и прочем, что не представляет государственной тайны. Специальная литература по этим вопросам насчитывает несколько тысяч наименований. Между тем среди них трудно было найти небольшую компактную книжку, где были бы представлены основные сведения по ЯО.

Представленная книга — своего рода «путеводитель» в названной области — не просто восполняет этот пробел, но и позволяет заглянуть в будущее ЯО, каким оно видится ее авторам — профессиональным военным с высшим техническим образованием и научными степенями. Аргументированно, на хорошем научном уровне, с привлечением обширного справочного материала обсуждаются вопросы национальной и международной безопасности в свете кардинальных политических перемен, происшедших в мире за последние годы.

Цунами Черного и Азовского морей

А. А. Никонов

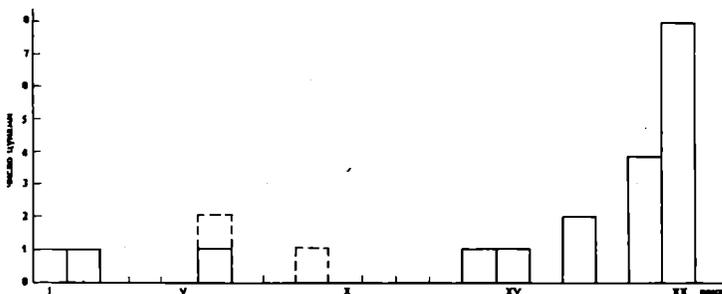


Андрей Алексеевич Никонов, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института сейсмологии Объединенного института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. Специалист в области движений земной коры, сейсмотектоники и палеосейсмологии. Неоднократно печатался в «Природе».

КОГДА рассматривают цунами, обычно имеют в виду океанские волны на берегах Тихого океана. Действительно, именно там они представляют наибольшую опасность и нередко вызывают очень тяжелые последствия. Недаром и само слово «цунами», которым в мировой литературе называют морские волны, представляющие непродолжительные возмущения уровня поверхности моря чаще всего за счет сильных землетрясений, происходит из японского языка. Специалистам, однако, известны цунами и на берегах других океанов, а также и во внутренних морях, в первую очередь в Средиземном. В нем происходит около 12 % всех известных в мире цунами. Ну а как обстоит дело с цунами в наиболее близком нам Черном море?

В литературе сведения об этом единичны и известны разве что очень узкому кругу специалистов. В этом нет ничего удивительного, поскольку в XX в. сильные землетрясения по берегам бассейна случались всего несколько раз и цунами, если и возникали при них, то были столь незначительны, что никакой реальной угрозы не представляли и не фиксировались сколько-нибудь точно, особенно в первую половину столетия. В Азовском же море цунами вообще не были известны.

Но картина станет совсем иной, если мы от масштабов человеческой жизни перейдем к течению природных процессов на протяжении, скажем, нашей эры. Автору пришлось проработать огромное количество разнообразных источников, начиная от античных полулегендарных сведений и вплоть до записей мареографов в текущем столетии. Естественно, что число сообщений о набегании волн на берег (вне связи с метеорологическими явлениями) распределено на протяжении письменной истории неравномерно, их количество увеличивается к нашему времени. Это, как и в других подобных случаях, отражает только большее внимание к ним по мере развития науки и системы наблю-



Распределения выявленных случаев цунами в Черном и Азовском морях с начала нашей эры. Пунктиром отмечены менее достоверные цунами.

дения. Трудно сомневаться, что и теперь знания о цунами за пределами нашего столетия в рассматриваемых морях фрагментарны и нередко неопределенны. Но в составленном теперь каталоге цунами двух внутренних морей насчитывается 20 событий, что дает возможность судить о проявлении цунами в Черном море гораздо более полно, несмотря на недостаточную точность многих из обнаруженных данных.

Наименее информативными с точки зрения современных требований следует признать античные сведения. Таково, например, упоминание Плиния в его «Натуральной истории» о гибели приморских городов Пирра и Антисса в результате затопления их морем. Мы не знаем точного положения этих городов (скорее всего, они располагались у Керченского пролива), но можем допускать, что в их гибели повинно не только медленное затопление берегов в результате трансгрессии — наступления моря, но и быстрое опускание участков берега при землетрясениях, сопровождавшихся цунами. В Средиземном и других морях подобные примеры не единичны.

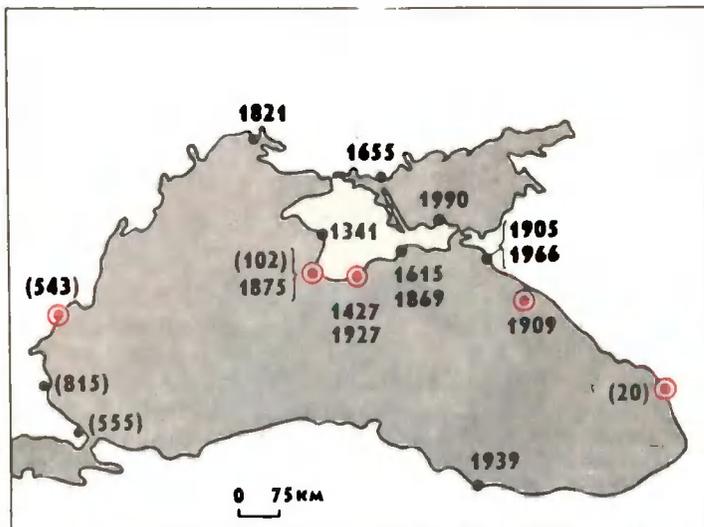
Более определенную информацию о цунами можно вывести из жития святого Климента, папы Римского. В письменных источниках о его мучениях в Херсонесе Таврическом (на берегу нынешней Севастопольской бухты), куда он был сослан за проповедь христианского учения, рассказывается, что после того, как непокорный проповедник был утоплен у берегов Херсонеса, море временно отступило от берега (от восточного окончания залива у Инкермана) на 3—4 км¹, что предполагает снижение уровня во всяком случае на несколько метров. Если считать, что в основе легенды лежит реальное природное событие (а иначе это «чудо» не поддается естественно-

научному объяснению), то необходимо признать в нем крупное цунами. Заметим, что цунами, хотя и небольшие, в Севастопольской и соседней с ней Балаклавской бухте отмечались при землетрясениях XIX и XX вв., достаточно определенно установлены и сильные землетрясения в море у Севастополя в последние несколько сотен лет. По преданию, святого Климента утопили 25 ноября 101 г., и последовавшее цунами можно считать первым сколь угодно определенно датированным событием рассматриваемого типа в Черном море.

Другое крупное возмущение морской поверхности в начале нашей эры относится к восточным берегам Черного моря. По целому ряду косвенных указаний, тогда от местного сильного землетрясения погиб город Диоскурия. Его остатки находят частично на дне современной Сухумской бухты. Без специальных геологических исследований трудно надежно установить, сопровождалось ли землетрясение и опускание участка побережья в Сухуми сильным цунами. Однако оно представляется весьма вероятным, если обратиться к аналогичным событиям в других районах. Первое относится к Ямайке, где в 1692 и 1909 гг. возникали сильные землетрясения, сопровождавшиеся опусканием береговых участков на несколько метров и цунами высотой до 16 м в первом случае и не менее нескольких метров — во втором.

Еще один пример относится к известному землетрясению 1862 г. на восточном побережье оз. Байкал с магнитудой 7,5, при котором обширная прибрежная равнина опустилась на 2,5 м с образованием залива Провал. На прилежащем берегу озера возникла волна цунами, которая быстро устремилась на берег и проникла вглубь на расстояние 2 км, но скоро вода возвратилась в прежние берега. Основываясь на этих примерах, мы можем полагать, что и землетрясение начала нашей эры в Сухум-

¹ Мучение Святого Климента // Зап. Одесского общества истории и древностей. 1877. Т. 10. С. 168.



Пункты, где отмечены цунами (цветные пунсоны — наиболее значимые случаи). Цифрами обозначены годы цунами, в скобках — менее достоверные данные.

ской бухте не обошлось без сильного цунами на прилежащем берегу. Об этом же говорит и древняя абхазская легенда, повествующая о городе чужеземцев, затопленном морем.

Но все же рассмотренные сведения можно было бы считать лишь предположениями о сильных цунами в Черном море, если бы мы не имели прямых письменных свидетельств из более близких к нам времен. Одно из них относится к 543 г., когда, согласно греческим источникам, «море вышло из своих пределов на три мили во Фракии, уничтожило много сел и усадеб, погубило бесчисленно людей и затем ушло обратно»². Согласно другому независимому сообщению, речь идет о местности около современных городов Варна и Балчик в Болгарии. Несомненно, здесь описано опустошительное цунами, которое связывают с крупным землетрясением с очагом под дном Черного моря восточнее Варны. Судя по дошедшим до нас описаниям и учитывая топографию берега, можно считать, что высота цунами составила не менее 4 м, скорее, еще больше. По 6-балльной шкале, которую применяют для оценки интенсивности цунами, это — 5-балльное событие. Между тем до недавнего времени считалось, что в Черном море цунами интенсивностью выше 2 баллов не происходят. Трудно допустить, что и другие весьма сильные, 9-балльные землетрясения у берегов Колхиды в VII, XI, XVIII вв., как и

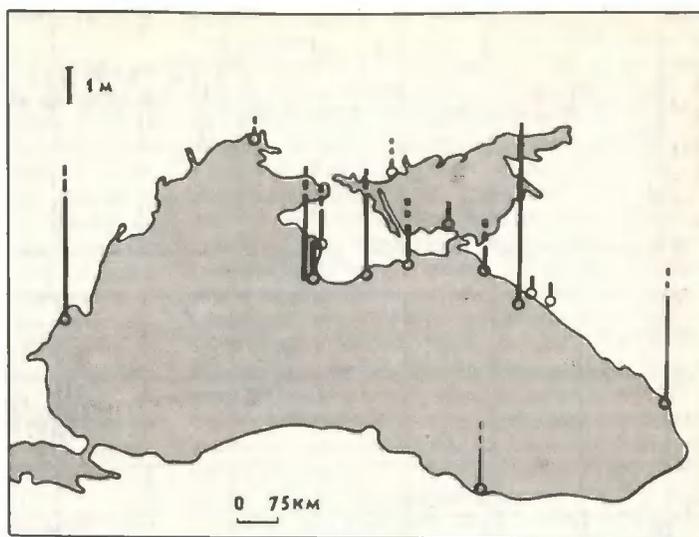
многие столь же крупные древние сейсмические события у берегов Анатолии и Фракии, не сопровождались сильными, разрушительными цунами.

Обратимся в этой связи к крупному землетрясению XV в., охватившему Южный берег Крыма, которое подтверждается необычным источником (во всяком случае для привыкших к определенности геофизиков). В литературе XVII и XIX вв. существуют лишь недостаточно конкретные сведения об этом событии, но и по ним ясно, что интенсивность этого землетрясения около 9 баллов (по-видимому, оно было подобно разразившемуся у Крымских берегов в сентябре 1927 г.). О цунами в этих источниках ничего не говорится. Но описание и землетрясения, и сопровождавшего его цунами мы неожиданно находим в местной татарской легенде. Вот интересующий нас отрывок: «И такие великие волны поднялись... у деревни Форос ... что несколько деревень было совсем смыто... Грозно бурлило море... высокие волны ходили по всему побережью...»³. Чтобы смыть несколько деревень, цунами должно было иметь высоту не менее 3—4 м. В 1927 г., когда Крым пострадал от двух сильных землетрясений, высота волн цунами, которые в это время регистрировались в нескольких пунктах не только визуально, но и с помощью самописцев, не превышала 1 м. Столь значительное различие в высоте и силе цунами

² Гръцки извори за българската история. IV. С. Болг. акад. наук. 1961. С. 33—44.

³ Никонов А. А. Землетрясения в сказаниях и легендах // Природа. 1983. № 11. С. 66—76.

Максимальная высота цунами в разных пунктах побережья. Пунктир — менее достоверные данные.



при сходных землетрясениях, по-видимому, объясняется разными механизмами очагов, энергией землетрясений и расстоянием эпицентра от берега.

В Азовском море цунами до недавнего времени были неизвестны вообще. И это не вызывало удивления потому, что, во-первых, считалось, что под его акваторией не возникают землетрясения (все Приазовье вообще считалось практически асейсмичной зоной), а во-вторых, потому, что само море очень мелководное (до 11—13 м), между тем как цунами присущи бассейнам глубоководным. Однако и тут, по-видимому, отсутствовала информация.

2 августа 1990 г. в одной из бухт северного берега Керченского п-ова наблюдалось внезапное набегание моря на берег. Погода была тихая, море совсем спокойное. Группа людей на пляже в 7 м от постоянной линии воды вдруг оказалась по щиколотку в воде, которая быстро, но тихо подошла и затем постепенно отхлынула. Другие люди, находившиеся в 300 м от них, вблизи скал у конца пляжа, примерно в 10 м от берега на глубине около 1,2 м, стоя в воде, ощутили давление на тело сильного течения воды с севера к берегу. При последующем обследовании бухты на ее обширном песчано-ракушечном пляже обнаружилась полоса свежего набега воды на расстоянии 8—10 м от нормальной береговой линии и на высоте около 40 см над ней.

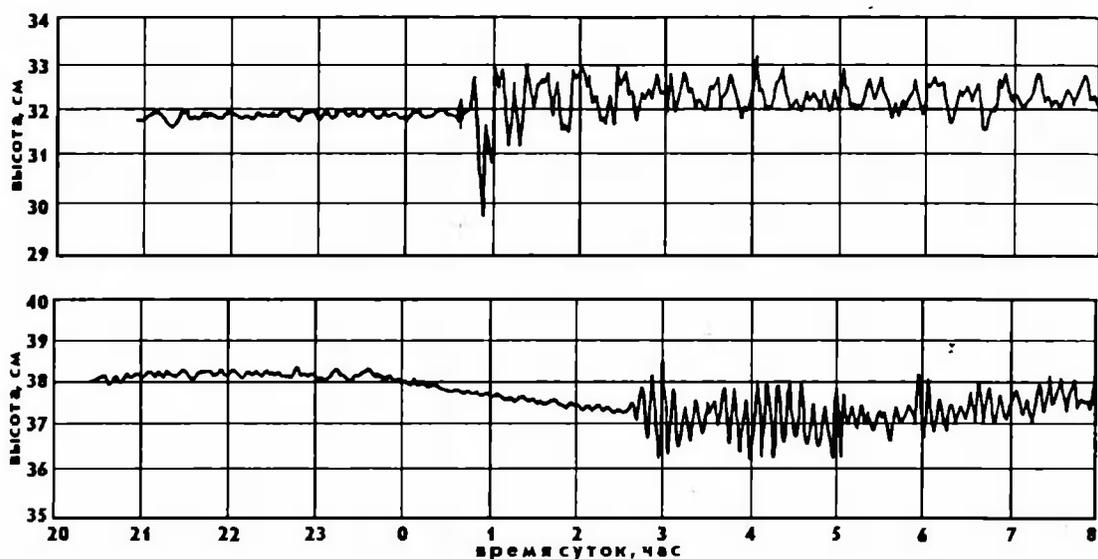
Никакими звуковыми или осязательными колебательными явлениями это не сопровождалось. Подземный гул слышался там накануне, около 22 час. со стороны Азовского

моря. Дважды, с промежутком в несколько минут, он шел как будто с запада или северо-запада, но ощутимыми колебаниями не сопровождался.

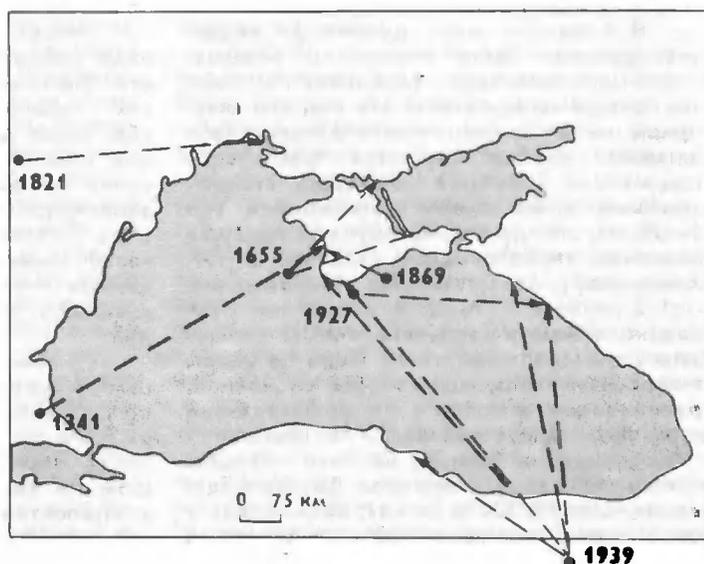
Несомненно, наблюдавшееся явление надо причислить к цунами. Но вот какова его причина? Подводное оползание или поток наносов на дне надо исключить, ибо море здесь мелководное и профиль дна очень пологий. Ощутимого землетрясения не было. И в каталоге региона не зарегистрировано землетрясения в этот день. Остается предположить, что в южной части Азовского моря возникло так называемое «тихое» землетрясение, сопровождавшееся резким локальным смещением дна.

В качестве исторического примера цунами в Азовском море, по-видимому, можно рассматривать сообщение известного турецкого путешественника Э. Челеби о разливе этого моря и соединении его с Сивашом на западном побережье, в частности у крепостей Геническ и Арабат. Указание на «разлитие» и последующее отступление воды в качестве курьезного случая, без упоминания о непогоде, буре, позволяет считать, что речь идет именно о цунами, а не о ветровом нагоне, тем более на западных берегах моря.

Наиболее вероятной причиной этого цунами мы считаем лишь недавно обнаруженное в литературных источниках очень сильное землетрясение с очагом в Черном море вблизи Севастополя в середине XVII в. Колебания от этого землетрясения несомненно должны были распростра-



Мареограммы, на которых записаны цунами, возникшие при землетрясении 11 сентября 1927 г. в Крыму: в Ялте (вверху), в Батуми (внизу).



Основные пути распространения известных цунами.

ниться по всему Крыму, и, конечно, волны с заметной силой могли дойти до западных берегов Азовского моря, где и вызвали столь необычное цунами. Его высота здесь, видимо, не превышала 0,5—1 м, но и этого могло оказаться вполне достаточно для затопления низменных песчаных берегов и соединения с Сивашом.

Таким образом, считать Азовское море свободным от цунами уже не приходится,

хотя вряд ли они здесь представляют реальную опасность.

Несмотря на небольшую интенсивность цунами в XX в. в Черном море, они могли выяснить ряд важных фактов. Так, удалось определить, что длина волн в открытом море составляла 45—100 км, скорость распространения цунами по акватории Черного моря от одного берега к другому колебалась от 120 до 400 км/ч, а время

добегая от источника до другого берега составляло от 10 до 100 мин.

Если проанализировать все ставшие теперь известными сведения о цунами в двух рассматриваемых морях, обнаруживается, что на протяжении 2000-летней истории они возникали на всех берегах Черного моря, хотя, вероятно, и не на всех участках. В Азовском море они известны на западном и южном берегах. Высота волн на берегах измерялась не только сантиметрами и десятками сантиметров, как это отмечено при некоторых землетрясениях текущего столетия, но составляла и по несколько метров, а в ряде случаев, вероятно, и существенно больше.

Для побережий Крыма собрано больше всего данных. Можно считать, что здесь значительные цунами могут возникать раз в столетие или даже дважды.

Как и в других морях, в двух рассматриваемых в целом выдерживается следующая закономерность: высота волн (и, соответственно, их разрушительная энергия) тем выше, чем больше энергия (магнитуда) породившего волны землетрясения. Есть в Черноморском бассейне (как и в других) по крайней мере две важные черты в возникновении цунами.

Во-первых, не все даже очень сильные землетрясения сопровождаются значительными возмущениями уровня поверхности. В качестве примера в Черном море можно указать на известное разрушительное землетрясение 1901 г. с подводным очагом у мыса Калиакра на болгарском берегу. С другой стороны, наряду с цунами, которые возникают на участках берега, ближайших к эпицентрам в акватории моря, волна нередко идет и через акваторию к удаленным (противоположным) берегам. Так, при землетрясениях 1927 г. у южных берегов Крыма цунами наблюдалось на северо-восточном берегу моря.

Несколько цунами от сильных землетрясений с очагами в глубине суши отмеча-

лось не только на ближайшем (или не на ближайшем), но и на удаленном берегу. Особенно яркий пример — Северо-Анатолийское землетрясение 26 декабря 1939 г., эпицентр которого был удален к югу от южного берега Черного моря на 200 км, а цунами, хотя и слабые, фиксировались на северном берегу. Установлено, что слабое цунами в Одессе на северном мелководье Черного моря возникло вследствие внутриконтинентального глубокофокусного Карпатского землетрясения 1802 г. Особый случай представляет цунами на западном берегу Азовского моря, по-видимому, в связи с сильным ($M \approx 6,5$) землетрясением у юго-западного берега Крыма в середине XVII в. Если это явление реально, то, как и в случае с землетрясением 1802 г., окажется, что цунами возникают в подобных случаях не за счет наката распространяющейся в акватории волны на берег, но за счет относительно слабых (интенсивность $\approx 5-6$) сейсмических колебаний самого этого берега, удаленного от источника колебаний на 200—400 км.

Наконец, отметим, что в Черном, как и в других морях (но не в Азовском — ввиду его мелководности), могут возникать цунами не только за счет сильных сейсмических явлений, но также, например, при подводных оползнях. С этой причиной скорее всего можно связывать, к примеру, цунами 1909 г. вблизи Кавказских берегов, когда высота волн доходила до 3—5 м.

Вероятно, именно подводные оползни в двух местах разорвали подводный кабель при вполне умеренном по силе землетрясении на Северо-Западном Кавказе в 1870 г. Широкое развитие турбидитов в приповерхностных отложениях моря у кавказских, крымских и болгарских берегов также подтверждает заключение о том, что здесь часто возникают подводные оползни.

Из всего изложенного должно быть ясно, что цунами, в том числе и разрушительные, для Черного моря не менее важны, чем другие катастрофические явления, обсуждаемые в литературе. Явная недооценка этого явления порождает успокоенность специалистов. Но именно долгий период относительного сейсмического спокойствия черноморских берегов должен внушить опасения и побудить исследователей уделить проблеме гораздо больше внимания.

⁴ Григораш З. К. Распространение цунами 1927 г. в Черном море // Тр. Морского гидрографического ин-та. 1959. Т. 18. С. 113—116; Григораш З. К., Корнева Л. А. Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // Океанология. 1969. Т. 9. Вып. 6. С. 988—995.

Радиоактивный йод и «чернобыльская болезнь»

Б. В. Карасев,
кандидат технических наук

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии
и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО)
Москва

ПРОШЛО более шести лет с момента Чернобыльской катастрофы, однако ее последствия становятся все более ощутимыми, как это, к сожалению, и предполагали многие, кто знакомы с внутренними механизмами этой трагедии. Из опыта проведения атомных испытаний известно, что основной угрозой радиоактивного воздействия на человека были радиоактивные осколки деления — изотопы йода, наиболее опасный из которых — йод-131, создающий большую часть дозы облучения. Попав в организм человека, йод концентрируется в щитовидной железе и выводится из нее только при приеме йодистых соединений.

Этот долгоживущий изотоп активно влияет на человека в течение примерно 1 мес после своего образования (период полураспада 8 дней). Йод существует в разных хорошо растворимых в воде химических формах, одна из которых (элементарный йод), будучи летучей, испаряется и попадает в организм через дыхательные пути. Защититься от нее можно только с помощью воздушных фильтров, например фильтров противозагасов с активированным углем.

Проблемы радиационных последствий Чернобыльской катастрофы обсуждались многими комиссиями, но большинство из них пришло к выводу о небольшой опасности облучения населения. Сегодня в оценке радиационных последствий большое место занимают карты, построенные по данным обследования местности, на них изолиниями

(линиями равной концентрации) выделены районы, загрязненные наиболее опасными радиоактивными веществами: цезием-137, стронцием-90, плутонием. Такие картографические материалы служат основанием для принятия тех или иных организационных мер, делаются выводы по ликвидации последствий аварии, которые обязывают власти действовать. К сожалению, данных о содержании йода-131 во время Чернобыльской аварии оказалось недостаточно для построения карт его концентрации на местности. Очевидно, несмотря на важность проблемы, наши службы не были подготовлены к мониторингу и профилактике йодного воздействия.

Комиссии радиационного обследования, в том числе и основная комиссия Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), практически не принимали во внимание опасность радиационного «йодного удара», считая его вклад относительно небольшим. Реально во многих районах, где выпали радиоактивные осадки, сложилась ситуация, в которой фактически не учитывалось воздействие йода-131. Так, для Новозыбковского района Брянской области, где радиоактивные выпадения наблюдались уже 27 апреля 1986 г., согласно отчету комиссии МАГАТЭ, только 6 и 7 мая населению было рекомендовано применение сухого молока для детей, 9 мая — защита и дезактивация помещений, а 17 мая введено снабжение детей сухим молоком и выдан населению йодистый калий. Ясно, что к этому времени йод-131 уже не представлял основной опасности.

Данные по радиоактивному йоду были засекречены, и только теперь можно попытаться включить их в оценку общего лучевого поражения.

Между тем, как этого и следовало ожидать, в печать начали проникать другие, ранее закрытые данные о последствиях радиационного воздействия Чернобыльской аварии. Так, согласно результатам первого независимого русско-американского изучения медицинских последствий Чернобыльской аварии, признаки острой лучевой болезни наблюдались в Брагинском и Наровлянском районах Гомельской области у большого количества жителей пострадавших районов. Характерная клиника соответствует, по мнению исследователей, дозам 100—400 рад. Отмечены случаи летальных исходов. Признаки хронической лучевой болезни наблюдались у половины детей из зоны радиационного загрязнения с уровнем более 40 Ки/км². В этих районах у взрослых и детей отмечались симптомы «чернобыльской болезни»: жалобы на астению, головную боль, сухость во рту, увеличение лимфоузлов и пр. Во всех районах увеличились случаи рака гортани, щитовидной железы...

Не останавливаясь на медицинских аспектах проблемы, приведем возможные объяснения наблюдаемых фактов на базе новых исследований радиационных выпадений. В первую очередь бросается в глаза пятнистость выпадений на всех рас-

стояниях от места катастрофы, причем радиоактивность некоторых пятен в десятки раз превосходит средние уровни. Так, нами были найдены пятна радиоактивного загрязнения цезием-137 (до 5—6 Ки/км²) на Смоленской атомной станции и Курской АЭС. Поскольку неравномерность выпадений — одна из важнейших их характеристик, на соответствующих картах необходимо указывать не только их уровни (числа Ки/км²), но и разбросы этих значений внутри площадей, ограниченных изолиниями. Еще большие разбросы наблюдаются в живых объектах (растения, животные и человек). Эти разбросы можно учесть, если принять во внимание, что они подчиняются одной и той же универсальной статистической закономерности: логарифмически-нормальному распределению, которое, по мнению автора, хорошо описывает многие природные закономерности в силу фундаментальных причин, вызывающих ее появление². Знание закона разбросов (или, как говорят физики, флуктуаций) радиоактивности позволяет делать предсказания о размере территорий, числе людей, полу-

чивших крайне высокие дозовые нагрузки, и т. д.

Наши коллеги из НПО «Тайфун» (г. Обнинск) проанализировали загрязнение йодом-131 после аварии на Чернобыльской АЭС и определили его дозовые нагрузки, исходя из средних значений выпадения содержания цезия-137 и их связи с содержанием радиоактивного йода³. Согласно этим расчетам, в зонах с содержанием цезия-137 40 Ки/км² суммарная доза йода-131 несколько превышает 26 бэр (или примерно 26 рентген, что более понятно многим читателям, интересующимся проблемой). Эта доза полностью соответствует временному нормативу 30 бэр, введенному Минздравом СССР в качестве максимальной дозовой нагрузки для населения загрязненных зон. Таким образом, расчеты формально лежат в пределах установленного норматива. Однако в этой работе не учтены возможные разбросы содержания йода в почвах, растениях и организме человека. Если принять, что разбросы содержания йода примерно такие же, как и цезия-137, которые измерены комиссией МАГАТЭ, и подчиняются логарифмически-нормальному распределению, то можно подсчитать, что около 2,5 % на-

селения в зонах с плотностью выпадений цезия-137 40 Ки/км² могло получить дозу примерно в 300 бэр!!! Отметим, что доза в 400 бэр считается смертельной для человека. Эти оценки, несмотря на их приближенность, объясняют наблюдаемые медиками массовые лучевые поражения населения после Чернобыльской катастрофы. Расчеты показывают необходимость переоценки многих выводов и заставляют принять, хотя и с опозданием, ряд мер по ликвидации последствий, угрожающих многим жителям пострадавших зон.

Очевидно, что и в районах возможных аварий ядерных объектов (атомных станций, судов с ядерными реакторами и т. д.) должны быть предусмотрены мероприятия по ослаблению «йодного удара»: созданы запасы йодида калия, продумана система мер по уменьшению поступления йода в организм человека, запланирована эвакуация населения в аварийных случаях.

Радиоактивный йод уже внес лепту в облучение населения. Нагрузки, добавляемые сейчас другими изотопами, относительно невелики, но они накладываются на мощные начальные дозы. Как это нужно учитывать? Проблемы, проблемы, проблемы... Научные и финансовые мощности для их решения необходимо существенно увеличить.

² Карасев Б. В. Статистический подход к изучению природы и некоторых закономерностей распределения вещества Земли // Пути познания Земли. М., 1971. С. 131—152.

³ Махонько К. П. и др. // Атомная энергия. 1992. Т. 72. Вып. 4.

Природная и экспериментальная гибридикация ЖИВОТНЫХ

Д. В. Терновский,
доктор биологических наук

Ю. Г. Терновская,
кандидат биологических наук
Биологический институт СО РАН
Новосибирск

ЧЕТЫРЕ тысячелетия отделяют нас от истоков гибридикации, когда человек от осла и кобылы вывел первого гибрида — мула. Он отличался от своих родителей повышенной жизнеспособностью, выносливостью, силой, долголетием, другими полезными качествами и, к сожалению, почти полным бесплодием. С тех пор популярность гибридикации стала расти, ее используют для получения высокопродуктивных и экзотических пород домашних животных.

