

The background is a dark, textured surface, possibly black or dark grey. It features a large, prominent, swirling shape in shades of blue and purple, resembling a vortex or a galaxy. This central element is surrounded by numerous vertical streaks of white, red, and blue, which appear to be paint splatters or drips. Some of these streaks are thin and delicate, while others are thicker and more pronounced. The overall composition is dynamic and abstract, suggesting a cosmic or geological theme.

Э.В.СОБОТОВИЧ

**КОСМИЧЕСКОЕ
ВЕЩЕСТВО
В ЗЕМНОЙ КОРЕ**

Э.В.СОБОТОВИЧ

КОСМИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ЗЕМНОЙ КОРЕ

1911

МОСКВА АТОМИЗДАТ 1976



Соботович Э. В. Космическое вещество в земной коре. М., Атомиздат 1976. 160 с.

Земля непрерывно бомбардируется космическим веществом: от ядер элементов до крупных тел массой в миллионы тонн. Эта бомбардировка оказывает определенное влияние на формирование лика Земли и климат нашей планеты. Понимание этого пришло к ученым сравнительно недавно.

О том, как зарождается и эволюционирует вещество в космосе, какова его роль в формировании Земли и земной коры, что собой представляет космическая пыль, где и как ее ищут на земной поверхности, какими методами исследуют и, наконец, для чего нужны подобные исследования — обо всем этом рассказано в книге.

Книга будет полезна тем, кто интересуется современным состоянием естественных наук, и тем, кто занимается исследованиями космоса.

Рисунков 26. таблиц 22, список литературы 40 названий.

Земля материально и энергетически непрерывно в ходе времени связана с Солнечной системой и Млечным Путем.

В. И. ВЕРНАДСКИЙ. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения

Одной из старых и в то же время новых проблем является проблема космического вещества.

О том, что помимо крупных тел (метеоритов), изредка попадающих на Землю, на нее постоянно сыплются мелкие частички (наблюдаемые иногда в виде метеоров), ученые догадывались давно. Еще в давние времена мореплаватели, попадавшие в южные широты, с изумлением взирали на таинственный конус света, который появлялся сразу после захода Солнца на фоне темного неба. Свечение наблюдалось всегда в одном и том же месте — в районе зодиакальных созвездий. Поэтому его и называли зодиакальным. Ничего таинственного в этом явлении природы, конечно, нет. Объясняется оно тем, что лучи опустившегося за горизонт светила рассеиваются мельчайшими частицами вещества, находящимися в космическом пространстве. Так невидимые пылинки искрятся в солнечном луче, проникшем в затемненную комнату. По яркости зодиакального свечения ученые установили, что концентрация межпланетной пыли незначительна: стоит ли обращать на нее внимание...

Но с наступлением эры полетов в космос этот вопрос сразу обрел практический смысл. Ведь при космических скоростях даже ничтожные частицы массой в миллионные доли грамма, встречаясь с оболочкой летательного аппарата, способны повредить ее подобно тому, как маленькие камешки разбивают прочное стекло автомашины, мчащейся по шоссе. Не удивительно, что на первых же советских и американских искусственных спутниках были установлены приборы для регистрации ударов микрометеоров. Результаты экспериментов заставили конструкторов задуматься о способах защиты космических кораблей от «пылевой эрозии».

Детальные исследования, проведенные главным образом учеными Ленинградского физико-технического института АН СССР, показали, что космических пылинок в окрестностях Земли очень мало: в среднем одна микрочастица на 10 км^3 . Результаты этих

экспериментов хорошо согласуются с наблюдениями яркости зодиакального свечения.

Значит, космос не очень загрязнен космической пылью. Однако мы пока еще слишком мало знаем о метеорной опасности, например, в районе пояса астероидов. Правда, нас должно успокаивать то, что многочисленные «Марсы» благополучно долетали и даже садились на поверхность планеты Марс, а «Юпитер» преодолел весь пояс астероидов и исправно снабжал ученых информацией.

Таким образом, в космическом пространстве не столь много пыли, чтобы она могла служить существенным препятствием для космических полетов.

Анализ яркости зодиакального свечения и ореола вокруг Солнца (рассеяние света пылинками и частицами создает ореол вокруг Солнца, называемый френгоферовой короной) позволил определить, что общая масса пыли, обращающейся внутри земной орбиты, составляет около 10^{15} т. Это эквивалентно сотне астероидов диаметром около 10 км. Очевидно, что во всей Солнечной системе, простирающейся примерно на 100—150 тыс. астрономических единиц¹, космической пыли значительно больше. Об этом говорит также факт постоянного ее выпадения на Землю. Только в последние годы стало ясно, насколько огромно количество космического вещества, постоянно выпадающего на Землю, и какую роль оно играет в формировании земной коры и ее осадочного чехла; знание состава космического вещества позволит заглянуть нам в глубь Земли, поскольку оно может представлять собой «среднюю пробу» Земли.

Действительно, в настоящее время науке доступны для непосредственного изучения метеориты и лунное вещество, но это вещество является продуктом прошедшей дифференциации и, по видимому, не может являться средней пробой космического вещества. В этом отношении космическая пыль, возможно, представляющая в некоторой своей части среднюю пробу первоначального газово-пылевого облака, с большей вероятностью отражает среднее нелетучее космическое вещество. Без знания же средней пробы Земли невозможно построить ее геохимическую модель — основу теоретической геологии.

Более того, ни одна космогоническая гипотеза не может считаться научно обоснованной, если она не учитывает данных метеоритики и космохимии, а следовательно, и физико-химических данных по космической пыли. Таким образом, исследования химического состава планет и межпланетного вещества Солнечной системы, абсолютного и относительного содержания элементов в ней прежде всего могут решить такую капитальную проблему, как установление среднего химического состава Земли и ее от-

¹ Одна астрономическая единица (а. е.) — это расстояние от Земли до Солнца (численно она равна 154 млн. км).

дельных оболочек, вскрыть химические и физические процессы, приведшие к дифференциации земного вещества, объяснить наблюдаемое современное распределение элементов и физико-химические свойства вещества, его превращения, происходившие при различных процессах в прошлом Земли и наблюдаемые в настоящее время.

Значительная часть выпадающего на Землю космического вещества, пролетая через земную атмосферу, нагревается, что вызывает заметные морфологическое, минералогическое и химическое его изменения. Образующиеся при этом сферические оплавленные микрочастицы являются единственным идентифицируемым морфологическим типом мелкодисперсного космического вещества. Они несут внешние признаки космогенности (оплавленности при прохождении через атмосферу) и могут быть выделены из некоторых земных природных образований.

Первые сферические оплавленные частицы (космические шарики) были обнаружены в глубоководных отложениях Тихого океана экспедицией на «Челленджере» около 100 лет назад. Однако широкое исследование мелкодисперсного космического вещества началось только лет 80 спустя.

В настоящее время поиски космических шариков ведутся в самых разнообразных земных объектах: в древних осадочных отложениях (особенно соляных), ледниковых взвесах, океанических донных осадках, атмосферной пыли, атмосферных осадках Антарктики и Гренландии и т. д.

Космический материал выпадает на Землю не только в виде частичек (ассоциаций атомов), но и в виде отдельных молекул, атомов элементов или их изотопов. Эти так называемые космогенные нуклиды поступают на поверхность Земли либо вместе с космической пылью, либо, генерируясь в верхних слоях атмосферы на ядрах азота, кислорода и других ее составляющих под действием высокоэнергетических космических лучей, выпадают вместе с атмосферными осадками. Возникает возможность изучать различные геохимические явления. Так, при помощи космогенных радиоактивных нуклидов ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al определяют скорость осадконакопления в морях и океанах, возраст осадков, скорость циркуляции водных масс и т. д. В частности, радиоуглеродное датирование в настоящее время получило настолько широкое распространение в разных отраслях науки, что даже издается специальный международный журнал «Radiocarbon».

На поверхности Земли есть условия для накопления и концентрации космической пыли. Хорошими природными концентраторами служат глубоководные океанические осадки. По данным анализа распространенности ряда космогенных нуклидов и некоторых тяжелых элементов, степень космогенности красных глубоководных глин, поднятых далеко от областей сноса терригенного материала, достигает 3%. Доля космогенного компонента во взвесах и талых водах ледников Кавказа значительно меньше

и едва достигает 0,05%, в антарктических льдах и ледниках Гренландии — немного больше. Выделение взвесей и солевого фона из льда — работа весьма сложная и трудоемкая. Часто необходимо перерабатывать десятки и сотни кубометров льда или талой ледниковой воды.

Присутствие во многих горных породах космической пыли можно установить несколькими способами, например: по изотопному составу гелия, по наличию металлических и силикатных сферул в соляных отложениях, в осадочных породах морского происхождения и т. д. Определенное количество металлических шариков носит несомненные признаки космогенности и может представлять собой как продукт абляции, т. е. сдувания расплавленных капелек с железных метеоритов при полете последних в атмосфере, так и самостоятельные космические частички, вернее, их остатки, вторгшиеся в атмосферу нашей планеты из космоса.

Формы существования вещества во Вселенной разнообразны — от плазмы и газа до консолидированных тел. Доля последних в общей массе может достигать 1—3%. Размеры этих космических «пылинок» могут быть различными: от долей микрона до сотен километров в поперечнике. Исследование космического вещества дает информацию о том, как оно рождается, как эволюционирует, начиная от нуклеосинтеза и кончая геологическими процессами на Земле.

В книге рассмотрены, по сути, два аспекта проблемы космического вещества: первый — рождение вещества в макрокосмосе, второй — поиски на поверхности Земли посланцев ближнего космоса (метеоритов, космической пыли, нуклидов, образующихся под действием космического излучения, а также привносимых вместе с ним). Описаны также методы поисков, выделения и идентификации космического вещества, найденного в земной коре. Показано, что наиболее ценную информацию можно получить при помощи изотопных методов исследования. При этом основное внимание уделялось ответам на вопрос «почему», ибо этот вопрос в науке ценится гораздо больше, чем вопрос «как».

Проблемам происхождения Солнечной системы и Земли отведено здесь мало места, поскольку на эту тему написано достаточно книг.

Вообще говоря, поток научной информации о космическом пространстве и космическом веществе настолько велик, что представляется безнадежным освоить все аспекты исследований, все экспериментальные данные. Тут вступают в действие астрономия и космонавтика, геология и геохимия, космохимия и биология и т. д. Единый образ, например, Земли или метеорита дробится на тысячу кусков, и каждый из них — сложнейшее сцепление фактов, гипотез, обобщений. Есть от чего прийти в отчаяние! Известный физик и математик Э. Шредингер следующим образом рекомендует выход из этой ситуации: «Мы ясно чувствуем, что только теперь начинаем приобретать надежный материал для то-

го, чтобы объединить в одно целое все, что нам известно, но, с другой стороны, становится почти невозможным для одного ума овладеть более чем какой-либо небольшой специальной частью науки. Я не вижу выхода из этого положения... если только некоторые из нас не рискнут взяться за синтез фактов и теорий, хотя наше знание в некоторых из этих областей будет в этом случае неполным и полученным из вторых рук и хотя мы подвергнемся опасности показаться невеждами».

Можно добавить, что это тем не менее поможет привлечь к проблеме внимание ученых различных специальностей, которые посмотрят на объект своих исследований с новых, непривычных для них точек зрения, с чем-то согласятся, о чем-то будут спорить, но это и послужит толчком для дальнейшего развития науки.

РОДОСЛОВНАЯ КОСМИЧЕСКОГО
ВЕЩЕСТВА

Этот бесконечно старый и непрерывно обновляющийся мир космических объектов, подавляющий своей грандиозностью, интенсивностью и богатством разыгрывающихся в нем явлений с масштабами времени от сотых долей секунды до миллиардов лет, представляет сейчас такую соблазнительную цель для научного исследования, которой просто нет равных.

Л. А. АРЦИМОВИЧ. Будущее принадлежит астрофизике

Космическое вещество, из которого состоим мы и наше космическое окружение, как и все в мире, имеет свое начало и конец. Начало можно исчислить с момента «большого взрыва», когда зародилась наша Вселенная¹, а конец представляется ученым-теоретикам в виде «черных дыр», когда огромная масса вещества сжимается собственным гравитационным полем до ненаблюдаемого объекта. Сейчас наша Вселенная находится где-то в середине своего жизненного пути.

Откуда взялась материя, пошедшая на строительство Вселенной, никто не знает. О том, как она зародилась, как образовались галактики и даже звезды, идут жаркие дебаты. Ученые разделились на два лагеря, где споры идут о том, что было раньше — курица или яйцо.

Аналогичным образом существуют две системы взглядов на эволюцию возникшего каким-то способом вещества: термодинамическая, основанная на втором законе термодинамики, гласящем, что в замкнутой системе все процессы однонаправленны и необратимы, причем развитие идет от сложного к простому (простейший пример — выравнивание температур), и биологическая, которая трактует эволюцию мира от простого к сложному (все знают, что простые частицы существовали раньше молекул, а последние — раньше нас с вами). Обе концепции долгое время существовали независимо, однако, поскольку они толкуют эволюцию вещества в прямо противоположных направлениях, их столкновение стало неизбежным.

Сейчас общепризнанно, что Вселенная расширяется, но человеком, впервые сдвинувшим ее границы (в 1922 г.), был совет-

¹ Под термином «наша Вселенная» подразумевают область пространства, ограниченную возможностями ее наблюдения (световым барьером). Поскольку подобных вселенных может быть много, их совокупность называют вселенной (с маленькой буквы). Здесь идет речь о Вселенной (с большой буквы) или, как ее еще называют, — Метагалактике.

ский ученый А. А. Фридман: взяв за основу уравнения Эйнштейна, он принял дополнительное условие, а именно, что Вселенная в среднем однородна, галактики и другие скопления материи распределены в ней более или менее равномерно. Так это или не так — покажет время, но решение на этой основе релятивистских уравнений привело к выводу, что расстояния между галактиками с течением времени должны увеличиваться. И чем дальше галактики находятся друг от друга, тем с большей скоростью они удаляются друг от друга. Таким образом, А. А. Фридман заложил основы теории расширяющейся Вселенной, хотя в то время (начало 20-х годов) астрономы еще ничем не могли подтвердить их правильность. Лишь спустя семь лет, в 1929 г., американский ученый Э. Хаббл открыл так называемое красное смещение в спектрах галактик. Это смещение он объяснил эффектом Доплера.

Австрийский физик Х. Доплер еще в 1842 г. показал, что если источник звука или света приближается к наблюдателю, то длина волны, испускаемой этим источником, укорачивается, а при его удалении — удлиняется. Иными словами, при приближении источника света цвет его сдвигается в фиолетовую область спектра, а при удалении — в красную. Доплер думал, что открытый им эффект объясняет видимый цвет далеких звезд: красноватые звезды должны двигаться от Земли, голубоватые — к Земле. Как оказалось, дело было не в этом. Цвет звезд зависит прежде всего от их температуры. Но свет от удаленных галактик, обнаруживающий красное смещение, трудно объяснить чем-нибудь другим, нежели тем, что они движутся от Земли. Более того, это смещение возрастает в среднем пропорционально расстоянию от галактики до Земли. Если до галактики А в два раза дальше, чем до галактики Б, то красное смещение для А примерно в два раза больше красного смещения для Б.

Таким образом, закон Хаббла гласит, что скорость (v) удаления галактики пропорциональна ее расстоянию до нас (D). Коэффициент пропорциональности (k) называется постоянной Хаббла: $v = kD$. Чтобы найти значение k , следует разделить скорость удаления какой-либо галактики (в км/сек) на расстояние до нас (в миллионах световых лет).

Постоянная Хаббла по мере развития астрономической техники уточняется. Сам Э. Хаббл совместно с М. Хьюмасом в 1936 г. для скорости разбегания галактик дал значение $536 \text{ км}/(\text{сек} \cdot \text{Мпс})$ ¹.

¹ Мпс — мегапарсек, т. е. 1 млн. парсеков. Парсек — это такое расстояние, на котором радиус земной орбиты виден под углом $1''$ дуги, или на расстоянии 200 тыс. а.е. (под таким углом монета в одну копейку видна с расстояния 3 км). Численно 1 парсек (пс) равен 3,26 светового года. Так как 1 световой год равен $9,45 \cdot 10^{12}$ км, то 1 пс означает расстояние, исчисляемое примерно 30840 млрд. км, а 1 Мпс = 3,26 млн. световых лет, или $3,084 \cdot 10^{19}$ км.

К середине 50-х годов стало ясно, что скорость расширения Вселенной существенно ниже, чем считал Хаббл. В то время постоянную Хаббла принимали равной:

$$k = \frac{v \text{ (км/сек)}}{D \text{ (км)}} = \frac{1 \text{ км/сек}}{3 \cdot 10^{17} \text{ км}} = 3,3 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^{-1}.$$

Это означало, что скорость удаления галактики увеличивается на 75 км/сек, если расстояние до нее возрастает на 1 Мпс. Обратная величина постоянной Хаббла имеет размерность времени. Следовательно, если бы расширение Метагалактики происходило в прошлом с такой же скоростью, как и сейчас, то потребовалось бы $T = 1/k = 10 \cdot 10^9$ лет для расширения Метагалактики из одной точки до современного состояния. Это время иногда условно называют возрастом Вселенной.

Последний раз константа Хаббла была пересмотрена А. Сэндиджем в 1971 г. в обсерватории им. Хэйла (США). Скорость расширения оказалась равной 53 ± 5 км/(сек·Мпс). Вновь установленный темп разбегания галактик позволяет оценить возраст Вселенной в 18 млрд. лет. Используя этот закон Хаббла, ученые рассчитали, что, например, ассоциации галактик в созвездии Гидры удаляются от Земли со скоростью 61 тыс. км/сек.

Это изящное объяснение красного смещения тем не менее убедило не всех ученых. Тот же результат можно получить при прохождении света сквозь космическую пыль. А ведь около половины вещества Вселенной находится в межзвездном пространстве. Некоторые релятивистские космологические модели, предполагающие искривление времени (аналогично искривлению пространства Эйнштейна), указывают на неизбежность красного смещения без привлечения механизма разбегания галактик. Наконец, существует теория усталости, согласно которой чем дольше свет находится в пути, тем меньше частота его колебаний.

На общее расширение системы галактик накладываются беспорядочные скорости отдельных галактик, обычно равные нескольким сотням километров в секунду. Именно поэтому ближайшие к нам галактики не обнаруживают систематического красного смещения. Ведь скорости беспорядочных (так называемых пекулярных) движений для этих галактик больше регулярной скорости красного смещения. Поэтому среди близких галактик наблюдаются и такие, которые приближаются к нам.