Однако гибридикация — скрещивание разнородных в генетическом отношении организмов — имеет не только прикладное значение. Изучение этого биологического процесса открывает перед исследователями широкое поле деятельности для решения фундаментальных проблем, связанных с эволюционным учением, происхождением, формообразованием, концепцией вида.

Появление гибридов наблюдается во всех классах позвоночных. Более 300 гибридных комбинаций зарегистрировано в отрядах птиц: куриных, гусиных, голенастых, чайковых, хищных, дятловых, воробьиных. «У млекопитающих отдаленные гибриды получены в 27 семействах из 29, при этом межродовых гибридов 52 и межвидовых — 259. Эти гибриды в большинстве своем жизнеспособны только на ранних стадиях эмбриогенеза, а в ряде случаев выживают и до половозрелого состояния»¹.

Перечень гибридов постепенно пополняется в результате содержания и разведения животных в питомниках, звероводческих хозяйствах, заповедниках, зоопарках. Известны случаи рождения гибридов от спариваний зубра с бизоном, овец с их дикими сородичами, благородного оленя с пятнистым, туркменского кулана с зеброй Гранта, тигра со львом, койота с шакалом, лисицы с песцом, домашних собак с волками, гамадрила с финксом, зайца русака с беляком. Существуют гибриды и среди китов. Например, дельфин афалина (семейство зубатых китов), ставший популярной кинозвездой одного из океанариумов, начал не только плодиться в неволе, но и спариваться с дельфинами других видов.

Мы занимаемся исследованиями ценнейших пушных зверей из семейства куньих (*Mustelidae*). В отряде хищных млекопитающих это одно из широко распространенных, богатых видами (71) и жизненными формами (наземными, полуночными, полуводными, полудревесными) семейств. Из 18 видов, встречающихся в России, 16 — составили нашу живую коллекцию. Зверей мы отлавливали в разных регионах страны — от западной границы до Сахалина. Условия экспериментальной базы Биологического института СО РАН, где проводились опыты и наблюдения в вольерах, максимально приближены к естественным. Она расположена в лесном массиве новосибирского Академгородка. О жизненном благополучии зверей, содержащихся в неволе, всегда можно судить по тому, как они размножаются. Известно, например, что в природе максимальный приплод солонога не пре-

вышает восьми детенышей. В наших вольерах самки рожали до 13 детенышей, а при повторном целенаправленном покрытии за два приплода в год одна самка принесла 22 малыша (9 и 13). В лабораторные популяции хищников вошли даже те виды, которые считались трудноразводимыми, — горностай, ласка, европейская норка и др.²

Литературные сведения о гибридах куньих фрагментарны, противоречивы, неправдоподобны, а порой ошибочны. В мировой сводке гибридов млекопитающих А. П. Грей ограничивается приведением восьми вариантов скрещиваний в этом семействе³. Только три из них не вызывают сомнения: соболь (*Martes zibellina*) и лесная куница (*M. martes*), хорек степной, или светлый (*Mustela eversmanni*), и фуру (альбинос черного хорька, одомашненный), хорек черный (*M. putorius*) и фуру. Сообщение о гибели новорожденных у лесной куницы, покрытой каменной куницей (*Martes foinea*), нуждается в проверке. Беременность фуры, оплодотворенной американской норкой (*Mustela vison*), закончилась гибелью эмбрионов. Остальные три варианта, как нам кажется, основаны на нереальных предположениях о спариваниях между фуру и лаской (*M. nivalis*), фуру и горностаем (*M. erminea*), куницей лесной и хорьком черным.

О гибридах, встречающихся в дикой природе, нельзя судить уверенно, так как сведения о них весьма ограничены и не содержат данных

© Терновский Д. В., Терновская Ю. Г. Природная и экспериментальная гибридикация животных.

¹ Лобашев М. Е. Генетика. Л., 1967. С. 492.

² Терновский Д. В. Биология куницеобразных (*Mustelidae*). Новосибирск, 1977.

³ Gray A. P. Mammalian hybrids. A check-list with bibliography. Edinburgh, 1972. P. 262.

об их происхождении, размножении, росте и развитии. В 1889 г. в Московском уезде поймали зверька, которого систематик С. И. Огнев определил как помесь хорька и норки⁴. Зоологи И. М. Залесский и М. Д. Зверев сообщили, что в Барабинской лесостепи в угодьях, где обитают бок о бок колонки и светлый хорек, отловили трех гигантских колонков с признаками хорька⁵. В России встречается естественный гибрид со-

⁴ Огнев С. И. Звери Восточной Европы и Северной Азии. М.—Л., 1931. Т. 2.

Залесский И. М. Случаи ненормальных размеров и окраски у колонков из Западной Сибири // Изв. Сибирской Краевой станции защиты растений от вредителей. Новосибирск, 1930. С. 83—84; Зверев М. Д. Материалы по биологии и сельскохозяйственному значению в Сибири хорька и других мелких хищников из семейства Mustelidae. // Труды по защите растений в Сибири. Новосибирск, 1931. Т. 1(18). С. 5—46.



Спаривание хорька с норкой европейской.
Здесь и далее фото авторов

Хонорки и гибридные хорьки следуют за человеком.



боля и лесной куницы — кидас. Реальность его существования подтверждена экспериментально в Ростовском зоопарке, Пушкинском зверосовхозе под Москвой и на Кировской биостанции. Приведенными примерами ограничиваются известные нам фактически публикации об этом редком явлении в семействе куньих.

Наши исследования по получению их гибридов наряду с неудачами часто оканчивались успехом и позволили раскрыть новые закономерности гибридизации. Много времени и усилий ушло на установление оптимальных сроков спаривания, разработку метода ранней диагностики беременности, подбор соответствующих половых партнеров. В отдельных случаях практиковали совместное парное или групповое воспитание молодняка разных видов зверей для устранения причин, препятствующих их спариванию.

Акклиматизация американской норки вызвала острую дискуссию среди биологов и охотоведов нашей страны⁶. Естественно, нельзя было оставаться в стороне от этого важного государственного мероприятия, непосредственно связанного с рациональным использованием и охраной таких ценных пушных зверей, как американская и аборигенная европейская (*Mustela lutreola*) норки. Нам понадобилось семь опытов, чтобы впервые добиться спаривания между этими норками как в прямом (самец — американская норка, самка — европейская норка), так и в реципрокном (самец — европейская норка, самка — американская норка) варианте. Во всех случаях самки оказывались беременными, но эмбрионы непременно рассасывались. Гибель зародышей, возможно, была связана с резким отличием в кариотипе родителей: диплоидный набор хромосом у американской норки — 30, а у европейской — 38. Генетическая разобщенность отразилась и на их биологической несовместимости,

ставшей редким примером вытеснения аборигена чужестранцем. Повсюду, где в угодьях появлялась широко и быстро расселяющаяся американская норка, вскоре исчезала местная.

В целях сохранения европейской норки на экспериментальной базе института был создан первый и единственный функционирующий питомник для сбережения и разведения этого уникального пушного зверя, исчезающего из мировой фауны. Отсюда 388 племенных зверьков были вывезены на Курильские о-ва (Кунашир и Итуруп), где их акклиматизация происходит успешно⁷. Дополнительно выпустили еще 108 особей на горные реки Памиро-Алая в Таджикистане. Более 200 племенных животных передали в филиалы питомника, зверосовхозы и зоопарки страны.

Помимо европейской норки мы спаривали хорьков (светлого, черного и фуру) и колонка — животных, принадлежащих трем самостоятельным родам в семействе Mustelidae. Из 119 вариантов гибридизации 15 — были внутривидовыми, 40 — межвидовыми и 64 — межродовыми. Одни из гибридов встречаются в природе, а другие можно получить только в неволе (например, с участием фуру).

О фуру следует сказать особо, так как этот красноглазый хорек альбинос до недавнего времени в нашей стране был мало известен даже зоологам. Это тот самый хорек фуру, который знаком широкой публике по знаменитой картине Леонардо да Винчи «Дама с горностаем» (XV в.), где на руках у фаворитки миланского двора, юной Галлериани, изображен с документальной точностью не горноста, а именно хорек фуру.

Существует несколько гипотез о происхождении и систематическом положении этого зверя. Но сравнительный кариологический анализ в соче-

тении с особенностями размножения, развития, поведения и другими биологическими показателями убедительно подтвердил, что фуру — альбиностическая форма черного хорька. В 1971 г. пару фуру из Пражского зоопарка передали нам Б. Карл. С этого времени началось разведение в России этих зверьков. Этого хорька, одомашненного с древности, мы спаривали с диким черным. Первую зиму они прожили в теплом помещении, а затем, когда зверьки стали размножаться, их переселили в вольеры под открытым небом. Результаты превзошли все ожидания и опровергли сомнения скептиков, полагающих, что измененные домашним содержанием «южане» не смогут существовать в суровом сибирском климате. Фурята, родившиеся и воспитанные в новых условиях, к зиме обросли длинным густым волосатым покровом и перенесли самые лютые морозы.

Прямой вариант скрещивания (самец — дикий черный хорек, самка — фуру) дал высокую плодовитость (в среднем 10 детенышей) и выживаемость потомства. У гибридов первого поколения преобладала окраска черного хорька, но остевой волос не имел резкого отличия по длине и равномерно покрывал мягкую подпушь, т. е. отсутствовала нежелательная «гривастость» отцовской формы. Детеныши были крупнее своих родителей благодаря эффекту гетерозиса (проявлению «гибридной мощности»). Особенно сильно гетерозис выражен у самцов. Самые крупные из них весили до 3300 г, притом что масса черного хорька — 2650 г, а фуру — 2280. При дальнейших скрещиваниях во втором, в третьем и последующих поколениях эффект гетерозиса снижился. Заметно было расщепление в окраске меха в соответствии с законами Менделя. В реципрокном варианте скрещивания (самец — фуру, самка — черный хорек) плодовитость была вдвое ниже (в среднем пять детенышей). В обоих вариантах сказалось материнское влияние на плодовитость.

В межвидовую гибридизацию (прямой и реципрокный варианты) мы включили также

⁶ Подробнее см.: Рожнов В. В. Европейская норка — естественно вымирающий вид? // Природа. 1992. № 1. С. 56—60.

⁷ Этому успеху, однако, радуются не все зоологи, так как последствия акклиматизации европейской норки совершенно непредсказуемы.



Родители кохосика.

Четырехкилограммовый кофутер в шесть раз тяжелее отца.

диких светлых и черного хорьков рода *Putorius*⁸. Эти два вида, несмотря на свойственную каждому из них пищевую специализацию и распространение в различных географических регионах, имеют значительную территорию совместного обитания. Совпадающий участок ареала охватывает примерно 43 % площади, заселенной черным хорьком, или 20 % области распространения светлого хорька. В районах совместного обитания гибриды этих хищников встречаются редко. Точного описания фенотипа и генотипа таких гибридов в литературе мы не встречали, ничего не было известно и об их жизнеспособности и фертильности.

В прямом варианте сам-



ку черного хорька спаривали с хорьком светлым. На 18-й день, чтобы убедиться, успешно ли прошло оплодотворение, самку прооперировали и в рогах

матки обнаружили пять эмбрионов (два в правом и три в левом). Правый рог ампутировали для гистологического исследования, левый был оставлен.

⁸ Терновский Д. В., Терновская Ю. Г. // Охота и охотничье хоз-во. 1987. № 5. С. 20—21.

Роды наступили на 41-й день после покрытия, и на свет появились самец и две самки. Такой срок беременности типичен для черного хорька, у светлого он короче (37—39 дней). На следующий год прооперированную самку покрыл другой светлый хорек, через 41 день она родила двух самок. Для проверки фертильности испытали гибридного самца и двух самок. Самец за четыре года покрыл восемь самок, из них по одной особи светлого и черного хорька, двух гибридных и двух фуру. Все самки принесли потомство от четырех до десяти (в сумме 55) малышей. Успешно прошла проверка и двух гибридных самок, они родили по семь детенышей.

В реципрокном варианте у самок светлого хорька от спаривания с черным родились один и три детеныша, что нетипично для этого высокоплодового вида. Изменился и срок беременности светлого хорька, который продолжался 40 дней. Фертильность реципрокных гибридов мы пока не проверяли.

К концу осени, примерно в трехмесячном возрасте, молодые гибридные хорьки первого поколения были очень похожи на взрослых светлых хорьков (даже опытные систематики не различали их по фенотипу). Только при внимательном сравнении удавалось уловить отдельные детали в распределении черных волос на хвосте и в узоре маски на конце мордочки. Молодые зверьки были похожи и на гибридов фуру и светлого хорька первого поколения и имели также 39 хромосом.

Дикие светлые хорьки, выращенные в неволе, более дружелюбны и лучше приручаются, чем черные. Однако большинство гибридов, происходящих от диких хорьков, трусливы или даже злобно-трусливы. При появлении человека самки прячут детенышей и убегают в укрытие. Гибриды, полученные при спаривании с фуру, дружелюбно настроены к человеку, с ними легко проводить эксперименты и наблюдать в лабораторных и полевых условиях.

В межродовую гибридизацию мы включили колонка, хорьков и европейскую норку,

животных, несхожих не только внешне и образом жизни, но и систематическим положением.

В литературе некоторые природные гибриды, независимо от их происхождения, часто называют тумакками, в частности особи с признаками светлого и черного хорьков, черного хорька и европейской норки или зайцев русака и белаяка. И. И. Иванов и Г. Поль предложили другую систему названий гибридов, которая, исключая путаницу, обеспечивает единообразие в их наименовании и, кроме того, дает ясное представление о родителях гибридов и их половой принадлежности⁹.

Мы приняли за основу эту систему и назвали межродовых гибридов по начальным слогам их родителей с окончанием «-ик» — хонорик (отец — хорек, мать — норка европейская). Кохосик произошел от скрещивания самца колонка с хорьком светлым. Экспериментальный аналог — хонорика — фунотер — родился от фуру, покрывшего норку европейскую. Два первых слога в его названии взяты от родителей, а третий — от фамилии его создателей — Терновские. По этой же системе получил название хонотер (отец — гибридный хорек с участием фуру, мать — норка европейская). В наименовании сложных гибридов между слогами родителей ставится дефис, например, кофу-нотер (отец — кофутер, мать — норка европейская). Этот зверек объединяет представителей трех родов — колонка, хорька и норки.

Первый межродовой гибрид, хонорик, родился 20 мая 1978 г. отец — межвидовой гибридный хорек третьего поколения, произошедший от черного и светлого хорьков, мать — норка европейская. Самка европейской норки с младенчества воспитывалась в семье гибридного хорька — будущего полового партнера. В возрасте 10,5 мес. она была покрыта своим молочным братом и через 41 день родила четырех самок хонори-

ков розовато-фиолетового и темно-фиолетового цвета, покрытых эмбриональным пухом, беспомощных, слепых, со свернутыми пополам ушными раковинами, плотно прижатыми к голове. Средняя их масса составляла $8,2 \pm 0,75$ г, длина тела — $74,5 \pm 1,91$ мм.

На 30-й день хонорики начали открывать глаза, а на 35-й зверьки полностью прозрели. Еще через пять дней у них хорошо проявился врожденный рефлекс следования за матерью, даже если ее заменяли различными двигающимися предметами и человеком. Внешне своеобразие хонориков было широко заметно: черная маска на голове контрастировала с более светлыми ушами, тогда как у норчат маска и уши одинакового цвета, а у детенышей хорька между глазами и ушами выделяется светлое расплывчатое пятно. Над глазом у хонорика слабо выделяется светлая бородавка, которая у хорьчонка значительно крупнее и ярче, а у норчонка — еле заметна. В 40-дневном возрасте по размеру и рисунку белых пятен на конце морды он стал занимать промежуточное положение между хорьком и норкой. А затем все больше стал напоминать мать — черная блестящая ость покрыла густую шелковистую подпушь. От норки они унаследовали способность плавать, от хорьков — умение рыть норы. Взрослые хонорики оказались немного крупнее европейских норок.

Самая удивительная биологическая особенность самок хонорика — их фертильность, которая, как принято считать, отсутствует у межродовых гибридов. Наши самки-хонорики, покрытые хорьками, приносят детенышей два раза в год. Плодовитость потомков, изученная до пятого поколения, значительно менялась, сильно варьировали также окраска и качество волосяного покрова гибридов. В отличие от самок, гибридные самцы первого поколения (хонорики, фунотеры и хонотеры), к сожалению, бесплодны.

Сообщение в печати о появлении нового зверька с очень красивой шкуркой — хонорика — вызвало большой интерес.

⁹ Иванов И. И., Поль Г. К вопросу о номенклатуре гибридов // Ежегодник Зоологического музея Императорской Академии наук. СПб., 1911. Т. 16. С. 34—37.



Сорокадневные детеныши норки европейской, хонорика, хорька черного (слева направо).

Многочисленные предприниматели стали выдавать за хонориков разводимых в стране гибридных хорьков.

Кохосика — гибрида, существующего и в природе, — мы получили в экспериментальных условиях. Брачный период у светлого хорька начинается раньше, чем у колонка. Чтобы совместить сроки спаривания половых партнеров, эстральных самок светлых хорьков содержали в изоляции до появления сперматогенеза у колонка. Беременность светлого хорька продолжалась 35—36 дней, т. е. на несколько дней меньше, чем обычно. Видимо, сказалось отцовское влияние: беременность у колонка длится 32—35 дней.

Всего родилось 14 кохосиков (7 самцов и 7 самок), способных участвовать в размножении. Самки приносили до

15 детенышей, а некоторые давали по два приплода в год. Самцы успешно покрывали кохосиков, светлых хорьков и фуру.

Взрослые кохосики первого поколения были похожи на гигантских колонков, но отличались от них темной окраской конечностей и кончика хвоста, а также более светлой подпушью. Фенотип кохосиков второго поколения характеризовался разнообразием хорькового, колонкового и промежуточного типа. Разными они были и по размеру.

У экспериментального гибрида — кофутера (отец — колонка, мать — фура) зарегистрирован максимальный эффект гетерозиса: самцы в шесть раз больше колонков. Роскошный зимний мех кофутеров имел оригинальную окраску: по хребту выделялась табачно-бурая полоса, на боках мех был оранжевого цвета. От колонка они отличались черноватыми конечностями и кончиком хвоста. И самки, и самцы оказались фертильными, причем самки

приносили до 13 детенышей.

Самки европейских норок, покрытые кофутером, рожали кофу-нотеров. Такой гибрид объединял в себе генотипы колонка, фуры и норки европейской. Красивый мех кофу-нотеров напоминает мех выдры, но с золотистым отливом и характерной для норки шелковистостью. Зимой он становится табачно-бурым, темно-каштановым или темно-коричневым. Самцы и самки кофу-нотеров способны спариваться с другими зверьками из семейства куньих, и мы надеемся получить новые гибриды.

Исследования гибридизации в семействе куньих представляют несомненный научный интерес, позволяют уточнить систематический статус и выявить генетическую близость видов. Опыт и результаты наших экспериментов свидетельствуют, что в природном генофонде таятся скрытые резервы для формообразования и получения новых ценных, высокопродуктивных пушных зверей.

Органические соединения в реках Москвы

Л. И. Вирин, Б. А. Суворов, В. П. Торьяни, Л. И. Хейфец
Москва

ЖАРКИЙ летний день на реке. Хочется пить. Зачерпнешь ладонью речную воду и задумаешься — можно ли, не опасно ли? Вопрос закономерен. Сегодня на него должны ответить трое: микробиолог — есть ли в реке болезнетворные бактерии и сколько их; неорганик — есть ли ионы тяжелых металлов, нитраты, нитриты, радионуклиды и т. д.; органик — есть ли в чистой на вид воде растворенные органические вещества, и насколько они опасны.

Первые двое ответят уверенно — у них есть и методики и приборы. Третий, если он честен, замнется с ответом. Тут нужен универсальный экологический мониторинг органических загрязнений. А его в России пока нет.

Есть метод ХПК — химически поглощаемого кислорода, грубо дающий сумму всей органики — и вредной и безвредной. Есть сотни частных методик: анализ фенолов, полиароматических, хлорорганических соединений и др.¹ Каждая методика может выявить соединения лишь одного класса, а классов много.

В Европе универсальный экологический мониторинг позволяет обнаружить и определить в воде любые органические загрязнения, независимо от их структуры.

Почему же его нет в России? Тут есть две причины. Первая: метод сложен и требует универсальных, эффективных методов концентрирования примесей, высокоэффективной капиллярной хроматографии на короткой колонке с хорошо смоченной фазой, способной пропустить и разделить практически

все загрязнения, масс-спектрального детектора для их идентификации, а также ЭВМ с мощной базой данных и поисковой программой для обработки результатов.

Вторая причина — наша история. В Советском Союзе всем заправляли министерства. А их интересовали в лучшем случае анализы своих сточных вод. «Здоровье людей» — это был лозунг для дураков. Беда не только в том, что на экологические исследования не оставалось (и теперь не остается) денег. Главное, что охрану природы свели к писанию бесчисленных казенных бумаг. А ведь при отсутствии настоящего контроля бумаги-то получаются липовые.

Вот акционерное общество «Экология Москвы» и занялось проблемой экологического мониторинга органических загрязнений в природных водах. Честно говоря, это совсем не просто. Отечественные приборы, материалы, реактивы далеко не эквивалентны нормальным «западным». Правда, удалось купить хорошую капиллярную колонку «Hewlett-Packard». Это позволяет нам анализировать органику в диапазоне температур кипения от 90 до 450 °С (для выявления легколетучих загрязнений необходим другой метод концентрирования). Остальное восполнили «российской смекалкой».

Результаты тем не менее получили интересные. Даже при уровне чувствительности 10 мкг/л в реках Москве и Яузе удалось обнаружить и идентифицировать более 60 органических загрязнителей почти 20 классов. И какие неожиданные соединения там оказались! Диву даешься.

Во всех пробах присутствовали парафины и олефины нефти (содержащие в основном 14—25 атомов углерода), «мазутная фракция». Это естественно, ведь более легкие соединения испаряются. Везде обнаружен и дибутилфталат — это

тоже понятно: слишком много старой резины и пластмасс лежит на дне, а дибутилфталат — самый массовый пластификатор.

Удивительно то, что во всех пробах, кроме отобранных на входах рек в Москву, основные загрязнения — хлор- и нитроароматические соединения и фенолы. Ну, хлорбензолы можно было ожидать. Но какой «букет» нитроароматических соединений! А ведь все это высокотоксичные вещества, и их концентрации местами в сотни раз превышают допустимые. А по токсичности некоторых из них, таких как нитрофенилэтанон, хлорнитротолуол, нет даже данных, возможно, они крайне ядовиты — этого мы не знаем. Откуда они появились в речной воде? Скорее всего, такой «букет» загрязнений мог появиться в результате синтеза красителей или лекарств на соответствующих производствах. Странно и то, что эти соединения обнаружены и в р. Москве у Воробьевых гор, и в Яузе. Правда, французы, исследуя загрязнения в р. Уазе, обнаружили похожую хлорнитроароматику.

В пробе, отобранной 5 мая прошлого года из Москвы-реки, оказалась группа очень любопытных соединений: сесквитерпены и их гидроксипроизводные. Вероятно, мы поймали залповый сброс резинового производства, так как сесквитерпены образуются при вулканизации изопреновых каучуков.

В воде Москвы-реки регулярно появляется трилолиламин, о токсичности которого нам тоже ничего неизвестно.

Сравнительно высоки концентрации тяжелых фталатов.

Мы не имеем права пренебрегать ни одним из обнаруженных соединений, пока не убедимся в их безвредности. Хотелось бы надеяться, что люди, отвечающие за нашу с вами безопасность, не проигнорируют сей «улов» и примут необходимые меры.

© Вирин Л. И., Суворов Б. А., Торьяни В. П., Хейфец Л. И. Органические соединения в реках Москвы.

¹ Терлецкая А. В. // Химия и технология воды. 1988. Т. 10. С. 14—37; Т. 13. С. 24—61.

Органические загрязнители (мг/л) в Москве-реке и Яузе

Соединение	ПДК, мг/л	Москва-река					Яуза							
		Точки и даты отбора проб												
		А		Б			В	Г	Д		Е			
		1.06	5.05	27.05	1.06	30.06	1.06	24.04	24.04	1.02	2.03	17.03	24.03	24.04
Толуол	0.5	0.04				+								
Гептанол						+		+						
Этилбензол	0.01	0.07				0.04								
Ксилол*	0.05	1				0.5								
Метилэтилбензол*		+				+								
Пропилбензол	0.2	+												
Циклогексанол						+		+	+		+	+		
Фенол	0.001		0.01	+	+	+	0.01	0.4					+	
Дихлорбензол*	0.002		+	+	+	0.6		0.4	+	+	0.5	0.3	0.7	
Нитробензол	0.2												0.7	
Трихлорбензол*	0.03		0.03	0.2	+	0.4			+	+	0.6	0.8		
Нитротолуол	0.02								+	+	3.5	6.5		
Бензойная кислота										+		+		
Хлорнитробензол	0.05		0.1	+	0.1	+	0.2		6				1.5	
Хлорнитротолуол			0.3	1.2	+	2								
Дихлорнитробензол	0.1									+	+	3	10	0.06
Нитрофенилэтанол			0.8	1.3		1.3	<.01							1.6
Нитрофенол	0.06										+	+	+	
Хлордекан									+					+
Сесквитерпен*		+												
Гидроксисесквитерпен*		0.12												
Бис(хлорметил)тетрахлорбензол					+									
Дибутилфталат	0.2	0.04	0.07	0.14	0.9	+	0.6	+	+	+	+	+	+	0.25
Триэтиламин			+	0.1	0.8	+	0.7							
Диоктилфталат*	1	+	+		+	+	0.3		+			+	+	+
Октилдецилфталат*			+	+		+	+							

Примечания. Точки отбора проб в районе: А – Щукина, Б – Воробьевых гор, В – м. "Коломенская", Г – ВДНХ, Д – м. "Преображенская площадь", Е – Курского вокзала, за плотинной; + – загрязнение отмечено, но концентрация не определена; * – присутствуют по крайней мере два изомера; "нефтяные" углеводороды не включены в таблицу.

Первые данные с ускорителя «Гера»

С. П. Баранов,

кандидат физико-математических наук

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
Москва

ИЗВЕСТНО, что большинство так называемых элементарных частиц в действительности не элементарны, а обладают довольно сложной структурой; ее изучение — одно из важнейших направлений физики высоких энергий.

Разгоняя частицы в ускорителях до достаточно высоких энергий и сталкивая их друг с другом, физики по результатам взаимодействия получают возможность судить о структуре исследуемого объекта. При этом каждая из сталкивающихся частиц выступает по отношению к другой как пробная. Чем выше энергия пробной частицы, т. е. чем меньше длина ее волны, тем более мелкие детали структуры можно различить с ее помощью. Разрешающая способность количественно характеризуется величиной Q^2 — квадратом переданного при взаимодействии четырехмерного импульса.

Сравнительно хорошее описание экспериментальных данных, относящихся к процессам с участием адронов (сильновзаимодействующих частиц) при высоких энергиях, удается получить в рамках так называемой партонной модели, согласно которой адроны можно представить в виде совокупности независимых точечных объектов — партонов (от англ. part — часть). В роли партонов, как установлено многочисленными экспериментами, выступают кварки и глюоны. Изучение структуры элементарной частицы при этом сводится к установлению функций распределения в ней партонов, т. е. плотности вероятности того, что партон определенного сорта имеет данное значение импульса. Функцию распределения приня-

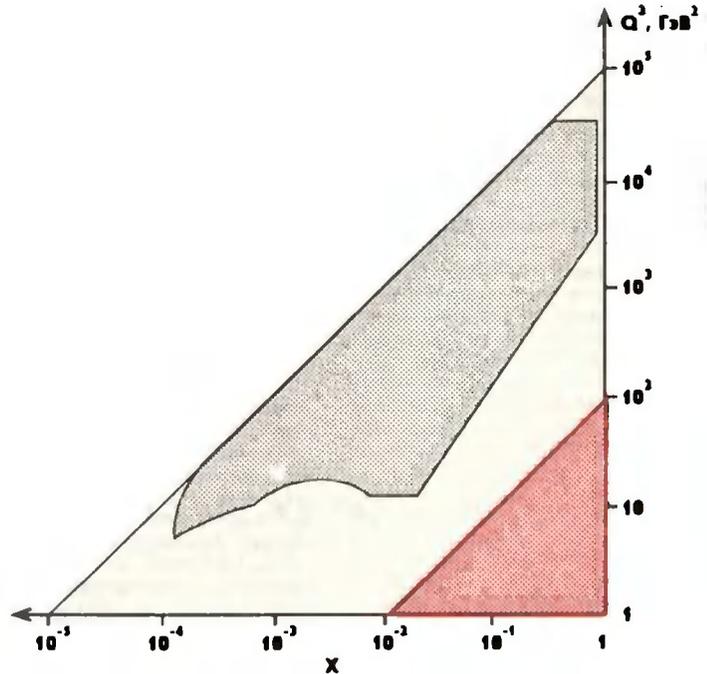


Рис. 1. Область кинематических переменных x и Q^2 , доступная для исследования на ускорителе «Гера» (заштрихована). Она гораздо шире области, исследованной на ранее построенных ускорителях (показана цветом).

то обозначать $F_i(x)$, где под x понимается отношение импульса партона i -го типа к полному импульсу адрона.

Помимо изучения структуры частиц (т. е. функций распределения) самостоятельный интерес представляет исследование взаимодействий партонов, входящих в состав разных частиц, друг с другом. Выступающие в роли партонов фундаментальные объекты теории — кварки, глюоны и имеющий одинаковое с ними значение фотон — подчиняются уравнениям, выражающим основополагаю-

щие принципы современных физических теорий (теории электрослабых взаимодействий, квантовой хромодинамики). Именно в таких «элементарных» процессах сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными позволяет наиболее прямым способом проверить справедливость основных уравнений.

Наконец, отдельной задачей физики высоких энергий остается поиск новых частиц.