Р. Дикке, физик из Принстонского университета (США), опираясь на теорию английского физика П. Дирака, считает, что всемирное тяготение постепенно ослабевает и, возможно, в настоящее время оно на 13% меньше, чем было 4 или 5 млрд. лет назад. Выполненные им расчеты также свидетельствуют о том, что многие мировые константы не являются в полном смысле константами. Например, П. Пибл и Р. Дикке (1962 г.) считают,

что скорость радиоактивного распада изменяется со временем. Уран распадается сейчас быстрее, чем 5 млрд. лет назад; в противоположность ему ^{40}K захватывает свой орбитальный электрон и переходит в ^{40}Ag значительно медленнее, чем на заре существования Солнечной системы. К сожалению, ни год, ни секунда не являются во Вселенной сколь-нибудь фундаментальной величиной.

В то же время закон сохранения энергии связан с однородностью времени, а закон сохранения количества движения является следствием однородности пространства. В свою очередь закон сохранения момента количества движения возможен только при условии однородности и изотропности пространства. Однако Вселенная далеко не однородна и не изотропна. Мы знаем, что во Вселенной Эйнштейна течение времени зависит от скорости движения. И одно это делает время в нашей Вселенной неоднородным, не говоря уже о местном замедлении времени вблизи массивных звезд и остановившемся времени «черных дыр».

Свойства пространства Вселенной также меняются со временем, особенно если принять ее постоянное расширение со скоростью света. Вселенная и сейчас неравномерно насыщена материей. Не только звезды в нашей Галактике, но сами галактики и группы их, названные академиком В. А. Амбарцумяном супергалактиками, распределены весьма неравномерно. И, конечно, пространство в области скопления галактик должно обладать иными свойствами, чем там, где вещество предельно разрежено. На основании изложенного К. П. Станюкович приходит к выводу: «Мы имеем основания и право считать наши мировые константы непостоянными. Мы должны признать, что установленные опытным путем на нашей планете или в пространстве ближайших окрестностей нашего Солнца, они могут быть такими же ошибочными, как и точка кипения воды на той идеальной планете, которую придумал Анри Пуанкаре».

П. Дирак предложил в качестве мировой единицы времени время так называемых сильных взаимодействий. Если поделить размеры элементарных частиц порядка 10^{-13} см на скорость света $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, то получим примерное значение, равное 10^{-23} сек, которое характеризует время, требующееся элементарной частице для того, чтобы переместиться со скоростью света на расстояние, равное ее диаметру. Поскольку все вещество состоит из элементарных частиц, то все процессы во Вселенной можно характеризовать при помощи этой константы более объективно. Например, если возраст нашей Вселенной 10 млрд. лет, т. е. примерно 10^{17} сек, то в новых безразмерных единицах ее возраст составит 10^{40} . Эта величина показывает, сколько элементарных колебаний частиц совершилось за все время существования Вселенной.

Знаменитый физик и астрофизик А. Эддингтон попытался определить число частиц во Вселенной. Зная ее диаметр (10^{28} см),

а следовательно, объем (около 10^{84} см^3) и плотность вещества Вселенной (10^{-28} г/см^3), можно найти ее массу: она составляет порядка 10^{56} г . Поскольку масса одного нуклона примерно равна 10^{-24} г , то число нуклонов во Вселенной получается равным 10^{80} .

Сравнивая эти два огромных числа — безразмерное время жизни Вселенной и число составляющих ее частиц, П. Дирак высказал мысль, что число частиц в Метагалактике равно квадрату ее безразмерного времени. А раз это так, то со временем должно увеличиваться и число частиц Вселенной. К. П. Станюкович полагает, что ничего абсурдного в этом заключении нет. Просто мы еще должны найти «закон творения». Число частиц может увеличиваться за счет «планкеонов», которые пропагандирует К. П. Станюкович, или сверхплотных сгустков, по мнению В. А. Амбарцумяна. А может быть, наша Вселенная расширяется не в пустоту, а в среду, уже заполненную материей, как считает Р. Дикке. При этом происходит не просто захват чужой материи, а взаимодействие двух материй, в результате чего Вселенная пополняется новыми элементарными частицами, новой энергией. Используя законы сохранения энергии, заряда, момента количества движения и развивая идеи Дирака, К. П. Станюкович показал, что скорость света, размеры нуклона (электрона) действительно оказываются постоянными. Гравитационная постоянная растет пропорционально радиусу кривизны Метагалактики (времени). Масса элементарных частиц, постоянная Планка и квадрат заряда частиц убывают обратно пропорционально квадрату радиуса кривизны. Скорость расширения «границы» Метагалактики равна скорости света.

Технический прогресс определяется достижениями науки, это прописная истина, но верно и то, что без первого не будет и второго. Причина растущей заинтересованности в проблемах астрофизики кроется в изобретении новых методов проникновения в дальний космос. При этом открываются такие явления, о которых ученые и не подозревали.

Все в природе является источником тяготения и подвергается его воздействию: не только все формы материи, но даже все виды энергии. Взаимоотношения между энергией и гравитацией определяются теорией относительности Эйнштейна. Например, заведенные часы будут на бесконечно малую величину тяжелее, чем незаведенные, и будут проявлять большее количество гравитационной силы благодаря запасу энергии, заключенной в пружине. Другой пример: воздействие силы (или энергии) на предмет в целях увеличения скорости его движения также увеличивает массу (или вес) предмета. Практически эффект опыта остается крайне незначительным до тех пор, пока скорость предмета не станет близка к скорости света. Однако при достижении скорости света масса любого предмета становится бесконечной. Полученная в результате увеличения скорости масса есть «реальная»

масса, поскольку она оказывает соответствующее гравитационное воздействие на другие массы.

Гравитация — одна из четырех элементарных сил, действием которых, как считают физики, можно объяснить все явления, происходящие в природе. Две силы — гравитация и электромагнетизм — хорошо известны нам из повседневной жизни. Две другие — так называемые сильное и слабое взаимодействия — действуют лишь внутри атома.

Может показаться странным, что сила гравитации — самая слабая из этих четырех сил. Наиболее «могучей» из них является сильное взаимодействие, удерживающее вместе частицы атомного ядра и, возможно, определяющее природу и размер этих частиц. Электромагнитная сила, примерно равная 0,01 сильного взаимодействия, удерживает отрицательно заряженные электроны на их сложных орбитах вокруг положительно заряженных ядер атомов и определяет большинство свойств материи, таких, например, как твердость, цвет и химическая активность.

Слабое взаимодействие составляет только одну триллионную (10^{-12}) электромагнитной силы и, в частности, вызывает радиоактивный распад. Но как бы это взаимодействие не было мало, оно в триллион триллионов раз превосходит силу гравитации.

Поскольку сила гравитации очень мала, на первый взгляд кажется непонятным, почему именно она играет основную роль в формировании Вселенной. Это объясняется тем, что сильное и слабое взаимодействия имеют очень небольшой радиус действия — они привязаны к атому, к миру малых величин. Радиус действия электромагнитной силы безграничен, но поскольку число отрицательных зарядов на Земле равно числу положительных, они почти полностью нейтрализуют друг друга, и эту силу обнаружить трудно.

Гравитация также имеет неограниченный радиус действия, но в отличие от других сил она возрастает с увеличением массы тела. Таким образом, гравитация царствует в мире больших величин — во Вселенной.

Связь между массой и гравитацией очевидна: чем больше масса, тем больше сила гравитации. Но масса есть также мера, определяющая инерцию предмета. Поскольку сила гравитации действует на любой предмет прямо пропорционально его массе (и инерции), то, следовательно, гравитация придает всем телам одинаковое ускорение, независимо от их массы. Пропорциональная зависимость между гравитацией и массой и между массой и энергией — так называемый принцип (закон) эквивалентности — признавалась многими учеными, включая Г. Галилея и И. Ньютона.

Однако лишь А. Эйнштейн оценил этот принцип по достоинству и положил его в основу общей теории относительности, которую он выдвинул в 1916 г.

В частности, он полагал, что сила гравитации изменяет или искривляет пространство вокруг предметов, причем это искривление пространства создает иллюзию притяжения.

Как полагает большинство астрофизиков, феномены пульсаров, квазаров¹ и источников гравитационных волн связаны с большой «концентрацией» гравитации. После открытия этих объектов перед астрофизиками встали сложные проблемы. Но прежде чем мы приступили к обсуждению их природы — немного истории.

1. Беспорядок в мире звезд

Еще тридцать лет назад она (Вселенная) представлялась спокойным и даже торжественным миром находящихся в равновесном состоянии неподвижных звезд.

В. А. АМБАРЦУМЯН. «Правда», 1970, № 32.

Изучая небо невооруженным глазом, можно увидеть несколько тысяч ярких звезд, шесть планет, блуждающих на их фоне, и, конечно, Солнце и Луну. Можно увидеть также одну из ближайших галактик — большую туманность Андромеды, находящуюся от нас на расстоянии 2,5 млн. световых лет, но мы примем ее лишь еще за одну звезду. Звезды различаются в основном по их яркости. В некоторых случаях можно заметить разницу и в их цвете: Антарес — красный, Капелла — желтая, Сириус — белый, а Вега — голубовато-белая.

В первой половине XIX в. ученые нашли еще один критерий — расстояние от Земли. Некоторые звезды находились относительно «близко» к нам (100—200 триллионов километров!), расстояние до других было гораздо больше. Этот критерий позволил вычислить истинную яркость, т. е. светимость тех звезд, расстояние до которых известно. Полагая (хотя это и недостаточно корректно), что химический состав звезд сходен (как и Солнце, подавляющее большинство звезд состоит в основном из водорода и гелия; имеются в виду, конечно, доступные наблюдению звездные атмосферы), ученые пришли к выводу, что светимость определяется прежде всего температурой поверхности звезды. Исторически различия в светимости называются спектральными классами. В среднем, чем горячее звезда, тем она ярче. Установив действительное расстояние до звезды, можно по ее видимой величине рассчитать истинную силу ее света — ее светимость, и, наоборот, можно определить, насколько яркой она будет казаться на любом выбранном нами расстоянии. Яркость звезды на

¹ Пульсары — пульсирующие радиосточники (полагают, что это быстро вращающиеся нейтронные звезды). Квазары — квазизвездные объекты с мощным излучением (в сотни раз большим, чем у галактик).

расстоянии 10 *пс* (или 32,6 светового года) называется ее абсолютной звездной величиной.

Если бы Солнце находилось от нас на расстоянии 10 *пс* (в действительности 0,000005 *пс*), то оно имело бы звездную величину 4,9 и было бы весьма тусклой звездой. Если бы Солнце и Сириус оказались на равном расстоянии от нас, то Сириус был бы на 3,5 звездной величины ярче Солнца. Поскольку разность в одну звездную величину соответствует изменению яркости в 2,512 раза, то можно сказать, что Сириус в $(2,512)^{3,5}$, или в 25 раз, ярче Солнца¹.

Представление древних греков о том, что на небесах все вечно и неизменно, было опровергнуто еще в конце XVI в., когда немецкий астроном Д. Фабрициус открыл первую переменную звезду омикрон Кита, расположенную в созвездии Кита. Эта звезда меняла свою яркость от второй звездной величины до восьмой с периодом, равным примерно 11 месяцам. Поэтому ее назвали Мира (удивительная). Позже оказалось, что это просто система из двух звезд. Затем была найдена другая, уже физически переменная звезда — дельта Цефея, четвертая по яркости звезда в этом созвездии. Период изменения ее светимости 5,37 суток. Были открыты и другие переменные звезды, сходные с дельтой Цефея, — все они обладают короткими и постоянными периодами изменения яркости. Длительность периодов изменения различна — от 2 до 45 суток, причем наиболее часто встречающаяся длительность их колебаний равна неделе. Все эти звезды объединяют в класс цефеид (по названию первой изученной звезды этого типа). Долгое время астрономы не придавали особого значения этим переменным звездам и не задумывались над причиной явления.

Изредка на небосводе, там, где ранее не было звезд, вспыхивает звезда и сияет по нескольку недель или месяцев. Древние китайские и японские астрономы упоминают о некоей звездочке, которая вспыхнула в 1054 г., просуществовала 2 года и достигла такой яркости, что была ясно видна даже днем.

В ноябре 1572 г. в созвездии Кассиопеи вспыхнула еще одна звезда, которая в период наибольшего блеска сияла в 5—10 раз ярче Венеры. Датчанин Т. Браге описал ее в небольшой книжке «О новой звезде». И с тех пор всякая звезда, внезапно вспыхивающая там, где прежде не было видно звезд, называется «Новой».

В 1604 г. появилась еще одна Новая, но уже в созвездии Змееносца. Она светила примерно так же, как планета Юпитер.

¹ Разница в 5 абсолютных звездных величин (например, между первой и шестой) соответствует изменению яркости в 100 раз. Другими словами, звезда первой величины в 100 раз ярче звезд шестой величины, поскольку $(2,512)^5 \approx 100$.

С тех пор было замечено очень много Новых. По современным оценкам, в различных областях Галактики каждый год появляется свыше двух десятков Новых, но лишь немногие из них видны с Земли, и ни одна из них не достигла такой яркости, как Новая Браге или даже Новая 1604 г.

В свете ядерной теории эволюции звезд цефеиды и Новые являются «родственниками». Только Новые — это «сбившиеся с пути» цефеиды. Когда водород в центре звезды израсходуется и ядро почти полностью оказывается состоящим из гелия, начинается сжатие звезды. Расчеты показывают, что внутренние силы гравитации увеличиваются в пропорции два процента к одному проценту сжатия, способствуя еще большему уменьшению размеров звезды. При этом гравитационная энергия нарастает быстрее тепловой, и газовое и световое давление на первых порах не препятствует сжатию. Вещество внешних слоев падает на ядро, и приобретенная кинетическая энергия превращается в тепловую энергию в пограничном слое. Температура резко поднимается, и начинаются ядерные реакции. Повышается газовое и световое давление, и внешние слои начинают расширяться. Так как тяжелый гелий теперь накапливается в непосредственной близости от ядра, давление на ядро возрастает и его температура увеличивается до 100 млн. градусов и более. Вследствие этого теперь уже в ядре начинаются ядерные реакции, в результате которых образуются ядра углерода, азота, неона и, вероятно, магния, и вновь выделяется энергия. В ядре температура повышается еще больше, и наружные слои звезд раздуваются, как мяч. Наконец, когда звезда накопит достаточное количество железа и энергии ядерных реакций уже не будет хватать на то, чтобы «расталкивать» вещество звезды, становится заметным фактор «проскока» сжимающейся звезды через равновесный радиус, что приводит к резкому разогреву и, следовательно, вновь к расширению и охлаждению. Звезда начинает пульсировать.

Период пульсации, по-видимому, определяется массой звезды и стадией ее эволюции. Рождается физически переменная звезда — цефеида.

Обычные цефеиды пульсируют ритмично и размеренно, раздуваясь и опадая снова и снова. Новая — это звезда, в недрах которой после долгого периода покоя развивается огромное давление, в результате чего она взрывается. Ее светимость по мере увеличения площади поверхности быстро возрастает (в 5—100 тыс. раз), при этом мгновенно излучается гигантское количество энергии. Светимость такой Новой может достигать — 8-й абсолютной величины, т. е. в это время она примерно в 20 тыс. раз ярче Солнца.

Однако такой яркой звезда остается в течение нескольких дней. В пространство выбрасывается часть вещества (примерно 10^{-3} — 10^{-5} массы звезды), а с ним уносится и значительная часть энергии. Звезда вновь начинает уменьшаться в размере (иногда

в течение нескольких месяцев) и после взрыва ведет себя примерно так же, как до взрыва.

У одних и тех же звезд наблюдались повторные вспышки — это значит, что структура звезд мало меняется в результате происходящих процессов. Существует мнение, что все Новые являются очень тесными двойными системами и что взаимодействие этой пары ведет к взрыву. А может быть, Новая — это очень долгопериодическая цефеида с широким размахом пульсации? Тут есть над чем подумать.

С 20-х годов XIX в., когда впервые было установлено, что туманность в созвездии Андромеды — это галактика (M-31) и что расстояние до нее составляет 2200 тыс. световых лет, или $2,1 \cdot 10^{19}$ км, ученые задумались над тем фактом, что в 1885 г. была видна одна из звезд этой галактики. Эта звезда в своем максимуме была ярче всей остальной галактики. Галактика Андромеды примерно в три раза больше нашей, и Новая, которая в ней вспыхнула, по своей яркости превзошла, таким образом, суммарный блеск миллиардов обыкновенных звезд. Она сияла как 100 тыс. простых Новых и почти в 10 млрд. раз сильнее нашего Солнца. Стало ясно, что эта звезда была не просто Новой — ее назвали Сверхновой.

1167
Сверхновые вспыхивают чрезвычайно редко. По оценке И. С. Шкловского, в больших звездных системах, подобных нашей Галактике, вспышки Сверхновых происходят раз в столетие, а по оценке американского астронома Ф. Цвикки — три за тысячелетие. Вспышки звезд, которые наблюдались в 1054, 1572 и 1604 гг., по своей мощности соответствовали Сверхновым. Если верить восточным хроникам, то самая замечательная Сверхновая вспыхнула в 1054 г., ибо она оставила после себя след — Крабовидную туманность. Эта туманность расширяется со скоростью 1300 км/сек и, по всем данным, является продуктом взрыва звезды. В 1949 г. было обнаружено, что Крабовидная туманность является мощным источником радиоизлучения. Оказалось также, что излучают сверхэнергетичные электроны, движущиеся в магнитных полях этой туманности. При вспышке Сверхновой образуется огромное число частиц со сверхвысокими энергиями — космическое излучение.

Наблюдения американских астрономов В. Бааде и Р. Минковского в конце 30-х годов показали, что Сверхновые отличаются друг от друга. Их можно подразделить на типы I и II, хотя существуют и промежуточные типы. Сверхновые II типа менее энергетичные, чем Сверхновые I типа: они обладают светимостью, лишь в 200 раз большей светимости обычных Новых, и, возможно, более многочисленны. Сверхновые II типа теряют при взрыве от 0,01 до 0,1 своей массы, в то время как Сверхновые I типа — от 0,1 до 0,9 своей массы.

Существует несколько гипотез о причине взрывов Сверхновых, однако общепризнанной теории нет. Возможно, что и в дан-

ном случае причиной взрыва является катастрофически быстрое выделение потенциальной энергии тяготения при «спаде» внутренних слоев звезды к ее центру, когда начинается диссоциация накопленного к тому времени железа, идущая с поглощением энергии и, следовательно, способствующая охлаждению звезды и ее дальнейшему сжатию.

Согласно теории, результатом процесса эволюции звезд может быть образование так называемых белого карлика, нейтронной звезды и черной дыры.

Первый белый карлик был открыт в 1844 г., когда астрономы обнаружили колебательные движения Сириуса — самой близкой к Земле и поэтому самой яркой звезды. Пытаясь найти объяснение этим колебаниям, ученые открыли маленький тусклый спутник Сириуса. Два тела вращались вокруг друг друга, и благодаря гравитационному воздействию карлика на своего соседа ученые смогли вычислить огромную плотность карлика.

По мнению ученых, в белый карлик превращаются сравнительно небольшие звезды, имеющие к концу своего коллапса массу, не больше чем в 1,2 раза превышающую массу Солнца. Если масса звезды превышает массу Солнца примерно в два раза, то сила гравитации полностью уничтожает структуры ядер атомов и превращает их в нейтроны. Согласно расчетам, этот процесс сопровождается выделением гигантского количества энергии, достаточного для распыления вещества внешней оболочки звезды в космосе. Оставшаяся часть светила представляет собой тело, состоящее из плотноупакованных нейтронов. Фактически это «атомное ядро» диаметром в несколько километров и плотностью в миллионы тонн на 1 см^3 — нейтронная звезда.

Еще несколько лет назад ученые почти не надеялись найти подобные нейтронные звезды, так как они должны светиться очень тусклым светом. Однако летом 1967 г. Дж. Белл, аспирантка Кембриджского университета (США), обнаружила резкие равномерные радиопульсы, поступающие от ненаблюдаемого визуально объекта. Немного позже несколько ученых во главе с астрофизиком Т. Голдом высказали предположение, что подобные пульсары в действительности могут быть нейтронными звездами.

Подсчеты показали, что нейтронные звезды, если они вообще существуют, вращаются с очень большой скоростью, совершая несколько оборотов в секунду. Сжатие звезды приводит к значительному увеличению скорости ее вращения. Подобно тому, как конькобежец на льду увеличивает скорость своего вращения, прижав руки к телу. Голд считает, что такая звезда излучает энергию «горячими пятнами», находящимися на ее поверхности.

Подобные гипотезы воскресили интерес к теории нейтронных звезд. Надеясь, что пульсары можно найти на месте взрыва Сверхновой, ученые начали исследование Крабовидной туманности, представляющей собой ярко светящееся облако газа в форме

краба и удаленной от Земли на расстояние 6 тыс. световых лет. Туманность образовалась, как мы уже говорили, в результате взрыва Сверхновой звезды, который китайские астрономы зафиксировали в 1054 г.

В конце 1968 г. Национальная астрономическая обсерватория Грин-Бенк (США) сообщила о пульсациях в районе Крабовидной туманности, а спустя некоторое время удалось установить, что пульсар располагается в ее центре. Частота импульсов пульсара Крабовидной туманности составляет 30 сигналов в 1 сек. Ритм пульсации постепенно замедляется (на 37 миллиардных долей секунды в день). Эти цифровые характеристики говорят о том, что пульсар представляет собой сравнительно недавно образовавшуюся нейтронную звезду, вращение которой замедляется в результате тормозящего эффекта излучаемой энергии.

Участвующие в обычных ядерных реакциях в условиях Земли электромагнитная сила и сильное взаимодействие не могут превратить в энергию более 1% вещества (причем превращают ее главным образом в тепло, свет и другие виды радиации). При коллапсе до нейтронной звезды в энергию переходит до 10% ее массы, а может быть, и значительно больше. Энергия представляет собой световое излучение, электромагнитные и гравитационные волны и нейтрино (не имеющие массы покоя частицы, путешествующие по Вселенной со скоростью света).

Электромагнитная сила, очевидно, препятствует коллапсу белых карликов. Сильное взаимодействие играет ту же роль в «спасении» нейтронных звезд; как упоминалось, оно обладает одним любопытным свойством: действуя на небольших расстояниях как сила притяжения, при очень малых расстояниях оно начинает выступать как отталкивающая сила. Поэтому сильное взаимодействие уравнивает силу гравитации в том случае, когда вещество звезды становится слишком плотным. Однако, как утверждает теория, если масса звезды незадолго до ее гибели вдвое превышала массу Солнца, никакие силы не могут спасти ее от коллапса. Более того, любое противодействие силе гравитации может лишь ускорить гибель звезды. Для правильной оценки этого явления теорию Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии следует понимать буквально: любой вид энергии является источником гравитационной силы, как и любая форма материи. Гравитационное поле нейтронной звезды оказывается настолько сильным, что свет и другие виды радиации вынуждены «заплатить» за то, чтобы «убежать» от звезды, переходом в область более низких частот.

Как полагает академик Я. Б. Зельдович, процесс закончится образованием черной дыры в пространстве, куда «провалится» материя, однако гравитационные свойства ее сохраняются: черная дыра благодаря своему гравитационному полю будет действовать как водоворот, «засасывающий» все и вся и даже лучистую энергию. Следует отметить, что ни одна черная дыра не была

обнаружена в телескоп¹. Доказательства их существования ученые ищут уже много лет, но лишь недавно три группы астрономов — две американские и одна английская — заявили, что обнаружили признаки черной дыры в созвездии Лебедя, отстоящем от Земли на 8 тыс. световых лет. Изучая характер движения звезды X-1, которая, как полагают, в 30 раз превышает по размерам наше Солнце, американские астрономы пришли к выводу, что перед ними двойная звезда. Но поскольку второй элемент системы невидим, можно заключить, что он и есть черная дыра. Английские исследователи пошли по другому пути. Обладая огромным полем тяготения, «дыра» как бы всасывает любую материю, оказавшуюся поблизости, испуская при этом рентгеновские лучи. Английские астрономы показали, что рентгеновское излучение системы Лебедь X-1 в миллионы раз превышает всю лучистую энергию, испускаемую Солнцем. Правда, ученые пока не пришли к единому мнению относительно источника этой радиации. В целом, как заявил Дж. Кристиан из Хейлской обсерватории, американские и английские астрономы «представили самые убедительные за все время доказательства существования черной дыры, однако выводы делать еще рано». Несмотря на всю кажущуюся неумолимость уравнений, доказывающих неизбежность черных дыр, многие ученые скептически относятся к вычислениям подобного рода. Действительно, в последней стадии коллапса звезды и при образовании черной дыры общая теория относительности вступает в противоречие с основными положениями квантовой теории.

Квантовая теория и общая теория относительности рассматривают явления природы с различных сторон. Если квантовая теория имеет дело с микромиром, то общая теория относительности, напротив, занимается миром больших величин — макромиром. Что же касается черных дыр, то «гибель» материи в результате безграничного увеличения плотности очень сомнительна с точки зрения квантовой теории. По сути дела, законы квантовой теории фактически исключают прямую деструкцию большинства элементарных частиц (вместе с их свойствами — спином, зарядом и т. д.) иным путем, чем аннигиляция (уничтожение). А последнее всегда предусматривает участие античастиц.

Однако, несмотря на некоторые очевидные противоречия, многие ученые возьмут на себя смелость говорить об ошибочности квантовой теории или теории относительности. Существует мнение, что обе теории не завершены и что в них отсутствуют некоторые важные данные о макро- и микромире. Это «белое пятно» находится где-то на границе между макромиром и макроэнергией и микромиром и микроэнергией.

¹ Полагают, что черных дыр (коллапсаров) в нашей Галактике существует не менее 1 млрд. Звезд же, которые могут закончить свой путь в виде черной дыры, не менее 30%.

Согласно модели «горячей Вселенной», в начале развития Метагалактики из сверхплотной и сверхгорячей расширяющейся материи образовались водород и гелий в количестве 70 и 30% по массе соответственно. Расширяясь, эта смесь охлаждалась, одновременно возникали неоднородности. Наступил такой момент, когда энергия охладившегося газа уже не в состоянии была противостоять силам гравитации, и протогалактические облака начали сжиматься. Протогалактика в то время представляла собой медленно вращающееся почти сферическое облако или группу облаков. Сжатие Протогалактики шло со скоростью, близкой к скорости свободного падения. Момент вращения при сжатии сохранился, поэтому с уменьшением размеров угловая скорость Галактики возрастала. (Галактика в настоящее время делает один оборот вокруг галактического центра за 245 млн. лет.)

Когда скорость вращения стала равна круговой скорости, силы притяжения и центробежные силы уравнились. Дальнейшее радиальное сжатие стало невозможным. Вертикальное же сжатие продолжалось, и в результате Протогалактика приняла форму диска. Одновременно начали рождаться звезды, при этом число звезд, образующихся в единице объема за единицу времени, пропорционально квадрату плотности газовой среды. При плотности менее 10^{-24} г/см³ звезды возникнуть не могут. Вероятность рождения звезды определенной массы пропорциональна $M^{-2,37}$, где M — масса звезды. Это означает, что с рождением одной звезды с массой, равной 5 солнечным массам (M_0), образуется 46 звезд с массой $1M_0$ и 2000 звезд с массой $0,2M_0$.

Но в 1947 г. астрофизики предложили новую гипотезу образования звезд: согласно новым представлениям, они возникают не при сгущении газово-пылевых масс, а в результате деления на части, взрыва сверхмассивных, очень плотных тел — сгустков дозвездной материи.

Этот вызов классической теории был брошен В. А. Амбарцумяном, когда его сотрудники обнаружили группы горячих голубых и белых звезд, которые они предложили назвать «звездными ассоциациями». От обычного звездного скопления ассоциация отличается тем, что занимает значительно большую область пространства.

В. А. Амбарцумян пришел к заключению, что такие «рассеянные» звездные группы не могут быть устойчивыми: сила взаимного притяжения звезд в них слишком мала, чтобы долгое время удерживать их вместе. А это значит, что ассоциации должны неизбежно распадаться.

Дальнейшие наблюдения привели В. А. Амбарцумяна к выводу, что ассоциации не просто неустойчивы — они расширяются со скоростью около 0,0014 км/сек. Но если бы звезды, входящие в состав ассоциаций, образовались в результате сгущения диффузной материи, ничего подобного произойти не могло: скопления молодых звезд были бы устойчивыми.

Один из самых серьезных аргументов в пользу гипотезы распада — удивительные явления, происходящие в ядрах некоторых галактик. Уже давно известно, что в галактиках в большинстве случаев концентрация звезд возрастает к центру. Кроме того, в самом центре многих галактик наблюдаются небольшие звездобразные сгущения. Иногда они ясно видны на фотографиях галактик. Эти сгущения и называются ядрами галактик. Так, ядро галактики Маркарян-10 благодаря своей огромной светимости выделяется резко. О существовании ядра в других галактиках можно судить по его активности.

Американский астроном К. Сейферт опубликовал в 1943 г. исследование спектров нескольких ядер, которые резко выделяются своей светимостью. Большая ширина спектральных линий водорода свидетельствует о том, что в ядрах таких галактик имеются газовые потоки, обладающие скоростями порядка 1000 км/сек и больше. Эти газы уходят из ядра, преодолевая силу его притяжения, за несколько десятков тысячелетий. Не исключено, что в ядрах есть тела, выбрасывающие мощные газовые потоки.

Более тонкие исследования галактик с менее яркими ядрами показали, что и там происходит истечение газов, хотя и не столь бурное. Такое же явление происходит и в нашей Галактике. Эти факты означают, что, в отличие от звезд и обычных звездных групп, ядра галактик могут обладать своеобразной, качественно новой формой активности.

Наблюдения галактик Сейферта приводят к мысли о взрыве: облака вещества с огромной скоростью выброшены из ядра. Этот механизм наблюдается во взрывающихся галактиках типа М-82, где взрыв произошел 1 млн. лет назад, — явление, сравнимое с тем, что происходит в галактиках Сейферта.

«Прослушивание» Вселенной при помощи радиотелескопов дало новую информацию. Были обнаружены локальные источники излучения в ядрах галактик и более обширные, являющиеся, по-видимому, облаками выброшенного газа. Это подтверждает наличие выбросов взрывного происхождения в очень активном центральном ядре.

Астрономы подсчитали, что только кинетическая энергия взрыва в галактике М-82 составляет около $3 \cdot 10^{55}$ эрг. Чтобы дать представление о том, насколько огромна эта энергия, достаточно сказать, что для получения ее надо взорвать термоядерную бомбу с водородным зарядом, равным массе 15 тыс. солнц.

Несколько лет назад с помощью радиоастрономических наблюдений было обнаружено, что из ядра нашей Галактики происходит непрерывное истечение водорода. Каждый год ядро выбрасывает массу газа, равную полутора солнечным. Но так как Галактика, по самым скромным оценкам, существует не менее 10 млрд. лет, то за это время из ядра, видимо, была выброшена масса газа, равная массе 15 млрд. солнц!

В последние годы в науке астрономии появилась новая область — астрономия инфракрасных лучей. Ученые получили возможность изучать инфракрасное излучение, свойственное галактикам Сейферта. Были зарегистрированы огромные изменения интенсивности излучения. Известно, что по флюктуациям (колебаниям) можно определить размеры источника энергии. Эти размеры не могут превышать расстояния, проходимого светом за время флюктуации; иными словами, диаметр источника излучения, интенсивность которого меняется за год, не может быть больше одного светового года. В галактиках Сейферта обнаруженные флюктуации свидетельствуют о том, что размеры источника излучения не превышают 10 диаметров Солнечной системы. Как в таком случае инфракрасное излучение, в 14^{14} раз более мощное, чем излучение Солнца, может выделяться в пространстве, ограниченном, скажем, орбитой планеты Плутон? В этом суть проблемы.

Изучение инфракрасного излучения квазаров полностью подтвердило их сходство с галактиками Сейферта. Эти объекты также выделяют большую часть своей энергии в форме инфракрасного излучения. Здесь наблюдаются флюктуации, свидетельствующие о сравнительно небольших размерах источника излучения. В чем их отличие? Квазары находятся на значительно большем удалении от нас, и их излучение в сотни раз мощнее. Наконец, источник излучения в галактиках Сейферта — ядро в самом галактическом ядре. В то же время ничто не указывает на то, что квазары находятся в центре галактик. Тем не менее не вызывает сомнения тот факт, что механизм излучения у них одинаков.

Сблизив таким образом эти два космических объекта (галактики Сейферта и квазары), астрономы неожиданно обнаружили, что ядро нашей Галактики (Млечный Путь) является источником излучения такого же типа. Почему это открытие не было сделано раньше? К сожалению, центр нашей Галактики недоступен обычным телескопам — слишком много космических объектов «заслоняет» его, и световое излучение галактического ядра не достигает Земли. Однако радиотелескопы обнаружили мощное излучение из центра Галактики, что может быть следствием выброса огромных масс газообразного вещества с большой скоростью. Дальнейшие наблюдения показали, что центр Галактики является источником очень мощного инфракрасного излучения, причем он обладает всеми свойствами источников, о которых говорилось выше.

Вывод напрашивается один: какое-то неизвестное явление вызывает необыкновенную концентрацию энергии на небольших пространствах. Периодически происходит освобождение энергии в форме взрыва, вызывающего выброс масс возбужденного вещества. Затем цикл повторяется до следующего взрыва.

Статистические исследования показывают, что многие звезды, появившиеся в результате такой «вулканической» деятельно-

сти, существуют недолго, а галактики Сейферта сохраняют свою активность в течение сотен миллионов лет. Конечно, эти расчеты нельзя принимать как неоспоримые, но, во всяком случае, галактики Сейферта существуют достаточно долго.

Для объяснения этих необычных явлений академик В. А. Амбарцумян допускает, что в каждом активном ядре имеется некоторое сверхмассивное тело, составляющее его сердцевину. Активность ядра — результат деятельности этого тела. Масса его может составлять сотни миллионов или даже миллиардов масс Солнца. Возможно, что само существование галактики вокруг ядра есть результат активности такого сверхмассивного тела. Не ядро образовалось в уже существовавшей галактике, а галактика возникла в результате активности ядра. Тот факт, что «рукава» спиральных галактик выходят из ядер, соответствует этой гипотезе. Если мы примем ее, то должны сделать вывод, что ядро галактики, теряя за время своей жизни огромные массы вещества, претерпевая взрыв и даже деление, должно с течением времени сильно меняться и, может быть, исчезнуть.

Самое главное и общее возражение гипотезе В. А. Амбарцумяна состоит в том, что никто не наблюдал ни самих сгустков дозвездной материи, ни образования из них звезд или других космических объектов.

Есть возражения и более конкретные. Действительно ли звездные ассоциации неустойчивы? За последние годы у многих звездных ассоциаций помимо основных, наиболее ярких звезд, были обнаружены своеобразные «короны», состоящие из довольно большого числа слабых звездочек. И хотя эти звездочки дают не так уж много света, их доля в общей массе ассоциации весьма существенна. Настолько существенна, что это меняет всю картину: поле тяготения ассоциации оказывается достаточно мощным, чтобы удержать ее от распада.

Нельзя не учитывать и того факта, считают сторонники классической точки зрения, что гипотеза образования звезд из газа и пыли лежит в основе теории звездной эволюции, выводы которой используются теперь во всех областях звездной астрономии и астрофизики.

Если теория звездной эволюции неверна, — отмечает московский астроном Ю. Н. Ефремов, — рухнет вся система наших представлений о мироздании. Даже методы определения расстояний во Вселенной окажутся под сомнением. Кроме того, не существует схемы эволюции звезд, образующихся из сверхплотной дозвездной материи, и, если необходимо отказаться от классической концепции, астрономам грозит опасность остаться у разбитого корыта.

На каждом астрономическом конгрессе выдвигается по несколько гипотез, которые, как правило, не выдерживают проверки временем. Однако одна из них — гипотеза антивещества начинает привлекать все большее внимание ученых. Представляет-

ся, что она лучше других может объяснить появление «сверхточника» энергии. Из всех известных реакций аннигиляция вещества и антивещества высвобождает самое большое количество энергии. Однако до последнего времени антивещество было в известной мере предметом научной фантастики. Существование античастиц доказано, а об антивеществе можно пока спорить. Не было свидетельств того, что античастицы могут соединяться в атомы и молекулы в тех же условиях, что и обыкновенные частицы.