На ускорителе «Гера» (HERA)¹ в распоряжении физи-

¹ HERA (Hadron-Electron Ring Accelerator) — адрон-электронный кольцевой ускоритель, построенный в лаборатории «Дэзи» (DESY) в Гамбурге (Германия). Подробнее об этом ускорителе см.: Арутюнян И. Н. «Дэзи» на Эльбе // Природа. 1993. № 4. С. 48—61.

ков имеются два пучка частиц: электронов с энергией $E_e = 30$ ГэВ и протонов с $E_p = 820$ ГэВ, сталкивающиеся «лоб в лоб». Энергия столкновения в системе центра масс составляет $\sqrt{s} = 314$ ГэВ. В настоящее время это рекордная величина среди коллайдеров электрон-протонного типа.

Реальные возможности исследования различных процессов зависят также от другой характеристики ускорителя — так называемой светимости, связанной с качеством формирования пучков и их интенсивностью. Светимость определяется количеством событий (данного типа), происходящих в единицу времени. Проектное значение светимости «Геры» равно $1,5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Это означает, что например, процессы с сечением (вероятностью) 10^{-36} см^2 будут наблюдаться на ускорителе примерно раз в сутки. Проектная светимость «Геры» будет достигнута летом 1994 г., но уже в сеансах со светимостью в 100 раз (1992 г.) и в 10 раз (1993 г.) меньшей были получены важные физические результаты. О них и пойдет речь ниже.

² Ускорители, в которых пучки частиц сталкиваются друг с другом (а не с неподвижной мишенью), называют коллайдерами (от англ. to collide — сталкиваться).

ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНА С ПРОТОНОМ. ГЛУБОКО-НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ

Взаимодействие электрона с протоном в подавляющем большинстве случаев происходит путем обмена фотоном — в этом и состоит основная особенность такого типа коллайдеров. Из трех фундаментальных взаимодействий (электромагнитных, слабых и сильных), собственных элементарных частицам, электрон непосредственно способен участвовать только в электромагнитном и слабом, причем слабое взаимодействие существенно уступает электромагнитному вследствие большой массы частиц, ответственных за его перенос — W^\pm - и Z-бозонов.

Наиболее простой и в то же время наиболее вероятный процесс, происходящий при столкновении электрона с протоном, — так называемое глубоко-неупругое рассеяние электрона на протоне. Он характерен тем, что фотон, испущенный электроном, непосредственно взаимодействует с одним из кварков протона. Взаимодействие фотона с точечными зарядами считается изученным достаточно хорошо, поэтому указанный процесс предполагается использовать в основном

для извлечения информации о состоянии кварков внутри протона, т. е. для измерения их функций распределения.

Наряду с простейшим возможны также процессы, затрагивающие уже сферу сильных взаимодействий. Рожденные в таких процессах партоны (глюоны и кварки), разлетаясь с большой энергией, порождают так называемые струи — группы энергичных адронов, летящих приблизительно в одном направлении, заданном исходным партонном. Струя, рожденная протонным остатком (т. е. протоном, потерявшим партон), обычно недоступна для наблюдения, поскольку, следуя направлению протона, она исчезает в канале ускорителя. Остальные же струи регистрируются детекторами и поставляют сведения о породивших их партонах.

Теоретические расчеты этих процессов основаны на уравнениях электродинамики и хромодинамики, однако осложняются тремя обстоятельствами: неполным знанием состояния исходных партонов (их функций распределения), недостаточным пониманием механизма превращения партонов в адроны на последнем этапе и, наконец, возможным вкладом других, сходных процессов. Теоретические модели, отличающиеся трактовкой этих моментов, приводят к похожему (но не совпадающим в точности) предсказаниям, вполне удовлетворительно согласующимся с экспериментальными данными.

ПАРТОННАЯ СТРУКТУРА ПРОТОНА

Вернемся к физическому процессу, для изучения которого «Гера» приспособлена лучше всего, — к глубоконеупругому

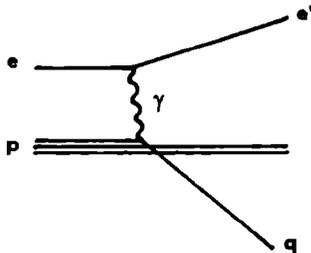
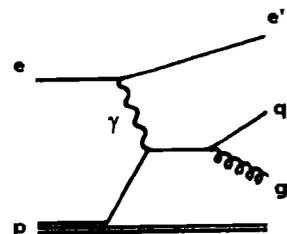
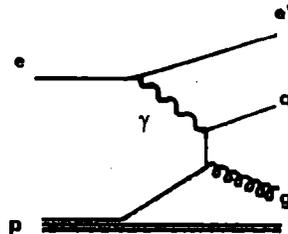
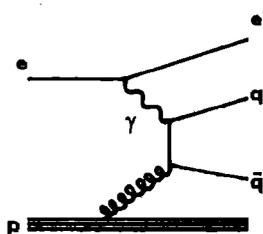


Рис. 2. Диаграммы Феймана, описывающие взаимодействие электрона с протоном p . При глубоконеупругом рассеянии (вверху) фотон γ , испущенный электроном, непосредственно взаимодействует с одним из трех кварков q протона. Внизу: примеры взаимодействий, приводящих к образованию струй — групп энергичных кварков q и глюонов g .



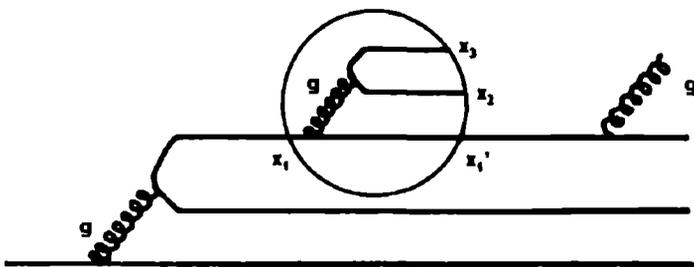


Рис. 3. Эволюция партонного дерева.

рассеянию. Этот процесс, как уже говорилось, служит основным инструментом исследования функций распределения кварков внутри протона.

С теоретической точки зрения формирование функций распределения включает в себя многочисленные процессы, происходящие среди партонов. Так, в цветном глюонном поле³ постоянно рождаются и исчезают виртуальные кварк-антикварковые пары; любой из виртуальных кварков может в свою очередь испустить новый глюон, который расщепляется на два глюона либо рождает новую виртуальную пару кварков, и так далее и так далее — развивается так называемое партонное дерево. Рассмотрим, как взаимодействует получившаяся система с внешним полем, например с обычным фотоном.

Глюоны не имеют электрического заряда и потому остаются для фотона невидимыми, взаимодействие же с кварками зависит от «жесткости» фотона, т. е. его длины волны (чем меньше длина волны, тем фотон более «жесткий»). Виртуальные пары кварков живут очень непродолжительное время — ровно столько, сколько им позволяет принцип неопределенности (время жизни обратно пропорционально степени виртуальности), поэтому кварки, как правило, не успевают разойтись на значительное расстояние. Если длина волны фотона существенно больше, чем раз-

мер кварковой пары, то фотон воспринимает пару как единый объект с нулевым полным зарядом (заряды кварка и антикварка противоположны по знаку), т. е. попросту не замечает ее. Если же его длина волны меньше размеров пары, то он способен независимо провзаимодействовать с любым из кварков. Аналогично часть партонного дерева, выделенная на рис. 3 кружком, выступает по отношению к длинноволновому фотону как «нерасчлененный» кварк q_1 (несущий импульс x_1), в то время как более коротковолновые фотоны различают кварки q_1 , q_2 и q_3 (соответственно с импульсами x_1 , x_2 и x_3). Такие же закономерности мы обнаружили бы, если бы взяли вместо фотона другую пробную частицу, например глюон или кварк (из другого протона): чем меньше длина волны пробной частицы, тем большее количество партонов ей видно. На языке партонной модели это означает, что функции распределения партонов зависят от условий их наблюдения: $F_i = F_i(x, Q^2)$. Величина Q^2 , характеризующая «жесткость» пробной частицы, является одновременно и мерой виртуальности партонов, доступных для наблюдения.

Математическая формулировка изложенной качественной картины выражается интегральным уравнением для функции распределения $F(x, Q^2)$, связывающим значения этой функции до и после элементарного акта ветвления партонного дерева с учетом всех возможных исходов. Пределы интегрирования по переменным x и Q^2 зависят друг от друга, так что решение этого уравнения оказывается весьма непростой задачей. До недавнего времени были известны лишь его решения в двух частных предельных случаях, по-

зволяющих расцепить две переменные и провести по одной из них явное интегрирование.

В первом случае, справедливом в области больших (близких к единице) значений x , уравнение сводится к так называемому уравнению Грибова—Липатова—Альтарелли—Паризи. Это уравнение описывает эволюцию партонного дерева при возрастании величины Q^2 и позволяет вычислять соответствующее изменение функций распределения (при заданных граничных условиях $F(x, Q_0^2)$).

Другой предельный случай, справедливый в области малых значений Q^2 , описывает эволюцию партонного дерева при уменьшении величины x и требует задания граничных условий в виде $F(x_0, Q^2)$. Соответствующее интегральное уравнение носит имя Кураева—Липатова—Фадына. Аналитическое решение этого уравнения предсказывает степенной рост функции распределения при стремлении x к нулю: $F(x) \sim x^{-\omega}$, где $\omega \approx 1/2$.

Область малых x при одновременно больших Q^2 оставалась непокрытой до самого последнего времени, пока Марчезини и Б. Вебберу не удалось переформулировать интегральное уравнение таким образом, чтобы сделать его доступным для решения методом Монте-Карло. Процесс ветвления партонного дерева разыгрывается в этом подходе как последовательность случайных событий, вероятность которых определяется ядром интегрального уравнения — элементарными взаимодействиями партонов. Разумеется, это не аналитическое решение, но оно позволяет проводить численные расчеты и сравнивать полученные результаты с экспериментом. Предсказываемое им поведение функций распределения в предельных частных случаях согласуется с решениями Альтарелли—Паризи и Кураева—Липатова—Фадына. Результаты экспериментальных измерений на «Гер» дают возможность провести сравнение теоретических предсказаний, полученных для функций распределения кварков в различных моделях.

В результате проведенного анализа предсказание Липатова о степенном росте функ-

³ Кварки и глюоны наделены особым, характерным только для этого типа частиц зарядом, который физики назвали цветом.

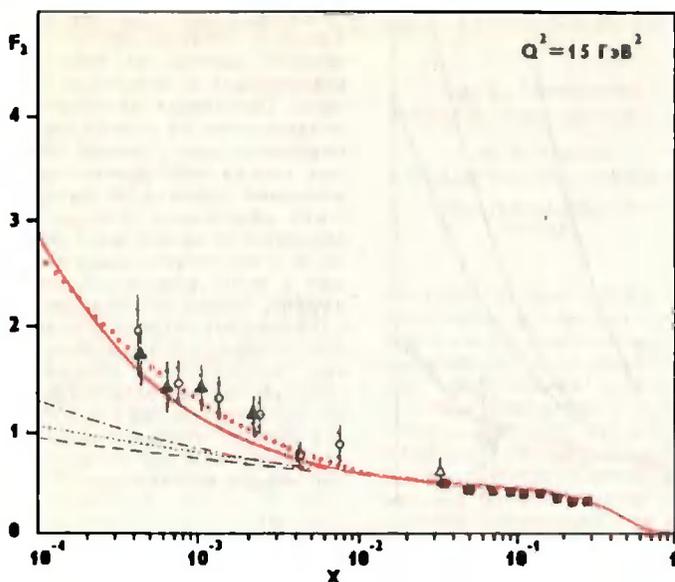


Рис. 4. Зависимость функций распределения F_2 кварков в протоне от переменной x . Цветными линиями и показаны предсказания моделей, основанных на уравнении Липатова; черными — других моделей. Как видно из рисунка, предсказание Липатова о степенном росте F в области малых x получило серьезное подтверждение.

ций распределения в области малых x получило серьезное подтверждение. Вместе с тем оно породило некоторое беспокойство среди теоретиков. Дело в том, что степенное возрастание функций распределения означает также степенное возрастание полных сечений адрон-адронных взаимодействий с ростом энергии, а это, в свою очередь, противоречит одному из важнейших физических постулатов — унитарности матрицы рассеяния, или, выражаясь более простым языком, сохранению полной вероятности или сохранению нормировки волновых функций, т. е. внутренней непротиворечивости самого квантово-механического аппарата.

Более тщательное изучение проблемы, проведенное Е. М. Левиным и М. Г. Рыскиным, показало, что степенное поведение функций распределения может оставаться справедливым лишь в некоторой

ограниченной области, после чего в эволюцию партонного дерева включается новый, не учитывавшийся ранее механизм. Смысл этого нового подхода раскрывается в следующих простых рассуждениях. Партоны обладают поперечными (не бесконечными) импульсами, а следовательно, в силу соотношения неопределенности, ненулевыми поперечными размерами. Когда количество партонов в адроне становится достаточно большим, суммарный поперечный размер партонов сравнивается с размером адрона. Дальнейшее увеличение числа партонов не приводит к росту сечения, так как партоны «затеняют» друг друга (как и для длинноволновых фотонов, партоны снова становятся невидимыми, но уже по другой причине). Левин и Рыскин дополнили описанное раньше интегральное уравнение необходимыми членами — в картине эволюции партонного дерева им соответствует возможность не только расщепления ветвей, но и их слияния.

Несмотря на отсутствие точного решения нового уравнения (пока имеются лишь приближительные оценки), его качественное поведение вполне очевидно: после крутого подъема, предсказанного Липатовым, ожидается выполаживание функций распределения с асим-

птотическим выходом на константу. Технические характеристики ускорителя «Гера», по-видимому, позволят в недалеком будущем охватить и эту область.

ЭФФЕКТИВНАЯ СТРУКТУРА ФОТОНА

Подобно тому как структура протона выявляется во взаимодействии с фотоном, характерные свойства самого фотона выявляются во взаимодействии с другими частицами, в частности с тем же протоном.

Начнем с наиболее общей характеристики взаимодействия протонов и фотонов — с поведения его полного сечения. В относительно давней феноменологической модели П. Ландсхофа это взаимодействие описывалось как обмен так называемым помероном, причем параметры померона непосредственно извлекались из доступных в то время экспериментальных данных. Параметризация Ландсхофа успешно выдерживает экстраполяцию в область существенно (в 10 раз!) возросших энергий. В этом смысле эксперимент не принес сюрпризов.

К сожалению, эта модель рассчитана на описание лишь полных сечений и ничего не говорит о деталях исследуемого процесса — например, о количестве адронных струй, их угловых распределениях и т. п. Для получения подобных характеристик в принципе хорошо приспособлена так называемая техника расчета диаграмм Фейнмана, основанная на теории возмущений. Однако и она встречается с трудностями.

Учет только простейших диаграмм (т. е. низшего порядка теории возмущений) приводит к чрезмерно заниженным значениям сечения и, следовательно, недостаточен. Вклад диаграмм следующего порядка оказывается значительным и даже превосходящим вклад диаграмм низшего порядка, что говорит о необходимости учета еще более высоких порядков. При этом нет гарантии, что вклад этих высоких порядков окажется мал и ряд теории возмущений можно будет оборвать. В луч-

⁴ См.: Ландсхоф П. Померон // Природа. 1994. № 1. С. 17—25.

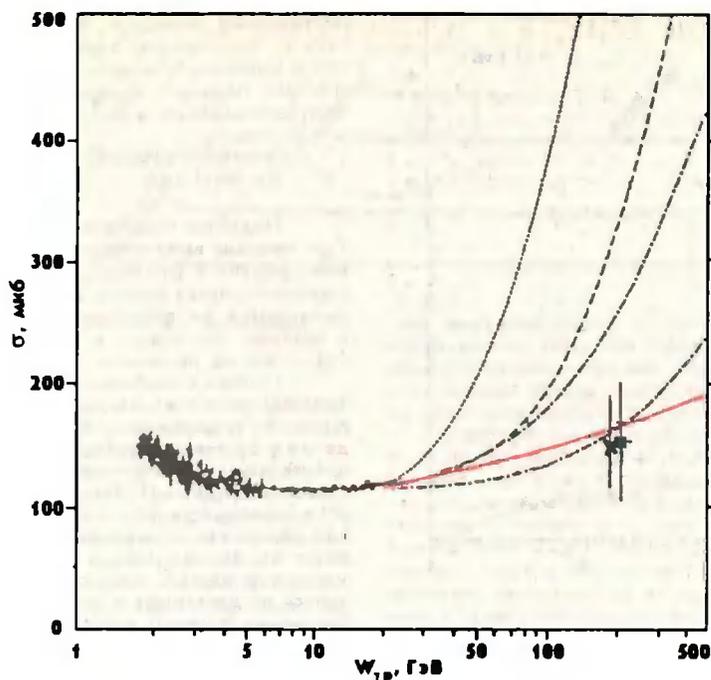


Рис. 5. Зависимость сечения σ фотон-протонного взаимодействия от полной энергии W в системе центра масс [экспериментальные данные получены на двух детекторах, установленных на «Герезе», — «Зевс» и H1]. Цветная линия соответствует предсказаниям модели Ландшофа; черные — предсказаниям моделей, основанных на партонной интерпретации фотона, при различных значениях параметра R_{\min}^T .

шем случае это грозит еще новыми вычислениями, в худшем — вызывает сомнения в сходимости ряда теории возмущений вообще. Однако, даже если этот ряд и сходится в принципе, наша способность вычислять катастрофически падает как из-за усложнения диаграмм, так и из-за увеличения их количества. Таким образом, мы вынуждены обратиться к каким-либо новым методам.

Альтернативным, полуфеноменологическим, подходом является трактовка фотона как адроподобного объекта с применением к нему идей партонной модели; при этом весь ряд бесконечно усложняющихся диаграмм Фейнмана упрятыва-

ется под именем функций распределения партонов. В пользу такого подхода имеется также весомое экспериментальное указание — адронные струи по направлению импульса фотона, аналогичные струям от протонного остатка. События, в которых наблюдаются такие струи (их большинство), приписываются так называемому взаимодействию со «структурированным фотоном», т. е. фотоном, «разложенным» на партоны. События, в которых таких струй нет, относятся к «точечному» взаимодействию и хорошо воспроизводятся простой теорией возмущений.

Совокупность точечного и «партонного» вкладов сравнительно хорошо описывает экспериментальные данные, оставляя, впрочем, известное чувство неудовлетворения. Так, сопряжение низко- и высокоэнергетического поведения полного сечения не выглядит достаточно гладким, вызывая ощущение некой искусственности. С другой, чисто теоретической стороны, предсказания моделей обладают чрезмерной чувствительностью к значению внутреннего параметра R_{\min}^T , формально от-

личающего партоны, принадлежащие к боковым ветвям партонного дерева, от партонов, участвующих в «жестком» процессе (физически эти партоны неразличимы, во всяком случае различимы лишь условно). Наконец, иногда наблюдаются «аномальные» события, в которых струя «фотонного остатка» отклоняется от направления фотона на угол, неприемлемо большой с точки зрения партонной модели, однако не описываемый и теорией возмущений. Подводя итог, скажем, что при значительных достижениях, понимании структуры фотона остается далеким от совершенства и нуждается в равной степени в продолжении теоретических и экспериментальных исследований.

Итак, что нового успели мы узнать благодаря «Герезе»?

Относительно протона подтвердилась правильность представлений о его партонной структуре и ее эволюции в не исследовавшейся ранее кинематической области. В их пользу свидетельствует совпадение теоретических предсказаний с экспериментально наблюдаемым поведением функций распределения кварков, в частности с их резким ростом в области $x \approx 10^{-3}$. По мере накопления экспериментальной статистики наблюдаемую область x удастся расширить до $x \approx 10^{-4}$. Там ожидается, что в игру вступит новое физическое явление — «партонная экранировка». Проверить правильность своих представлений в этой области еще предстоит.

Что касается фотона, то наиболее значимым результатом нужно признать сам факт обнаружения у него нетривиальной структуры. Рассматривавшийся долгое время как один из «истинно элементарных» объектов, фотон в определенных условиях демонстрирует сложное строение. Раскрытие этого строения составит одну из увлекательных задач физики ближайшего будущего.

«ФАКЕЛЬНЫЙ» МЕТОД ОЧИСТКИ И ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ

А. В. Сосновский,

кандидат географических наук

В. В. Гохман,

кандидат географических наук

Институт географии РАН
Москва

В ЛАБОРАТОРИИ инженерной гляциологии и проблем Севера Института географии РАН разработан новый метод опреснения и одновременно очистки минерализованной воды, позволяющий отделить соли, нерастворимые примеси, растворенную органику, микроэлементы. Основан метод на хорошо известном эффекте разделения солевой воды при замораживании на пресные кристаллы льда и рассол. Не совсем привычен только способ замораживания (вымораживания или намораживания в зависимости от решаемой задачи) — с помощью дальнеструйной дождевальной техники с различными приставками. А поскольку вода в таком случае замерзает в разбрызгиваемом «факеле», этот метод, по предложению известного гляциолога профессора В. Г. Ходакова, на протяжении многих лет руководившего нашей лабораторией, был назван факельным.

Владимир Георгиевич Ходаков (1932—1993), внесший значительный вклад в различные отрасли гляциологии, в 70-х годах возглавил работы по теоретическому и экспериментальному исследованию возможностей зимнего дождевания (еще раньше, в 50-х годах, его испытывали в Якутии, пытаясь создать ледяной покров на золотосных грунтах с целью их защиты от промерзания, однако в то время положительного результата добиться не удалось).

В ходе лабораторных и полевых исследований, проведенных в 80-х годах на базе Полярно-Уральской экспедиции

Института географии РАН, было установлено, что факельным методом в зависимости от технологии намораживания можно получить лед разной структуры. В случае, когда вода разбрызгивается над поверхностью, с которой она не стекает, формируется слой водолеяной смеси, при промерзании которой образуется монокристаллический лед плотностью 800—900 кг/м³.

Ранее искусственный монокристаллический лед создавали на основе тонкослойного налива (с помощью обычного шланга) со скоростью 0,5—1 см в сутки на каждый градус отрицательной температуры воздуха. Факельный метод эффективнее более чем в два раза даже в условиях теплой зимы¹.

В настоящее время таким образом намораживается монокристаллический лед для строительства ледяных переправ и плотин высотой в десятки метров и объемом в сотни тысяч кубических метров, а также взлетно-посадочные полосы. В практику он внедрялся с начала 80-х годов.

Если же вода, не успев замерзнуть, фильтруется из водолеяной смеси, то образуется масса пористого льда плотностью 400—600 кг/м³, состоящая из ледяных сферических зерен. Этот лед подобен естественному фирну, обычно формирующемуся в верхней части горных ледников.

Для того чтобы сразу получить такой лед, обладающий высокой фильтрующей способностью и низкой минерализацией, параметры капельного факела выбираются в зависимости от температуры воздуха таким образом, чтобы капля воды при

падении лишь частично замерзала и покрывалась ледяной коркой, а основная часть солей осталась в центральной, незамерзшей части.

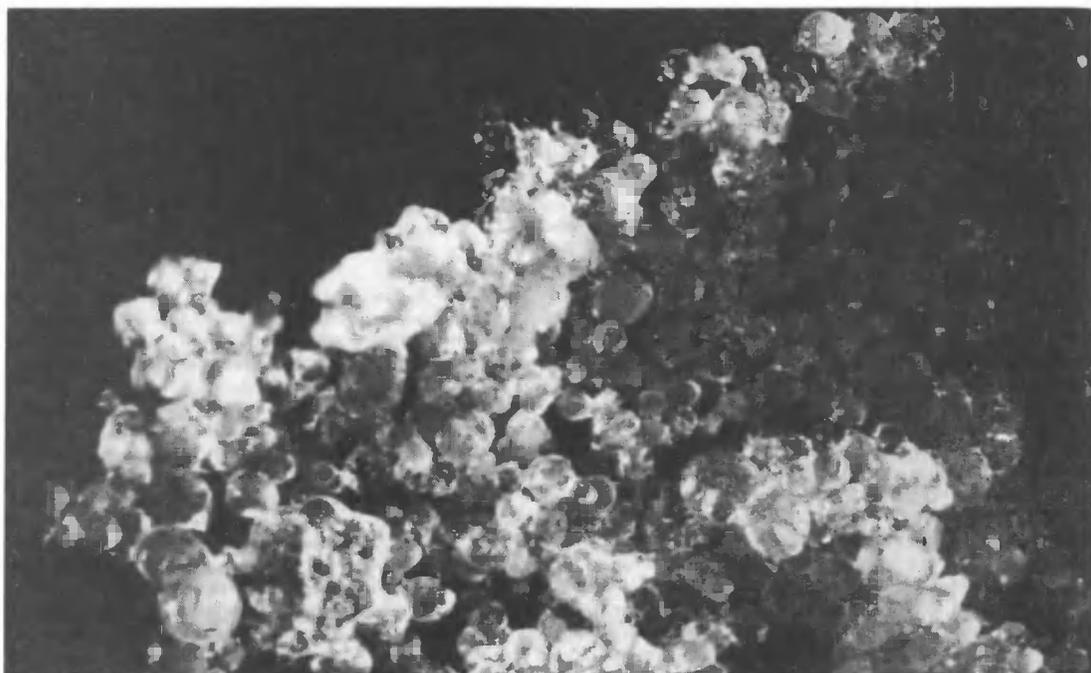
Такие тонкие ледяные оболочки при падении разбиваются, и в результате незамерзший рассол вытекает и фильтруется из зоны намораживания. На месте же дождевания формируется и быстро растет в высоту (3—10 м в сутки) массив пористого льда, состоящий из пресных осколков ледяных скорлупок и небольшого количества взвешенного рассола, удерживаемого в них капиллярными силами. Многочисленные лабораторные и натурные экспериментальные исследования, проведенные в различных регионах России с использованием морской воды, воды естественных солевых озер и стоков различных производств показали, что минерализация намороженного пористого льда в 10—12 раз ниже минерализации исходной воды. Таким образом, факельный метод оказывается эффективным для опреснения воды.

Остаток солей вымывается из сформированного льда в процессе естественного таяния в соответствии с теоретической зависимостью, подтвержденной результатами экспериментальных лабораторных и полевых исследований:

$$m = q^{(1-f)/f}$$

где $m = M_n/M_0$; $q = Q_n/Q_0$; M_0 , Q_0 — начальные значения минерализации и объема льда до таяния; M_n , Q_n — значения минерализации и объема льда в процессе таяния; f — влажность пористого льда, в частях. Минимальная влажность пористого льда изменяется от 0,06 для пресного льда до 0,18 для льда соленостью 35 г/л.

¹ Сосновский А. В., Ходаков В. Г. Способ производства монокристаллического льда: А. с. 1684573 СССР // Б. И. 1991. № 38.



Мелкозернистый лед, полученный факельным намораживанием. Увел. в 15 раз.

Проведенные исследования показали, что при таянии менее 1/3 объема льда минерализация оставшейся части снижается еще на порядок. При этом макроионы различных солей, микроэлементы и растворенная органика выходят с одинаковой высокой скоростью. Исключение составляют² менее подвижные ионы HCO_3 .

Высокая эффективность факельного метода для очистки и деминерализации загрязненных вод обусловлена высокой производительностью намораживания льда; пористой, легко фильтрующей рыхлой структурой намораживаемого льда; возможностью регулирования фазового состава замерзающих капель и температуры ледяного массива, позволяющи-

ми получать лед с относительно небольшой минерализацией. Кроме того, метод не требует предварительной очистки воды, и, в свою очередь, позволяет очищать воду от нерастворимых примесей. В этом случае массив пористого льда выступает в роли естественного фильтра.

При факельном методе намораживания льда можно применять как широко распространенные в сельском хозяйстве дальнеструйные дождевальные установки (ДДН-70, ДДН-100) с небольшими переделками, производимыми на месте, так и дождевальную технику серии «Град», специально созданную для проведения этих работ на Волгоградском ПО «Оросительная техника» под руководством Р. А. Бальбекова. Производительность намораживания ледяного материала наиболее широко распространенной в сельском хозяйстве установкой ДДН-70 с расходом воды 65 л/с, дальностью и высотой полета струи 70 и 18 м составляет около 150 м³ за сутки в пересчете на один градус отрицательной средней суточной температуры воздуха. Это позволяет намораживать одной установкой за сутки при темпера-

туре воздуха -20°C ледяной массив объемом 3000 м³ и весом более 1500 т. Впервые такой массив высотой около 7 м был заморожен в мае 1978 г. на озере Большая Ходата на Полярном Урале менее чем за сутки непрерывной работы одной установки ДДН-70.

Во второй половине XX в. во Франции Л. Керваном были построены первые опытные опреснительные вымораживающие установки на искусственном холоде. Однако из-за больших капитальных и энергетических затрат на получение искусственного холода они не получили распространения, хотя теплофизически метод вымораживания выгоднее наиболее распространенного в настоящее время метода дистилляции: теплота льдообразования составляет всего 13 % скрытой теплоты парообразования.

Вымораживание в естественных условиях больших средств не требует, так как используются природные источники энергии: отрицательная температура воздуха при замораживании воды; положительная температура воздуха и солнечная радиация при таянии льда, в ходе которого осуществляется

² Гохман В. В., Сосновский А. В., Ходаков В. Г. Эксперименты по опреснению пористого льда // Материалы гляциологических исследований. Вып. 69. М., 1990. С. 201—204.

сепарация и удаление рассола. Энергия расходуется в основном для подачи воды на место проведения работ, хотя и здесь в будущем будет возможно применение ветроэнергетических установок. Кроме того, его применение не связано с использованием дорогостоящих опреснительных установок и наличием квалифицированного технического персонала.

До настоящего времени было известно несколько разновидностей опреснения методом естественного вымораживания. Так, применительно к районам, где наблюдаются суточные колебания температуры воздуха около 0°C , сотрудником Института географии РАН С. Ю. Геллером в 50—60-х годах разработана следующая схема опреснения минерализованных вод.