Мы рассмотрели две взаимоисключающие гипотезы звездообразования. Но так ли уж они противоположны, как кажутся? Возможно, что обе они рассматривают разные стороны одной и той же проблемы. Как указывалось, ученые склоняются к мысли о том, что вещество Вселенной заканчивает свой путь в черных дырах. Но, возможно, коллапс — это лишь определенный этап в жизни материи. Просто нам пока неизвестны законы, которые приводят к разрушению коллапсаров, их взрыву в виде сверхзвезд В. А. Амбарцумяна.

В 1928 г. известный английский астрофизик Дж. Джинс высказал мнение о том, что центры галактик могут быть «особыми точками», в которых вещество вливается в нашу Вселенную из каких-то других, совершенно неизвестных пространственных измерений, проявляющих себя в нашей Вселенной как точки, в которых непрерывно образуется вещество. Может быть, коллапс и антиколлапс — это просто части единого процесса? Во всяком случае, К. П. Станюкович развивает идею о том, что сколлапсированные образования, сгустки мертвой материи, при определенных условиях способны «раскрываться» с выделением огромных количеств масс-энергии.

2. Антивещество во Вселенной

Вселенная в целом находится в себе самой, и все ее свойства должны иметь объяснение в ней самой.

Д. ШАМА. Современная космология

Первой ласточкой, возвестившей, что помимо привычного нам мира вещества может существовать симметричный ему антимир, был позитрон. Он был найден американским физиком К. Д. Андерсоном в 1932 г. в опытах по наблюдению следов космических лучей в камере Вильсона, а через два года И. Кюри и Ф. Жолио установили, что позитроны испускаются ядрами при радиоактивном распаде. Однако прошло немало времени, прежде чем до сознания физиков дошло, что позитрон в качестве античастицы представляет собой гонца неизвестного нам мира антивещества. И это несмотря на то, что прямые наблюдения показали, что при столкновении позитрона с электроном происходит полная анни-

гиляция (исчезновение) этих частиц, сопровождающаяся испусканием квантов электромагнитного излучения. При этом выдерживается релятивистское соотношение массы и энергии: $E=mc^2$. В дальнейшем оказалось, что жесткие гамма-кванты при взаимодействии с веществом также могут образовывать позитрон-электронные пары, которые можно разделять в магнитном поле и даже накапливать в магнитных ловушках.

Справедливости ради следует сказать, что позитрон был открыт значительно раньше, в 1928 г., когда стройной цепочкой математических уравнений выдающийся английский физик П. Дирак доказал существование антиэлектрона. «Теория дырок» Дирака (1930 г.) формулируется следующим образом: если из сплошного моря электронов, находящихся в определенном энергетическом состоянии, выбить электрон, то на его месте образуется дырка (но не в обычном понимании, а нечто такое, что ведет себя в электромагнитном поле как электрон, но с положительным зарядом). Суть теории Дирака состоит в релятивистском обобщении волнового уравнения электрона Э. Шредингера. Она устанавливает, что частицы и античастицы совершенно симметричны, но противоположны по знаку электрического заряда и могут совместно рождаться и аннигилировать. Если электрон встретится с дыркой, неизбежен переход его из состояния положительной энергии в свободное (ненаблюдаемое) состояние с отрицательной энергией, сопровождаемый испусканием гамма-кванта. При этом и электрон и дырка исчезают, порождая электромагнитное излучение.

Точно так же положительно заряженному протону должен противостоять отрицательно (и равно) заряженный антипротон. Нейтрон не имеет заряда, но он обладает магнитным полем (спином), ориентированным в определенном направлении. Ему будет противостоять нейтральный антинейтрон, магнитное поле которого ориентировано в противоположном направлении.

Один из важнейших принципов физики — принцип симметрии, поэтому античастицы должны обладать всеми свойствами частиц (с учетом их зеркальности). Если протоны и нейтроны могут объединяться в атомные ядра, то теоретически ничто не мешает антипротонам и антинейтронам объединиться в антиядра.

Атомное ядро может окружить себя электронами, образуя нейтральный атом, и атомное антиядро может окружить себя антиэлектронами (позитронами), образуя нейтральный антиатом.

Еще до открытия первой античастицы — позитрона — справедливость теории Дирака и необходимость учета состояния с отрицательной энергией были подтверждены при построении теории рассеяния квантов на свободных электронах — комптон-эффекта. Открытие позитрона и установление его свойств, предсказанных теорией (аннигиляции при столкновении с электроном и рождении в паре с электроном под действием гамма-квантов), казалось бы, подтвердило правильность теории Дирака. Тем не

менее, более 20 лет эта теория многими физиками считалась математическим курьезом, случайным совпадением с практикой. И лишь открытие антипротона в 1955 г. доказало справедливость теории Дирака и симметрии физических законов относительно частиц и античастиц. И вот тогда, воспользовавшись теорией Дирака, ученые впервые заглянули в иной, «перевернутый» мир, в котором знакомые нам элементарные частицы все без исключения переменили не только левую сторону на правую, но и знаки заряда: оказалось, что вечные кирпичики мироздания — протон, нейтрон и электрон — вовсе не вечные. Они исчезают и возникают вновь, причем обязательно в паре с соответствующими античастицами.

Ну, а если каждая частица должна иметь своего антипода — античастицу, то где-то должны быть антиэлементы, антивещество и даже целые антимиры. Ведь позитрон и антипротон, к примеру, вполне могут образовать антиводород, из антиводорода синтезируется антигелий в антизвезде, и далее все идет по плану, вплоть до образования антижизни. В бескрайних просторах космоса, может статься, и существуют антимиры — зеркальное подобие нашего мира со всеми его свойствами. Но для такого широкого обобщения необходимы прямые доказательства. Многое в этом направлении уже сделано, еще больше намечено сделать. Например, необходимо получить в лабораторных условиях более сложные, чем антипротон, ядра, а, следовательно, и антиатомы.

И вот американским физикам Л. Лидерману и его коллегам 6 лет назад удалось зарегистрировать на брукхэйвском ускорителе около 200 ядер тяжелого изотопа антиводорода — антидейтрона. Тогда же группа Ю. Д. Прокошина получила на самом мощном в мире Серпуховском ускорителе (он ускоряет протоны до энергии в 70 млрд. электрон-вольт) свыше 50 тыс. антидейтронов. Этой же группой в 1971 г. синтезирован антигелий с массой, равной 3. Это открытие трудно переоценить и, хотя обнаружено всего 5 антиядер ${}^3\text{He}$, сам факт открытия второго антиэлемента антитаблицы Менделеева дает основания полагать, что и все элементы этой антитаблицы где-то могут существовать.

Таким образом, зеркальная симметрия Вселенной становится более приемлемой и более понятной, чем асимметрия, хотя именно последняя характерна для нашей Солнечной системы. Как далеко распространяется асимметрия — неизвестно, но уже даже в масштабах нашей Галактики возможность существования антивещества не исключена, тем более в Метагалактике или вообще во вселенной.

Во всех известных физических процессах образования частиц происходит одновременное рождение одинакового числа античастиц. Все известные процессы исчезновения частиц, обладающих электрическим или ядерным зарядами, являются процессами парной аннигиляции, в них исчезает всегда одинаковое число частиц и античастиц. Возможно, что эти процессы превращения

частиц и их энергии покоя в энергию поля или обратные превращения энергии полей в энергию покоя частиц происходят в крупных масштабах во Вселенной. Среди объектов, известных современной астрофизике, имеются такие, которые выделяют огромное количество энергии, невозможное при ядерных или термоядерных реакциях, служащих источниками энергии звезд. Об этом говорилось в предыдущем разделе.

Если предположить, что Вселенная симметрична относительно вещества и антивещества, то космология прежде всего должна найти причину наблюдаемой асимметрии в масштабах по меньшей мере Солнечной системы, объяснить образование космических тел, состоящих из одного вещества или одного антивещества и содержащих огромное число частиц (порядка 10^{57}). Заметим, что число звезд в Галактике составляет около 10^{11} , а в наблюдаемой Вселенной — 10^{21} , т. е. примерно 10^{78} частиц (мы приняли, что наша Солнечная система представляет собой некий средний объект во Вселенной). Предположить, что 10^{57} частиц могло бы выделиться из 10^{78} в результате статистической флуктуации, невозможно. По расчетам Б. М. Понтекорво и Я. А. Смородинского и оценкам В. М. Харитоновича с учетом нейтрино-антинейтринного фона, для статистического отделения 10^{57} частиц общее число частиц должно достигать 10^{108} , т. е. не хватает 10^{30} частиц. Следовательно, разделение симметричной Вселенной в результате флуктуации локальной плотности числа протонов настолько невероятно, что вряд ли заслуживает обсуждения.

Н. А. Власов считает, что совокупность гравитационного и электромагнитного полей может оказаться несимметричной относительно вещества и антивещества. Следуя за Х. Альфвеном и О. Клейном, он предполагает, что Вселенная взяла свое начало из некой биплазмы, состоящей из одинакового числа протонов и антипротонов, электронов и позитронов, т. е. из стабильных в вакууме частиц и античастиц. В такой симметричной и электрически нейтральной биплазме гравитационное поле должно приводить к частичной сепарации тяжелых частиц (протонов и антипротонов) от легких (электронов и позитронов). В свою очередь внешнее электрическое поле смещает вещество и антивещество в противоположных направлениях и приводит к их разделению. Существование электрического поля вполне естественно, поскольку всякое движение намагниченной биплазмы под действием гравитации или турбулентности газовых облаков вызывает нестационарность магнитного поля, а следовательно, и возникновение электрического поля. Х. Альфвен и О. Клейн в 1963 г. вычислили, что подобным механизмом могут разделяться массы, в 10 тыс. раз меньшие массы Солнца, т. е. могут образовываться мелкомасштабные облака и антиоблака. Если эти облака связаны магнитными полями, то при их столкновениях должно происходить их укрупнение и разделение. Действительно, при столкно-

вении облака с антиоблаком на их границе развивается интенсивный процесс аннигиляции, и под действием возрастающих температуры и давления они отталкиваются друг от друга. Напротив, одноименное вещество не будет отталкиваться: облака будут проникать друг в друга и, таким образом, укрупняться.

Процесс разделения вещества и антивещества должен учитываться в любой космологической модели. Это одна из первых ступенек «биологического» развития материи от простого к сложному. Если был большой взрыв, то по достижении плотности расширяющегося субстрата 10^{-2} частица/см³ начнется процесс разделения вещества и антивещества (по оценкам Н. А. Власова, 1966). Если галактики рождаются в результате выброса вещества из плотных и массивных тел типа ядер галактик или сверхзвезд (по модели В. А. Амбарцумяна), то при этом, возможно, выбрасывается симметричная биплазма, которая лишь в дальнейшем разделяется на вещество и антивещество.

Современной астрофизике известно большое количество удивительных и пока необъяснимых явлений. К ним относятся колоссальные взрывы сверхзвезд, огромная энергия ядер галактик, большая энергия турбулентного движения межзвездного газа и др. Лишь немногие ученые связывали эти космические катастрофы с процессами аннигиляции вещества и антивещества, которые порождают энергию, в тысячу раз большую, чем энергия термоядерных процессов превращения водорода в гелий — самый высокоэнергетический ядерный процесс. Возможно, это объясняется некоторым консерватизмом и нежеланием преодолеть устоявшееся мнение о том, что симметрия Галактики, даже Метагалактики или вселенной — скорее плод фантазии, чем научное заключение.

К сожалению, пока нет данных, говорящих за или против симметрии Вселенной. Основным источником сведений о состоянии Метагалактики (доступной наблюдению части вселенной) являются астрономические и радиоастрономические наблюдения. Однако любое электромагнитное излучение, будь это фотоны (видимый свет), рентгеновское или гамма-излучение или, наконец, радиоволны в диапазоне от 0,01 до 10^6 см, является нейтральным относительно вещества или антивещества. Оно не может нести никакой информации о природе вещества, его породившего. И звезда, и антизвезда при прочих условиях будут светить совершенно одинаково. Правда, такие антиатомы, как протоний (ядро — антипротон, а вместо электрона — позитрон) и позитроний (ядро — позитрон), имеют характерные линейчатые спектры, и их в принципе можно было бы обнаружить в оптических лучах антизвезды, но дело в том, что эти образования очень недолговечны (время жизни, например, ортопозитрония равно $1,4 \cdot 10^{-7}$ сек), поэтому интенсивность спектральных линий будет ничтожна. О свойствах других антиатомов мы не имеем представления.

При аннигиляции вещества и антивещества должны испускаться гамма-кванты со специфическим спектром с энергией примерно от 0,5 до более 50 Мэв. Такие кванты действительно наблюдаются, но причина их возникновения — вопрос дискуссионный. Следует отметить, что лишь столкновение электрона с позитроном приводит к преобразованию их энергии покоя в энергию фотонов. При аннигиляции протона с антипротоном (или нейтрона с антинейтроном) сначала образуются так называемые пи-мезоны (они бывают положительными, отрицательными и нейтральными), которые, распадаясь, превращаются в электроны, позитроны, гамма-кванты и нейтрино.

Много фактов может дать исследование космических лучей. Они приходят к нам из самых отдаленных частей нашей Галактики, и не исключена возможность, что какая-то их часть пришла из соседних галактик. Космическое излучение представляет собой поток ядерных частиц с энергией порядка десятков миллиардов электрон-вольт. О составе космического излучения дает представление табл. 1.

Таблица 1

Состав первичного космического излучения

Группа ядер	Заряд Z	Среднее число нуклонов	Доля в общем потоке, %
Протоны	1	1	92,9
Ядра:			
He	2	4	6,3
Li, Be, B	3—5	10	0,13
C, N, O, F	6—9	14	0,4
Ne, Na, Mg, Al, Ca	10—20	31	0,18
Тяжелые ядра (главным образом Fe)	20—30	51	0,05
Сверхтяжелые ядра	>30	?	0,001

Представление о космическом излучении как о потоке ядер элементов, индукционно ускоренных в электромагнитных полях Галактики, было развито Я. А. Терлецким и Э. Ферми. Однако, возможно, частицы очень высоких энергий (более 10^{17} электрон-вольт на нуклон) зарождаются за пределами нашей Галактики. Некоторая доля относительно мягкого космического излучения обязана своим происхождением Солнцу (около 5% по числу частиц и 2—3% — по суммарной энергии).

Если в областях пространства, из которых космическое излучение приходит на Землю, существует антивещество, естественно ожидать, что в космическом излучении наряду с частицами будут и античастицы.

Около 15 лет ведутся поиски следов антиядер в фотоэмульсиях, поднятых на большие высоты. Сотрудниками Ленинградского физико-технического института в 1972 г. при просмотре фотоэмульсий, облученных при полете космических аппаратов «Космос-213», «Союз-5», «Зонд-5, 7», было установлено, что из 2750 следов многозарядных частиц с энергией меньше 1 Гэв на нуклон около 100 можно приписать антиядрам с зарядовым числом 3.

Как известно, существует закон сохранения электрического заряда. Это означает, что аннигилировать и превратиться в фотоны могут только равные количества положительного и отрицательного заряда. Точно также положительные и отрицательные заряды должны возникать в равных количествах из гамма-квантов; возникновение электрического заряда одного какого-то знака невозможно. Тем не менее, в окружающем нас мире нет явных признаков антивещества, хотя в процессе возникновения частиц должны были бы возникать и античастицы, причем в таком же количестве. Если бы симметрия была характерна уже для нашей Галактики, то число частиц и античастиц в первичном космическом излучении должно быть вполне соизмеримо. Как следует из табл. 1, речь идет главным образом о протонах и антипротонах, поскольку они составляют основную долю космического излучения. Однако следует иметь в виду, что отдельные антипротоны могут образоваться и в вещественной среде в результате столкновения быстрых частиц. Поэтому их наличие в составе космического излучения еще ни о чем не говорит. В то же время обнаружение даже единичного сложного антиядра однозначно свидетельствовало бы в пользу существования антивещества в составе космического излучения. До сих пор, однако, никаких тяжелых антиядер (тяжелее ${}^3\text{He}$) в космическом излучении не обнаружено.

Причин отсутствия заметных количеств антиядер в космическом излучении может быть несколько.

Метагалактика состоит главным образом из вещества, что не исключает возможность существования других метагалактик, состоящих из антивещества, но по определенным причинам обмен материей между ними практически не происходит или из-за слишком больших расстояний еще не успел произойти. Принцип симметрии обобщенной Вселенной при этом остается ненарушенным.

Прежде чем попасть на Землю, античастицы, как и частицы, должны долго блуждать в галактических и межзвездных магнитных полях. По расчетам Н. А. Власова, например, радиус кривизны траекторий частиц в среднем в магнитном поле Солнечной системы равен $3 \cdot 10^{11} \text{ см}$, что в несколько тысяч раз меньше размеров Солнечной системы (радиус 10^{15} см). Распределение магнитных полей в Галактике недостаточно изучено, но, по некоторым данным, они имеют преимущественное направление вдоль спиральных рукавов. В таких полях частицы будут быстрее распространяться вдоль рукавов по спиралям вокруг силовых линий.

Поперечный дрейф может происходить лишь в случаях неоднородности магнитного поля. Если античастицы поперек магнитного поля распространяются в среде, заполненной частицами, то, проблуждав 1 световой год, они обязательно аннигилируют (при плотности частиц 10^{-29} г/см³). Это расстояние меньше расстояния до ближайших к Солнечной системе звезд. При диффузии частиц вдоль магнитного поля (вдоль спирального рукава) они, конечно, достигли бы Земли, если бы тот спиральный рукав, к которому принадлежит и Солнечная система, содержал бы заметные количества антивещества. Это опять-таки не исключает возможности того, что какой-то соседний рукав нашей Галактики состоит из антивещества.

Фантазия может увести нас и дальше: действительно, если бы Галактика состояла из рукавов и антирукавов, то в ее центре, где рукава сходятся, непрерывно шел бы процесс аннигиляции, поддерживаемый непрерывной диффузией вещества и антивещества из соответствующих рукавов. Не этим ли объясняется выделение огромных количеств энергии в ядрах некоторых галактик, которые наблюдают оптическими и радиоастрономическими методами?

Если в Галактике существуют антитела, то они рано или поздно должны попасть в пределы Солнечной системы, если нет антигравитации. Наблюдения за траекториями комет показали, что среди них могут быть пришельцы из других звездных систем. Гипотеза об антивещественном составе некоторых комет и сопровождающих их появление метеорных потоков отстаивалась в 1966 г. академиком Б. П. Константиновым при обсуждении проблемы Тунгусского метеорита: предполагалось, что Тунгусский метеорит представлял собой антитело массой около 1 кг. Мы вернемся к проблеме тунгусского дива в следующей главе, а сейчас важно отметить, что на нашу Землю могут попадать антиметеориты, являющиеся представителями антимиров, находящихся в просторах нашей Галактики.

Проблему антиметеоритов всесторонне рассматривал профессор ядерной физики Люблинского университета (ПНР) М. Суботович и, не отвергая вероятность нахождения антивещества в качестве «гостя» нашей Солнечной системы, предложил несколько методов его обнаружения. Так, рассматривая процессы аннигиляции вещества, он отмечает, что при этом образуются частицы: пи- и мю-мезоны, позитроны, нейтрино и как результат их взаимодействия с веществом (а также мощного гамма-излучения) вторичные частицы: нейтроны, протоны, продукты расщепления ядер и их превращений после захвата, например, нейтрона. В среднем при взаимодействии одного антипротона с веществом образуется $2,9 \pm 0,6$ нейтронов. Эти нейтроны в реакциях (n, p), (n, pn), ($n, 2n$), (n, α) и других образуют различные радиоактивные ядра в окружающей среде, например, в поверхностных и приповерхностных слоях Луны. Радиоактивные нуклиды об-

разуются также в процессах захвата пи- и мю-мезонов, фотоядерных реакциях либо при соударении с быстрыми протонами. В табл. 2, составленной М. Суботовичем, приведены некоторые

Таблица 2

Некоторые долгоживущие радиоактивные нуклиды, которые могут образоваться в процессе взаимодействия антивещества с веществом

Образующийся нуклид	Период полураспада, лет	Ядерные реакции	Исходный нуклид	Распространенность в изотопной смеси, %
^{10}Be	$2,7 \cdot 10^6$	(n, γ)	^9Be	100
^{14}C	$5,57 \cdot 10^3$	(n, γ)	^{13}C	1,1
^{14}C	$5,57 \cdot 10^3$	$(\mu^-, n); (n, p)$	^{14}N	99,6
^{22}Na	2,58	$(n, 2n)$	^{23}Na	100
^{26}Al	$7,38 \cdot 10^5$	$(\gamma, n); (n, 2n)$	^{27}Al	100
^{26}Al	$7,38 \cdot 10^5$	(p, γ)	^{25}Mg	10,1
^{26}Al	$7,38 \cdot 10^5$	(p, n)	^{26}Mg	11,2
^{36}Cl	$3,08 \cdot 10^5$	(n, γ)	^{35}Cl	75,5
^{40}K	$1,3 \cdot 10^9$	(n, γ)	^{39}K	93,1
^{53}Mn	$1,9 \cdot 10^5$	$(\gamma, 2n)$	^{55}Mn	100
^{59}Ni	$7,5 \cdot 10^4$	$(p, \gamma)^{59}\text{Cu} (\beta^+)^{59}\text{Ni}$	^{58}Ni	67,9
^{81}Kr	$2,13 \cdot 10^5$	(n, γ)	^{80}Kr	2,3
^{81}Kr	$2,13 \cdot 10^5$	(p, n)	^{81}Br	49,5

радиоактивные нуклиды, которые могли бы возникать и быть исследованы (большой период полураспада) как продукты взаимодействия антиметеоритов с материей поверхностного слоя Луны. Здесь указаны лишь некоторые из возможных ядерных реакций, в результате которых могут возникать долгоживущие радиоактивные нуклиды. Следует заметить, что на Луне существуют также естественные радиоактивные элементы, которые аналогично радиоактивным элементам на Земле, образовались в процессе нуклеосинтеза. Второй возможной причиной возникновения наведенной радиоактивности является взаимодействие космического излучения с нуклидами субстанции, образующей поверхностный слой Луны.

Радиоактивность, вызванная первичным космическим излучением, может быть также обнаружена в метеоритах и атмосфере Земли. Плотность потока частиц первичного космического излучения в пространстве вокруг Солнца составляет $(4,21 \pm 0,20)$ частица/(см²·сек). Наилучшим местом в Солнечной системе для обнаружения наведенной радиоактивности, вызванной возможным взаимодействием антиметеоритов с веществом, являются, очевидно, лунные кратеры. Поверхность Луны, по-видимому, подвергалась бомбардировке частицами антиматерии в течение 4—5 млрд. лет. Поэтому можно ожидать своего рода равновесия

между потоком антиматерии и количеством радиоактивных ядер, являющихся продуктами аннигиляции нуклон — антинуклон.

М. Суботович полагает также, что факт бомбардировки лунной поверхности антиметеоритами можно обнаружить, изучая характерные особенности возникающих при этом кратеров. Вопрос о возникновении кратеров еще не выяснен до конца, тем не менее законы, описывающие формирование кратеров, говорят о том, что существует весьма четкое различие в параметрах кратеров (глубина, поперечник, объем), образованных химическими или ядерными зарядами. (Взаимодействие вещества с антивеществом в первом приближении можно уподобить ядерному взрыву.) У кратера, образованного взрывом химического заряда, отношение глубины к поперечнику заметно больше, чем у кратера ядерной природы. Иными словами, объем кратера при взрыве ядерного заряда всегда меньше, чем при взрыве химического, при условии одинаковой мощности зарядов.

Такой кратерный способ поисков следов антивещества может быть особенно эффективен на поверхности Луны, где эрозия очень медленна и следы космической бомбардировки практически не стираются со временем. Взаимодействие типа материя — антиматерия должно вести к образованию кратеров с такими характеристиками, как при ядерных взрывах. Кратеры этого типа получились бы при соударении антиметеоритов с поверхностью Луны. При ударах «обычных» метеоритов с поверхностью Луны возникают такие же кратеры, как при взрывах химических материалов.

Таким образом, изучая одновременно как радиоактивность, так и геометрию кратеров, можно получить информацию о происхождении последних и судить о том, попадает ли антивещество в нашу Солнечную систему или нет.

3. Солнечная система

Многие из последних научных работ по исследованию космического пространства заканчиваются гипотезами о возникновении и эволюции Солнечной системы. По-видимому, это останется одной из основных проблем и, может быть, центральной проблемой, на которой сосредоточатся космические исследования ближайшего будущего.

Х. АЛЬФВЕН. Стратегия космических исследований

Наша Солнечная система состоит из вещества, находящегося в самых различных состояниях: от солнечной плазмы и чрезвычайно разреженного газа в межпланетном пространстве до нелетучего консолидированного вещества в планетах (особенно земной группы) и астероидах.

Почти 5 млрд. лет существует наша Солнечная система. Почти 5 млрд. лет кружится вокруг центрального светила Земля. Как же возник мир, в котором мы живем?

В настоящее время большинство ученых считают, что Солнце и планеты образовались одновременно из одного и того же холодного газово-пылевого облака. С позиции небесной механики ученые конструируют и процесс образования Солнечной системы.

Сначала существовала холодная газово-пылевая туманность, аналогичная тем, которые астрономы наблюдают в настоящее время. Эта туманность на 99% состояла из газа, главным образом водорода, и на 1% из консолидированного вещества (по массе). Размеры отдельных консолидированных тел должны быть невелики (до 100 км в диаметре, иначе туманность не была бы устойчивой).

Полагают, что масса протосолнечной туманности составляла 1—2 солнечных массы, т. е. $(2-4) \cdot 10^{33}$ г. Первоначально она могла занимать область пространства вплоть до ближайших звезд. Правда, 5 млрд. лет назад и звезды были значительно ближе друг к другу. Можно, однако, полагать, что протяженность туманности измерялась световыми месяцами или 1—2 световыми годами. По определенным причинам, о которых речь будет идти ниже, туманность начала сжиматься, и, когда ее радиус достиг примерно $(4-8) \cdot 10^{14}$ см (примерно орбита Нептуна — афелий¹ Плутона), начались процессы конденсации вещества. Плотность облака газа, из которого возникло Солнце, 10^{-21} г/см³. Эта часть первичной туманности (протосолнечная), по мнению У. Каула (1971 г.), должна была быть более холодной, чем окружающее облако. Конечно, подобная конденсация могла происходить и происходила до образования Солнечной системы, да и сейчас происходит в других частях Галактики.

Как известно, Солнце относится к звездам третьего поколения. Это значит, что пошедшее на его образование вещество фактически должно представлять собой смесь вещества трех генераций. На самом же деле это более сложная смесь, поскольку происходит постоянный обмен веществом между различными частями Галактики, его перемешивание. О том, что каждая последующая звезда усваивает распыленное вещество своих предшественников, говорит факт накопления в Галактике тяжелых элементов. Чем моложе звезда, тем больше в ней тяжелых элементов. За 6—8 млрд. лет содержание тяжелых элементов увеличивается на порядок. Это значит, что обновленный космический субстрат («пепел Сверхновых») становится исходным материалом звезд следующего поколения. Заметим, что в эволюции звезд четко выявляются цикличность и направленность. Цикличность

¹ Афелий — точка орбиты, наиболее удаленная от Солнца, перигелий — наиболее приближенная.

выражается в кругообороте вещества, направленность — в том, что в каждом новом цикле участвует все меньшее количество вещества (в наблюдаемой части Вселенной), так как субстрат белых карликов, нейтронных и коллапсировавших до «гравитационной ямы» звезд надолго, если не навсегда, выпадает из круговорота. Главным же фактором является неуклонное возрастание доли тяжелых элементов.

Этот же факт свидетельствует в пользу конденсационной гипотезы образования звезд. Если бы Солнце образовалось в результате взрыва какого-то сверхплотного сгустка, а планеты — путем сгущения диффузной материи, исторгнутой при этом процессе, мы не только не наблюдали бы существенной разницы в распространенности тех или иных элементов в звездах, но и консолидированное вещество в нашей Солнечной системе (например, некоторые железные метеориты) не могло бы быть старше самой системы.

Основываясь на конденсационной гипотезе образования звезд, рассмотрим вопрос об «обновлении» космического вещества. По современным оценкам, основная масса вещества нашей Галактики заключена в звездах. Масса межзвездного газа составляет всего несколько процентов общей массы Галактики. И это количество постепенно уменьшается в результате постоянного образования звезд. Лишь 1—2% звездной материи возвращается в диффузное состояние в результате звездных катастроф типа взрывов Новых и Сверхновых звезд и менее энергичных выбросов. Возникают вопросы: все ли вещество той или иной солнечной системы, погибшей при взрыве, полностью обновляется; связано ли образование новых солнечных систем с полной переработкой некогда консолидированного вещества, с полной гомогенизацией его и последующей конденсацией из плазмы?

По-видимому, эти вопросы связаны с проблемой планетных систем и их распространенностью в звездном мире. По очень осторожным оценкам, по крайней мере небольшая часть из 100 млрд. звезд нашей Галактики должна иметь планетные системы. Во время звездных катастроф, а их было на протяжении существования Галактики (12—15 млрд. лет) порядка 1 млрд. (учитывая экспоненциальный рост звездной активности по мере продвижения в глубь веков), консолидированное вещество планет далеко не всегда превращается в плазму. Не этим ли объясняется тот факт, что газовые скопления содержат до 1—2% пыли?

Масса протосолнечного газово-пылевого облака, по-видимому, составляла 1,1—2 солнечных массы. При этом масса консолидированного вещества, существовавшего до начала образования Солнечной системы, в первичном облаке могла составлять $(2-4) \cdot 10^{31}$ г. Суммарная масса всех планет Солнечной системы составляет едва ли не тысячную долю первоначальной массы облака и на порядок меньше массы первично консолидированного вещества. Можно полагать, что на строительство планет,

особенно планет земной группы, пошла значительная доля первично консолидированного вещества.

То, что в процессе эволюции первичного протосолнечного облака образовались многие мелкие сгущения (центры конденсации), принимается почти всеми космогонистами. Очевидно, что на первых этапах развития первичного облака зародышами протопланет могли служить уже существовавшие пылинки. Можно также полагать, что доля первично консолидированного вещества в планетах оказалась значительно большей, чем в Солнце. Как известно, последовательность «вычерпывания» вещества протопланетного или протосолнечного облака зародышами планет или зарождающимся Солнцем подчиняется закону Ньютона, гласящему, что сила тяготения прямо пропорциональна произведению притягивающихся масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Если одна из притягивающихся масс значительно больше другой, то эта большая масса начнет захватывать все вещество из своей гравитационной зоны. Планеты, особенно земной группы, «не доросли» до того, чтобы относиться безразлично к массе притягивающейся частицы. По крайней мере Земля даже на конечном этапе своего формирования не в состоянии захватывать газы с молекулярной или атомной массой менее 40. А зародыш Солнца по достижении определенной массы начал захватывать все вещество. Поскольку газа было в первичном облаке раз в 100 больше по массе, чем консолидированной материи, то, естественно, Солнце формировалось в основном за счет газовой составляющей.

При образовании планет процесс носил избирательный характер: захватывался главным образом консолидированный материал. Этот консолидированный материал представлял собой пыль и фрагменты первичного облака («реликтовое» вещество Солнечной системы), а также сгущения, образовавшиеся во время формирования Солнечной системы (солнечное вещество). Различия в химическом составе этого генетически разнородного вещества должны быть, однако они, по-видимому, слишком незначительны, чтобы можно было их заметить при помощи современной аналитической техники, и, кроме того, мы не знаем, чего следует ожидать в том или другом случае. Единственным надежным критерием следует считать концентрацию радиоактивных элементов, поскольку реликтовое вещество должно содержать, например, урана и тория значительно меньше, чем вещество «солнечного» происхождения (предполагается, что основная масса радиоактивных ядер образовалась непосредственно перед рождением Солнечной системы). Так как реликтовое вещество образовалось задолго до Солнца, то оно уже тогда содержало меньше тяжелых радиоактивных ядер (по закону постепенной структуризации Вселенной), а те, которые были, успели в значительной степени распасться, пока туманность находилась в стационарном состоянии до момента образования Солнечной системы.

Многие исследователи задумывались над вопросом, что послужило толчком к конденсации первичного газово-пылевого облака. В частности, В. Г. Фесенков (1964 г.) считал, что таким толчком был взрыв Сверхновой в непосредственной близости от туманности. В том, что радиоактивные элементы Солнечной системы обязаны своим происхождением взрыву Сверхновой звезды 4,7 млрд. лет назад, убеждены Ф. Хойл и В. Фаулер (1964 г.), Дж. Бербидж (1964 г.), автор настоящей книги (1968, 1970, 1971, 1974 гг.), А. К. Лаврухина (1973 г.), В. Н. Ларин (1974 г.) и др.

Предположим, что Сверхновая имела непосредственное отношение к зарождению Солнечной системы из первичной туманности. К тому времени в газово-пылевом облаке, по-видимому, уже существовали твердые тела в виде пыли и более крупных фрагментов (рис. 1), которые, попадая в сферу действия Сверхновой, частично испарялись или даже превращались в плазму. Непрозрачность облака была настолько значительной¹, что часть туманности вообще не могла быть переработана или даже затронута вторгшейся плазмой Сверхновой, но в целом облако было выведено из равновесного состояния, и в нем начались процессы интенсивной консолидации вещества [например, по механизмам, предлагаемым Дж. Латимером (1950 г.) или В. С. Сафроновым (1969 г.), или согласно другим конденсационным гипотезам].

Сверхновая во время взрыва (примерно первые 100 сек) синтезировала заметные количества тяжелых радиоактивных ядер, в том числе ядер урана и тория. Первичная туманность получила дополнительно около 2—3% нового вещества, обогащенного этими ядрами² (по оценке автора). Вторгшееся в первичную туманность вещество Сверхновой могло представлять собой плазму или атомы, движущиеся со скоростью от нескольких сот до нескольких тысяч километров в 1 сек. Возможно, вещество Сверхновой вместе с ее электромагнитным излучением явилось тем энергетическим источником, который необходим, например, для

¹ Поверхностная плотность могла составлять 10^5 — 10^6 г/см² при сжатии первичной туманности до 1000 а.е. (1000 расстояний от Земли до Солнца). До сжатия первичная туманность могла простираться до ближайших звезд, и тогда поверхностная плотность была, естественно, значительно меньшей, но вполне достаточной для поглощения излучения Сверхновой.

² Если эта оценка верна и если допустить равномерное расширение вещества Сверхновой без направленных выбросов, то усвоение протосолнечной туманностью 2% вещества Сверхновой может иметь место в случае, если взрыв ее произошел в окрестностях первичной туманности на расстоянии (r) от нескольких месяцев до нескольких световых лет в зависимости от сброшенной массы Сверхновой (от $1 M_0$ до $10 M_0$) и протяженности туманности. Действительно, если радиус первоначальной туманности R составлял один световой год при массе $1 M_0$, а Сверхновая сбросила также $1 M_0$ и протосолнечная туманность усвоила 2% нового вещества, то из простого соотношения $\frac{1}{3} \pi R^2 r = 0,02 \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$ получаем: $R = r \sqrt{0,08}$ или $r = 3,5$ светового года. С момента взрыва Сверхновой прошло не менее 4,7 млрд. лет, поэтому трудно сейчас искать ее остатки, скажем, в виде нейтронной звезды.

образования хондр или фрагментов металлического железа, которые в дальнейшем слагали родительские тела метеоритов.