По принципу сообщающихся сосудов-отсеков, расположенных террасами, строится площадка для намораживания. В морозную ночь с температурой не выше -3°C в верхний отсек наливается соленая вода слоем до 20 см. Днем соленую воду, находящуюся под коркой льда, спускают в расположенный ниже отсек, а лед опускается на гофрированное дно площадки и начинает таять. Первую порцию воды, обогащенную солями, сбрасывают в сток, а оставшуюся опресненную воду (приблизительно третья часть) направляют в сборный резервуар.

При устойчивых отрицательных среднесуточных температурах воздуха применяется последное намораживание в зимний период массивов монолитного льда, в которых содержание солей не отличается от минерализации исходной воды. Опреснение воды достигается только в процессе медленного оттаивания в теплое время года. Известны также попытки применения «снежных пушек» для разбрасывания воды и намораживания массива гранулированного мелкозернистого льда. При этом диаметр каплей выбирался исходя из условия полного и замерзания при падении. Последнее приводило к увеличению энергозатрат на мелкодисперсное разбрызгивание воды и значительному понижению температуры намораживаемого льда.

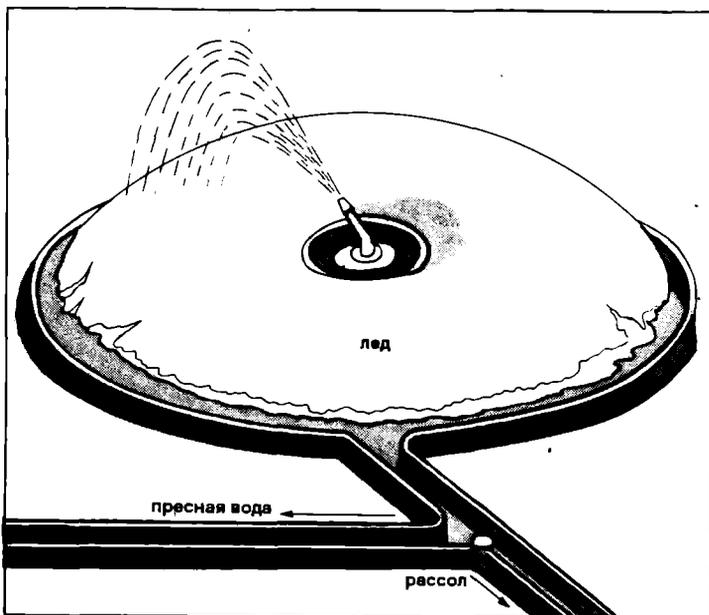


Схема опреснительного комплекса, основанного на факельном методе. Дождевальная установка формирует массив пористого льда. В ходе дождевания происходит сток незамерзшей воды повышенной солености (рассола). Рассол отводится в один водосток, а начинающаяся поступать пресная вода — в другой.

В рассматриваемых способах высота ледяных массивов не должна была превышать 4—5 м, иначе лед неравномерно прогрелся и опреснился, что вело к низкому выходу пресной воды. Это объясняется тем, что наиболее благоприятный для опреснения весенний период со среднесуточной температурой около 0°C уходит в основном на нагревание льда до температуры минус $1-3^{\circ}\text{C}$, а процесс опреснения протекает при относительно высокой температуре воздуха и сопровождается интенсивным таянием пресных кристаллов льда, разбавлением рассола и, как следствие, снижением выхода пресной воды. Кроме того, небольшая производительность намораживания льда, обусловленная низкой интенсивностью теплообмена и большими перерывами между поливами, необходимыми для полного замерзания налитой воды, а также длительность процесса опреснения, связанная с необ-

ходимостью прогрева массива льда, и низкий выход опресненной воды приводили к относительно высокой ее себестоимости. Поэтому эти способы опреснения естественным вымораживанием не нашли широкого практического применения.

Указанные недостатки устраняются при применении метода факельного вымораживания льда, который значительно повышает производительность намораживания льда, создает ледяные массивы с пористой, легко фильтрующей воду структурой, резко снижает соленость намораживаемого льда³. Технология опреснения минерализованной воды методом факельного вымораживания состоит из нескольких этапов.

Сначала выбирается или создается из сточных вод источник соленой воды на зимний период, выбирается площадка намораживания (желательно с небольшим уклоном), имеющая в случае фильтрующих грунтов гидроизолирующее покрытие из естественных (на-

³ Сосновский А. В., Ходаков В. Г. Способ опреснения соленой и морской воды: А. с. 1130531 СССР // Б. И. 1984. № 47.



Одна из модификаций установки «Град-1», устанавливаемая на обычном тракторе.

пример, глина) или искусственных (различные пленки) материалов, проводится сооружение каналов стока вокруг площадки намораживания или возводятся бортики на ее границе, подготавливаются бассейны для приема рассола и пресной воды. При обустройстве площадки намораживания предусматривается сток незамерзшей в процессе зимнего дождевания воды и ее поступление на повторное намораживание для снижения объема остаточного рассола и повышения его концентрации. В холодный период года проводятся работы по намораживанию ледяных массивов. С наступлением потепления осуществляются мероприятия по отводу, консервации или утилизации рассола и аккумуляции талой пресной воды. Первые порции талой воды имеют повышенную минерализацию и отводятся в рассолохранилища. После промывки ледяного массива талой водой из верхней его части начнет поступать пресная вода, минерализация которой будет постоянно снижаться до значений 1—10 мг/л в конце периода таяния.

Проведение ряда указанных мероприятий обусловлено спецификой метода опресне-

ния вымораживанием в природных условиях — зависимостью от климатических условий, сезонностью процессов получения пресной воды — и вызванная этим необходимостью строительства водоудерживающих сооружений, а также отчуждение земли под хранилища льда, воды и рассола. Возможные пути устранения или снижения остроты некоторых недостатков связаны с учетом специфики водопотребления, максимальным использованием благоприятного рельефа местности для сооружения водо- и рассолохранилищ.

Общим недостатком всех способов опреснения является проблема удаления остаточного рассола. Кардинальный путь ее решения заключается в утилизации рассола путем переработки его на полезные соли и элементы. Однако в настоящее время из-за ряда технико-экономических причин рассол, как правило, складывается на суше в испарительных бассейнах, выпаривается в специальных установках, закачивается под землю или сбрасывается в реки или море, что отрицательно влияет на окружающую среду. При сбросе рассола в испарительные бассейны их размеры определяются исходя из минерализации соленой воды, ее расхода опреснительной установкой, количества остаточного рассола и интенсивности испарения. Причем испарительные бассейны должны пе-

риодически очищаться от соли, которая вывозится в котлованы, защищенные от размыва, и там захороняется. В ином случае придется сооружать новый испарительный бассейн, а старый, сработанный, гидроизолировать и засыпать землей для предохранения от ветровой эрозии и засоления окружающих земель. В целом способ захоронения остаточных рассолов, вариантов которого довольно мало, определяется с учетом специфики местных условий.

Необходимая степень очистки опресняемой воды определяется величиной ПДК химических элементов и соединений, входящих в состав сточных вод и влияющих на величину выхода пресной воды и объем остаточного рассола. При очистке сточных вод технологический режим работы целесообразно выбирать таким, чтобы получить минимальный объем остаточного рассола с максимальной минерализацией и уменьшить объем рассолопринимающих бассейнов. При необходимости снижения количества остаточного рассола и повышения его концентрации проводится дополнительное его опреснение факельным вымораживанием. При создании запасов пресной воды технологический режим намораживания выбирается таким, чтобы в процессе намораживания минерализация массива была минимальной (на порядок ниже минерализации исходной воды).

Одним из путей применения метода факельного вымораживания является распределение соленых озер, непригодных для других целей. Частичное или полное их распределение достигается путем забора в зимний период соленой воды на намораживание-опреснение. При небольшом объеме озера вся его вода замораживается на берегу, первые порции минерализованного талого стока отводятся за пределы бассейна, а пресная вода самотеком поступает в чашу озера. При большом объеме воды в озере такая технология, периодически осуществляемая, будет постепенно понижать минерализацию воды.

Метод факельного вымораживания можно использовать

и для очистки дренажно-сбросных вод гидромелиоративных систем, а также для промывки засоленных земель в регионах с континентальным климатом. Здесь возможны различные варианты применения опреснения методом вымораживания. Так, накопив минерализованные воды в понижениях рельефа местности, их замораживают зимой на гидроизолированной снизу площадке, пресная вода накапливается в специальном бассейне, откуда ее забирают на промывку засоленных почв. Второй вариант заключается в намораживании слоя пористого льда заданной толщины непосредственно на участках засоленных земель, требующих промывки¹. В этом случае в период весеннего снеготаяния земли промоются автоматически. Первые порции талой воды, фильтрующейся через пористый лед в почву, будут соленые. Однако по мере таяния ее соленость будет снижаться до значений минерализации в конце таяния порядка 0,1—0,01 г/л. При этом большая часть воды, полученной при таянии намороженного льда, окажется пресной и при фильтрации в почву будет вытеснять минерализованную грунтовую воду. Режим же намораживания следует выбирать таким, чтобы образовывался влажный пористый лед, а количества взвешенной в нем воды было недостаточно для значительного гравитационного стока.

Метод факельного намораживания льда может применяться для защиты природных вод от загрязнения и без привлечения технологии опреснения. Так, одна из причин силь-



Автономная установка «Град-2».

ного загрязнения питьевой воды — слив животноводческих стоков на поля зимой и их вынос в реку в период активного весеннего снеготаяния, что вызывает резкое ухудшение качества воды и требует дополнительных средств на ее очистку и санитарную обработку. Если же животноводческие стоки превратить в замороженные массивы многометровой высоты, таяние из-за уменьшения площади льда резко сократится и основная масса этих стоков будет таять уже после схода снежного покрова. В результате основного объема стоков будет задерживаться на полях и использоваться в качестве удобрений.

рокую доступность и экономичность метода факельного вымораживания, что позволяет успешно применять его в районах с отрицательными зимними температурами воздуха ниже минус 5—10 °С для очистки и опреснения природно-техногенных вод (промышленных, бытовых и сельскохозяйственных стоков, шахтных вод и т. п.) и в целях водоснабжения мелких и средних потребителей путем использования пресной воды, поступающей при таянии искусственных ледяных массивов. В настоящее время продолжается разработка теоретических основ метода и ряда его приложений. Однако их реализация в конкретных проектах затруднена из-за отсутствия достаточного финансирования. Если данные исследования, направленные на решение экологических проблем России, привлекут внимание государственных организаций, коммерческих структур или частных лиц, мы будем рады сотрудничать с ними.

¹ Сосновский А. В., Ходаков В. Г. Способ промывки засоленных земель: А. с. 1752279 СССР // Б. И. 1992. № 29.

Проведенные исследования показали высокую эффективность, технологичность, ши-

Останцы растаявшей Арктиды

С. В. Томирдиаро



Савелий Владимирович Томирдиаро, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой мелиорации и геодезии Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. Специалист в области мерзлотоведения. В настоящее время руководит исследованиями по мелиорации северных сельскохозяйственных земель. Автор нескольких монографий, в том числе: Лёссово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене (М., 1980); Криогенно-зоологические отложения Восточной Арктики и Субарктики (М., 1987).

С ЭКЗОТИЧЕСКИМИ ледяными землями Северной Якутии читатели «Природы» впервые познакомились более 20 лет назад¹. Пронизанные мощными ледяными жилами плато, или столбообразные возвышенности, вздымаются над окружающими заболоченными низменностями, как острова в море. Впрочем, они слагают и значительную часть настоящих островов в Новосибирском архипелаге.

Не случайно российские исследователи

берегов Якутии Э. В. Толль, А. А. Бунге, К. А. Волосович и другие выдвинули впоследствии отвергнутую теорию погребенных ледников арктической Азии. С моря они видели перед собой омываемые и подрезаемые прибоем гигантские стены подземного льда, из которых в кажущемся беспорядке выступали бесчисленные земляные пирамиды и пирамидки. Их посчитали затеками земли (земляными жилами) в трещинах ледника². Казалось, теорию погребенного ледника подтверждали и бесчисленные кости животных ледникового периода — мамонтов, бизонов, овцебыков и диких лошадей, выпадающие из земляных пирамид и рассыпанные на отмелях у ледяных подножий обрывов.

Однако впоследствии выяснилось, что не древний ледник был засыпан землей, а изначально существовали столь же древние, но подземные гигантские ледяные жилы, в плане составляющие сплошной лабиринт мощных подземных ледяных стен толщиной в 7—8 м и высотой (в обнажениях на обрывах) до 30—35 м. Образуются подземные ледяные жилы только в условиях вечной мерзлоты в результате растрескивания земли в зимние морозы. Механизм этого процесса описан в уже упомянутой статье в «Природе».

Однако в то время ее автор, как, впрочем, и другие исследователи, еще не знал, что «ледяные земли» встречаются лишь в небольшом регионе самого севера Якутии и резко отличаются по строению и составу от вечномерзлых лёссовых пород того же возраста всей остальной Якутии, Чукотки и Аляски, также содержащих лабиринты подземных ледяных жил, но гораздо более тонких — порядка 1,5—2,5 м в ширину. Вот почему исследователи, изучавшие арктическое побережье Якутии в начале века, говорили о погребенных ледниках с «земляными жилами» во льду, а те, кто работал в более южных

© Томирдиаро С. В. Останцы растаявшей Арктиды.

¹ Томирдиаро С. В. Подземное оледенение Восточной Сибири // Природа. 1972. № 7. С. 84—91.

² Толль Э. В. Очерк геологии Новосибирских островов // Зап. Академии наук. СПб., 1899. Сер. 8. Т. 9.



Лессово-ледовый останец на о. Большой Ляховский. Берег Захар-Сисэ. На переднем плане — низкая терраса с байджарахами — буграми из лессового материала, остающегося после оттаивания заключенных во льду «земляных колонн». Бугры-пирамиды в плане располагаются в шахматном порядке, что соответствует расположению самих грунтовых колонн во льду. На заднем плане — панорама тающего и отступающего ледяного обнажения высотой 22—24 м.

районах в 50-х годах, — о ледяных жилах в грунте.

В 70-х годах много спорили и о самом происхождении вечномерзлых лессовых пород, покрывающих огромными «плащами» все равнины и даже возвышенные между-речья северо-востока Азии. Взамен господствующей концепции о существовании здесь гигантских покровов из речных пойменных илов с жильными льдами я выдвинул теорию об их золовом генезисе — происхождении из нанесенной ветрами пыли. Большое содержание в этих породах подземных жильных льдов позволяло выделить на гигантских просторах Якутии и Чукотки новую для геологии криогенно-золовую формацию³. В 1982 г. вышла новая геологическая карта Северо-Востока СССР, где аллювиальные отложения в соответствии с нашими разработками заменили криогенно-золовыми. Полученные за прошедшие годы данные позволяют считать, что «ледяные земли» арктической Якутии, т. е. высокие

останцы древней арктической лессово-ледяной равнины, — остатки гигантской суши, еще совсем недавно (до 10—8 тыс. лет назад) существовавшей на севере нынешней Якутии, часть которой занимала обсыхавший тогда шельф, а часть находилась на плаву на глубоко промерзавшей океанической акватории. Подтверждающий этот вывод весьма обширный фактический материал содержится в упомянутой монографии, вышедшей небольшим тиражом. Поэтому я вновь обращаюсь к читателям «Природы».

ЛЕССОВО-ЛЕДОВЫЕ ИЛИ ЛЕДОВО-ЛЕССОВЫЕ?

90 % объема горной породы всех обследованных нами «ледяных земель» арктической Якутии оказались сложными древними подземными льдами и лишь 10 % — минеральным глинистым грунтом. Последний слагает заключенные во льду своеобразные «земляные колонны» диаметром 2—3 м при их общей высоте в береговых обнажениях до 40 м и более. Колонны располагаются в плане в шахматном порядке, а окружающий их лед представляет в разрезе мощные стены шириной до 8 м. Это означает, что перед нами необыкновенно гипертрофированные, но в целом типичные полигонально-жильные льды, которые и ныне образуются на равнинах Крайнего Севера.

Вечномерзлые грунты ежегодно раскалываются (при зимнем охлаждении и соответственном сжатии) на бесчисленные

³ Томирдиаро С. В. Лессово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене. М., 1980.



блоки-полигоны трещинами глубиной до 5—7 м (их называют морозобойными). Весной они заполняются водой или кристаллами изморози. Летом грунт прогревается, расширяется и выдавливается на поверхность по контактам с ледяными жилами. Размеры решетки морозобойных трещин связаны со среднегодовой температурой, а главное — с сезонными амплитудами колебания температуры в вечной мерзлоте зимой и летом. Поэтому размеры современной «решетки» в плане весьма велики (порядка 15×20 м) — сказывается морской климат. Зато решетка плейстоценовых ледяных жил почти в два раза гуще, что свидетельствует о переходе климата в Арктике и Субарктике на границе плейстоцена и голоцена (около 10 тыс. лет назад) с крайне континентального на морскую. Формирование в наше время подземных льдов, которые слагают останцы Арктиды, на нашей планете совершенно исключено. Необычайная удача для всей палеогеографии четвертичного периода, что уникальные лессово-ледовые отложения со всей заключенной в них палеозоологической и климатической информацией вообще сохранились до наших дней.

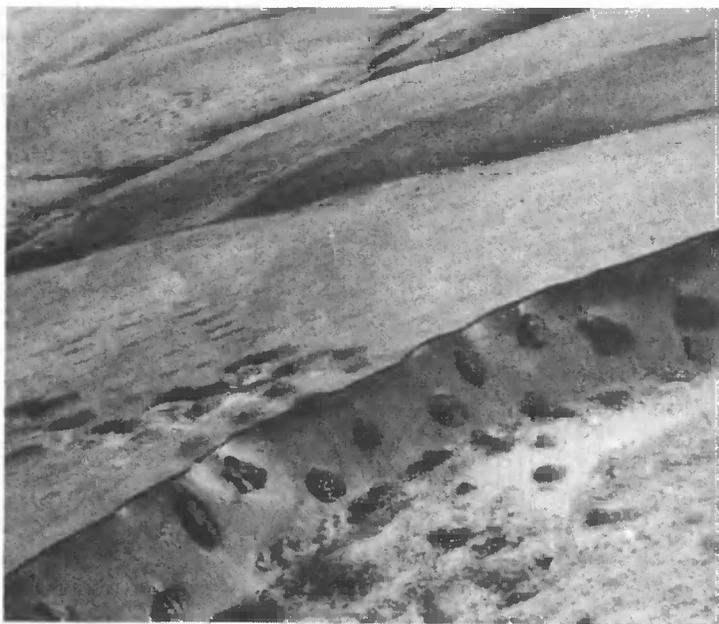
Современный климат оказался для них слишком теплым даже в Арктике, и потому ледяные земли постепенно разрушаются. Летом древние подземные льды вместе с тонким теплозащитным слоем почвы здесь ежегодно подтаивают, в результате заклю-

ченные во льду грунтовые колонны выступают на поверхности тундры в виде множества хорошо видимых задернованных бугров. Этого не наблюдается на лессово-лессовых породах, менее насыщенных льдом, если поверхность тундры ничем не нарушена. В целом задернованные бугры — прекрасный аэровизуальный признак, необходимый для разделения на аэрофотоснимках участков лессово-ледовых пород и участков лессово-лессовых покровов; его мы и использовали при картировании. Этот признак является и важнейшим показателем продолжающейся гибели «ледяных земель», их опускания (так называемой термоплатации) на больших площадях. Ведь в случае стабилизации грунт из бугров постепенно растекся бы под тундровой почвой и поверхность за несколько десятков лет полностью выровнялась бы. В целом при дешифрировании аэроснимков и составлении карты выявилась приуроченность «ледяных земель» к островам и приморским равнинам северной Якутии. Они сохранились севернее примерно 72° с. ш., между п-вом Таймыр и устьем Индигирки. На самом Таймыре в эпоху образования лессово-ледовых земель широко распространялись обычные наземные ледники.

«Ледяные земли» неизвестны ни в каком другом районе мира. Встречающиеся в литературе описания и даже фотографии так называемых «ледяных стен» в речных и морских обрывах регионов Яку-

Лессово-ледовый останец Оягосский яр на берегу пролива Дм. Лаптева. Высота ледяной стены 22—24 м. Видна характерная для жильных льдов вертикальная полосчатость. Сверху надо льдом — тонкий почвенно-грунтовый слой, свойственный таким «ледяным землянкам».

Фото автора



Общий вид лессово-ледовых платообразных останцов и ледового обнажения Оягосский яр. На тундровой поверхности плато выступают округлые оплывающие бугры — вершины заключенных в подземном льду грунтовых колонн.

Фото автора

тии, Чукотки и Аляски, расположенных южнее, относятся к гораздо более тонким ледяным жилам, развитым в покровах ледово-лессового типа. Обнаруживаемые иногда в обнажениях этих регионов якобы сплошные ледяные стены — явление кажущееся. Береговые обрывы обрушились вдоль, а не поперек простираения ледяных жил. Когда эти льды быстро вытаивают под летним солнцем, обнаруживаются лежащие за ними толщи лессовой породы, но главное, в разрезе всегда вскрывается много жил, расположенных вкрест простираения, весьма тонких, шириной не более 1,5—2,5 м.

Таким образом позднплейстоценовые мерзлотно-лессовые отложения северо-востока Азии можно разделить на два типа. Один из них — лессово-ледовый — условно назван арктическим, а другой — ледово-лессовый — субарктическим.

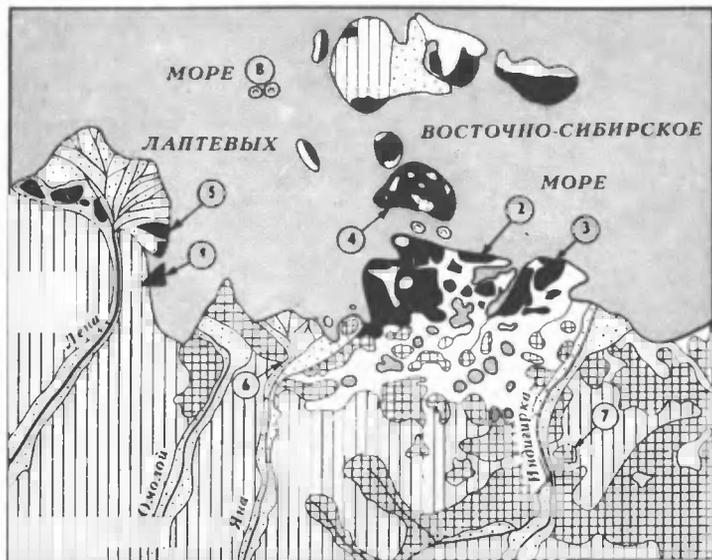
СТРУКТУРА И СТРОЕНИЕ «КОЛОНН» И ЖИЛ

Были проведены минералогические, палинологические, палеонтологические, гранулометрические, гляциологические и многие другие анализы отложений обоих типов⁴. Особенно интересными оказались материалы петрографических исследований об-

ломков пород и минералов во фракции крупной пыли, доминирующей в мерзлотно-лессовых отложениях как арктического, так и субарктического типа. Оказалось, что для последнего это обломки осадочных метаморфизованных пород, которыми сложено все горное окружение североякутских равнин. В то же время в земляных колоннах «ледяных земель» арктического типа эта фракция в значительной степени состоит из обломков вулканогенных пород, иногда слоев вулканического стекловатого пепла. Характерно необычайно большое для Арктики содержание фракций глины. При полном отсутствии в азиатской Арктике и Субарктике вулканов все это свидетельствует об особой системе циркуляции атмосферы в позднплейстоценовой Арктике, заносившей сюда продукты вулканической деятельности из других, весьма отдаленных регионов.

Самое незначительное содержание минерального вещества в лессово-ледовых отложениях при крайней гипертрофированности здесь ледяных жил свидетельствует об очень слабых темпах накопления минеральной пыли. При оттаивании ледовой толщи, накапливавшейся в течение холодных этапов позднего плейстоцена — зырянского (70—45 тыс. лет назад) и сартанского (25—10 тыс. лет назад) — на террасах остается слой грунта средней толщины всего 1,5—2 м. Столь медленное накопление минерального вещества соизмери-

⁴ Томирдиаро С. В., Черненко Б. И. Криоганно-золотые отложения Восточной Арктики и Субарктики. М., 1987.



Расположение лессово-ледовых земель и ледово-лессовых отложений. Цифрами обозначены останцы: на мысе Быковский (1), Оягосский яр (2), Шелохомский яр (3), на о-ве Большой Ляховский (4), на о-ве Боскуз-Арыта (5), в урочище Мус-Хав (6), Воронцовский яр (7); о. Васильевский (8).

- Лессово-ледовые земли
- Горные сооружения
- Низкие равнины
- Ледово-лессовые земли
- Растущие острова
- Молодые речные и морские наносы

мо с поступлением на Землю глобального дождя вулканической и метеоритной пыли.

В веществе земляных колонн отсутствует пыльца древесных растений при изобилии пыльцы травянистых растений (в то же время существуют лесные сообщества в долинах, расположенных немного южнее горных сооружений). Почти полностью отсутствуют в «колоннах» песчаные фракции. Эти и другие особенности их состава свидетельствуют о поступлении минеральной пыли в «ледяные земли» в основном с севера, со стороны замерзшего в то время Арктического океана.

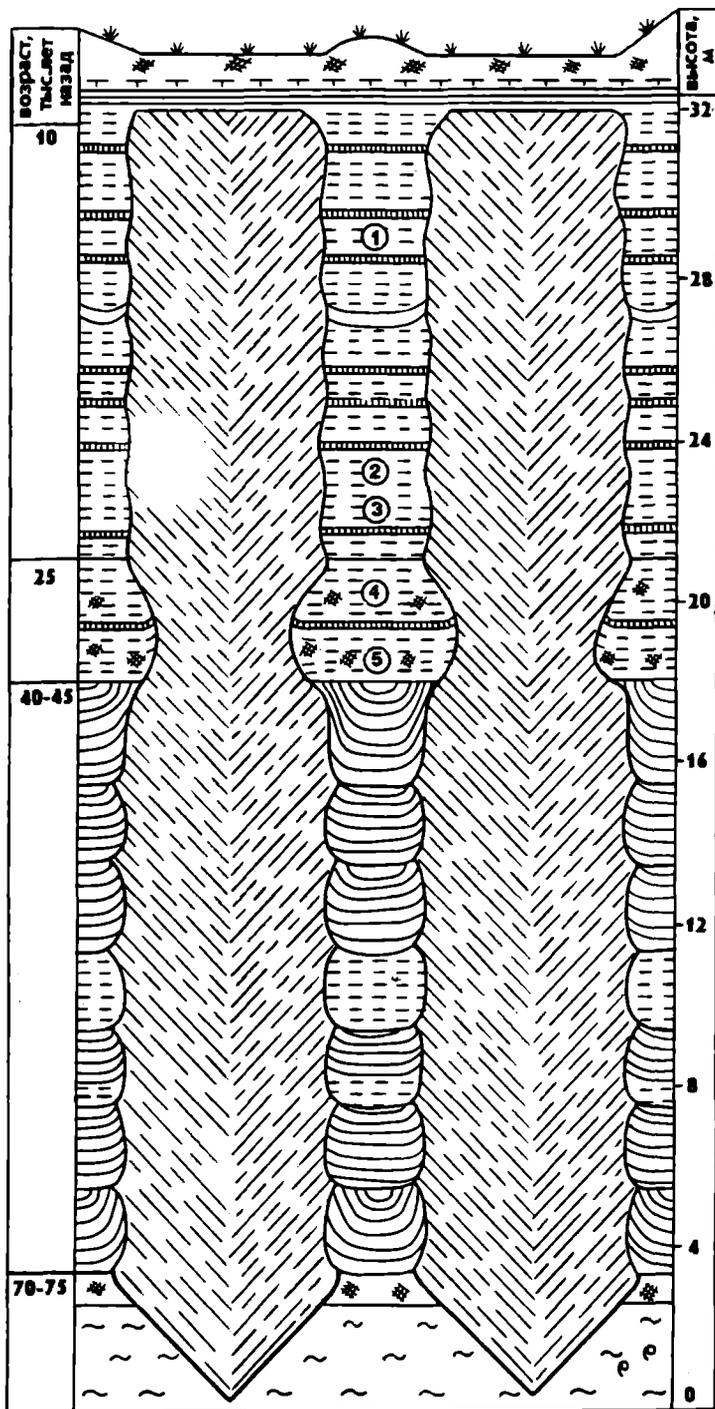
Лессово-ледовые отложения широко развиты на нынешних арктических островах в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. Такие породы слагали исчезнувшие в нашем веке острова Васильевский и Семеновский, «сохранившиеся» на фотографиях. Раньше в этом регионе были подрезаны и размыты морем острова Меркуриус и Диомида, нанесенные на карты. Можно полагать, что также растаяли наблюдавшиеся издали острова типа Земли Санникова. На их месте до сих пор сохранились островные мелководья, известные у моряков как опасные для судоходства банки. Все это позволяет считать, что лессово-ледовый покров однотипного строения покрывал в недалеком прошлом (до начала голоцена) всю шельфовую часть северной Якутии и продолжался далее на север уже в пределах океана по покрывавшему его толстому панцирю невоскрывавшегося многовекового пакового льда. Эту своеобразную

разную лессово-ледовую сушу, представляющую собой трансарктический мост, мы называем Арктидой.

В ходе накопления лессово-ледовых отложений арктического типа под тонким слоем почвы всегда содержались мощные подземные льды. Толщина ледяных жил здесь не уменьшалась даже в самый холодный и сухой сартанский этап (25—10 тыс. лет назад). В отложениях этого же времени, но уже немного южнее толщина ледяных жил резко уменьшилась, что однозначно свидетельствует о резком возрастании темпов эолового лессонакопления.