Как уже указывалось, вследствие экранирующего эффекта вторжение высокоэнергетической плазмы Сверхновой в протосолнечное облако не привело к его полной переработке. Сохранились ассоциации атомов, пыль, крупные фрагменты. При этом мелкая составляющая получила дополнительно большее количе-

☆

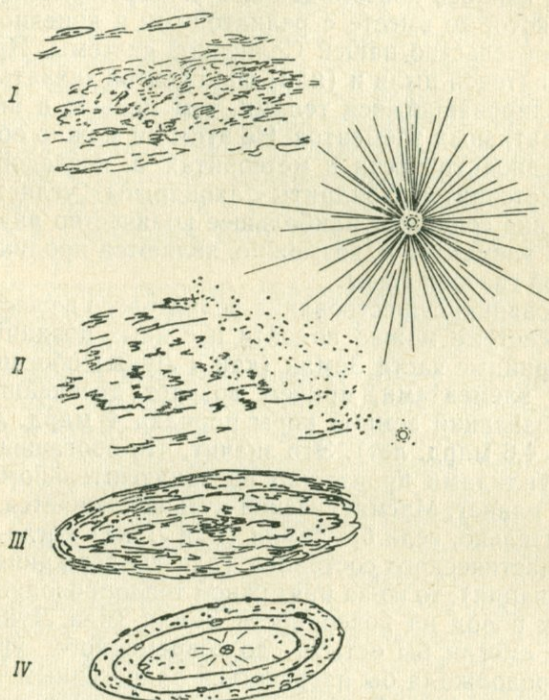


Рис. 1. Главнейшие этапы эволюции Солнечной системы (по Э. В. Соболичу, В. А. Руднику, 1971):

I — первоначальная газопылевая туманность и звезда, впоследствии ставшая Сверхновой; *II* — первоначальная газопылевая туманность попала в сферу действия Сверхновой звезды (более 4,7 млрд. лет назад), получила внешний импульс и обогатилась радиоактивными нуклидами как за счет наведенной радиоактивности, так и непосредственно за счет вещества Сверхновой; *III* — в выведенной из равновесного состояния газопылевой туманности начались процессы упорядочения и конденсации слагающего ее вещества (4,7 млрд. лет назад); уплотнение газопылевой туманности привело к образованию протосолнечного газопылевого облака с явно выраженными сгущениями в центре (будущее Солнце) и в районах орбит будущих планет (4,68 млрд. лет назад); *IV* — центральное сгущение превратилось в Солнце, началось формирование Солнечной системы и, в частности, планеты Земля, завершившееся примерно 4,6 млрд. лет назад (Луна сформировалась одновременно с Землей)

ство радиоактивных нуклидов на единицу массы, нежели крупные фрагменты. Наибольшее количество радиоактивных нуклидов осталось в газовой фазе. Среди первичных фрагментов, естественно, наиболее устойчивыми были металлические; может быть, поэтому их доля среди реликтовых фрагментов разного состава оказалась наибольшей, чем и объясняется большое количество сверхдревних железных метеоритов.

Результатом воздействия на протосолнечное облако взрыва Сверхновой явилась консолидация в его пределах новых сгущений и тел, которые вместе с реликтовыми в конечном итоге пошли на строительство нашей Солнечной системы. При этом чем больше реликтовой пыли и (или) фрагментов захватывалось этими консолидировавшимися телами, тем меньше в них содержалось радиоактивных элементов. Не этим ли можно объяснить повышение радиоактивности в метеоритах в последовательности: железные метеориты < хондриты < ахондриты < углистые хондриты? Последние содержат наибольшее количество радиоактивных (и летучих) элементов и, возможно, являются продуктом конденсации чистой газовой фазы.

К обоснованию существования реликтового вещества в протосолнечной системе можно подойти и с иных позиций. Известно, что периферийные части Земли (как и Луны) обогащены радиоактивными элементами, причем возраст древнейших геологических образований земной коры порядка 4 млрд. лет (лунных пород — до 4,6 млрд. лет). Это значит, что обогащение радиоактивными нуклидами произошло на заключительном этапе формирования планет. Магматический путь исключается.

Действительно, если бы Земля (или Луна) когда-то была нагрета до пластического состояния (для поддержания механизма дифференциации), то из-за ничтожной теплопроводности твердых силикатных пород на поверхности Земли (или Луны) ее недра никогда не смогли бы остыть до современного уровня. Более того, она продолжала бы нагреваться радиогенным теплом и все больше разжижалась. Геофизические же данные ясно указывают, что Земля (как и Луна) твердая.

Дифференциация элементов в твердом теле даже при условии его относительной пластичности при низких температурах, но высоких давлениях должна происходить столь медленными темпами, что даже 4,5 млрд. лет не хватит для выделения геосфер. Допустить же значительную распространенность выделяющих тепло элементов в земных (или лунных) глубинах нельзя, ибо Земля (или Луна) тогда находилась бы к настоящему времени в огненно-жидком состоянии и, конечно, на земной поверхности не было бы пород возрастом около 4 млрд. лет.

Чтобы земная кора обогатилась из земных глубин радиоактивными элементами в наблюдаемых концентрациях, требуется извлечение их из мантии с глубины более 5000 км (А. А. Смыслов, 1969 г.), а мантия, как известно, кончается на глубине

2900 км. Если же допустить, что каким-то способом это все же произошло, то мощность коры в этом случае должна была бы превышать существующую в 7—10 раз. А если допустить, что радиоактивных элементов в мантии в соответствующее число раз больше (чтобы обеспечить существующую мощность в 20—40 км), то она должна была бы полностью расплавиться под действием радиогенного тепла.

Таким образом, любые механизмы магматической дифференциации земного вещества (в том числе и зонная плавка), по-видимому, допустимые для отдельных магматических очагов верхов верхней мантии, неприемлемы при объяснении обогащения периферийных частей Земли (и Луны) радиоактивными элементами и тем более неприемлемы при объяснении образования ядра, мантии и их подразделений. Недаром все большее число ученых склоняется к гипотезе «катастрофического» образования металлического ядра Земли в момент ее формирования (У. Каула, 1971 г.; Э. В. Соболевич, 1970, 1974 гг.; В. А. Рудник, Э. В. Соболевич, 1971 г.).

Конденсационные гипотезы образования планет должны учитывать возможность существования в протопланетном облаке генетически разнородного вещества, находящегося в различных фазовых состояниях. Согласно современным представлениям, например, крупные фрагменты протопланетного облака стремятся расположиться ближе к центру уплощающегося пылевого диска, но поскольку на начальных этапах эволюции протопланетного облака они были представлены главным образом реликтовым материалом и, следовательно, обладали ничтожной радиоактивностью по сравнению с мелкой пылью и газом, то образовавшееся протоядро Земли практически не содержит с самого начала радиоактивных элементов. Более того, планеты земной группы, с этой точки зрения, должны содержать меньше урана и тория, чем планеты-гиганты, а не наоборот, как это следует из теории гравитационной дифференциации газового облака. Поскольку Солнце слагалось в основном из вещества в газовой фазе, то, по-видимому, оно на единицу массы во время своего образования захватило больше радиоактивных нуклидов, чем планеты земной группы.

Нам осталось рассмотреть последний вопрос, когда-то волновавший космогонистов, а именно: почему планеты обладают гораздо большим моментом количества движения, чем само Солнце. Ведь если Солнце и планеты образовались в едином процессе конденсации, то момент количества движения должен быть пропорционален массам образующихся тел, чего не наблюдается. Действительно, после толчка взрывной волны Сверхновой туманность потеряла гравитационную устойчивость, начала сжиматься к своему центру тяжести. При сжатии она раскручивалась все быстрее и быстрее и постепенно уплощалась. По экватору сгустившейся туманности, где центробежные силы были особенно

велики, образовался протопланетный диск, похожий на кольца Сатурна. В дальнейшем, как уже указывалось, из протосолнца возникло наше светило, а из протопланетного диска — планеты. Но как же было передано вращательное движение от протосолнечного сгущения протопланетному диску? Английский астрофизик Ф. Хойл еще в 1958 г. предложил гипотезу магнитогидродинамического переноса момента количества движения от центральной части сжимающегося диска к внешним частям. Сущность его гипотезы состояла в следующем: протосолнце имело дипольный магнитный момент, магнитные силовые линии которого, будучи «вмороженными» в центральное сгущение и вещество диска, поддерживали равенство угловой скорости в системе, как спицы в велосипедном колесе. При этом происходило торможение протосолнца, аналогичное торможению при вращении фигуриста на льду, когда он разводит руки в стороны. Центробежные силы уменьшались, сжатие продолжалось. А вещество протопланетного диска, прихватив запас движения системы, разбегалось в плоскости эклиптики.

Можно предположить, что наблюдаемая закономерность уменьшения распространения легких и летучих элементов в планетах по мере приближения их орбит к Солнцу связана с гравитационной и химической дифференциацией первоначального газовой-пылевого облака. При этом большую роль играла солнечная радиация. Можно также допустить (следуя доводам сотрудника Чикагского университета Дж. Лаймера), что сепарация химических элементов происходила при их конденсации из первоначальной солнечной плазмы (здесь идет речь об агломератах «солнечного» происхождения). Действительно, элементы и их соединения должны были конденсироваться в определенном порядке по мере уменьшения температуры облака. Первыми конденсировались капли железо-никелевого сплава и силикаты, состоящие из наиболее распространенных элементов. Застывшие капли примешивались к твердым первичным частицам газовой-пылевой туманности. Частицы соединялись, образуя более крупные агломераты, и дальше все шло по схеме: более крупные сгущения притягивали более мелкие и рассеянные атомы, и в конце концов формировались планеты. Вблизи Солнца остывание первичного газа происходило медленнее, а дальше от Солнца — быстрее. Поэтому планеты земного типа (Меркурий, Венера, Земля и Марс) при своем образовании захватили наиболее высокотемпературные фракции конденсатов. В зоне между Марсом и Юпитером формировались астерониды — родоначальники метеоритов. Их вещество содержало несколько меньше этих фракций. Возможно, что в краевых частях кольца происходило сгущение вещества, по составу близкого к углистым хондритам, почти полностью сохранившим состав солнечной материи. Наконец, самые далекие от Солнца огромные планеты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) возникли почти целиком из нефракционированного и неразделенного солнечно-

го вещества, сохранив газы (с большой долей водорода) в виде главной составной части.

Это общая схема, которой придерживаются многие ученые.

В. Н. Ларин полагает, так же как и А. К. Лаврухина, Э. Андерс, автор этой книги и другие космохимики, что вспышка

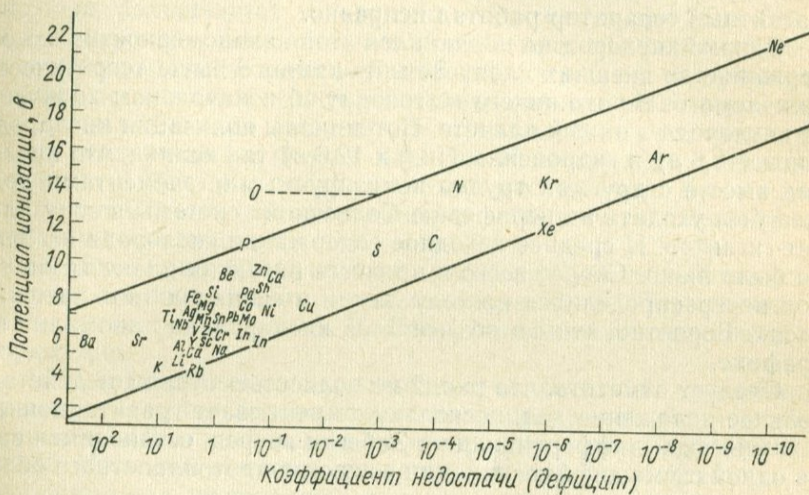


Рис. 2. Магнитная сепарация ионов в протопланетном облаке (по В. Н. Ларину, 1973)

Сверхновой, послужившая толчком к формированию Солнечной системы, должна была навести сильную радиоактивность в протомеществе за счет образования легких короткоживущих нуклидов. Радиоактивность, в свою очередь, вызывала ионизацию вещества облака (отрыв внешних электронов), частицы получали положительный заряд. Дальнейшую судьбу солнечного вещества В. Н. Ларин описывает следующим образом: формирование диска и растекание вещества в плоскости эклиптики шло в магнитном поле; заряженные (ионизованные) частицы не пересекали магнитные силовые линии и поэтому оставались во внутренней части диска (магнитное поле для них было ловушкой), нейтральные частицы, напротив, должны были выталкиваться на периферию (рис. 2).

Магнитной сепарацией заряженных частиц можно объяснить различие в составе планет: внутренние планеты (планеты земного типа) обогащены металлами, потому что у металлов низкие потенциалы ионизации, а внешние планеты-гиганты состоят в основном из элементов, у которых потенциалы ионизации высокие.

Если такая «сортировка» элементов по их потенциалам ионизации происходила в действительности, то это должно было отра-

зяться и на составе Земли: чем выше потенциал ионизации элемента, тем меньше его остается в зоне формирования Земли.

Сравнив современный состав Земли и Солнца, можно проверить, шла ли миллиарды лет назад магнитная сепарация заряженных частиц. Результаты этой проверки изображены на рис. 2, который, по мнению В. Н. Ларина, свидетельствует, что магнитный сепаратор работал исправно.

Однако кислород не подчинился этой закономерности: его содержание во внешних слоях Земли намного выше теоретически ожидаемого. Но это ничего не говорит об изначальном количестве кислорода в нашей планете. Потенциалы ионизации кислорода воды (13,6 в) и гидроксила (13,2 и 12,6 в) так велики, что кислород вместе с другими трудно ионизируемыми элементами должен был уходить на периферию Солнечной системы в зону планет-гигантов. И среднее исходное содержание кислорода на Земле было ниже. Скорее всего в процессе развития планеты кислород перераспределился по телу Земли и скопился во внешних слоях. Вероятно, этим и объясняется кислородная аномалия на графике.

Следует отметить, что рис. 2 не полностью отражает действительное положение дел, поскольку не учитывает гравитационной и химической дифференциации. Забегая вперед, остановимся еще на одной схеме дифференциации вещества протопланетного облака на примере метеоритов.

Если из углистых хондритов удалить летучие компоненты, то остаток элементов будет отражать их среднюю распространенность в обычных хондритах. Э. Андерс считает, что в истории метеоритов могли быть два процесса, ответственных за нехватку летучих элементов: аккреция метеоритных родительских тел из солнечной туманности, в течение которой они теряли газы (H_2 , He и др.), и последующее нагревание родительских тел метеоритов. Г. Зюсс полагает, что наиболее глубокое химическое фракционирование имело место во время конденсации твердых тел Солнечной системы из первоначальной пыли и газа. Внимательное рассмотрение поведения редких элементов на кривой космической распространенности показывает, что их концентрация находится в весьма узком интервале — от 0,1 до 1 атома на 10^6 атомов кремния (например, распространенность Mn, Na, K, Rb, Cs, Cu, Au, Ga, Ge, Sn, Sb, F, S, Se и др.) Между тем давление паров этих элементов различается очень сильно. Следовательно, никакой единой температуры конденсации или последующего прогрева не могло быть. По-видимому, метеориты представляют собой смесь по крайней мере двух фракций: высоко- и низкотемпературной.

Подобное разделение имеет и другие основания. Углистые хондриты содержат высокотемпературную фракцию — оливин, пироксен, металл и низкотемпературную — гидратированные силикаты, Mg, S, FeS, Fe_3O_4 . Наблюдается хорошая корреляция

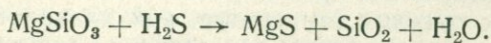
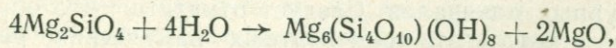
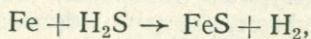
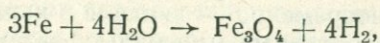
между относительным содержанием этих минералов, содержанием летучих и отношением количества хондр к матрице. Низкотемпературная фракция ассоциируется с матрицей, а высокотемпературная — приписывается хондрам и металлу.

Детальное рассмотрение процессов конденсации и данные по распространенности элементов привели Андерса к выводу, что аккреция большинства метеоритов имела место при 520—680°K. Поскольку вещество, слагавшее Землю, имело раннюю историю, сходную с историей метеоритов, можно полагать, что упомянутым процессам подвергался и материал, пошедший на строительство Земли. Разница лишь в том, что доля нелетучих элементов в нем была несколько больше той, что сейчас находится в веществе пояса астероидов, орбита которого расположена значительно дальше от Солнца, чем орбита Земли, а стало быть, и бывшей орбиты протоземного вещества.

Приведем еще одну гипотезу дифференциации элементов в протопланетном облаке, предложенную А. К. Лаврухиной в 1973 г. В основе модели А. К. Лаврухиной лежат следующие соображения.

1. При образовании протосолнца из холодной туманности реализуется гравитационная энергия со скоростью, которая обеспечивает постоянный нагрев ее внутренних частей примерно до 500°K. При этой температуре почти все элементы (заметим — свободные, т. е. не находящиеся в консолидированном состоянии) будут находиться в виде гидридов, а элементы, не образующие гидриды, — в виде металлов (Fe, Ni, Co, Pt-металлы, Mn, Cr, W, Nb, Ta) и частично в виде окислов (FeO, Fe₃O₄, NiO, CoO, CdO) или сульфидов (Pt-металлы, Mo, W). Из данных по агрегатным состояниям гидридов при различных температурах и давлении 1 атм следует, что при температуре облака менее 100°K в его состав будут входить твердые пылинки гидридов металлов (окислов и сульфидов) и газообразные H₂, He, Ne, Ar, Kr, Xe, гидриды Zn, Tl и, по-видимому, Pb.

При охлаждении солнечной плазмы в ней, наряду с металлическим железом и высокотемпературными минералами, должны накапливаться гидриды. Однако при $T < 800^\circ\text{K}$ образовавшиеся высокотемпературные минералы будут взаимодействовать с H₂O и H₂S:



Следовательно, охлаждающаяся солнечная плазма будет состоять из гидридов, сульфидов, окисей и гидратированных силикатных минералов. Например, кремний будет образовывать

соединения: Si_2 , SiH_4 , SiO , SiS и SiO_2 ; их доля зависит от соотношений Si/H , O/H и S/H , плотности и температуры облака.

2. В период активной деятельности Солнца начинается процесс постепенного нагрева протопланетного облака и вытеснения

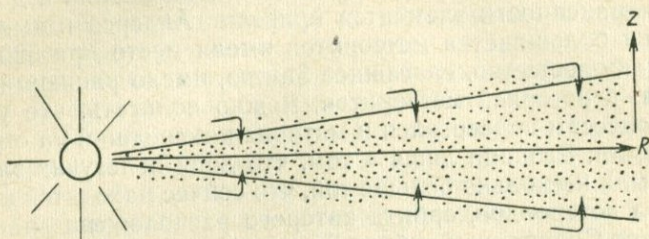


Рис. 3. Схема нагрева газовой-пылевой облака солнечным излучением и рассеянными частицами, находящимися в разреженной зоне слоя (по В. С. Сафронову, 1969)

летучих соединений (H_2 , H_2O , NH_3 , CH_4 , H_2S) и инертных газов из ближайших к Солнцу областей в направлении Юпитера. При этом химические соединения других элементов будут перемещаться по механизму физического переноса и транспортных химических реакций. Наиболее характерной чертой последних является использование гетерогенных равновесий между твердым веществом и газом и перенос образующихся газообразных соединений в другую зону, где при иных температуре и давлении происходит распад их на исходное вещество.