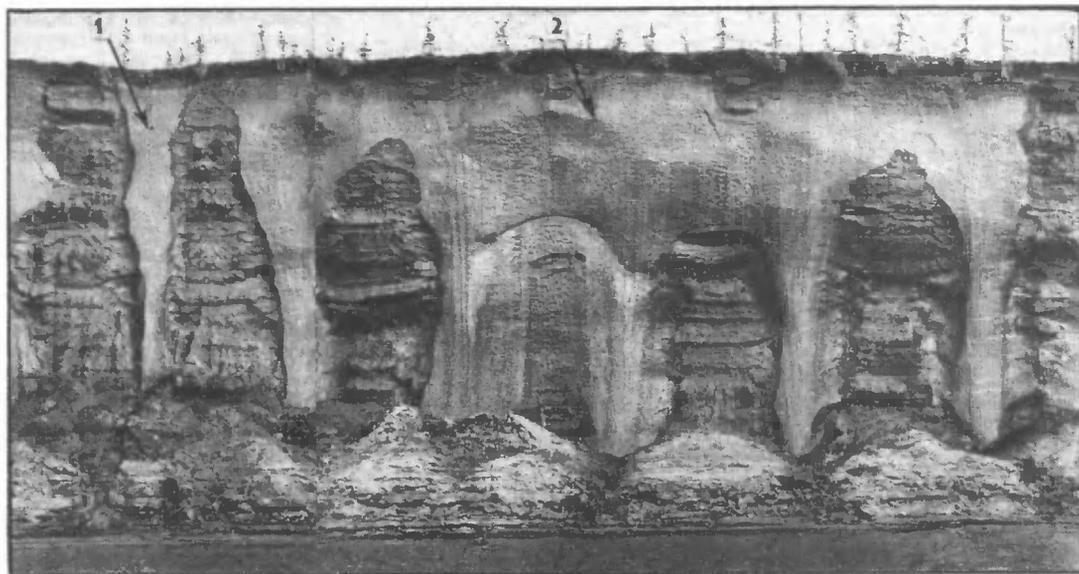
Резкое усиление этого процесса в приледниковых областях Европы в тот же геологический период (здесь он называется позднечюрмским) было установлено еще в 70-х годах⁵. Таким образом, это было глобальным явлением, связанным с резким похолоданием и континентализацией климата, иссушением ландшафтов того времени. И только в арктической области Восточной Сибири этот процесс не проявился, поскольку ветер здесь дул с океана и терригенная пыль с расположенных южнее горных сооружений в Арктику почти не поступала. Накапливалась та же экзотическая пыль, что и в более климатически мягкую зырянскую ледниковую фазу. А поскольку вещество поступало крайне медленно, формировались ледяные гигантские жилы. При этом сам

⁵ Величко А. А. Природный процесс в плейстоцене. М., 1973.



Опорный разрез лессово-ледовой толщи на мысе Быковский (урочище Мамонтова Хойота). Слева — нижние границы стратиграфических горизонтов: голоцена (10 тыс. лет назад); сарганского холодного интервала (25 тыс. лет назад); каргинского потепления климата (40—45 тыс. лет назад); зырянского холодного интервала (70—75 тыс. лет назад). Справа — высота обследованных горизонтов в метрах. Цифрами в средней «колонке» отмечены датировки слоев по ^{14}C : 1 — 14220 ± 100 ; 2 — 21630 ± 240 ; 3 — 22070 ± 410 ; 4 — 28500 ± 630 ; 5 — 38040 ± 810 лет.

-  Лед в ледяных жилах
-  Грунтово-почвенный слой; погребенный торфяник
-  Лессовая порода с прослоями льда (намокавшая)



Опорный разрез ледово-лессовых толщ (криогенно-золовые отложения субарктического типа). Обнажение Мус-Хая на р. Яна. Хорошо видны мощные толщи супесчаного вечномёрзлого лесса с прослоями погребенных в них почвенных горизонтов. Толща почти до подножия обнажения рассекается сравнительно тонкими ледяными жилами. 1 — жила, вскрытая почти вдоль ее простираия (высотой около 30 м и шириной 2—3,5 м); 2 — такая же тонкая жила, но вскрытая вдали ее простираия. Ниже из ледяной стенки выступают тонкие «ледяные колонны» ледяных жил, вскрывающихся (по мере оттаивания обрыва) вкrest простираия.

Фото А. И. Гусева

лед в них имел сублимационный характер, т. е. образовался не из воды, затекавшей летом в глубокие морозобойные трещины, а из кристаллов глубинной изморози, выпадавших на их стенках из воздуха в начале его весеннего прогрева. При этом запасы холода минувшей зимы в толще вечной мерзлоты создавали на стенках глубоких трещин эффект «снежной шубы», известный всем по бытовым холодильникам.

Лед в гигантских ледяных жилах до сих пор не везде намок от просачивавшихся в них уже в голоцене болотных вод. Часто даже сейчас лед представлен скоплениями сыпучих кристаллов.

ЛАНДШАФТЫ И КЛИМАТ

В ледово-лессовых останцах Арктиды изобилуют костные остатки мамонтовой фауны, в том числе первоклассные слоновые бивни. Остатки худшего качества значительно реже находят на расположенных

южнее гигантских равнинах с ледово-лессовыми покровами того же геологического возраста, но с меньшим содержанием льда. Таким образом, можно говорить о более благоприятных условиях захоронений и о более изобильной фауне крупных травоядных в Арктике, чем в Субарктике.

Изучение растительных макро- и микроостатков дает этому феномену следующее объяснение. В пределах Арктиды в позднем плейстоцене существовала богатейшая луговая злаковая растительность, тогда как южнее были распространены сухие польные степи, а в южной Якутии — и настоящие песчаные пустыни.

Именно изобилие подземного льда в толщах Арктиды способствовало в летнее время водному питанию травянистых растений на ее поверхности и формированию богатейших луговых высокоотравных ландшафтов.

Здесь и паслись стада крупнейших в Сибири арктических мамонтов и бизонов, крупных лошадей. Потому бивни арктических мамонтов, собранные на останцах Арктиды, гораздо крупнее бивней так называемых горных мамонтов, живших южнее.

Поскольку в этих районах золотая пыль на равнины могла поступать с ближайших гор даже при господствовавших тогда северо-восточных ветрах, темпы ее накопления были в десятки раз большими и ледяные жилы здесь не успевали разрастись вширь. Отсюда — малое содержание льда в подпочве, а значит, недостаток в летнее время водного питания растений.

И животные здесь были помельче — овцы, быки, более мелкие лошади и бизоны.

Именно из-за этого коренного различия в геологическом строении покровных золово-криогенных толщ арктического и субарктического типов при совершенно одинаковых климатических условиях на них формировались столь резко различные ландшафты — влажные высокопродуктивные злаковые луга в Арктике (в том числе, видимо, и на плавучей части Арктиды) и сухие степи и даже полупустыни в Субарктике. Впервые концепция о парадоксальном развитии в Арктике в самом разгаре холода ледниковых эпох не полярной пустыни, а богатейших мамонтовых травяных пастбищ (с изобилием, кроме мамонтов, других крупнейших травоядных) прозвучала все в той же статье в «Природе». Спустя несколько лет американские и канадские ученые Д. Гопкинс, Д. Мэтьюз, Ч. Швигер, С. Юнг и другие пришли к аналогичным выводам на материале своих исследований на Аляске⁶.

Детальное изучение состава и строения самих ледяных жил позволяет сделать еще ряд палеогеографических выводов. Исследования проб древнего воздуха, сохранившегося в виде бесчисленных пузырьков, защемленных между кристаллами льда из различных останцов, были проведены в газоаналитической лаборатории Магаданского СВК НИИ. Пузырчатость (пористость) древних ле-

дяных жил нередко достигает 9—10 %, что совершенно невозможно для льда, образовавшегося из жидкой фазы воды. Лед в жилах возник из изморози и поэтому порист и имеет белесоватый оттенок.

Анализы показали, что содержание кислорода в пузырьках древнего воздуха в Арктике было гораздо меньшим, чем сейчас. Поскольку кристаллы сублимационного льда (глубинная изморозь) формировались в полигональных морозобойных трещинах «ледяных земель» при весеннем потеплении воздуха, задолго до начала вегетации растений, столь малое содержание кислорода скорее всего было характерно для зимы и ранней весны. Летом воздух несомненно насыщался кислородом из-за бурного произрастания трав при круглосуточном (арктическом) световом дне.

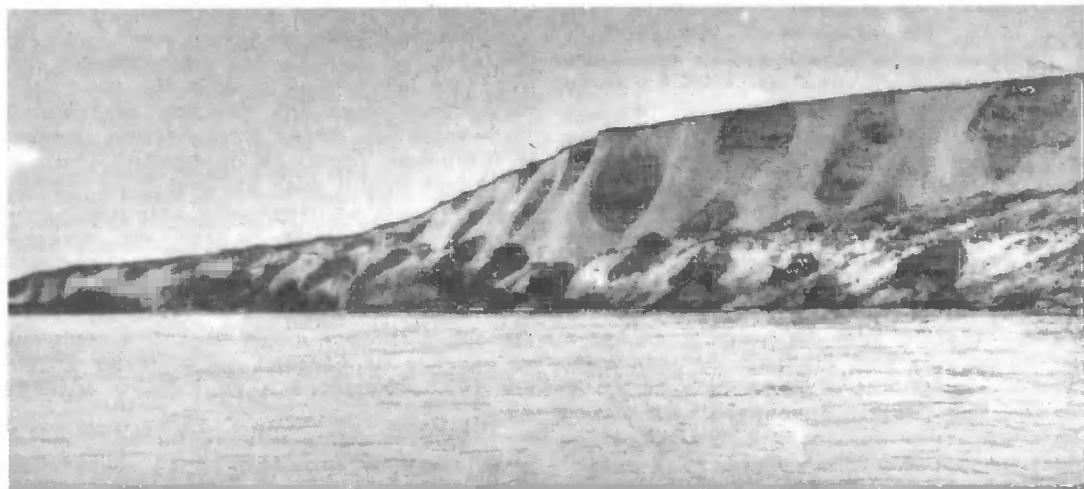
Кроме того, ледяные жилы оказались прекрасными термометрами. Строение слагающих их «элементарных жилок», а также размеры их полигональной решетки в плане позволяют реконструировать древние температурные условия зимних сезонов в Арктике. Оказалось, что морозы здесь достигали -100°C и ниже, а летом воздух мог нагреваться до 20°C и более.

В наше время на Земле аналогов такой континентальности климата нет. Объяснить ее можно лишь существованием суши на месте Арктического океана. Такой сушей в западном секторе Арктики были ледниковые щиты на шельфах, в которые перерастали распространявшиеся на север наземные континентальные ледниковые покровы Северной Европы и Западной Сибири.

Но в Восточной Сибири осадков для наземных оледенений на низменностях не хватало. Здесь ледники существовали только

⁶ Tomirdiuro S. V. // *Paleoecology of Beringia*. N. Y., 1982. P. 29—37.

Лессово-ледовый остров Боскуз-Арыта, уцелевший в дельте р. Лены.





Лессово-ледовое обнажение Шелохомский вр. Здесь виден фрагмент редкого в наше время непосредственного контакта морских волн с уходящим под уровень моря лессово-ледовым массивом.

Фото автора

в горах. Именно поэтому на равнинах формировались золовые мерзлотно-лессовые толщи, в которых изначально присутствовал подземный жильный лед. Золовая пыль покрывала и ледяной панцирь на океане в восточно-сибирском секторе Арктики.

Правда, еще недавно (до наших наблюдений) считалось, что на Аляске мерзлотно-лессовые отложения с жильными льдами действительно содержат золовую пыль, а такие же включения в Якутии и на Чукотке относили, как мы уже отмечали, к речным илам. Но если столь грандиозные их покровы могли возникнуть на огромных междуречьях Восточно-Сибирской равнины, Якутия была обводнена примерно так, как нынешние низовья Амазонки. Это в корне противоречило общим палеогеографическим выводам о крайнем иссушении всех свободных от покровных ледников северных территорий в последние ледниковые эпохи как в Евразии, так и на Аляске.

К тому же при изобилии в ледово-лессовых (и в лессово-ледовых) толщах Якутии остатков типично степной фауны в них полностью отсутствовали остатки рыб, раковин моллюсков и других водных организмов. Кроме того, разновозрастные аллювиальные чехлы не могли сформироваться сразу на террасах разного уровня. В разрезах ледово-лессовых толщ полностью отсут-

ствуют прослои отмытых песков, т. е. русловые речные фации. Наконец, состав толщ, их однотонность в разрезах и соответствующий состав минералов типичен для лессов.

Возникшая в научной литературе дискуссия о происхождении отложений с жильными льдами привлекла внимание ряда геологов Аляски, которые на своей территории уже давно считали весьма схожие по составу отложения бассейнов Юкона и Танаы золовым лессом. Побывав в Якутии, обследовав ряд опорных обнажений и изучив якутские образцы в своих лабораториях, эти специалисты поддержали наши выводы об золовом генезисе.

Золовые процессы и глобальное лессонакопление в позднем плейстоцене были характерны не только для обсыхавшего сибирского арктического шельфа, но и для гигантского ледяного панциря на глубоко промерзавшем тогда Арктическом океане. В восточном (сухом и холодном) секторе на океаническом льду должны были сформироваться те же отложения, которые сохранились на островах, и тот же луговой ландшафт. В результате возникал сухопутный трансарктический мост между Сибирью и Арктической Канадой — Арктида, существование которой давно предполагалось из-за наличия одинаковых растений на островах Новосибирского и Канадского архипелагов.

Полученный и изученный нами материал показал, что если для мамонтовой фауны, флоры лугов и степей ледникового

времени Арктида могла явиться хорошо проходимым трансарктическим сухопутным мостом, то для человека он был непреодолимым барьером. Мамонтовая фауна была адаптирована к крайне низким зимним температурам и к снижению содержания кислорода в воздухе, ибо существовала в этом регионе в течение всего позднего плейстоцена. Нами были найдены кости мамонта в коренном залегании в лессово-ледовой толще на самом севере Якутии в районе дельты реки Лены на Быковском п-ове, которые были датированы радиоуглеродным методом в 21,6 тыс. лет. Возраст бивней и зуба мамонта, найденных В. М. Макеевым на ныне покрытой ледниками Северной Земле, составил около 19 300 лет. А ведь это глубокая Арктика и самое холодное и суровое время за весь плейстоцен.

Изучение останцов Арктиды позволяет также по-новому рассмотреть механизм послеледникового резкого потепления климата в Арктике. Эти останцы не только стремительно разрушаются сейчас морем, озерами и реками, но и, как мы уже отмечали, просто оседают из-за протаивания верхней части ледяных жил. Но поскольку они все же (хотя и фрагментарно) сохранились до наших дней, их разрушение в масштабах целой Арктиды скорее всего произошло не от увеличения солнечной радиации. На границе плейстоцена и голоцена в Арктический океан хлынула теплая атлантическая вода и прорвалась под его льды. Только прогрев находившейся под лессово-ледяным панцирем Арктиды холодной воды Арктического океана мог привести к протаванию этого панциря снизу, к его развалу и выносу плавучих обломков из Арктики.

Не случайно именно в самом начале голоцена донные отложения Арктического океана насыщаются остатками ранее отсутствовавшей морской фауны, в том числе массой атлантических фораминифер. Потепление Арктического океана было столь сильным, что после гибели Арктиды здесь, видимо, сформировался почти безледный режим известного ранее голоценового оптимума. Недаром в это время лесная растительность распространилась по былым степным равнинам арктической Якутии, остатки древовидных ив и берез того времени во множестве встречаются в торфяниках даже на самых северных островах Новосибирского архипелага⁷. Превращение безледного Арктического океана времен оптимума в

современный Ледовитый океан произошло во второй половине голоцена — около 5 тыс. лет назад, одновременно с формированием современных ландшафтов арктических тундр. Мы связываем это с продолжающимся ослаблением водообмена между Атлантикой и Арктикой.

Гибель такой громадной «климатической» суши в Арктике, какой была в ее восточном секторе Арктида, а в западном секторе — шельфовые и плавучие ледниковые покровы, должна была привести к полной перестройке глобальной циркуляции атмосферы в Северном полушарии. Вскрытие в Арктике ранее погребенной под ледяными и лессово-ледяным панцирями огромной океанической акватории создало здесь вместо круглогодичного барического максимума зимний барический минимум, вместо антициклонального режима — господство мощных циклонов, вместо крайне холодного и сухого (криоаридного) климата — плювиальный дождливый морской климат. Сухостепные ландшафты северной Якутии заменились при этом крайне обводненными ландшафтами сплошных болот и озер. Поэтому полностью погибли мамонты и сибирские овцебыки, а лошади и бизоны трансформировались в раннеголоценовые лесные виды. Сменилась даже фауна насекомых⁸. Ранее господствовавшие степные виды сменились фауной озерно-болотных ландшафтов. В целом столь грандиозная катастрофа в Арктике и Субарктике не могла не сопровождаться сильными потрясениями природной среды и в средних широтах Северного полушария.

Не случайно именно к эпохе начала голоцена восходят библейские и шумерские легенды о великом потопе. Есть отголоски этих событий и в преданиях американских индейцев. Столь грандиозные глобальные события многие исследователи объясняют гибелью Атлантиды, но гораздо вероятнее, что эта катастрофа была вызвана гибелью Арктиды. Проведенные нами исследования останцов этого уникального арктического феномена природы, несомненно, далеко не исчерпывают всей заключенной в них геологической и палеогеографической информации. А так как Арктика и сейчас является «кухней погоды» Северного полушария, то ее состояние в недавние ледниковые эпохи представляет особый интерес для специалистов многих областей естествознания.

⁷ Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. М., 1977.

⁸ Киселев С. В. Позднекайнозойские жесткокрылые Северо-Восточной Сибири. М., 1981.

Полиплоидия у дождевых червей

А. Г. Викторов,
кандидат биологических наук
Москва

Распространенность полиплоидных форм у дождевых червей

Род (количество кариологически изученных видов)	Количество цитотипов (способ размножения)	
	диплоидных	полиплоидных
<i>Allolobophora</i> (7)	7 (A)	—
<i>Aporrectodea</i> (4)	4 (A)	3(A)+6(P)+1(Ps)
<i>Bimastus</i>	2 (A)	1(P)
<i>Dendrobaena</i> (12)	10 (A)	8(P)+1(?)
<i>Dendrodriilus</i> (1)	1 (A)	2(A)+4(P)
<i>Eisenia</i> (7)	6 (A)	7(A)+1(P)
<i>Eiseniella</i> (2)	1 (A)	2(P)
<i>Eiseniona</i> (1)	1 (A)	—
<i>Eophila</i> (5)	3 (A)	1(A)+1(P)
<i>Helodrilus</i> (2)	3 (A)	1(P)
<i>Lumbricus</i> (7)	7 (A)	—
<i>Octolasion</i> (8)	7 (A)	1(A)+4(P)+1(?)

Примечания. А — амфимиксис; Р — партеногенез; Ps — псевдогамия; (?) — способ размножения не установлен.

КАК ИЗВЕСТНО, термин «полиплоидия» имеет два оттенка. С одной стороны, это геномная мутация, заключающаяся в увеличении диплоидного числа хромосом путем спонтанного или вызванного экспериментально добавления целых хромосомных наборов. С другой стороны, так называют тип видообразования, производящий полиплоидные биотипы, изолированные генетически от диплоидных предков и представляющие собой биологические виды с момента своего возникновения.

Геномные мутации — значительно более редкое явление у животных по сравнению с растениями. Тем более велик интерес к тем таксонам животных, в которых полиплоидные формы встречаются особенно часто. Примером может служить семейство дождевых червей (*Lumbricidae*). К настоящему времени у 58 кариологически исследованных видов дождевых червей 45 полиплоидных цитотипов. Соотношение между полиплоидными и диплоидными цитотипами близко к 1:1 (45:52). Вполне возможно, что реальное число полиплоидных рас несколько больше либо, наоборот, меньше. Это связано с тем, что практически все авторы, изучавшие полиплоидные расы люмбрицид, сталкивались с варьированием числа хромосом, которое в большинстве случаев носило характер анеуплоидии, т. е. числа хромосом, не кратного гаплоидному набору. Одни авторы

эти случаи рассматривают как вполне реальные гипоплоидные хромосомные наборы, другие — как методические артефакты.

Из 45 полиплоидных рас дождевых червей партеногенетически размножаются 29, амфимиктически — 13, псевдогамно (сперматозоид проникает в яйцеклетку, однако слияния мужского и женского ядер не происходит) — одна, и способ размножения двух не установлен. В большинстве случаев партеногенез у люмбрицид носит характер автомиксиса (одна из форм самооплодотворения), при котором непосредственно перед мейозом в яйцеклетке происходит удвоение числа хромосом. Единственным исключением является гексаплоидная раса *Dendrobaena octaedra*, у которой не происходит конъюгация хромосом и отсутствует первое деление мейоза (ре-

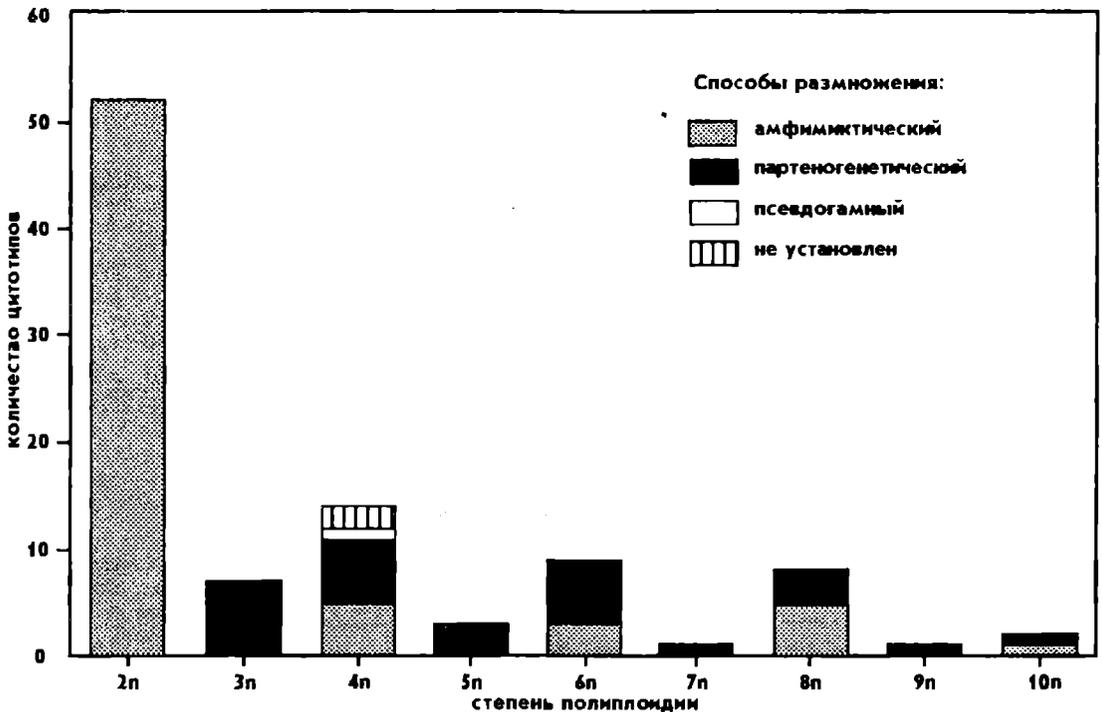
дукционное). В силу этого все образующееся потомство генетически идентично матери². Как известно, подобный тип партеногенеза носит название апомиксиса.

У дождевых червей принято выделять три основные экологические группировки: поверхностно-подстилочные, собственно почвенные и норники. Интересно, что именно в верхних слоях почвы, богатых органикой, с сильными колебаниями абиотических факторов, обитает подавляющее большинство полиплоидных рас. Данная черта особенно четко прослеживается в полиплоидных сериях видов *Eisenia nordenskioldi*, *Aporrectodea caliginosa*, в которых диплоидные черви живут

© Викторов А. Г. Полиплоидия у дождевых червей.

¹ Викторов А. Г. // Успехи совр. биологии. 1993. Т. 113. № 3. С. 304—312.

² Omodeo P. // Caryologia. 1955. V. 8. P. 135.



Частота полиплоидии и количество цитотипов у дождевых червей.

в более глубоких слоях почвы, а полиплоидные (с набором хромосом 4n, 6n, 8n в первом случае и 3n, 4n — во втором) заселяют ее верхние горизонты. Исключение — южносибирская октоплоидная раса *E. pordenskioldi*, относящаяся к норникам³. Эта закономерность обеспечивает, кроме всего прочего, экологическое разделение популяций ди- и полиплоидов в случаях их симпатрического существования.

Наряду с полиплоидией партеногенез, особенно апомиктический, обладает в верхних слоях почвы большими адаптивными преимуществами перед амфимиксисом⁴, поскольку дает возможность сохранять ко-адаптированные комплексы генов, обеспечивающие своим

обладателям существование в довольно широком (по влажности, составу почвы и т. д.) диапазоне местообитаний. Таким образом, у любрицид — обитателей подстилки — формируются две эколого-генетические стратегии, основанные на полиплоидном генотипе и обеспечивающие своим обладателям существование в среде с малопредсказуемыми флуктуациями абиотических факторов. При этом амфимиктические полиплоиды пытаются «генетически поймать среду», реализуя с помощью полового размножения большой запас наследственной изменчивости полиплоидного генома, в то время как их партеногенетические родичи, благодаря девственному размножению, поддерживают в более или менее неизменном виде «генотип на все случаи жизни», позволяющий безбедно существовать в широком спектре разнообразных местообитаний⁵.

Интересно отметить, что гексаплоидная апомиктическая *D. octaedra*, обитающая в 30-километровой зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, единственная среди всех почвенных беспозвоночных, переживших последствия аварии, за два года не только восстановила, но даже несколько превысила свою численность по сравнению с контролем (на относительно незагрязненных радионуклидами участках). Это неожиданное явление объясняется тем, что популяциям этих олигохет удалось выйти из-под пресса размножающихся обычным половым способом хищников, популяции которых восстанавливались несравнимо медленнее, так как встреча особей двух полов при многократном снижении численности стала весьма проблематичной⁶.

Существует несколько точек зрения, объясняющих более обширные ареалы поли-

³ Графодатский А. С., Перель Т. С., Раджабли С. И. // Докл. АН СССР. 1982. Т. 282. С. 1514.

⁴ Jaenike J., Selander R. K. // American Zoologist. 1979. V. 17. P. 729.

⁵ Krivolutzkii D. A., Pokarzhovsky A. D., Viktorov A. G. // Soil Biol. Biochem. 1992. V. 24. N 12. P. 1729—1731.

плоидных дождевых червей по сравнению с их диплоидными сородичами. По мнению П. Омодо, это обусловлено скорее не преимуществами, которые дает им полиплоидный геном, а тем, что, размножаясь партеногенетически, одна полиплоидная особь может основать новую популяцию. Однако среди 22 видов дождевых червей, интродуцированных в Северную Америку, только 8 видов размножаются партеногенетически, а то же время из 11 неарктических видов амфимиктических только два. Данная точка зрения также не может объяснить широкое распространение и амфимиктических полиплоидных люмбрицид (например, *E. nordenskioldi*).

Сравнительный анализ географического распростране-

ния разных рас, принадлежащих одной полиплоидной серии, у ряда видов дождевых червей (*E. atlavinytaeae*, *E. nordenskioldi*, *A. caliginosa*) показывает, что полиплоиды, вне зависимости от способа размножения, имеют тенденцию занимать границы соответствующих видовых ареалов (симпатрия разноплоидных рас одного вида наблюдается лишь в случае, если они принадлежат к разным экологическим группировкам, обитают в разных почвенных горизонтах). Это позволяет сделать вывод о высоких способностях полиплоидных люмбрицид заселять неосвоенные участки почва⁶.

⁶ Викторова А. Г. // Биология почв Северной Европы. М., 1988. С. 103—105.

Отмеченные выше особенности экологии и биогеографии полиплоидных дождевых червей, очевидно, служат проявлением фундаментального общеприродного свойства полиплоидии как эволюционного пути, ведущего к образованию геномов с многократно дублированной наследственной изменчивостью, позволяющих таким червям выдерживать неблагоприятные флуктуации окружающей среды, амплитуда которых бывает особенно велика на границах ареалов, а также во временных и неустойчивых местообитаниях.

КОРОТКО

Ф. З. Меерсон с сотрудниками (НИИ общей патологии РАМН) установили, что в основе известного факта — адаптации организма к регулярно повторяющимся стрессорным воздействиям — лежит генерализованная активация синтеза стресс-белков (белков теплового шока) и их накопление в разных органах, в том числе в сердце, печени и мозге.

Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1993. № 9. С. 231—233.

Английские исследователи (Лондонская школа гигиены и тропической медицины, Институт психиатрии, Лондон) установили, что количество психических заболеваний в Великобритании в 1984—1985 гг. увеличилось по сравнению с 1977 г. на 8 %, причём в

Большом Лондоне заболеваемость еще выше. Причины такого увеличения изучаются.

Journal of Epidemiology Community Health. 1993. V. 47. N 5. P. 358—361 (Великобритания).

Экологические изменения в Приаралье повлияли на возникновение различных заболеваний, в том числе мочекаменной болезни.

Медики во главе с В. С. Рябинским (Урологическая клиника ЦИУФ МЗ РФ) обнаружили, что в питьевой воде арыков и колодцев возросло содержание взвешенных частиц, нитритов, нитратов, хлоридов, повысилась жесткость, а также изменилось соотношение содержащихся в воде элементов с достоверным увеличением железа, марганца, меди, цинка, свинца и никеля.

Урология и нефрология. 1993. № 4. С. 19—23.

По измерениям, выполненным в конце 1990 — начале 1991 г. на южной границе Аргентины (55° с. ш.), отмечено 50 %-ное увеличение потока ультрафиолетовой радиации на земную поверхность, связанное, очевидно, с движением к северу обедненных озонном воздушных масс после весеннего разрушения озоновой дыры над Антарктидой. Дж. Федерик (J. Federik; Чикагский университет, США) считает, что это были первые в мире измерения, показавшие значительное усиление ультрафиолетовой радиации над населенными районами планеты.

Environmental Science and Technology. 1993. V. 27. N 8. P. 1463 (США).

Полеты по программе «Спейс шаттл»: январь — июнь 1993 г.

С. А. НИКИТИН
Москва

В ПЕРВОЙ половине 1993 г. состоялись четыре экспедиции по программе «Спейс шаттл» (53—56-й полеты). Предлагаем их краткий обзор¹.