3. Модель процесса нагрева вещества протопланетного облака показана на рис. 3 (по В. С. Сафронову). Нагрев происходит в неоднородном конусообразном слое, толщина которого возрастает в направлении R , а плотность убывает с Z . Солнце находилось за пределами этого слоя; его излучение распространялось почти параллельно слою, оно проникало в верхние разреженные части слоя на большие расстояния от Солнца и после рассеяния в них попадало внутрь слоя.

4. В процессе транспорта образуются все основные минералы метеоритного вещества; их состав и абсолютные количества меняются в направлении R . Образование минералов разного вида происходит не одновременно — вначале в каждом участке образуются низкотемпературные минералы, затем они испытывают термальный метаморфизм, наряду с образованием более высокотемпературных минералов. Следует отметить, что образование минералов в результате транспортных химических реакций не требует таких высоких температур, как их кристаллизация из расплава, поэтому метеориты представляют многокомпонентную смесь минералов разнотемпературного генезиса.

Не вдаваясь в детали гипотезы А. К. Лаврухиной, отметим, что она конструирует такие условия в протопланетном облаке,

которые обеспечивают наблюдаемую дифференциацию элементов в метеоритах разных классов и в целом в планетах Солнечной системы. Ее модель, правда, не учитывает наличия первоначально консолидированного вещества: она исходит из того, что протопланетное облако целиком состояло из новообразований.

Основная идея гипотезы А. К. Лаврухиной — дифференциация элементов в результате транспортных реакций. Возможно, что и этот процесс имел место во время образования Солнечной системы.

По-видимому, уже недалеко время, когда множество дополняющих друг друга гипотез воплотятся в единую стройную модель. При этом надо учесть возможности гравитационной, термической, магнитной и электромагнитной дифференциаций, не забывая, однако, о том, что 1—2% первоначального вещества протосолнечного облака были в консолидированном состоянии и на первых этапах формирования Солнечной системы являлись центрами конденсации, т. е. зародышами консолидирующих тел. Одним из таких тел была и зарождающаяся Земля, которая вначале представляла собой лишь каменную глыбу, которой удалось не только уцелеть при разрушительных столкновениях тел друг с другом, но и вырасти, «вычерпывая» вещество из окружающего пространства. Уже за первые 100 млн. лет Земля обрела почти современные размеры, аккумулировав около $6 \cdot 10^{21}$ г рассеянного вещества. Скорость аккумуляции сначала росла и достигла громадных значений 10^{14} т/год, т. е. ежечасно на Землю обрушивалось до 10—15 млрд. т вещества (рис. 4). По мере вычерпывания вещества, двигавшегося в окрестностях земной орбиты, рост Земли замедлялся, а затем практически прекратился.

Однако Земля до сих пор встречает на своем пути пыль, камни и даже глыбы довольно больших размеров. Об этом будет идти речь в следующей главе.

Н. П. Семенов, как и В. Н. Ларин, считая, что первоначальное вещество, пошедшее на строительство Земли, было в значительной степени восстановленным до металлов или даже до гидридов, предложил кислородно-водородную модель Земли (рис. 5), которая, в частности, объясняет образование земной коры. Кора, по его мнению, представляет собой кислородный каркас, препятствующий потере водорода: «...во внутренних частях

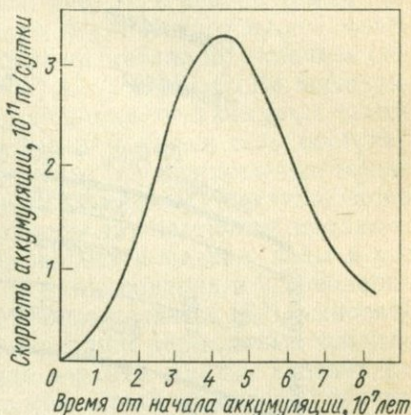


Рис. 4. Скорость аккумуляции Земли (по Б. Ю. Левину и А. Н. Симоненко, 1973)

Земли остаются в ядре протопланетные гидриды наряду с металлическим бескислородным составом элементов, главным образом железа». На протяжении геологической истории проходят процессы дегазации ядра Земли. Плотность ионных гидридов по

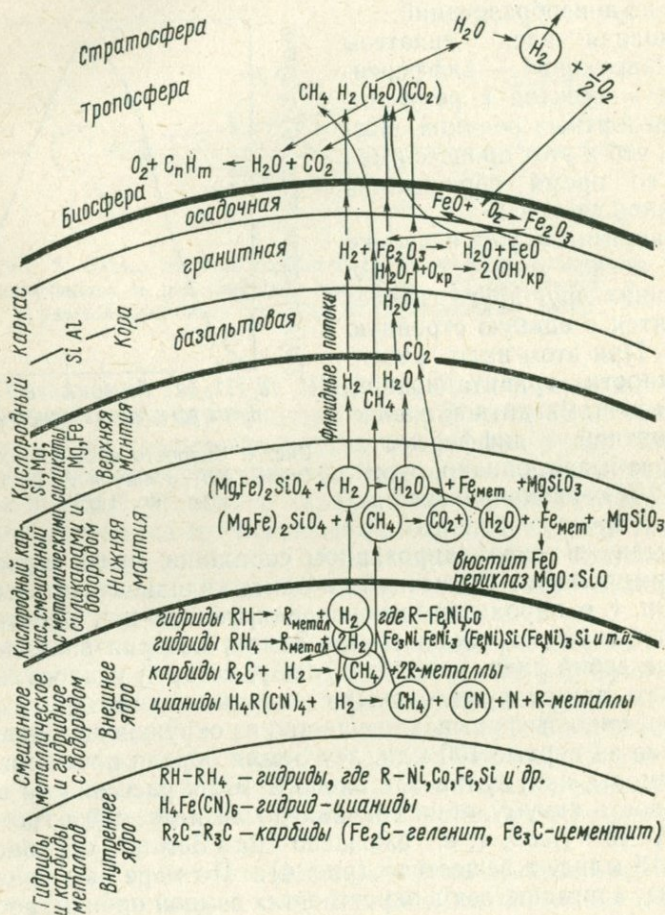


Рис. 5. Кислородно-водородная модель Земли (по Н. П. Семенико)

сравнению с металлами больше, поэтому при дегазации водорода и переходе от гидридов к металлам наблюдается разуплотнение — расширение ядра и увеличение объема Земли в целом. И далее: «Выделение водорода из ядра является пульсационным процессом, связанным с мегациклами тектогенеза и моментами сжатия и расширения, вызываемыми, вероятно, астрономическими факторами, который сменяется периодами прекращения пото-

ка водорода. Вследствие выделения газов в глубинах Земли (в мантии) создаются конвекционные и фильтрационные потоки теплопереноса под воздействием тепла, выделяемого в реакциях разложения гидридов и восстановления водородом, поступающим из внешнего ядра».

По мнению Н. П. Семененко (см. рис. 5), в центре Земли находится внутреннее ядро первичного космического происхождения, сложенное гидридами и карбидами металлов, главным образом $(\text{Fe, Ni})\text{H}$, $(\text{Fe, Ni})\text{H}_3$, $(\text{Fe, Ni})_2\text{C}$, $(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$. Во внешнем ядре происходит частичный распад гидридов и карбидов с выделением водорода и углеводородов. Выделяющиеся газы поступают в нижнюю мантию, при этом происходит разуплотнение внешнего ядра. В нижней мантии под воздействием поступающего снизу водорода и углеводородов происходит частичная металлизация, образуется смесь силикатов железа и магния, воды и углекислоты, частично просачиваются выше водород и углеводороды. Образуются FeO , SiO , AlO и MgO , выделяется H_2S , выносятся сульфиды металлов и идет формирование термальных флюидных потоков. Расположенная выше верхняя мантия состоит из силикатов магния и железа. Через нее просачиваются горячие H_2O , CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , что приводит к выплавлению и дифференциации вещества, устремляющегося в виде флюидов в нижние отделы земной коры. Просачиваются на поверхность земной коры в основном H_2O , в меньшей мере CO_2 и в еще меньших количествах — H_2 , CH_4 и H_2S . Пары воды, поднимаясь в верхнюю часть атмосферы (на высоте 500 км и больше), фотодиссоциируют на кислород и водород. Кислород, обогащая атмосферу, снова вступает во взаимодействие с литосферой, окисляет породы, а водород улетучивается за пределы действия сил земного тяготения.

Эта модель основана на идее первоначально гомогенной Земли и сталкивается с теми же трудностями, о которых говорилось в начале главы. По-видимому, затруднения можно было бы обойти, если, не умаляя роли гидридов в эволюции Земли как планеты, принять, что наблюдаемая геофизиками зональность Земли (геосферы) была заложена еще в ходе ее формирования.

Рассматривая родословную космического вещества, мы постепенно пришли к истории нашей планеты. Иначе и не может быть, ибо пока единственной базой существования человечества является наша Земля, а человечеству требуется все большее количество вещественных и энергетических ресурсов, скрытых в земных глубинах. Эта задача с каждым годом усложняется. Давно отошли в прошлое случайные открытия крупных месторождений полезных ископаемых. Поверхность Земли в основном обследована, и человечеству необходимо знать строение ее глубин. Невозможно или очень трудно получить правильное представление о местонахождении и генезисе месторождения полезного ископаемого, а тем более о форме нахождения и относительном

количестве его в теле Земли, не опираясь на правильную модель земной коры. Последнюю же нельзя построить без модели Земли как планеты.

Все геологические явления связаны с составом и строением Земли. Нет ни одной отрасли геологии, правильное развитие которой можно предполагать в отрыве от определенных моделей Земли.

Теперь стало ясно, что геохимическую модель Земли следует строить на космохимической основе. При этом необходимо ясно представлять космическую ситуацию, предшествовавшую образованию Земли: последовательность конденсации тех или иных соединений в протопланетном облаке, последовательность их аккреции растущей Землей и, наконец, историю Земли на ранних этапах ее существования.

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО
ОКРУЖЕНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В своей научной работе геолог часто забывает, что он имеет дело не просто с Землей, а с одним из индивидуально-различных естественных тел — с одной из «земных планет» Солнечной системы...

В. И. ВЕРНАДСКИЙ. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения

В последние годы естествоиспытатели, занимающиеся историей нашей планеты и пытающиеся понять движущие силы ее развития, все чаще обращаются к космосу. Нет ни одной гипотезы «саморазвития» Земли, которая удовлетворительно объясняла бы совокупность явлений, наблюдаемых на земной поверхности и в земной коре, объясняла бы отрывочные сведения о верхней мантии, более глубинных частях Земли. Пока не создано и подходящей «космической» или смешанной гипотезы.

Конструирование подобных гипотез не является предметом этой главы. Нам важно показать, что в настоящее время создалась довольно сложная ситуация в планетарной геохимии, и наметить пути выхода из этого положения.

Исследователи, причастные к наукам о земле, имеют самые различные специальности: это геологи и геохимики, геофизики и метеорологи, биологи и географы, планетологи и астрономы.

Изучая планету Земля, ученые постоянно сталкиваются с энергетическим и материальным (вещественным) влиянием космического окружения на Землю. Это электромагнитные поля, опоясывающие Землю и взаимодействующие с аналогичными полями Солнечной системы и Галактики, это космическое вещество (метеориты, пыль, тяжелые ядра, низкоэнергетический компонент космического излучения, космические лучи солнечного, галактического и метагалактического происхождения) и, наконец, это гравитационное взаимодействие тел Солнечной системы и всего звездного населения Галактики.

В. И. Вернадский (1965) относил к космическим факторам и такие, как явление радиоактивности и планетогенез. С этим можно было бы согласиться, поскольку мы знаем, что подавляющая часть имеющихся в Земле радиоактивных элементов досталась ей в наследство от первоначального протопланетного вещества и не «производится» в самой Земле; в процессе планетообразования были заложены основы строения Земли и ее последующего развития. Немалую роль в этом развитии играл вещественный

состав протогеосфер. Однако, если мы последуем за В. И. Вернадским, то большинство глобальных геологических явлений мы должны отнести к сфере космических проявлений активности нашей планеты, и будет трудно отделять влияние космических факторов во время существования Земли как планеты от чисто земных. В связи с этим мы оставим в стороне эти две основополагающие проблемы (радиоактивность и планетогенез), тем более что им уделялось внимание в предыдущей главе, и рассмотрим некоторые представления о влиянии космических факторов на геотектогенез и осадочную оболочку земной коры. Еще раз подчеркнем, что влияние космического окружения на развитие нашей планеты происходит параллельно с ее развитием, обусловленным внутренней энергией Земли, слагающейся из радиогенного тепла (главным образом), тепла химических превращений слагающего ее вещества и изменений физических характеристик планеты. В. Е. Хаин (1973) отмечал, что «односторонность тектонических гипотез проявляется уже в том, что в большинстве из них отрицается роль в развитии Земли внешних, астрономических факторов; с другой стороны, некоторые приверженцы ротационной гипотезы, придавая этим факторам решающее значение, игнорируют роль эндогенных процессов. Последователи гипотезы глубинной дифференциации не замечают, что дифференциация и фазовые превращения вещества в недрах Земли должны вести к определенным изменениям объема Земли, а следовательно, и скорости ее вращения и т. п.»

В 50—60-х годах многими исследователями было подмечено, что сейсмическая активность Земли имеет корреляционные связи с ее ротационным режимом, относительным расположением светил (Земли, Луны и Солнца) на небе, солнечной активностью, колебаниями в положении магнитных полюсов Земли, с инверсией магнитного поля Земли и, наконец, с галактическим годом.

Так, Г. П. Тамразян (1967) обобщил имеющиеся наблюдения о том, что цикличность тектогенеза, по крайней мере основных мегациклов, разделенных между собой интервалами в 150—200 млн. лет, совпадает с продолжительностью галактического года. На рис. 6 приводятся графики изменения гравитационного потенциала во время «путешествия» Солнечной системы по своей галактической орбите. По Г. П. Тамразяну, гравитационный потенциал Галактики на единицу массы Земли по мере ее движения по галактической орбите непрерывно изменяется; так, в перигалактики он на 27% больше, чем в апогалактии. Вместе с изменением гравитационного потенциала меняется и расстояние от Земли до Солнца, а следовательно, и количество солнечной радиации, поступающей на Землю. В связи с этим перигалактический участок орбиты Г. П. Тамразян называет галактической зимой, а апогалактический участок — летом. Сейчас мы переживаем галактическую зиму, когда уменьшается сжатие Земли, что ведет к развитию разломов земной коры в близмеридиональных на-

правлениях; в галактическое лето сжатие возрастает и преобладают субширотные дислокации. Вообще говоря, пульсационная гипотеза развития земной коры и ее складчатых сооружений импонирует большинству ученых; многие из них полагают, что гео-

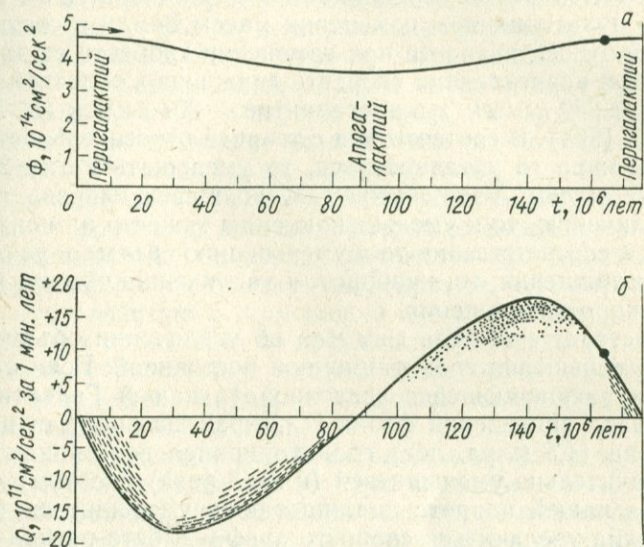


Рис. 6. График изменения гравитационного потенциала Галактики на единицу массы по пути движения Земли (Солнечной системы) в течение аномалистического космического года (176 млн. лет), по Г. П. Тамразяну:

a — гравитационный потенциал Галактики Φ вдоль галактической орбиты Земли (Солнечной системы); *b* — изменение гравитационного потенциала Галактики в единицу времени (градиент гравитационного потенциала Q) вдоль галактической орбиты Земли (точка — современное положение Земли)

тектонические явления являются следствием последовательного расширения и сжатия Земли.

Само изменение гравитационного поля Галактики Г. П. Тамразян связывает с наличием облаков космической пыли. Вполне логичным в связи с этим представляется объяснение Г. П. Тамразяном (1959) похолоданий климата (оледенений) на поверхности нашей планеты за счет уменьшения солнечной радиации, однако, как отмечает Л. А. Пухляков (1970), эта гипотеза, выдвинутая еще в 1909 г. Ф. Нельке, не объясняет длительной плейстоценовой эпохи оледенения. Если принять скорость движения Солнечной системы равной 250 км/сек (что в 1200 раз меньше скорости света), она пройдет облако космической пыли протяженностью в несколько световых лет за тысячи или в крайнем случае за несколько десятков тысяч лет. Последнее же оледенение длилось около 1 млн. лет. Кроме того, мы имеем данные о том, что в

плейстоцене на Землю поступало, по-видимому, больше космической пыли, чем сегодня.

Основное же положение Г. П. Тамразяна о последовательных сжатиях и расширениях Земли в результате изменения гравитационных потенциалов перекликается с гипотезой А. А. Лаврова (1962) о пульсационном изменении массы Земли в соответствии с теорией относительности при изменении скорости ее движения, а именно: в перигалактии скорость движения Солнечной системы составляет 250 км/сек, а в апогалактии — 207 км/сек (В. А. Цареградский, 1964). В соответствии с теорией относительности масса Земли должна то увеличиваться, то уменьшаться на $2,55 \cdot 10^{-7}$ начальной массы. А это обстоятельство, в свою очередь, приведет то к увеличению, то к уменьшению силы тяжести на поверхности планеты и соответственно то к уменьшению объема и увеличению скорости вращения, то, наоборот, к увеличению объема и уменьшению скорости вращения.

Существует еще одна гипотеза об увеличении объема Земли за счет уменьшения гравитационной постоянной. Если стоять на позициях расширяющейся вселенной (и нашей Галактики), то, как показал английский физик П. Дирак, за время существования Земли (4,5 млрд. лет) гравитационная постоянная должна была значительно уменьшиться (в 2—3 раза). Поэтому сила тяжести на нашей планете должна также уменьшиться (так же, как должна увеличиться скорость альфа- и бета-распада радиоактивных ядер), а сама Земля должна расшириться. Б. Хизен считает, что за последние 3,25 млрд. лет окружность Земли увеличилась примерно на 1800 км.