В 53-м полете была использована орбитальная ступень «Индевор», стартовавшая с космодрома на м. Канаверал (штат Флорида) 13 января 1993 г. в 12 час. 59 мин. по Гринвичу. Корабль «Индевор» вышел на близкую к расчетной орбиту с высотой в перигее 295 км, в апогее — 300 км и наклоном 29°. Экипаж состоял из пяти астронавтов: Д. Каспер (командир), Д. Макмонайгл (пилот), М. Ранко, Г. Харбо, Сьюзен Хелмс (специалисты по операциям на орбите); Хелмс впервые совершила полет в космос.

Основная задача экспедиции заключалась в том, чтобы вывести на орбиту спутник связи «TDRS-6». Спутники этого типа представляют собой ретрансляционные станции, предназначенные для обеспечения связи наземных центров управления полетами с шаттлами и другими космическими объектами на околоземных орбитах. Сеть таких спутников позволяет НАСА отказаться от многих наземных станций слежения и передачи данных. Кроме того, программа полета предусматривала проведение комплекса астрофизических исследований, а также технических и космобиологических экспериментов; соответствующая аппаратура размещалась как в грузовом отсеке, так и непосредственно в шаттле.

Спутник связи «TDRS-6»

вместе с двухступенчатым межорбитальным буксиром «IU»² был выведен на орбиту примерно через 6 ч после старта «Индевора»; масса спутника при этом составляла 2340 кг, масса буксира — 14 160 кг. Далее автоматическая система обеспечила выведение связки «TDRS» — «IU» на геостационарную орбиту, что осуществляется в такой последовательности. Сначала включаются двигатели «Индевора», чтобы отделить и отвести шаттл от связки спутник — буксир, что и произошло через 19 мин. Затем, примерно через 45 мин. после «увода» системы «TDRS» — «IU» от шаттла, включается на 146 с РДТТ первой ступени межорбитального буксира, в результате чего система переходит на промежуточную эллиптическую орбиту (при этом высота в апогее примерно совпадает с высотой геостационарной орбиты — 35 880 км); согласно расчетному времени, это происходит через 7 ч 13 мин после старта. На промежуточной орбите первая ступень буксира «IU» сбрасывается. Далее, еще через 6 ч 12 мин, в точке апогея включается на 108 с РДТТ второй ступени буксира и переводит связку «TDRS» — «IU» на финальную геостационарную орбиту. Согласно расчетам, время выхода на конечную орбиту — 12 ч 30 мин после старта. Для «TDRS-6» точка стояния определена над о-вами Гильберта (Тихий океан) — 178° з. д.

Астрофизические исследова-

ния экипаж проводил с помощью находившегося в грузовом отсеке шаттла диффузного рентгеновского спектрометра (масса 1192 кг), который регистрировал рентгеновское излучение наиболее горячих (1 млн. К) компонент межзвездной среды. Определяя температуру и состав газа, ученые рассчитывают получить важнейшую информацию о происхождении, эволюции и физическом состоянии межзвездной среды нашей Галактики.

На пятый рабочий день полета «Индевора» астронавты Харбо и Ранко совершили выход в открытый космос — первый из серии выходов, нацеленных на отработку операций по сборке орбитальной космической станции «Фридом».

Экипаж выполнил также около 30 экспериментов на коммерческой основе по заказу частных фирм. Большая часть носила биотехнологический характер и проводилась в интересах медицины и фармакологической промышленности.

19 января 1993 г. в 13 час. 38 мин. по Гринвичу «Индевор» совершил посадку на космодроме на м. Канаверал; полет продолжался 6 сут 0 ч 39 мин.

54-й полет по программе «Спейс шаттл», в котором использовалась орбитальная ступень «Дискавери», состоялся 8—17 апреля 1993 г. Стартовал в 5 час. 29 мин. по Гринвичу с космодрома на м. Канаверал, корабль «Дискавери» вышел на близкую к расчетной околоземную орбиту высотой около 300 км и наклоном 57°. В состав экипажа входили пять астронавтов: К. Камерон (командир), С. Освальд (пилот), М. Фолл, К. Кокрелл и Элен Очоа (специалисты по операциям на орбите); Кокрелл и Очоа впер-

² Двухступенчатый межорбитальный буксир «IU» представляет собой разгонный блок длиной 5,18 м и диаметром 2,8 м. Первая ступень РДТТ (ракетный двигатель твердого топлива) имеет массу заряда 9707 кг и развивает тягу 1,885 кН; у второй ступени РДТТ масса заряда 2722 кг, тяга 807 кН.

© Никитин С. А. Полеты по программе «Спейс шаттл»: январь — июнь 1993 г.

¹ Предыдущий обзор полетов по этой программе см.: Природа. 1993. № 9. С. 89—91.

вые совершали полет в космос. Стартовый вес всей космической транспортной системы, включавшей орбитальную ступень «Дискавери», два твердотопливных ускорителя и топливный бак, достигал 2043,4 т; при этом масса научного оборудования — около 7 т, а масса самой орбитальной ступени (без полезной нагрузки, т. е. без экипажа и научного оборудования) — примерно 78 т.

Основная задача экипажа в этом полете состояла в проведении исследований, связанных с изучением Земли и околоземного космического пространства. Для ее выполнения на борту «Дискавери» находилась разнообразная аппаратура, в том числе лаборатория по изучению атмосферы в научных и прикладных целях «ATLAS-2» (Atmospheric Laboratory for Science and Applications). Эта лаборатория (вторая в данной серии) является основой комплексной научной программы НАСА, получившей название «Миссия к планете Земля» и призванной в долгосрочном плане объединить усилия по изучению нашей планеты как глобальной системы. Программа предусматривает всестороннее исследование взаимодействия различных сфер Земли: земной поверхности, воздушной оболочки, водной сферы (океаны, включая ледовые участки) и биосферы. Новые данные позволяют, в частности, лучше понять природу естественных изменений на планете Земля, чтобы четко отличать естественную эволюцию от изменений, вносимых человеческой деятельностью.

Семь приборов лаборатории «ATLAS-2» предназначены для изучения солнечной энергии и химического состава средних слоев атмосферы Земли и их воздействия на озоновый слой. Исходные данные по атмосфере и солнечно-земным связям, с которыми будут сравниваться последующие изменения, были установлены лабораторией «ATLAS-1» во время полета «Атлантика» 24 марта — 2 апреля 1992 г.

Лаборатория «ATLAS-2» снабжена также: трассовым молекулярным ИК-спектроскопом — для установления распределения на высотах 10—

140 км 30—40 различных газов, в том числе водяного пара, озона, метана, хлористых и азотных соединений; микроволновым атмосферным датчиком — для определения температуры и давления в средней атмосфере, а также содержания озона, водяного пара и оксида хлора; УФ-спектрометром — для измерения концентрации озона путем сравнения солнечной ультрафиолетовой радиации с УФ-излучением, отраженным атмосферой. Для исследования солнечного излучения имеется спектральный измеритель, позволяющий установить распределение солнечной энергии по длинам волн от ИК- до УФ-диапазонов, солнечный УФ-регистратор, а также активный радиометр и прибор для определения солнечной постоянной, предназначенные для предельно точных и независимых измерений полной энергии Солнца, достигающей Земли.

Все эти исследования на базе атмосферной лаборатории носили международный характер: помимо американских ученых в разработке экспериментов и создании аппаратуры принимали участие ученые Бельгии, Германии, Франции, Нидерландов и Швейцарии. Эксперимент по изучению солнечной радиации в дальнем ультрафиолете и его воздействия на ионосферу Земли был разработан студентами колледжей и университетов штата Колорадо.

Исследования солнечно-земных связей проводились также с помощью субспутника «Spaflap-201», который, находясь в свободном независимом полете, регистрировал скорость и ускорение солнечного ветра, наблюдал за динамикой солнечной короны. Субспутник был выведен на самостоятельную орбиту дистанционным манипулятором, а затем, после завершения своей программы измерений, манипулятором же был захвачен и возвращен в грузовой отсек шаттла.

Наконец, были продолжены работы, начатые в прежних полетах шаттлов. К ним относятся эксперименты по любительской радиосвязи, по электрооптической локализации шаттла с помощью аппаратуры, установленной на о. Мауи (Гавай-

ские о-ва); по регистрации радиационной обстановки внутри помещения шаттла. Были, продолжены испытания специальной камеры «Геркулес», с помощью которой астронавт может снять интересующий его объект на Земле, а камера при этом автоматически определит долготу и ширину объекта.

Поскольку научная программа была очень насыщенной, исследования велись круглосуточно — по 12 час. поочередно каждой сменой: в «голубой» смене (с голубыми нашивками на костюмах космонавтов) работали астронавты Камерон, Освальд и Очоа, в «красной» (соответственно с красными нашивками) — Кокрелл и Фоул.

17 апреля 1993 г. в 11 час. 37 мин. по Гринвичу «Дискавери» с экипажем совершил посадку (посадочный вес 93,5 т) на м. Канаверал; длительность 54-го полета составила 9 сут 6 ч 8 мин (расчетная продолжительность 8 сут 6 ч 6 мин, однако из-за погодных условий на м. Канаверал посадка была отложена на сутки).

В 55-м полете в 14-й раз использовалась орбитальная ступень «Колумбия», стартовавшая с космодрома на м. Канаверал 26 апреля 1993 г. в 14 час. 50 мин. по Гринвичу. Экипаж «Колумбии» включал семь астронавтов: С. Нейджел (командир), Т. Хенрикс (пилот), Дж. Росс, Ч. Прикорт, Б. Харрис (специалисты по операциям на орбите), У. Вальтер и Г. Шлегель (специалисты по полезной нагрузке). Прикорт, Харрис, Вальтер и Шлегель участвовали в космическом полете впервые; Вальтер и Шлегель — немецкие астронавты, оба — физики по специальности.

Стартовый вес космической транспортной системы «Колумбия» — два твердотопливных ускорителя — топливный бак — составил 2051,5 т, при этом масса орбитальной ступени (без экипажа и научного оборудования) примерно 72,5 т, а масса основной полезной нагрузки — лаборатории «Спейслэб-D2» — 11 361 кг.

«Колумбия» вышла на близкую к расчетной круговую

орбиту высотой 300 км и наклоном 28,5°.

В задачу экипажа входило проведение по заказу ФРГ (за что НАСА будет выплачена соответствующая сумма) научных экспериментов с помощью аппаратуры микрогравитационной лаборатории «Спейслэб-D2». Это — вторая лаборатория такого типа с научной аппаратурой, подготовленной в основном учеными и специалистами ФРГ (первая — «Спейслэб-D1» — была установлена на борту орбитальной ступени «Челленджер» и позволила ее экипажу, в состав которого входили астронавты из ФРГ и Европейского космического агентства, успешно осуществить исследования в 1985 г.). Большая часть этих экспериментов разработана учеными ФРГ и Европейского космического агентства, несколько предположено учеными Японии, три подготовлено НАСА. В целом научная программа лаборатории «Спейслэб-D2» посвящена изучению поведения человеческого организма и других биологических объектов, а также различных материалов в условиях микрогравитации. Не представляется возможным не только коротко охарактеризовать, но даже просто перечислить названия всех 90 экспериментов, поэтому лишь коснемся в нескольких словах отдельных их групп, имеющих либо важное практическое применение, либо открывающих новые исследовательские горизонты в перечисленных направлениях, либо ведущих к получению новых фундаментальных результатов.

В области космического материаловедения были продолжены опыты по выращиванию полупроводниковых кристаллов, в частности кристаллов арсенида галлия, играющих огромную роль в электронике. Эти опыты направлены на получение кристаллов все более высокого качества и больших размеров, а их результаты могут оказаться полезными для улучшения наземных методов выращивания кристаллов.

С помощью аппаратуры, получившей название голографической оптической лаборатории, изучались процессы тепло- и массопереноса, охлаждения — чрезвычайно важных, например,

в металлургии. Несколько экспериментов, имеющих как фундаментальное, так и прикладное значение, посвящено исследованию роста кристаллов белка, а также их биологических свойств. В плане создания и будущего функционирования орбитальной станции «Фридом» важное значение имели эксперименты, связанные с поведением роботов в условиях микрогравитации, с воздействием космической радиации на организмы астронавтов, с оценкой влияния атомарного кислорода на различные материалы — полимерные, композитные, органические (всего было экспонировано 200 образцов).

По традиции экипаж «Колумбии» продолжил эксперименты по любительской радиосвязи.

Научная работа экипажа велась круглосуточно, в две смены, по 12 час. каждая.

6 мая 1993 г. в 14 час. 30 мин. по Гринвичу «Колумбия» с экипажем вернулась на Землю. Посадочный вес корабля составил 103,3 т; продолжительность полета — 10 сут 23 ч 40 мин (расчетная продолжительность — 8 сут 22 ч 2 мин, но снова посадка была отложена из-за погодных условий на м. Канаверал).

Следующий, 56-й запуск по программе «Спейс шаттл» состоялся 21 июня 1993 г. Орбитальная ступень «Индевор» стартовала в 13 час. 07 мин. по Гринвичу с экипажем из шести астронавтов: Р. Грейб (командир), Б. Даффи (пилот), Д. Лоу, Нэнси Шерлок, П. Вайсоф, Дженис Восс (специалисты по операциям на орбите); Шерлок, Вайсоф и Восс впервые совершали полет в космос.

Стартовый вес космической транспортной системы «Индевор» — два твердотопливных ускорителя — топливный бак составил 2050,3 т, в том числе масса орбитальной ступени (без экипажа и полезной нагрузки) 78,6 т, масса основной полезной нагрузки — лаборатории «Спейслэб-1» — 4371 кг. Расчетная орбита «Индевора» в этом полете — круговая высотой примерно 460 км и наклоном 28,45°.

Основная задача экипажа «Индевора» — проведение экспериментов на базе комплекта научной аппаратуры «Спейслэб-1» и встреча со спутником «Эврика-1», его захват, помещение в грузовой отсек и возвращение на Землю. Напомним, что спутник «Эврика-1» был создан Европейским космическим агентством и 31 июля 1992 г. запущен с борта орбитальной ступени «Атлантис» на самостоятельную орбиту высотой 425 км.

НАСА официально трактует успех 56-го полета по программе «Спейс шаттл» как начало новой эры в коммерческом использовании космоса: эксперименты с помощью аппаратуры «Спейслэб-1» проводились полностью на коммерческой основе, кроме того, чисто коммерческими операциями были также запуск и возвращение спутника «Эврика-1».

На четвертые сутки полета после необходимого маневрирования «Индевор» сблизился со спутником «Эврика» настолько, что ручной механический робот-манипулятор смог успешно захватить его и поместить в грузовой отсек шаттла.

На следующий день Лоу и Вайсоф осуществили выход в открытый космос продолжительностью примерно 4 ч (он стал вторым в серии выходов с целью отработки операций, необходимых при сборке орбитальной космической станции «Фридом»). Кроме того, астронавты выполнили в открытом космосе несколько операций с использованием механического манипулятора в плане подготовки к ремонту Космического телескопа им. Хаббла, который предполагалось провести в декабре 1993 г. во время очередного полета по программе «Спейс шаттл».

Интересно отметить, что выход в открытый космос стоял на последнем месте в иерархии приоритетов программы 56-го полета. Дело в том, что первоначально запланированная длительность полета составляла 6 сут 22 ч 40 мин. Однако после стартовых расчетов остатков топлива и потребного характеристического импульса для встречи со спутником «Эврика», его захвата и помещения в гру-

зовой отсек шаттла позволили продлить время полета на 24 ч. А выход в открытый космос разрешалось провести только в случае увеличения длительности полета на сутки.

Львиная доля времени была отведена экипажем работе с комплексом аппаратуры «Спейсхэб-1». Лаборатория содержала оборудование для проведения 22 экспериментов, из которых 13 — в области космического материаловедения и биотехнологии. В этих экспериментах изучались процессы получения полимерных материалов в условиях микрогравитации (с последующим сравнением с такими же полимерами, произведенными в наземных условиях); физические и химические процессы, происходящие при образовании полимерных мембран; процессы выращивания

кристаллов, в том числе белковых веществ. Исследовались воздействия факторов космического полета на организм человека, возможность полной утилизации человеческих выделений; обрабатывались элементы замкнутой системы водопользования.

Некоторые из выполненных экипажем «Индевор» экспериментов были предложены студентами (например, по отработке методов дозаправки космического аппарата топливом на орбите) или проводились для студентов в демонстрационных целях (например, демонстрация явления сверхтекучести гелия).

ВВС США провели очередной эксперимент по регистрации факела при работающих двигателях шаттла, конверсионного следа или так назы-

ваемого феномена «шаттлового сияния» — надежно зарегистрированного эффекта, возникающего при взаимодействии шаттла с атомарным кислородом на орбите. Эксперимент проводился с помощью электрооптической установки на о. Мауи (Гавайские о-ва).

1 июля 1993 г. в 12 час. 52 мин. по Гринвичу «Индевор» совершил посадку на м. Канаверал (посадочный вес корабля 101,7 т). Посадка откладывалась дважды — сначала из-за плохой погоды в районе м. Канаверал, затем из-за низкой облачности над посадочной полосой, и в результате длительность 56-го полета (четвертый полет «Индевора» по программе «Спейс шаттл») составила 9 сут 23 ч 46 мин.

НОВОСТИ НАУКИ

Астрофизика

Зависимость физических констант от времени

В 1938 г. знаменитый английский физик П. А. М. Дирак высказал предположение о возможном изменении во времени фундаментальных физических констант¹. Впоследствии был предложен ряд экспериментов по проверке этой гипотезы². В работе сообщалось об экспериментально обнаруженном изменении во времени отношения частот квантовых стандартов оптического и радиодиапазонов. Предполагалось, что одна из возможных причин этого — непостоянство отношения массы электрона к массе протона $\mu = m_e/m_p$. Полу-

ченное значение скорости изменения этого параметра оказалось равным $\dot{\mu}/\mu = (2,3 \pm 0,3) \times 10^{-11} \text{ год}^{-1}$. Значит, за время существования Вселенной $\sim 1,5 \cdot 10^{10}$ лет отношение масс электрона и протона выросло бы на несколько десятков процентов (в том случае, если μ линейно зависит от космологического времени). Это увеличение параметра должно проявиться в спектрах внегалактических объектов, сформированных $\sim 10^{10}$ лет назад.

Д. А. Варшолович и С. А. Левшаков (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) проанализировали линии поглощения молекулярного водорода в спектре квазара PKS 0528-250, в котором идентифицированы линии поглощения лаймановской и вернеровской полос с красным смещением $Z = 2,811$, что соответствует времени образования Вселенной $\sim 1,3 \cdot 10^{10}$ лет.

Как известно, энергия молекулы, равная сумме электрон-

ной, вращательной и колебательной энергий, может быть представлена в виде разложения по степеням параметра m_e/M , где M — масса молекулы. Для водорода $M = 2m_p$, и энергия его молекулы разлагается по параметру $\mu = m_e/m_p$. Именно это и позволяет, исходя из сравнения отношения частот линий в спектре квазара, излученных на ранней стадии развития Вселенной, с отношением частот тех же линий в лабораторных условиях, определить изменение параметра μ во времени.

Было проанализировано 18 линий из спектра квазара PKS 0528-250. При условии линейности изменения с космологическим временем параметра μ , оказалось, что $|\dot{\mu}/\mu| \leq 3 \cdot 10^{13} \text{ год}^{-1}$, это на два порядка меньше значения, полученного в лабораторном эксперименте. Точность прецизионных лабораторных измерений существенно выше астрономических, но из-за большого ин-

¹ Dirak P. A. M. // Phys. Rev. Lett. 1938. V. A165. P. 199.

² Долинин Ю. С., Малинюк А. Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43. С. 167.

тервала времени наблюдения космических объектов получающиеся значения скорости изменения m/m_p много меньше значений, получаемых прямой лабораторной проверкой.

Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58. Вып. 4. С. 231—235.

Астрофизика

Где кончается Солнечная система?

Солнце, как известно, выбрасывает во внешнее пространство потоки ионизованного газа (плазмы), именуемые солнечным ветром. Они перемещаются со сверхзвуковыми скоростями, пока не столкнутся с потоками межзвездного газа, выброшенного в свое время другими звездами. В результате такой встречи возникает сферическая ударная волна, граница которой — гелиопауза — представляет собой барьер, о который и ударяется солнечный ветер. Движение Солнца в галактическом пространстве и движение межзвездного газа искажают форму гелиопаузы, и вместо сферической она приобретает каплеобразное очертание.

Существование гелиопаузы было зарегистрировано благодаря мощным радиосигналам низкой частоты летом 1992 г. приборами, установленными на американских космических аппаратах «Вояджер-1 и -2». Выяснилось, что она лежит далеко за пределами орбиты Плутона, считавшейся границей Солнечной системы. Было известно, что еще в мае-июне 1991 г. на Солнце произошли крупные вспышки, выбросившие сильные потоки частиц. Очевидно, радиозлучение, зафиксированное «Вояджерами», было генерировано ударами именно этих частиц о гелиопаузу.

Зарегистрированный тогда сигнал лежал в диапазоне 1,8—3,5 кГц. Радиоволны столь низкой частоты никогда не проникают внутрь Солнечной системы — солнечный ветер представляет для них слишком плотный барьер.

Расстояние до гелиопау-

зы удалось измерить благодаря точному определению времени событий: в сентябре 1991 г. оба «Вояджера» отметили внезапное падение интенсивности космических лучей, что было вызвано их отклонением во внешнее пространство под воздействием проходивших рядом с аппаратами заряженных частиц, изверженных Солнцем; примерно через 9 мес. после этого и наблюдались мощные радиосигналы. Зная время событий, Д. Гарнет (D. Garnett; Университет штата Айова, США) с коллегами смогли рассчитать скорость этих частиц, составляющую от 600 до 800 км/с. Следовательно, гелиопауза находится на расстоянии между 126 и 169 а.е. от Солнца.

Однако есть возражения против этой точки зрения. Так, Р. Макнатт (R. McNutt; Университет им. Дж. Гопкинса в Балтиморе, штат Мэриленд, США) полагает, что частицы могли начать замедляться еще за первоначальной ударной волной, из чего следует, что гелиопауза находится в 80—130 а.е. от Солнца.

Еще одним доказательством обнаружения гелиопаузы служит факт регистрации вспышки радиоизлучения в 1983—1984 гг., которая, очевидно, была порождена происшедшим за год с небольшим до нее крупным извержением на солнечной поверхности; этой вспышке тоже предшествовало падение интенсивности космических лучей, зарегистрированное «Вояджерами».

Частота радиоволн зависит от плотности плазмы у гелиопаузы. Идущие от нее волны «срезаны» на уровне ниже 1 кГц. Это говорит о том, что в межзвездном пространстве вокруг Солнечной системы содержится в среднем около 0,04 электрона в 1 см^3 . Хотя волны с более низкими частотами и могут проникать сквозь раскаленный и неплотный солнечный ветер во внешних областях Солнечной системы, межзвездная среда с ее низкими температурами и большей плотностью их задерживает.

Часть астрофизиков склонна принять гелиопаузу за границу Солнечной системы; иные возражают, указывая на

существование значительного числа комет, составляющих так называемое Облако Оорта, которое тоже принадлежит Солнечной системе, но расположено на еще больших расстояниях от нашего светила.

New Scientist. 1993. V. 138. N 1879. P. 14 (Великобритания).

Астрономия

Открыто четыре новых спутника

Всего за одну неделю в сентябре 1993 г. число естественных спутников планеты Нептун «увеличилось» на четыре.

Два из них обнаружены американскими астрономами Д. Джюитом (D. Jewitt; Университет штата Гавайи, Гонолулу) и Дж. Луу (J. Luu; Стэнфордский университет, штат Калифорния), работавшими на 2,2-метровом телескопе обсерватории Мауна-Кеа (Гавайи). Диаметр каждого из этих небесных тел составляет, по всей видимости, от 150 до 200 км; орбита проходит вблизи поверхности планеты.

Еще два спутника Нептуна в те же дни были открыты А. Уильямсом (A. Williams; Уэстфилдский колледж им. Королевы Марии, Лондон) и А. Фицсиммонсом и Д. О'Силлэйгом (A. Fitzsimmons, D. O'Sealigh; Королевский университет в Белфасте, Ирландия). Наблюдения велись на 2,5-метровом Телескопе им. Исаака Ньютона, расположенном на Канарских о-вах (Испания). Размеры этих небесных тел и параметры их орбиты пока не сообщаются.

Всего годом раньше те же Д. Джюит и Дж. Луу впервые наблюдали неизвестный слабосветящийся и медленно движущийся объект, который обращается вокруг Плутона. В марте 1993 г. они же присоединили к «свите» Плутона еще один спутник. Оба этих небесных тела имеют поперечник около 200 км или немногим более.

Столь стремительный темп открытий навел Джюита на мысль, что во внешней части Солнечной системы существу-

ют еще десятки тысяч аналогичных объектов, еще неизвестных астрономам.

New Scientist. 1993. V. 139. N 1893. P. 12 (Великобритания).

Астрономия

Как отклонить астероид!

Хотя вероятность столкновения Земли с достаточно крупным небесным телом, что причинило бы всему живому неисчислимые беды, но слишком велика, однако полностью исключить такое событие тоже нельзя, поэтому специалисты предлагают различные способы избежать подобной угрозы.

Есть сторонники идеи заблаговременно подготовить мощную ракету с ядерной боеголовкой, которую можно будет немедленно запустить в направлении приближающегося к планете объекта. Суть не в том, чтобы «разбомбить и уничтожить» небесное тело, а чтобы отклонить его с опасной орбиты. Взрыв бомбы вблизи астероида или на нем заставит испариться с его поверхности газ, струи которого сработают наподобие реактивного двигателя и уведут астероид в сторону. Э. Теллер, «отец» американской водородной бомбы, известный своей безграничной решимостью, уже призвал правительство США испытать такого рода «перехватчик» на проходящих мимо Земли и не представляющих опасности астероидах. Теллера охотно поддержали представители военно-промышленного комплекса, заинтересованные в заказах заводы, пострадавшие от окончания «холодной войны». В НАСА был подготовлен отчет о готовности к составлению соответствующей программы, но один из членов комиссии, К. Чепмэн (С. Чарман; Институт наук о Луне и планетах, Тусон, штат Аризона, США), отказался подписать этот документ, видя в нем «сознательную попытку склониться в пользу военных технологий».

Сходной идеи придерживаются И. Немчинов (Институт динамики геосфер РАН, Москва) и Дж. Меллош (J. Melosh; Уни-

верситет штата Аризона, США). По их мнению, следует использовать гигантское зеркало: сфокусировав солнечные лучи на поверхности астероида, оно поднимет его температуру, а остальное довершат выравнявшиеся из недр газовые «гейзеры». Решение хотя и более сложное технически, зато значительно безопаснее.

Не убежден в правильности этой идеи видный астрофизик К. Саган (С. Sagan; Корнеллский университет, Нью-Йорк). Он озабочен, тем, что некий злоумышленник, прознав о методе, может попытаться применить его «наоборот»: перенацелить летящий мимо Земли астероид на столкновение; даже само составление списка таких безопасных астероидов может облегчить злодею его намерение ради шантажа человечества или же по безумию превратить мирное небесное тело в смертельное оружие.

Не испугавшись такого кинофантастического поворота сюжета, Немчинов и Меллош излагают свою идею более детально на страницах английского журнала «Nature»: по сигналу с Земли в случае обнаружения идущего «на таран» астероида в космос с борта шаттла или специально запущенной ракеты выбрасывается гигантский парус; следуя на соответствующем курсе вблизи от небесного тела, парус направляет на его поверхность отражаемый пучок солнечного света — и далее развевается уже описанный сценарий.

Согласно подсчетам, «зеркальный парус» способен за год работы отклонить с опасной орбиты астероид диаметром до 2,2 км; на 10-километровый уйдет около десятилетия. Чтобы за такой же срок отвести на безопасный путь такой же астероид путем взрыва, потребовалась бы ядерная бомба с тротиловым эквивалентом от 200 до 2000 Мт, что небезобидно уже само по себе. Впрочем, в любом случае, а в парусной модели в особенности, необходимо заблаговременное оповещение о надвигающейся катастрофе.

В успокоительном тоне выступает видный специалист по кометам и астероидам Б. Марс-

ден (B. Marsden; Гарвардско-Смитсоновский астрофизический центр, Кембридж, штат Массачусетс): должное внимание к подобным исследованиям позволит заранее предсказать угрозу в случае долгопериодных небесных тел, идущих к нам из самых удаленных областей Солнечной системы. Однако такие астероиды составляют, по-видимому, лишь 2—5 % общего их числа, зато все более близкие, вероятно, уже открыты, и прямо угрожающих Земле среди них как будто бы нет. Так или иначе, Марсден считает гигатонную нейтронную бомбу (предлагали и такой вариант!) на Земле или на околоземной орбите еще более опасной, чем астероид.

Дебаты продолжаются.

New Scientist. 1993. V. 140. N 1899. P. 8 (Великобритания).

Астрономия

И все-таки не планеты!

В 1992 г. астрономы К. Марш и М. Махони (K. Marsh, M. Mahoney; Лаборатория реактивного движения в Пасадене, Калифорния, США) высказали предположение, будто вокруг трех молодых звезд в созвездии Тельца обращаются планеты. Гипотеза основывалась на обнаруженном ими резком обрыве в инфракрасном спектре газопылевых дисков, окружающих эти звезды. Обрыв связан, по их мнению, с пробелом, создаваемым невидимой для нас планетой.

С опровержением данной гипотезы выступили А. Босс (A. Boss; Институт им. Карнеги, Вашингтон, США) и Х. Йорк (H. Yorke; Вюрцбургский университет, Германия). Рассчитав инфракрасный спектр газопылевого диска, окружающего молодую звезду, они обнаружили, что падение интенсивности в спектре может происходить и тогда, когда в диске нет разрывов.

Дело в том, что пылевые частицы при температуре около 30 °C приобретают способность испаряться, что «ликвидирует» излучение в коротко-

волновой части инфракрасного диапазона, которая как раз и соответствует данной температуре.

Дискуссия продолжается.

Astrophysical Journal Letters. 10.07.1993 (США); *New Scientist*. 1993. V. 138. N 1878. P. 17 (Беликобритания).

Планетология

Этот астероид не виноват

В штате Айова (центральная часть США) находится кратер Мансон — один из крупнейших на Земле (его поперечник 35 км). В 1988 г. М. Кунк (M. Kunk; Геологическая служба США, Рестон, штат Вирджиния) определил, что его возраст близок к 64—65 млн. лет, т. е. примерно совпадает со временем глобальной катастрофы, приведшей к массовому вымиранию различных видов флоры и фауны на границе мелового и третичного периодов в истории Земли.

В начале 1993 г. группа геофизиков установила, что «магнитный» возраст пород, слагающих этот кратер, не соответствует времени катастрофы. Ныне Кунк совместно со своим коллегой Г. Изеттом (G. Izett) заново изучили мансонские геологические породы, взяв образцы для исследования непосредственно в зоне удара небесного тела о поверхность Земли, где отмечено плавление пород. В результате они получили новую датировку события — оно произошло около 73,8 млн. лет назад.

Такое определение возраста сделано также на основании того факта, что на территории соседнего штата Южная Дакота недавно найдены трещиноватые зерна кварца, полевого шпата и циркония (трещины явно вызваны мощным сотрясением), а возраст геологических слоев, в которых обнаружены эти зерна, надежно датируется в пределах 72,3—74,8 млн. лет.

Таким образом, южнодакотские и мансонские события на 7—11 млн. лет древнее катастрофы, нанесшей столь колоссальный урон земной жи-

ни. Если в проблеме массовой гибели животных и растений в конце мелового периода придерживаться гипотезы столкновения Земли с крупным небесным телом, то единственным реально возможным виновником такого события является астероид, который обрушился на п-ов Юкатан (южная Мексика), оставив после удара о Землю кратер Чиксулуб диаметром, как недавно установлено, 300 км.

Science. 1993. V. 262. P. 729 (США).

Физика

Жидкости испаряются брызгами

Испарение конденсированных тел традиционно описывается в учебниках как мономолекулярный процесс, состоящий в выходе наиболее быстрых атомов из потенциальной ямы, глубина которой равна средней энергии связи U . В соответствии с этим представлением поток испаренных атомов вычисляется как интеграл по распределению скоростей в пределах от минимальной величины, обеспечивающей вылет атома, до бесконечности. Эти представления, конечно, чрезмерно упрощены.

В действительности, как считают С. И. Анисимов и В. В. Жаховский (Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН), для атомов, находящихся в поверхностном слое и вносящих основной вклад в испаренный поток, энергия связи U не является фиксированной величиной, а зависит от структуры ближайшего окружения данного атома. Она равна U только по порядку величины. При температурах много меньших U/k время выхода в газовую фазу оказывается много больше времени перестройки ближайшего окружения поверхностного атома, иными словами — характерного времени изменения самой энергии связи U . Таким образом, процесс испарения является коллективным. Вследствие флуктуаций энергии связи в поверхностном слое образуются атомы или группы атомов, для отрыва которых достаточно энергии порядка сред-

ней тепловой. Эти атомы и определяют величину испаренного потока. Если принять описанный механизм перехода атомов из конденсированной фазы в газовую, то сам собой отпадает неоднократно обсуждавшийся в литературе, но так и не решенный сложный вопрос о формировании высокоэнергетического «хвоста» максвелловского распределения атомов в поверхностном слое.

С макроскопической точки зрения, флуктуации энергии связи поверхностных атомов представляют собой известные капиллярные волны. Граница раздела между жидкостью и паром в действительности не является ни плоской, ни стационарной. На участках границы, выпуклостью обращенных в сторону газовой фазы, энергия связи уменьшается на величину, которая становится сравнимой с U при длинах волн порядка межатомного расстояния. Для таких волн макроскопическое описание, разумеется, некорректно. Однако при качественном обсуждении механизма испарения удобно представлять себе, что на границе фаз (толщина которой вдали от критической точки порядка межатомных расстояний) возбуждены волны, спектр которых простирается вплоть до длин волн, сравнимых с толщиной границы. Взаимодействие таких поверхностных мод ведет к сложному стохастическому изменению формы границы со временем — своеобразной поверхностной турбулентности. При таком движении за счет коротковолновых мод образуются участки границы с большой локальной кривизной, вносящие значительный вклад в поток испаренных атомов. Заметим, что при длинах волн, в несколько раз превышающих межатомные расстояния, движения нескольких атомов в волне коррелированы, поэтому, наряду с испарением отдельных атомов, можно ожидать отрыва от поверхности небольших их групп.

Эти простые качественные соображения были подтверждены авторами численным моделированием процесса испарения, выполненным методом молекулярной динамики

для системы из 8 тыс. частиц с потенциалом взаимодействия Ленарда—Джонса. В расчетах хорошо видно, что от поверхности иногда отрываются достаточно большие (порядка десятка атомов) кластеры, которые обычно находятся в колебательно-возбужденном состоянии и распадаются в газовой фазе на более мелкие. Распределение потенциальной энергии для газа имеет выраженный «хвост» в сторону отрицательных энергий. Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. С. 91.

Организация науки

Чем заняты английские ученые?

Департамент трудоустройства Великобритании провел опрос работодателей с целью выяснить, каким образом распределены в стране те или иные специальности среди лиц, непосредственно занятых в области науки и техники.

Оказалось, что на первом месте по численности стоят специалисты в области вычислительной техники, анализа компьютерных данных и программисты: их насчитывается 170 тыс. Это более чем вдвое превышает численность техников-лаборантов, занимающих второе место.

В области биологических наук (включая биохимию) работают около 50 тыс. специалистов; в области химии — примерно 35 тыс.

Физики, геологи и метеорологи, вместе взятые, насчитывают лишь около 12 тыс. чел.; по другим дисциплинам, относящимся к естественным наукам, набирается примерно 15 тыс.

Фармакологией заняты 30 тыс. специалистов; в медицинской радиологии работают 15 тыс.; медицинскими и зубо-врачебными техниками — 21 тыс.; психологов насчитывается около 2 тыс., а специалистов в области других наук о поведении человека вместе со специалистами по общественным дисциплинам — немногим более 1 тыс.

Отряд экономистов и статистиков составляют около 20 тыс. чел. Преподаватель-

ский состав университетов не превышает 22 тыс.

Всего в стране наукой и техникой заняты 595 тыс. чел. Кроме того, те или иные специальные познания в этих областях используются еще у 1,7 млн. чел.

Совет по науке и технике Великобритании призывает обратить внимание на эти статистические данные, с тем чтобы исправить некоторые диспропорции в распределении специалистов (в частности, считается недостаточным число преподавателей в высших учебных заведениях), а также повысить оплату научного труда, что должно сделать его более привлекательным для молодежи.

New Scientist. 1993. V. 139. N 1887. P. 10 (Великобритания).

Биотехнология

Получение таксина

Таксин, ядовитый для человека и некоторых животных алкалоид, содержится в коре и древесине тиса в незначительных количествах. А между тем это одно из средств для лечения рака, основанное на способности тормозить деление клеток. Таксин широко применяют для лечения рака яичников, кожи, грудных желез, прямой кишки.

Ф. Ди Космо (F. DiCosmo, Центр биотехнологии растений, Университет г. Торонто, Канада) и его коллеги разработали новый метод получения таксина из клеточной культуры тиса. Они использовали клетки коры двух видов тиса: дальневосточного (*Taxus cuspidata*) и канадского (*T. canadensis*), которые помещали в питательный агар и инкубировали. Примерно через 30 дней образовывалась бесформенная масса (каллус) с содержанием таксина около 0,02 % от биомассы клеток, что примерно в два раза больше, чем в самой коре. Кроме того, исследователи установили, что выращивание клеток коры тиса в питательном бульоне облегчает получение таксина, так как он выделяется во внешнюю среду.

Авторы полагают, что новый метод получения таксина в скором времени будет освоен промышленностью и это, помимо прочего, поможет сохранить природные ресурсы тиса. New Scientist. 1993. V. 137. N 1855. P. 21 (Великобритания).

Биохимия. Медицина

Перспективы лечения паркинсонизма

Во всем мире около 1 % 70-летних людей страдают от болезни Паркинсона, возникающей из-за гибели подкорковых узлов (*substantia nigra*) головного мозга при атеросклерозе, воспалении мозга и т. п. Для лечения паркинсонизма обычно используют препараты, которые стимулируют синтез нейромедиатора дофамина клетками мозга. Но в конце концов и этот препарат перестает помогать.

Более перспективным считается лечение, основанное на введении в мозг больного нервных клеток зародышевой человека, полученных после абортов. Однако эти клетки могут погибнуть после пересадки.

Сотрудники биотехнологической компании «Sinergel» (штат Колорадо, США) исследовали разные типы клеток мозга крысы и установили, что выживанию упомянутых трансплантатов могут способствовать клетки глии, которые заполняют пространство между нейронами и мозговыми капиллярами и служат для защиты и опоры нервных клеток мозга. Исследователи получили из линии глиальных клеток субстанцию, названную нейротрофическим фактором (GDNE), очистили ее и определили последовательность ДНК, а затем идентифицировали соответствующий ген человека. Этот ген был клонирован, введен в бактериальные клетки, в результате чего удалось получить нужное для работы количество белка GDNE. Оказалось, что этот белок помогает сохранять жизнеспособность продуцирующих дофамин нервных клеток, 70 % которых обычно погибает в течение трех

недель культивирования. Добавление в культуральную среду GDNE останавливает процесс их гибели, способствует увеличению размеров отростков, производящих дофамин, и стимулирует синтез этого медиатора. На все другие виды нервных клеток действие GDNE не распространяется.

New Scientist. 1993. V. 138. N 1875. P. 16 (Великобритания).

Медицина

ОРЗ — это серьезно

Трудно поверить, что острые респираторные инфекции могут стать причиной смерти миллионов детей. Тем не менее ежегодно в мире умирают 4,3 млн. заболевших ОРЗ детей, причем более полутора миллионов — в Африке.

Африканские дети болеют ОРЗ в среднем 6—10 раз в год. Чаще всего никакого лечения, кроме домашнего режима, достаточного питья и полноценного питания, не требуется, тем не менее до 70 % этих детей получают совершенно ненужное и дорогое лечение антибиотиками или другими препаратами.

Почти во всех странах Африки настоящим убийцей стала пневмония (детская смертность больше 40 случаев на 1000 человек). В подавляющем большинстве случаев это болезнь может быть успешно вылечена при условии своевременного поставленного диагноза и использования антибиотиков. Пневмония у африканских детей развивается на фоне недостаточного питания, поэтому среди возможных профилактических мер, по мнению экспертов ВОЗ, должны быть: улучшение питания, снижение частоты рождения маловесных детей, борьба с загрязнением воздуха в помещениях и т. п. Кроме того, специалисты считают (правда, не приводя объяснений), что 10 %-ного снижения смертности от пневмонии можно достичь вакцинацией населения против коклюша и кори.

World Health Organization. Press Release. 1993. N 79 (Швейцария).

Медицина

Эпидемия дифтерии

В последние десятилетия в развитых странах мира дифтерию удавалось успешно сдерживать благодаря широкой иммунизации детей дифтерийным анатоксином. В развивающихся странах для прививок против дифтерии используют смешанную вакцину КДС (против коклюша, дифтерии и столбняка).

В Европе наиболее низкий уровень заболеваемости дифтерией — 623 случая — был зарегистрирован в 1980 г. В некоторых европейских странах за более чем десятилетний период не зафиксировано ни одного случая этой болезни. Такая же примерно ситуация в Австралии, Канаде, Японии и США. В Китае ежегодное число случаев дифтерии упало с 25 859 в 1974 г. до 143 в 1992 г. Сходным образом снизилась заболеваемость и во многих других странах, таких как Аргентина, Бразилия, Алжир, Египет, Малайзия, Таиланд, Шри-Ланка. В Индии и Нигерии снижение заболеваемости менее очевидно.

В СССР заболеваемость дифтерией начала расти еще в 80-х годах и достигла первого пика в 1983—1985 гг. — 1400—1600 случаев в год. Это составило около 87 % общего числа случаев этой болезни в Европе (для сравнения: в 1974 г. — только 14 %). Вторая волна эпидемии началась в 1990 г. и в 1991 г. только в России было зарегистрировано 1896 случаев дифтерии и 80 смертельных исходов, в 1992 г. — уже 3897 случаев и 125 смертей, а за первые семь месяцев 1993 г. — 4685 случаев дифтерии. Наиболее высокая заболеваемость наблюдалась в Санкт-Петербурге, Калининградской и Орловской областях, а также в Москве. Среди заболевших — больше всего взрослых (в основном продавцы, работники транспорта, военные и медицинский персонал), но немало и детей дошкольного и школьного возраста. Эпидемия дифтерии в России продолжает расти: только в

июле 1993 г. заболело еще 983 человека.

На Украине в 1991 г. заболел 1101 человек, в 1992 — 1553; за первые семь месяцев следующего года — 1462, причем наибольшее число заболевших было в Киеве, Харьковской области и в Крыму.

Основными причинами вспышки дифтерии в России и на Украине считают снижение охвата прививками детей, ослабление иммунитета взрослых, миграцию населения, сказывающуюся на распространении патогенных форм инфекции.

Имеются отчетливые признаки того, что вспышка дифтерии, достигшая размеров эпидемии в России и на Украине, распространяется и на соседние территории. В 1993 г. за первые семь месяцев зарегистрировано 28 случаев дифтерии в Азербайджане, 51 — в Беларуси, 23 — в Казахстане, 25 — в Узбекистане. В Польше выявлено пять случаев этой болезни, причем все заболевшие прибыли из Украины и Беларуси; впервые за последние 30 лет дифтерия проявилась в Финляндии: заболел мужчина, побывавший в Санкт-Петербурге.

World Health Organization. Press Release. 1993. N 70 (Швейцария).

Медицина

К лечению диабета

Работа группы американских исследователей во главе с П. Сун-Шионгом (P. Soon-Shiong) позволяет надеяться на существенный прогресс в лечении диабета. Речь идет о диабете I типа (ювенильный диабет), который является инсулинзависимым и возникает, когда поджелудочная железа перестает производить достаточное количество инсулина — гормона, контролирующего уровень глюкозы в крови. Инсулин вырабатывается так называемыми β-клетками, расположенными в железе в виде скопления (островков Лангерганса). Нужно количество инсулина перестает синтезироваться, когда в результате вирусной инфекции или аутоиммунной реакции β-

клетки погибают. Больные диабетом I типа вынуждены ежедневно вводить себе инсулин с помощью инъекций. Однако при этом способе лечения трудно поддерживать стабильный уровень глюкозы в организме, как это происходит у здоровых людей.

Попытки лечить диабет у таких больных путем пересадки им островков Лангерганса закончились неудачей из-за выраженной аутоиммунной реакции. Пробовали также защитить островки Лангерганса, поместив их в крошечные желеобразные капсулы на основе альгината (полисахарид, содержащийся в морских водорослях). Молекулы альгината позволяют молекулам глюкозы или инсулина диффундировать через капсулу. В зависимости от поступления глюкозы, островки Лангерганса, заключенные в альгинат, выделяли нужное количество инсулина в кровь. В то же время молекулы альгината не позволяли проникать внутрь капсул ни антителам, ни тем более клеткам белой крови ввиду их большего размера. Однако и в этом случае полностью избавиться от реакции иммунной системы не удавалось.

Группа Сун-Шионга решила эту проблему, изменив тип альгината. Дело в том, что альгинат состоит из остатков В—D-маннуроносовой и α -L-гулууроносовой кислот, однако только маннуроносовая кислота стимулирует иммунную систему. Поэтому авторы использовали в опытах альгинат с более высоким содержанием гулууроносовой кислоты.

В экспериментах, проведенных на собаках, у которых был искусственно вызван диабет, было показано, что капсулы, приготовленные из нового альгината, позволяют избежать аутоиммунной реакции. Авторы получили разрешение на клинические испытания нового метода на 20 больных сахарным диабетом I типа. Операция введения капсул в брюшную полость занимает всего 20 мин.

В результате опытов на собаках было показано, что одна инъекция может заменить введение инсулина в течение шести месяцев, при этом инкапсулированные клетки остров-

ков Лангерганса оставались активными в брюшной полости животных в течение двух лет. Даже когда собаки вновь стали нуждаться в инъекциях инсулина, пережившие островки снижали дозы ее введения примерно в два раза.

Proceedings of the National Academy Science US. 1993. V. 90. P. 5843 (США).

Биология

Как птицы «настраивают» свой «компас»

Известно, что многие перелетные птицы пользуются как зрительным, так и магнитным способом навигации, однако оба эти метода пока еще поняты довольно поверхностно.

Эксперименты с целью изучения способностей птиц определять свой путь при миграции поставили на выращенных в неволе саванных воробьях (*Passerculus sandwichensis*) П. Кеннет и М. Эйбл (Р. Kenneth, M. Able; Университет штата Нью-Йорк, Олбани, США). Они воздействовали на птиц магнитными полями различной силы и направленности, поляризованным и неполяризованным светом, а затем отслеживали направление, в котором те намеревались лететь. Как обнаружилось, в дневное время птицы фиксируют не положение Солнца, а поляризацию поступающего света. Именно это и позволяет им производить «калибровку» встроенного в их организм «магнитного компаса», т. е. вносить поправку, учитывающую, что магнитные полюса не совпадают с географическими и «магнитный» север нетождествен подлинному направлению на север. Особенно важно это для птиц, мигрирующих между Северной Америкой и Европой, где отклонение было бы весьма значительным. Исследователи, впрочем, не смогли установить, как именно птицы фиксируют поляризацию света.

Аналогичные работы независимо вели орнитологи В. и Р. Вильтшко (W. Wiltshcko, R. Wiltshcko; Университет во Франкфурте-на-Майне, Герма-

ния) совместно с У. Мунро и Х. Фордом (U. Munro, H. Ford; Новоанглийский университет, штат Новый Южный Уэльс, Австралия). Они проверили гипотезу, согласно которой некоторые животные ощущают магнитное поле с помощью имеющихся в их организме светочувствительных молекул, которые реагируют на него лишь тогда, когда подвергаются световому возбуждению.

Исследования были поставлены на птицах, которых в Австралии называют среброглазками (*Zosterops l. lateralis*). При воздействии белым, зеленым и синим светом они пытались лететь в одном и том же направлении, а при красном — теряли ориентировку вообще.

Экспериментаторы полагают, что красный свет несет недостаточное количество энергии, чтобы возбудить светочувствительные молекулы, а более коротковолновое излучение позволяет птицам «включать» магнитную ориентацию.

Эти выводы значительно осложняют сложившиеся представления. Установлено, например, что черепахи и грызуны находят путь независимо от освещения; тритонам свет для этого необходим, но их реакция на свет различных длин волн дифференцирована. Так что, по всей вероятности, механизмы тут разные.

Специалисты высказывают предположение, что в ходе эволюции тех или иных групп позвоночных их магнитные рецепторы развивались по-своему. Nature. 1993. V. 364. N 6437. P. 523—525 (Великобритания).

Биология

Еще раз о карликовых самцах пауков

Изучение полового диморфизма, особенно карликовости самцов, — тема модная среди зарубежных зоологов. В этом отношении очень хороший объект исследований — пауки: половой диморфизм у них ярко выражен¹. Карлико-

¹ См.: Михайлов К. Г. Половой диморфизм и каннибализм у пау-

вость самцов у пауков принято объяснять либо высокой смертностью на непоползлых стадиях («теория жизненного цикла»), либо каннибализмом со стороны самок: мелкого самца самка просто не воспринимает как добычу.

Новейшая гипотеза происхождения карликовости самцов выдвинута Ф. Вольратом (Оксфордский университет) и Дж. Паркером (Ливерпульский университет)². По их мнению, карликовость — прямой результат дифференциальной смертности, ведущей к нарушению соотношения полов у пауков. Проанализировав 802 вида пауков из 31 семейства и подсемейства, авторы показали, что, как правило, виды с малоподвижными, «сидячими» самками имеют карликовых бродящих самцов. Это явление особенно характерно для пауков-тенетников, строящих постоянную ловчую паутину, в меньшей мере — для засадчиков и почти отсутствует у бродящих пауков-охотников (наличие карликовых самцов не зависит от общего размера пауков данного вида).

Итак, более активные самцы чаще гибнут, нарушается соотношение полов, смягчается конкуренция между самцами. В этих условиях размер тела становится не столь важен, и возможно сокращение числа линек, во время которых происходит рост особи (такое явление описано недавно для пауков-кругопрядов). Другими словами, отбор на карликовость — результат внутривидовой конкуренции, связанной с изменением смертности самцов.

Хорошей иллюстрацией конкретных причин карликовости самцов служат результаты работы австралийской исследовательницы Б. Мейн³, почему-то проигнорированные Вольратом и Паркером. Изучив норных пауков, Мейн показала, что мелкие размеры и сокращение жиз-

ненного цикла — приспособление к чрезмерной сухости или, наоборот, к затоплению местобитаний.

Однако новая гипотеза, как и прежние, вызывает ряд вопросов. Каков разброс количества линек в природных популяциях пауков, ведь доказательные результаты получены только для одного вида кругопрядов? Каковы физиологические механизмы изменения числа линек? Что говорит по поводу карликовости самцов палеонтология, ведь, например, включения пауков в янтаре весьма многочисленны? Наконец, никакого серьезного опровержения гипотезы каннибализма со стороны самок, хорошо разработанной на пауках-кругопрядах⁴, авторы нового взгляда на проблему не приводят, хотя и цитируют некоторые работы конкурентов.

Приходится признать, что проблема карликовости самцов далека от разрешения. Возможно, при дальнейших исследованиях будет показана применимость сразу нескольких, взаимодополняющих гипотез. Современным исследованиям явно недостает морфогенетического и физиологического подходов, которые, разумеется, сделают работу более длительной и трудоемкой, зато могут дать существенные результаты.

© К. Г. Михайлов,
кандидат биологических наук
Москва

Зоология

Открыто млекопитающее!

Когда в наше время говорят об открытии неизвестных науке живых существ, на ум обычно приходят тысячи еще не описанных специалистами мелких насекомых или червей. Обнаружение же млекопитающего, да еще крупного — настоящая сенсация.

Первые известия поступили в мае 1992 г., когда в Ханой

возвратилась объединенная группа исследователей из министерства лесного хозяйства Вьетнама и Всемирного фонда охраны дикой природы. Они привезли обнаруженные в домах охотников, промысляющих в северо-западной части Вьетнама, три пары рогов — длинных и прямых, «не подходящих» ни к одному из видов, известных ученым.

В 1992—1993 гг. эту глубинную область Вьетнама четырежды посетили зоологи Ву Ван Зунг, Фам Монг Зяо, Нгуен Нгок Кинь (Институт лесоводства Вьетнама, Ханой) и Дж. Маккинноп (J. MacKinnon; Всемирный фонд охраны дикой природы, Азиатское бюро в Гонконге). Им удалось найти три комплекта черепа с жевательными аппаратами, две нижние челюсти с зубами и три отлично сохранившиеся шкуры. Все эти вещественные свидетельства существования неизвестного животного были обнаружены в провинциях Нгеан и Хатинь, на восточном склоне высокого горного хребта, однако охотники утверждают, что встречали его и на западном склоне, в пределах Лаоса. Пока же его научно доказанный ареал площадью около 4 тыс. км² охватывает заповедник Ву Куанг, а также вытянутый с северо-запада на юго-восток малонаселенный район между границей с Лаосом и правым берегом р. Ке (в ее среднем и верхнем течении), ограниченный координатами: 104°5' в. д., 19°25' с. ш. и 105°50' в. д., 18°05' с. ш.

«Новичку» дали предварительное наименование *Pseudorhynchus nghetinhensis* sp. nov. (орикс — вид антилопы, встречающейся в Африке; ее рога имеют некоторое поверхностное сходство с рогами вьетнамского животного).

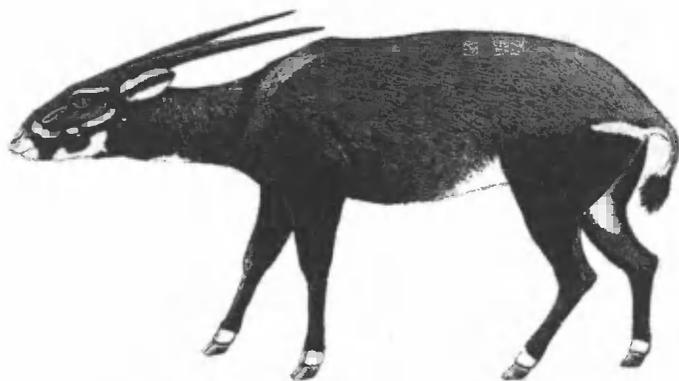
Псевдорикс отличается длинными (32—52 см) гладкими и почти прямыми рогами, четкими белыми и черными пятнами на морде, которых нет, однако, у африканской антилопы. Масса взрослой особи достигает, по видимому, 100 кг. Длина тела (без короткого хвоста) около 1,5 м, высота в плече 80—90 см. Хвост длиной 12—13 см украшен пушистой черной кисточкой. Уши по высоте превышают 10 см;

ков // Природа. 1991. № 11. С. 110—111; Он же. Зачем паукам карликовые самцы // Природа. 1992. № 9. С. 108—109.

² Vollrath F., Parker G. A. // Nature. 1992. V. 360. P. 156—159.

³ Main B. // Acta Zoologica Fennica. 1990. V. 190. P. 273—278.

⁴ См.: Elgar M. A., Ghaffar N., Read A. F. // J. Zool. 1990. V. 222. P. 455—470.



Реконструкция псевдорикса.

весь череп имеет длину от 32 до 36 см. Расстояние между основаниями рогов у псевдорикса значительно больше, чем у таких видов антилоп, как японский и суматранский серау (*Capricornis crispus*; *C. sumatraensis*). Примерно такое расстояние наблюдается у азиатского буйвола — горного аноа (*Bubalus quarlesi*), но оно уже, чем у домашнего рогатого скота. У самок рога почти параллельны друг другу, а у самцов длиннее и слегка расходятся. Копытца изящны и невелики — до 6 см. Окраска псевдорикса — от темно-коричневой до густо-рыжевато-коричневой. Вдоль всего хребта протянулась черно-коричневая полоса. Беловатая и светло-желтая полосы украшают снизу и сверху его глазницы; совершенно белые полоски — по бокам морды, на голове и подбородке. Верхняя часть туловища покрыта шелковистой мягкой и гладкой шерсткой длиной около 2,4 см, а нижняя — более длинной, 3,5 см, и пушистой. У псевдорикса нет на спине полосы густой шерсти, которая обычна для серау и антилопы-нильгау (*Boselaphus tragocamelus*).

Предварительные результаты анализа ДНК показали, что псевдорикс биологически больше связан с настоящими быками (*Bovidae*), чем с иными полорогими жвачными. Однако пока еще рано судить, к какой таксономической группе быков он принадлежит. Похоже, псевдорикс представляет сравнительно обособившуюся ветвь своего подсемейства, а возможно, об-

разует совсем новое подсемейство.

Многие его анатомические черты можно считать примитивными, так что отнесение псевдорикса к группе *Boselaphini* довольно условно, однако лишь у этой группы наблюдается свойственное псевдориксу сочетание находящихся на морде желез с характерным рисунком черных и белых полос на морде, шее, ногах и крестце.

Это травоядное животное населяет склоны гор от самых верхних горизонтов, покрытых хвойными лесами, среднюю зону с вечнозелеными широколиственными деревьями и даже предгорную область на высоте всего 200 м над ур. м. со вторичными зарослями по речным берегам. Судя по размерам заселенной псевдориксом территории и по частоте, с какой он попадает в охотничьи западни, численность его — всего несколько сот особей. Правительство Вьетнама приняло решение увеличить территорию заповедника Ву Куанг с 16 тыс. до 60 тыс. га и разработать план создания еще двух заповедников.

Открытие вызвало большое оживление среди зоологов всего мира: до сих пор в данном регионе Азии были известны лишь два рода полорогих — настоящие быки и серау; таким образом, ныне описан сразу и новый вид и новый род.

Известно, что многие полорогие — крупный рогатый скот, козы и антилопы — играют существенную роль в хозяйственной деятельности человека. Среди полорогих есть виды, потенциально пригодные к одо-

машиванию или же скрещиванию с домашними животными, что не исключено и для псевдорикса.

Nature. 1993. V. 363. N 6428. P. 398, 443 (Великобритания).

Охрана природы

Монахи дружат с летучими мышами

Королевский институт естественных наук — главное объединение ученых Бельгии — объявил о начале кампании в защиту летучих мышей. Меры стали необходимыми после того, как выяснилось, что все 18 видов летучих мышей, встречающихся в стране, попали в список животных, находящихся под угрозой исчезновения. Даже малый подковонос (*Rhinolophus hipposiderus*), который еще 30 лет назад был в Бельгии самым распространенным, почти полностью исчез.

По мнению зоолога Ж. Файрона (J. Fairon), возглавившего кампанию, основные причины этого — применение пестицидов в сельском хозяйстве, сокращение природной среды обитания летучих мышей, а также враждебное отношение к ним части населения.

С мая 1993 г. добровольцы под руководством профессионалов начали посещать фермы и церковные здания, где еще остались летучие мыши. Участники кампании убеждают владельцев в безобидности этого животного и осматривают чердачные помещения, голубятни, сеновалы и амбары, чтобы установить, есть ли в крыше отверстия для свободного вылета летучих мышей.

Примером для других может служить аббатство монашеского ордена траппистов в Орвале, известное в течение столетий своей пивоварней. Монахи не только не изгоняли летучих мышей, а даже уложили на чердачном полу съемное пластиковое покрытие, которое можно легко очистить от помета. «В благодарность за это»

серая ночница (*Myotis myotis*) ежегодно уничтожает около 3,5 т насекомых.

New Scientist. 1993. V. 138. N 1786. P. 10 (Великобритания).

Экология

Нутрии опустошают побережье

Американский предприниматель Э. А. Макилхени некогда сумел сказочно разбогатеть на производстве и продаже острой перчаточной приправы. Большое состояние позволило ему в 1938 г. купить островок Эйвери-Айленд у берегов штата Луизиана, где он устроил вольер для полувыведенных ему нутрий коипу (*Myocastor coypus*). Это южноамериканский полуводный грызун, тесно связанный своей жизнью с водоемами. Однако вскоре случился нередкий на просторах Мексиканского залива ураган, и больше десятка нутрий оказались на свободе. Сегодня обширные прибрежные болота Луизианы буквально захвачены этими животными: они поедают клубни диких растений, произрастающих на пресноводных болотах; в солоноватых приморских маршах уничтожают травянистые побеги. В обоих этих случаях незакрепленная растительностью почва легко смывается в море, а на месте «съеденных» нутриями болот образуются озера и заливы открытой воды.

Специалист по экологии прибрежных зон Ч. Сассер (C. Sasser; Университет штата Луизиана) провел интересный эксперимент. Он огородил несколько участков заливных лугов и маршей по берегам р. Атчафалы в ее дельте. Избавленная от грызунов, эта местность вскоре покрылась свежей растительностью, а контрольные неогороженные участки так и остались грязевыми пустошами.

Макилхени в свое время был уверен, что местные аллигаторы быстро расправятся с разбегавшимися нутриями, однако он ошибся. По мнению Г. Линскома (G. Linscombe; Управление охраны природы Луизианы), нутриям удалось най-

ти здесь весьма подходящую экологическую нишу.

Несколько десятилетий назад аналогичные события начали развиваться и в Восточной Англии, где нутрии сбегали со зверофермы. Там они тоже стали уничтожать растительность и посевы, повреждали насыпи и берега рек. В 1989 г., по завершении 10-летней кампании, все они были наконец уничтожены. Но если в Восточной Англии число взрослых особей не превышало 5 тыс., то в Луизиане их в тысячу раз больше.

После того как были отброшены в качестве неэффективных такие методы, как использование ядов, простой отстрел, инъекции, делающие животных стерильными, перспективы дальнейшей борьбы с нутриями на юге США связывают с созданием широкого спроса на их шкурки. В 60—70-е годы местные охотники ежегодно сбывали более 1 млн. таких трофеев, однако ныне стоимость одной шкурки упала с 20 до 2 долл., и добыча зверьков стала невыгодной. Вновь привлечь внимание дельцов к этому товару пытаются сейчас представители Университета штата Луизиана, посетившие известную международную Монреальскую меховую ярмарку в Канаде.

New Scientist. 1993. V. 138. N 1878. P. 6 (Великобритания).

Геология

149-й рейс «ДЖОЙДЕС Резолюши»

После шестилетнего перерыва, во время которого глубоководное бурение велось в Индийском и Тихом океанах, вновь возобновились работы в Атлантике. Они начались 149-м рейсом, который проходил с 15 марта по 25 мая 1993 г. в пределах Иберийской абиссальной равнины. Соначальниками рейса были Д. С. Соьер (D. S. Sawyer; Университет Райса, Хьюстон, США) и Р. Б. Уитмарш (R. B. Whitmarsh; Институт океанографических наук, Уормли, Великобритания).

Основная цель бурения в этом рейсе заключалась в изу-

чении природы и строения зоны перехода океанской коры в континентальную в районе Иберийской пассивной окраины, которая может служить примером невулканической континентальной окраины, где процесс рифтинга не сопровождался сколько-нибудь заметным вулканизмом.

По геофизическим данным, мантийные породы перидотиты, обнажающиеся на западной окраине банки Галисия, прослеживаются под осадками также и в районе бурения, поэтому в рейсе предусматривалось глубокое проникновение в погребенные выступы акустического фундамента, чтобы затем, изучив химический, петрологический и минералогический состав поднятых пород и проведя их микроструктурный и изотопный анализ, выявить природу и геологическую историю этого фундамента. Кроме того, в рейсе предстояло изучить историю накопления турбидитов (отложенный мутьевых потоков) вдоль Иберийской континентальной окраины и связь этого процесса с климатическими колебаниями, а также определить возраст деформаций осадочного чехла с целью корреляции с аналогичными событиями в горных сооружениях, окаймляющих Альборанское море.

В рейсе было пробурено 10 скважин в пяти точках, расположенных вдоль широтного профиля вкост простирания континентальной окраины. В трех точках — 897, 899 и 900 — удалось получить полный разрез осадочного чехла и проникнуть в акустический фундамент. В породе фундамента вошла и ближайшая к берегу скважина 901, пройденная большей частью без отбора керна. Бурение скважины 898 пришлось прекратить из-за обрыва буровой колонны, едва она вскрыла верхние 350 м и вошла в верхнеолигоценые осадки.

Хотя в рейсе и не были достигнуты все поставленные цели, полученная информация исключительно важна для понимания процессов, происходивших на ранних стадиях развития пассивных окраин океана. Участники рейса на основе материалов бурения и с учетом геофизических данных предложили

предварительную интерпретацию строения. зоны перехода от океана к континенту в районе исследования¹.

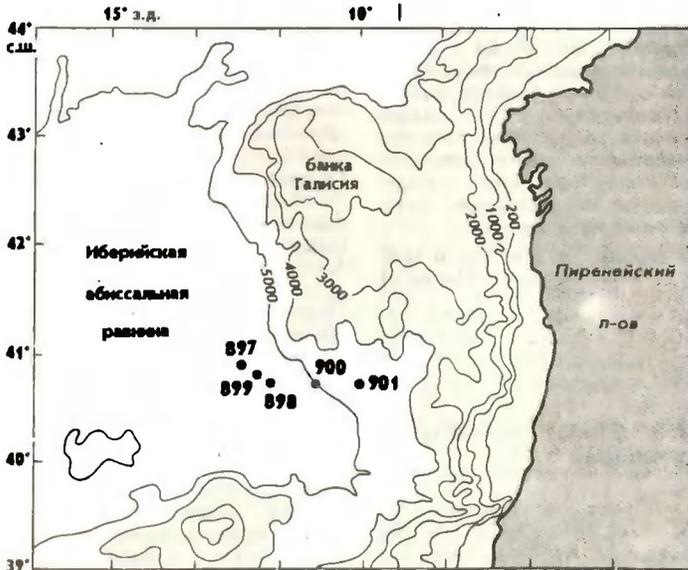
Фундамент, вскрытый скважиной 897 на глубину 153 м, сложен брекчией, состоящей на 90 % из серпентинизированных лерцолитов и гарцбургитов. Аналогичные породы пройдены на глубину 95 м и скважиной 898, которая расположена в 20 км восточнее, на другом выступе фундамента. Эти мантийные породы фиксируют предсказанную здесь по геофизическим данным границу между утоненной континентальной корой и настоящей океанической

ской корой, которая, как предполагают, лежит непосредственно к западу от района бурения. Фундамент, пробуренный скважиной 900 на глубину 75 м, сложен сильнодеформированными, брекчированными и метаморфизованными породами основного состава. По мнению участников рейса, эти породы могут быть либо палеозойскими базальтами, которые оказались надвинутыми на континентальный фундамент в период горообразования в герцинскую эпоху, либо габброидами нижней коры, либо докембрийской субконтинентальной мантией, в которую на этапе мезозойского растяжения внедрились габброиды, впоследствии метаморфизованные. И, наконец, самая восточная скважина (901) вскрыла фундамент, который сложен верхнеюрскими черными сланцами и песчани-

ками с обильным детритом, состоящим из обрывков наземной растительности, что однозначно свидетельствует о наличии в этой части окраины континентальной коры.

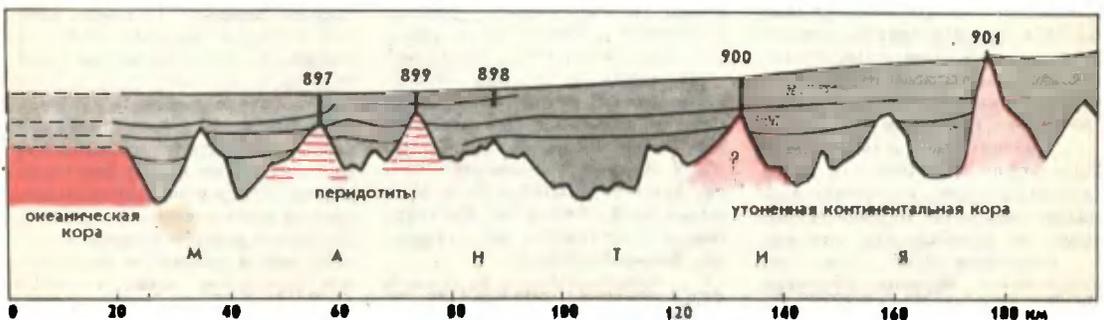
Осадочный чехол, пробуренный в рейсе, сложен в своем основании маломощными (около 50 м) преимущественно грубообломочными образованиями мелового возраста и залегающими на них с перерывом кайнозойскими отложениями (мощностью до 750 м), в составе которых чередуются турбидиты, контуриты (отложения, сформированные контурными, сходящими вдоль склона, течениями), пелагические и гемипелагические осадки. В кайнозойской части разреза отмечаются по крайней мере четыре крупных перерыва в накоплении осадков: на рубеже эоцена и

¹ Sawyer D. S., Whitmarsh R. B. et al. Ocean-continent transition in the Iberia Abyssal Plain 6 Leg 149 // Preliminary Report. 1993. ODP, College Station.



Район работ в 149-м рейсе «ДЖОЙ-ДЕС Резолюшн». В пяти точках (897—901), расположенных вкостр пространства континентальной окраины, пробурено 10 скважин. Цифры на изолиниях — глубина океана.

Схема строения зоны перехода океан — континент по результатам бурения в 149-м рейсе. В точках 897, 899 и 900 скважины вскрыли полный разрез осадочного чехла и проникли в акустический фундамент. Ближайшая к берегу скважина 901 тоже вошла в породы фундамента. Бурение скважины 898, которая прошла лишь верхние 350 м, было приостановлено по техническим причинам.



олигоцена, в раннем миоцене, на рубеже среднего и позднего миоцена и в начале раннего плиоцена. Перерыв на рубеже среднего и позднего миоцена совпадает с поверхностью регионального углового несогласия, которая фиксируется на сейсмических профилях; возможно, такое несогласие возникло на этапе сжатия в Бетской Кордильере на юге Испании, которое захватило также и континентальную окраину Пиренейского п-ова.

© И. А. Басов,
доктор геолого-
минералогических наук
Москва

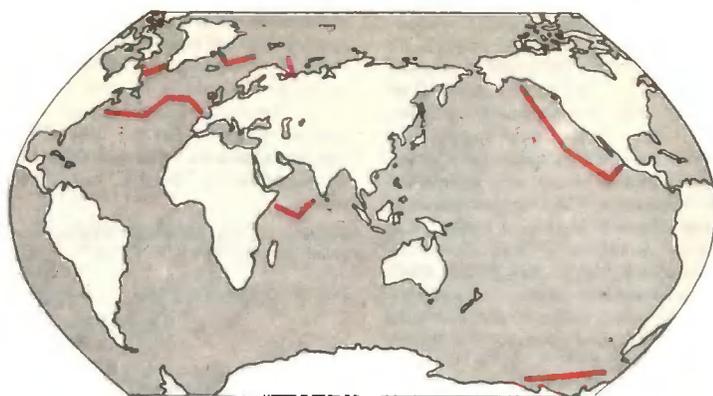
Организация науки.

Океанология

Исследования глобальной динамики океанских экосистем

При всей разноликости предлагаемых сценариев глобальных климатических изменений из них вытекает один общий вывод: в конечном счете очевиден разносторонний прессинг на физическое состояние Мирового океана (подъем или опускание уровня океанских вод, колебания в поступлении атмосферных осадков, изменение теплового режима вод и т. д.). Для решения возникающих в связи с этим актуальных проблем биоокеанологии и биоресурсов международное научное сообщество предприняло в конце 80-х годов координированные усилия: была разработана программа GLOBEC (GLOBAL ocean ECosystems dynamics program — глобальная динамика океанских экосистем). В США Национальный комитет по этой программе был создан в начале 1989 г.; в ее проведении участвуют Национальный научный фонд, Национальное управление по изучению океана и атмосферы и Научно-исследовательское управление ВМФ США.

Специалисты, участвующие в этой программе, прежде всего изучают воздействие ди-



Основные районы Мирового океана, где ведутся экспедиционные работы по программе GLOBEC.

намики физических процессов на планктонные организмы, поскольку они служат основой всей кормовой базы океана.

У программы GLOBEC три кардинальные цели: 1) достижение более полного, всестороннего понимания фундаментальных процессов продуцирования органического вещества на фоне глобальных климатических изменений; 2) разработка и внедрение в экспедиционные и экспериментальные исследования новых методов оценки различных параметров популяций животных (воспроизводство, рост, смертность); 3) создание методики прогнозирования динамики популяций в меняющихся климатических ситуациях и реакции на них океана.

Для достижения этих целей стратегия программы строится по трем генеральным направлениям: математическое моделирование; разработка новой исследовательской техники; междисциплинарные экспедиционные исследования для сбора и обработки материалов.

Методы численного моделирования используются для изучения характера и результатов динамических воздействий на структуру биологических сообществ, метаболизм, питание; математическое моделирование предусматривает концептуальные исследования основ прогноза. Районы Мирового океана, намеченные по программе GLOBEC для экспедиционных

исследований, были выбраны по различным мотивам, но в каждом случае ставятся три общие задачи: фиксация влияния климатических изменений на экосистему региона; прогноз степени воздействия климатических изменений на биоту, например в промысловых районах Северной Атлантики, в Аляскинском заливе (по некоторым регионам уже накоплен обширный многолетний массив наблюдений по биологической океанографии); сопоставление получаемых материалов с результатами работ по другим программам, таким как WOCE (World Ocean Circulation Experiment — эксперимент по изучению циркуляции Мирового океана) и Global Ocean Flux Study (изучение глобальных океанских потоков).

© В. Н. Виноградов
Санкт-Петербург

Сейсмология

Плита Наска погружается

24 мая 1993 г. в Аргентине, вблизи от ее границ с Чили и Боливией, произошло мощное землетрясение. Его магнитуда по шкале Рихтера достигала 6,6; эпицентр располагался в точке с координатами: 12°96' ю. ш., 66°44' з. д.

Толчок был настолько сильным, что ощущался в отдаленных провинциях Жужуй, Сальта и Тукуман и даже в чилийском городе Копьяпо, находящемся в 750 км к юго-западу.

Основному сейсмическому событию предшествовал предварительный толчок магнитудой 6,2, произошедший несколькими секундами ранее.

К счастью, очаг землетрясения залегал на глубине 238 км под поверхностью, что исключило жертвы и существенные разрушения. Именно такая глубина позволила сейсмологам заключить, что землетрясение было вызвано новым эпизодом погружения плиты Наска под Южно-Американскую плиту земной коры.

Это землетрясение — самое мощное в регионе Центральных Анд, считая с февраля 1973 г.

Smithsonian Institution Bulletin of the Global Volcanism Network, 1993. V. 18. N 5. P. 13 (США).

Климатология

На дне океана — свидетельства внезапных изменений климата

На большой площади дна Атлантического океана — от Лабрадора до Исландии — обнаружено значительное количество обломков известняка. По мнению специалистов Геологической обсерватории им. Ламонта — Дозрти при Колумбийском университете (Палисейдс, штат Нью-Йорк, США), целые «флотилии» айсбергов, отколовшихся от ледниковых щитов, которые сползали с территории Гренландии и Канады, несли с собой в океан различные терригенные осадки. Присутствие в осадках именно известняков свидетельствует о внезапных и достаточно быстрых изменениях климата.

В крайние холодных условиях известняки быстро разрушались. Ледниковые щиты активно продвигались к океану, а полярные воды широкими потоками отходили к югу, разнося айсберги. Воды Северной Атлантики сильно охлаждались, а массивные глыбы льда дрейфовали к югу, испытывая при этом минимальное таяние. Талые воды разбавляли соленые воды океана. Погружение более плотных и соленых вод замедлялось,

что и влекло за собой внезапные кратковременные изменения климата в обширной зоне от Канады до Европы.

Геологи утверждают, что нашли доказательства шести таких эпизодов изменения климата в интервале 70—14 тыс. лет назад.

Bulletin of the American Meteorological Society. 1993. V. 74. N 3. P. 470 (США).

Палеонтология

Поздне меловое вымирание было глобальным

Мало какое событие в истории Земли привлекает больше внимания ученых и широкой публики, чем великое вымирание на рубеже мелового и третичного периодов (65 млн. лет назад), когда внезапно (или почти внезапно) вымерла половина всех родов и 3/4 видов растений и животных: динозавры, аммониты, белемниты и множество других. «Природа» писала об этом неоднократно¹. Существуют два основных сценария поздне меловой катастрофы. Согласно первому, в Землю врезался гигантский метеорит, астероид или ядро кометы. Удар вызвал заражение атмосферы СО и другими ядовитыми газами; пыль, дым и сажа на долгое время закрыли Землю от солнечного света; пошли кислые дожди, фотосинтез прекратился, и множество живых существ погибли: растения от темноты, животные от голода, те и другие еще и от холода. Строникни этого взгляда усиленно ищут на суше и морском дне следы гигантского кратера, а также импактиты — переплавленные при ударе или взрыве горные породы. По второму сценарию, причина вымирания кроется в быстром в геологическом смысле, но постепенном по человеческим мер-

кам изменении климата и уровня Мирового океана, причем считается, что изменение климата началось в тропиках и вымирание там было сильнее, чем в высоких широтах².

Американские палеонтологи Д. М. Рауп и Д. Яблонский из Чикагского университета³ проанализировали списки морских двусторчатых моллюсков из отложений маастрихта — последнего века мелового периода, начавшегося 73 млн. лет назад и закончившегося великим вымиранием. Двусторчки — удобный объект: их систематику на уровне родов хорошо изучена, в меловую эпоху они были весьма многочисленны, а их вымирание в конце мела более чем заметно: исчезло 63 % всех родов. Рауп и Яблонский проанализировали 3514 находок 340 родов двусторчак из 106 местонахождений — от Гренландии до Антарктиды; они сгруппировали их по квадратам со сторонами 10° широты и долготы, наложили на палеогеографическую карту того времени и для каждого из 57 квадратов подсчитали процент родов, вымерших в конце мела.

К их немалому удивлению получилось, что интенсивность вымирания была неодинаковой в разных широтных и долготных зонах. В тропиках (от 30° с. ш. до 30° ю. ш.) она выше, чем в умеренных широтах, а в Северной и Южной Америке и Новой Зеландии выше, чем в Европе и Африке. В Центральной Америке в тропическом поясе вымерло 67 % родов, а в умеренных широтах восточной и северо-восточной Азии и Западной Австралии — лишь 51—53 %. Но именно в тропической Центральной Америке, на п-ове Юкатан, находится метеоритный кратер Чиксулуб, который считают наиболее вероятным местом падения «того самого» метеорита. Неужели разгадка найдена? Не тут-то было!

Рауп и Яблонский обратили внимание на то, что значительную часть изученных ими вымерших моллюсков составля-

¹ Редкие события в геологии // Природа. 1986. № 1. С. 55—60; Земля пережила «метеоритную зиму» // Природа. 1986. № 11. С. 113; Причина глобального вымирания — всемирное затемнение // Природа. 1992. № 8. С. 113—114.

² Кауфман Э. Дж. // Катастрофы и история Земли. М., 1986. С. 156—254.

³ Там же.

ли роды отряда рудистов (*Hirpudidita*). Эти высокоспециализированные неподвижно прирастающие к твердому грунту крупные моллюски жили в тропиках и особенно процветали в позднем мелу на коралловых рифах. Все они вымерли в самом конце мела. Ясно, что этот богатый родами вымерший отряд должен увеличить долю вымерших родов именно в тропиках, но главное: по наиболее обоснованным датировкам рудисты исчезли не в самый момент великого вымирания, а на 1—2 млн. лет раньше, на рубеже мелового и позднего маастрихта³. Значит, за их исчезновение метеорит ответственности не несет.

Когда 46 родов рудистов исключили из подсчетов, оказалось, что различия между широтными и долготными поясами исчезли. Вымершими оказались 52 % родов, однако приблизительно столько же (в пределах ошибки измерений) было и в тропиках, и в высоких широтах. Значит, вымирание морской фауны на рубеже мела и третичной эпохи было глобальным. Именно это, собственно говоря, и предусматривает гипотеза столкновения с небесным телом: ядовитые газы, дым, пыль, сажа были разнесены ветром по всей планете столь быстро, что «метеоритная зима» должна была наступить повсеместно.

Гораздо существеннее то, что вымирание некоторых важных групп морской фауны предшествовало этой глобальной катастрофе. Кроме рудистов до конца маастрихта не дожили двусторчатые моллюски иноцерармы (надсемейство *Inoceratoidea*), некоторые аммониты и др.⁴ Это значит, что катастрофа наложилась на более или менее длительный и начавшийся еще до нее процесс ухудшения условий существования меловой биоты, а это усугубило последствия катастрофы: не попавшая в «тиски стресса», но ослабленная изменениями климата, уров-

ня океана и другими причинами биота могла бы перенести «метеоритную зиму» с меньшими потерями.

С. К. Н. Несис,
доктор биологических наук
Москва

Антропология

Важная антропологическая находка

При раскопках в пещере Симе-де-Лос-Уэлос, в одном из горных районов североиспанской провинции Атапуэрка, было обнаружено более 700 остатков по крайней мере 24 индивидов древнего человека. Среди этих находок особый интерес представляют три хорошо сохранившихся черепа, которые были исследованы испанскими палеонтологами и археологами. Возраст находок, определенный по составу сопутствующей остаткам человека фауне хищных млекопитающих и особенностям геологического строения пещерных отложений, — более 300 тыс. лет. Среди костей млекопитающих, найденных в пещере, чаще всего встречаются кости медведя Деннгера (*Ursus deningeri*), который, как и древний человек, предпочитал селиться в пещерах. По мнению испанских ученых, находка в Атапуэрке представляет собой крупнейшую коллекцию остатков человека среднего плейстоцена, найденную в одном местонахождении (за исключением, может быть, коллекции находок синантропов из китайской пещеры Чжоукоудянь). Такой большой материал позволяет по морфологическим особенностям человеческих остатков определить важные особенности, характеризующие предков человека в переломные этапы эволюции.

Всю обширную группу древних людей, живших 1,75—0,4 млн. лет назад, можно отнести к виду человека прямоходящего (*Homo erectus*). Находка в Атапуэрке важна также и потому, что большинство других находок остатков человека этого возраста представляют собой отдельные, часто мало связанные друг с другом, фрагмен-

ты костей из разных местонахождений. К сожалению, пока они не дают достаточно ясно представления об эволюции предшественников человека разумного (*Homo sapiens sapiens*). Предметом дискуссий остается также вопрос о линии, разделяющей человека прямоходящего и человека современного типа. Существует даже гипотеза о том, что человек современного типа появился не менее 500 тыс. лет назад от группы «архачинных *Homo sapiens*». К ним относили остатки из Сванскомба (Англия), Штенгейма и Гейдельберга (Германия), а неандертальский человек (*Homo sapiens neandertalensis*), появившийся около 300 тыс. лет назад, является боковой ветвью, не связанной с человеком современного типа.

Данные предварительных исследований находки из Атапуэрки позволяют поставить под сомнение последнюю из гипотез. Хорошо сохранившиеся черепа двух взрослых и одного молодого индивида имеют ряд черт, свидетельствующих об их близости с неандертальским человеком. Объем мозга черепов взрослых людей из Атапуэрки мог быть 1390 и 1125 см³ (человек прямоходящий — 900—1 200 см³, неандерталец — 1 200—1 800 см³). По таким важным антропологическим особенностям, как развитие надбровного валика, выступание лицевых костей, высота лица, отсутствие клыковой ямки верхней челюсти, люди из Атапуэрки сходны с неандертальцами. По мнению испанских ученых, изучавших остатки людей из Атапуэрки, эти признаки могут свидетельствовать о достаточно раннем формировании неандертальской стадии развития человека разумного. Хотя полученные данные могут интерпретироваться по-разному, они, скорее всего, также свидетельствуют о том, что наиболее ранние этапы эволюции человека разумного прошли через неандертальскую стадию. Это позволяет считать неандертальцев одним из предков *H. s. sapiens*, а не боковой ветвью в его эволюции.

Nature. 1993. V. 362. N 6420. P. 534 (Великобритания).

¹ Raup D. M., Jablonski D. // Science. 1993. V. 260. N 5110. P. 971—973.

³ Шиманский В. Н., Соловьев А. Н. Рубеж мезозоя и кайнозоя в истории органического мира. М., 1982.

Кристаллография

КРИСТАЛЛЫ. РОСТ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА. М.: Наука, 1993. 272 с.

В 1993 г. исполнилось 50 лет Институту кристаллографии РАН, носящему имя его основателя академика А. В. Шубникова. Это научное учреждение — бесспорный лидер в своей области — продолжает традиции русской и советской кристаллографической науки, давшей миру таких выдающихся ученых, как А. В. Гадолин, Е. С. Федоров, Г. В. Вульф, А. Ф. Иоффе, Б. М. Вул, В. К. Фредерикс.

В наши дни кристаллография стала мощной междисциплинарной наукой с прямым выходом в такие определяющие научно-технический прогресс области исследований, как физическое материаловедение, микроэлектроника, лазерная техника, оптика, химия неорганических и органических веществ, молекулярная биология.

В юбилейном сборнике освещаются различные вопросы современной кристаллографии: геометрическая теория кристаллов, методики и резуль-

таты исследований кристаллической и реальной структур кристаллов, проблемы выращивания кристаллов и изучения их свойств. Статьи носят в основном обзорный характер. Они написаны известными специалистами в области физики и химии кристаллов, снабжены обширной библиографией.

Книга продолжает серию «Проблемы современной кристаллографии», основанную в 1989 г.

Экология

И. Н. Росновский. УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЫ: ТЕХНОГЕННО-МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ. Новосибирск: Наука, 1993. 161 с.

Варварское отношение к природе неизбежно ведет к ее деградации. К счастью, проблемам экологии в нашей стране стали уделять больше внимания. Но несмотря на свою чрезвычайную значимость, проблема устойчивости и повышения плодородия почв еще только поставлена. Это обстоятельство побудило автора к написанию кни-

ги, в которой он определил само понятие устойчивости почв к внешним воздействиям, описал методы ее количественной оценки, классифицировал типы устойчивости почв и внешних воздействий.

Наиболее ранними считаются пойменные почвы, непродуманное освоение которых может привести к непредсказуемым экологическим последствиям. Поэтому в качестве примера были выбраны почвы Обской поймы, служащие основной базой кормопроизводства в Западной Сибири. Полученные в результате обследования этих почв данные позволили автору разработать принципы оценки предельно допустимых и экологически безопасных напряжений в почвенном профиле под воздействием внешних нагрузок, составить уравнения для их расчета и построить эмпирико-теоретическую модель прогноза влияния уплотнения почв сельскохозяйственной техникой на их агрофизическое состояние. Книга может быть полезна как исследователям (агрофизикам, почвоводам, экологам), так и практикам сельского хозяйства.

ПОПРАВКА

В № 2 «Природы» допущена ошибка в подписях к обложке. Следует читать: НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Подросший птенец беркута. См. в номере: Ивановский В. В. Беркут. (Фото автора). НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Джебальдинский конус на Патомаском нагорье. См. в номере: Зейлик Б. С., Зозулин А. В. Кольцевые космогенные структуры.

Над номером работали
Ответственный секретарь
Л. П. БЕЛЯНОВА
Заместитель ответственного
секретаря
В. И. ЕГУДИН

Научные редакторы
И. Н. АРУТЮНЯН
О. О. АСТАХОВА
А. Н. ГРИЦУК
М. Ю. ЗУБРЕВА
Г. М. КАРАСЕВА
Г. В. КОРОТКЕВИЧ
Л. Д. МАЙОРОВА
Н. В. УСПЕНСКАЯ
О. И. ШУТОВА

Литературный редактор
Г. В. ЧУБА

Художественные редакторы
Л. М. БОЯРСКАЯ, Д. И. СКЛЯР

Заведующая редакцией
И. Ф. АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор
Е. Е. БУШУЕВА

Корректоры
Р. С. ШАЙМАРДАНОВА
Т. Н. МОРОЗОВА

В художественном оформлении
номера принимали участие
В. С. КРЫЛОВА
В. И. ЕГУДИН

Компьютерный набор
М. Н. ГРИЦУК

Адрес редакции:
117810, Москва, ГСП-1
Мароновский пер., 26
Тел.: 238-24-56, 238-26-33

Сдано в набор 8.02.94
Подписано в печать 21.03.94
Формат 70×100 1/16
Бумага типографская № 2
Офсетная печать
Усл. печ. л. 10,32
Усл. кр.-отт. 636,2 тыс.
Уч.-изд. л. 15,1
Тираж 23 767 экз.
Зак. 2232

Ордена Трудового Красного
Знамени
Чеховский полиграфический
комбинат
142300, г. Чехов
Московской области

ПРИРОДА

1⁹⁴



«Ученые должны стараться занимать передовые места в развитии нашей культуры и не мямлить, что «у нас есть что-то более важное». Это уж дело руководителей разбираться, что самое важное и сколько внимания можно уделить науке, технике и пр. Но дело ученого — искать свое место в стране и в новом строе не ждать, пока ему укажут, что ему делать».

Эти слова сказаны выдающимся физиком и инженером Петром Леонидовичем Капицей в 1935 г. В июле нынешнего года исполняется 100 лет со дня его рождения. Ученик А. Ф. Иоффе и Э. Резерфорда, он стал автором фундаментальных открытий, удостоенных Нобелевской и других высоких премий и наград, членом многих академий и научных обществ мира. Основатель научной школы, организатор науки и гражданин, он был барометром интеллекта и порядочности.

Следующий номер «Природы» будет целиком посвящен феномену Капицы — его судьбе и делам. Много из того, что говорил и писал Капица, появится в печати впервые.

Индекс 70707



ISSN 003 2-874X. Природа. 1994. N 3. 1-126.