Е. Н. Люстих (1962), справедливо полагая, что уменьшение гравитационной постоянной должно сопровождаться увеличением расстояний между Солнцем и планетами, отмечает, что в прошлом Земля должна была получать гораздо больше солнечной радиации, чем теперь. Л. А. Пухляков (1970) рассчитал, что если бы гравитационная постоянная от кембрия до наших дней уменьшилась в два раза, то в кембрии на Землю должно было приходиться в 1900 раз больше солнечной радиации, чем сейчас, а при уменьшении гравитационной постоянной на 0,1% в 2,25 раза больше. А ведь нам известно, что в кембрии и докембрии существовали ледники! Тут явное противоречие между теоретической астрофизикой и геологией¹.

Пробным камнем физики Земли является проблема дрейфа континентов. Конечно, сейчас не существует вопроса о том, смещаются ли крупные подразделения земной коры относительно

¹ Не исключено, что общее уменьшение гравитационной постоянной со временем в определенной степени компенсировалось в системе Земля — Солнце увеличением гравитационной массы Земли за счет поступления на нее космического вещества.

друг друга или нет. Они, конечно, смещаются. Об этом говорят многочисленные прямые измерения, в том числе измерения между определенными точками Европы и Америки.

Большинство морей и океанов поборники гипотезы мобилизма считают гигантскими трещинами в земной коре, которые, постепенно расширяясь, достигли современных размеров. Один из отцов гипотезы дрейфа континентов А. Вегенер полагал, что тормозящая сила приливных волн, которые создаются притяжением Луны и Солнца, влияет, в первую очередь, на верхнюю, сиалическую оболочку и заставляет ее медленно перемещаться относительно нижних частей Земли, «подобно тому, как ветер заставляет двигаться лед по воде». При этом одни льдины способны отрываться от других и, двигаясь вперед, образовывать впереди нагромождения льда, а позади оставлять свободное ото льда водное пространство. «Аналогичным образом, — по мнению А. Вегенера, — под действием тормозящей силы приливов одни матерки способны отрываться от других и, перемещаясь в западном направлении, образовывать впереди себя горные сооружения, а позади — обнажение магмы (будущие океаны)» (цит. по Л. А. Пухлякову, 1970, с. 148).

Однако, как признает сам А. Вегенер, подобная движущая сила эквивалентна не более чем 10^{-7} массы глыбы, и высота горных сооружений, которые она способна создать, не может превышать 5 м. Кордильеры или Анды в отдельных местах по крайней мере в 1000 раз превосходят эту величину. Даже если бы Вегенер был прав, то возникает вопрос, почему нет мощных горных образований по западным побережьям Европы и Африки и почему, наоборот, они возникли по их восточным обрамлениям?

Конечно, предлагаемая Вегенером аналогия между земной корой и плавающим льдом не состоятельна. Одни льдины способны отрываться от других и обгонять их лишь из-за различия действия на них сил (например, за счет разной парусности). Тормозящая же сила приливной волны действует на матерки равномерно, т. е. если они и будут перемещаться на запад, то одновременно и никак не относительно друг друга. Кроме того, если бы скорость вращения Земли уменьшалась на протяжении всей ее истории и за счет этого двигались матерки, то перемещение континентов должно было начаться в далеком прошлом, а не в нижнем карбоне, когда отделился, например, Новый Свет от Старого.

Несостоятельность этой гипотезы очевидна. Действительно, невозможно согласиться с тем, что сиаль может перемещаться относительно мантии. Имеется и другая точка зрения. Так, Л. А. Пухляков (1970) пишет: «Почему земная кора должна перемещаться именно по мантии и почему она не может перемещаться вместе с мантией в виде блоков мощностью в несколько сот и даже тысяч километров? Очевидно, в виде таких блоков она и перемещается».

Существуют и другие космические гипотезы, пытающиеся объяснить историю формирования современного лика Земли, среди которых следует упомянуть о гипотезе Л. А. Пухлякова о расширении Земли за счет присоединения одного или даже двух спутников лунного размера, причем последний (Перун) перепахал всю Землю примерно 70 млн. лет назад и увеличил массу Земли на 6,4%. При этом остается совершенно непонятным, как могла сохраниться на земной поверхности фауна, которая существовала до этого момента.

Представляет интерес также соображение, выдвигаемое Б. И. Трошичевым о том, что тесное сближение крупных космических тел типа больших комет с Землей способствует зарождению и формированию складчатых структур.

Он предположил, что местные поднятия земной коры могут вызываться гравитационным воздействием крупных космических тел типа комет, периодически или спорадически приближающихся к гравитационной зоне Земли. При быстром прохождении крупного космического тела вблизи Земли последняя не успевает отреагировать должным образом всей своей массой, а пластические ее компоненты (вода, газы, нефтебитумы, соли, легкоплавкие компоненты магматических очагов) могут быстрее перемещаться, вызывая воздымание целых регионов. Лишь потом вступают в действие силы, которые очень медленно восстанавливают нарушенное равновесие (явление изостазии).

Как известно, геосинклинали содержат наибольшее количество легкоподвижных компонентов, поэтому мощное кратковременное гравитационное воздействие будет как бы «взрывать» эти геосинклинали в результате резких перепадов температур и давлений.

Изложенное, конечно, не подрывает устои геотектоники; безусловно первичными являются глубинные разломы Земли, чем определяются меридиональные и широтные области неустойчивости, или мобилизма. Однако не исключена возможность того, что сам механизм складчатости, который, как известно, имеет катастрофический характер (складки формируются очень быстро), приводится в действие гравитационными силами.

Вернемся теперь к вопросу об энергии. Конечно, основным источником энергии Земли, в особенности земной коры, являются радиоактивные элементы. Это они «готовят почву» для последующих преобразований земной поверхности. Существует устойчивое равновесие между внешними силами (ротационный режим, сила тяжести, распределенная по всему объему Земли) и внутренними (межмолекулярное взаимодействие — упругость). Обычно эти силы уравновешены, и их равнодействующая равна нулю. Б. И. Трошичев полагает, что в случае уменьшения силы тяжести (приближение крупного космического тела) это равновесие нарушается (аналогию можно провести с приливным воздействием Луны). Часть потенциальной энергии земного веще-

ства перейдет в кинетическую, при этом будет совершена работа, направленная на механическое перемещение вещества и, следовательно, в конечном итоге на местное повышение температуры (вплоть до температуры плавления), поскольку после кратковременного гравитационного воздействия все снова должно прийти в равновесное состояние.

Таким образом, ученые приходят к выводу, что Землю, ее настоящее и будущее невозможно рассматривать в отрыве от ближнего (а возможно, и дальнего) космоса.

1. Метеориты и тектиты

Всесторонне, все более углубленно изучая метеориты и их падение на Землю, мы еще более расширили наши познания о Солнечной системе, используем их для освоения космоса, межпланетных полетов.

Е. Л. КРИНОВ. Небесные камни

В 1794 г. были изданы заметки известного русского ученого Э. Ф. Хладни о космической природе железной глыбы, привезенной академиком П. С. Палласом и названной впоследствии палласовым железом. Ученый привел основные характеристики железных и каменных тел, попавших на Землю из межпланетного пространства. Официальная же наука Западной Европы признала возможность падения камней с неба лишь в 1803 г., когда в Париже ученые наблюдали метеоритный дождь. В своем путешествии вокруг Солнца Земля ежедневно сталкивается с огромным количеством космических пылинок. Более крупные оставляют свою «визитную карточку» в виде метеоров, сгорая в атмосфере Земли. Более мелкие пылинки, масса которых составляет 10^{-8} — 10^{-9} г и число которых неизмеримо больше, постепенно оседают на Землю. Сквозь земную атмосферу могут прорваться сравнительно крупные тела. Именно такие выпавшие на Землю тела и называются метеоритами. Их масса может составлять граммы, а может достигать и сотен и тысяч тонн. Скорость приближения метеорных тел к Земле зависит от их собственной скорости и направления движения относительно движения Земли и может лежать в пределах от 0 до 72 км/сек. Ускоряясь под действием земного тяготения, они могут входить в атмосферу со скоростями от 11 до 73 км/сек.

Несмотря на огромные скорости, столкновения Земли даже с довольно крупными телами маловероятны, так как она надежно защищена атмосферой, которая перерабатывает попадающее в нее космическое вещество, почти целиком превращая его в пыль. В мало измененном виде попадают на Землю лишь самые мелкие частицы: они обладают большой парусностью и теряют космическую скорость в верхних слоях атмосферы, на высотах 120—

140 км. Кинетическая энергия частиц при столкновении с молекулами воздуха переходит в тепловую, но так как плотность воздуха на указанных высотах мала, этот переход совершается медленно. Тепловая энергия тратится на излучение, и частица в целом остается холодной. Часть ее вещества теряется в результате распыления при микровзрывах, сопровождающих столкновения с молекулами воздуха. При малых скоростях вступления в атмосферу (15—20 км/сек) затормаживаются, не достигнув даже температуры плавления, частицы размером в десятки микрометров, но при больших скоростях (60—70 км/сек) это происходит лишь с частицами в десятые доли микрометра.

Более крупные частицы сохраняют космическую скорость до более плотных слоев атмосферы, где столкновения с молекулами воздуха происходят чаще. Выделяющаяся при этом тепловая энергия не успевает излучиться, частицы разогреваются и плавятся. После потери космической скорости частицы остывают и вновь затвердевают. Потери массы таких частиц происходят тоже только при распылении. У частиц крупнее 6 мкм при скоростях вступления в атмосферу около 60 км/сек и у частиц крупнее 100 мкм при скоростях 15 км/сек вещество нагревается до кипения; они быстро испаряются, уменьшаясь в размере. Быстрые частицы сохраняют неиспарившийся остаток субмикронных размеров, медленные — несколько больший. Для частиц размером более 500 мкм существенную роль играет дробление: от летящих частиц отделяются более мелкие, размером около 100 мкм. Эти осколки ведут себя иначе, чем при самостоятельном вхождении в атмосферу: они оказываются как бы «впрыснутыми» сразу в плотные слои атмосферы, вскипают и испаряются.

Интенсивно дробятся, испаряются и почти никогда не достигают поверхности Земли и очень крупные тела, с массой в десятки и сотни килограммов и даже в тонны. Преодолеть земную атмосферу удастся лишь очень немногим, наиболее прочным телам и только при малых скоростях вступления в атмосферу (до 22 км/сек) и благоприятных углах входа в нее. Остатки этих тел и выпадают на поверхность Земли в виде метеоритов.

Расчеты показывают, что при скорости 12 км/сек примерно 80—90% массы первичного тела теряется в атмосфере за счет сдувания расплавленных капелек (абляции), а при скорости 20—25 км/сек на Землю выпадает всего 1% первоначальной массы. Остальная часть метеорита выпадает на Землю в виде силикатных или металлических шариков. Ежегодно регистрируется в среднем 3,7 падений метеоритов на Землю, хотя, по подсчетам ученых, на земную поверхность за год падает по меньшей мере 1000 метеоритов. Однако зарегистрировать падения удастся редко, так как обжитое пространство на земном шаре относительно невелико. Много метеоритов падает в океаны, моря, пустыни, в полярные, горные и лесные районы. За последние годы в различных местах СССР наблюдали полеты очень ярких болидов, со-

провождавшиеся сильными звуковыми явлениями и даже сотрясением почвы при падении. Вслед за болидами должны были выпасть метеориты, однако найти их не удалось.

Ранним утром (около 7 ч утра по местному времени и в 0 ч 17 мин по мировому времени) 30 июня 1908 г. сотни людей на обширных пространствах Восточной Сибири от Енисейска до Бодайбо наблюдали полет «огненного шара» — болида, за которым тянулся светлый хвост, переходящий в клубы дыма. Многие видели взрыв в районе реки Подкаменной Тунгуски, а еще больше народу слышало сильные удары, напоминавшие раскаты грома или выстрелы из орудий. Воздушная волна обожала весь земной шар и была зафиксирована на микробарограммах многих метеорологических станций Сибири, Европейской части России и Западной Европы. Почти через 20 лет ученые стали изучать это явление. В 1927 г. на место катастрофы прибыла первая экспедиция под руководством профессора Л. А. Кулика. Как было установлено, взрыв произошел на высоте 5—10 км. Он вызвал ожоги деревьев на расстоянии больше 10 км от эпицентра и вывал леса на расстоянии до 30 км. Свидетели взрыва, находившиеся на расстоянии 60 км, рассказывали Л. А. Кулику, что почувствовали сильный жар («загорелись» уши, чуть не загорелась рубашка), а взрывная волна сбросила одного из них с крыльца, разрушила сарай, разбила стекла в окнах и наделала всяких других бед. Вначале Л. А. Кулик предполагал, что «тунгусское диво» — это больших размеров метеорит, поэтому основные усилия направил на его поиски. Было обследовано множество впадин, заполненных водой, но, увы, в них метеорита не оказалось. Энергия взрыва оценивалась в 10^{23} — 10^{24} эрг. По всем признакам, это было массивное тело, летящее со скоростью 30—40 км/сек. Но при ударе такого тела о Землю должен был образоваться огромный кратер. Однако ничего похожего обнаружено не было. Вокруг предполагаемого места взрыва стоял так называемый «телеграфный лес» — это свидетельствовало о том, что взрыв произошел в воздухе: взрывная волна, действуя сверху вниз, ободрала деревья, превратив их в телеграфные столбы. Дальше от эпицентра наблюдался радиальный вывал леса. Распыленное вещество взорвавшегося Тунгусского метеорита заполнило верхние слои атмосферы и приблизительно через две недели достигло западного побережья США. Атмосфера Земли была замутнена, ощущалось заметное снижение солнечного освещения вплоть до сентября 1908 г. Количество вещества, распыленного в атмосфере и создающего подобный эффект, должно было исчисляться миллионами тонн. Любопытно, что одновременно с падением Тунгусского метеорита в стратосферу проникло тонкораспыленное вещество, которое вызвало резкое увеличение светимости ночного неба (например, в ночь с 30 июня на 1 июля 1908 г. во всей Западной Сибири и Европе ночь так и не наступила). Как полагает В. Г. Фесенков, облако тонкораспыленного вещества,

вытянутое в сторону, противоположную Солнцу, было связано с Тунгусским метеоритом еще до его встречи с Землей. Это облако представляло собой хвост кометы, а метеорит — ее ядро. Согласно современным представлениям, ядра комет состоят из замерзших газов и воды, загрязненных пылью никелистого железа и силикатов. Именно поэтому на Землю не выпало каких-либо крупных осколков.

Идею о том, что Тунгусский метеорит представлял собой комету, столкнувшуюся с Землей, выдвинули: в 1930 г. У. Уипл и в 1951 г. И. С. Остапович. Академик В. Г. Фесенков был сторонником кометной природы Тунгусского метеорита.

Тунгусский метеорит был утренним, т. е. догонялся Землей или двигался ей навстречу. В первом случае относительная скорость их столкновения была бы порядка 10 км/сек . Однако факты (первоначально синеватый оттенок болида, чрезвычайная его яркость, мощность баллистических волн и приблизительная оценка продолжительности полета) указывают на гораздо большую начальную космическую скорость. А это означает, что Тунгусский метеорит был встречным, т. е. обладал обратным орбитальным движением, совершенно не свойственным для метеоритов, поступающих из астероидного кольца, а характерным лишь для некоторых комет с очень далекими афелиями. Комета двигалась навстречу Земле почти с параболической скоростью. В верхних слоях комета была заторможена, и конечная скорость болида не превышала 20 км/сек , а в нижних слоях атмосферы, возможно, составляла $5\text{--}6 \text{ км/сек}$. Для более точных оценок энергии взрыва необходимо знать орбиту, скорость движения при встрече с Землей и траекторию Тунгусского болида в атмосфере.

В. Г. Фесенков вычислил 14 вариантов орбит. Пересмотрев для этой цели показания очевидцев, а также приняв во внимание форму площадки вывала леса в районе падения согласно результатам, полученным рядом экспедиций последних лет, он пришел к выводу, что во всех случаях угловое расстояние от видимого радианта Тунгусского болида до Солнца было сравнительно небольшим, поэтому Тунгусская комета, приближаясь к Земле, не могла быть замечена. Это вполне аналогично комете Мркоса (1957 г.), которая, несмотря на свою огромную яркость и близость к Солнцу, была обнаружена только тогда, когда она уже обогнула Солнце и вышла за пределы земной орбиты.

Метеорит в процессе торможения дробится и превращается в плотный «рой» частиц; подхваченный ударной волной, он продолжает двигаться как единое тело. Когда тело начинает дробиться, происходит резкое уменьшение его средней плотности: возникает явление, аналогичное удару о твердую поверхность, когда происходит внезапный взрыв. При начальной скорости 40 км/сек это бывает на высоте примерно 12 км , а при начальной скорости 30 км/сек — на высоте около 8 км . Отсюда ясно, почему движение тунгусского тела должно было кончиться взры-

вом. В более высоких слоях атмосферы оно двигалось уже в виде раскаленного болида, но в начале процесса дробления и, вследствие этого, резком торможении произошло почти мгновенное выделение еще сохранившегося запаса кинетической энергии. Количество энергии, которая пошла на разрушение тайги и вывал леса, составляет приблизительно 25 Мт тротилового эквивалента, если считать, что при этом сохранилось около половины всей начальной массы и скорость перед конечным торможением составляла около 10 км/сек. Вместе с тем сравнительно малая высота взрыва (по разным данным, равная примерно 5—6 км) не позволяет думать, что тунгусское тело с самого начала представляло «рой» частиц, хотя и достаточно уплотненный. Но распад этого тела в атмосфере и превращение его в довольно плотное облако, например, В. Г. Фесенкову казалось совершенно несомненным.

О тунгусской катастрофе 1908 г. существуют разные гипотезы. Отбросив наиболее фантастические (например, взрыв марсианского космического корабля), рассмотрим возможность взрыва тела, состоящего из антивещества. Предположение о том, что тунгусское тело состояло из антиматерии, было высказано еще в 1941 г. Ла Пазом, затем на заседании Британского астрономического общества в 1959 г. Г. Бонди и, наконец, У. Ф. Либби в 1965 г. В Советском Союзе эту точку зрения отстаивал академик Б. П. Константинов. В одной из публикаций Б. П. Константинова и др. (1966 г.) на основании некоторых соображений высказывались идеи об антивещественной природе некоторых микрометеоритов, представляющих собой «шлейфы» антиматериальных комет.

Вероятность существования антивещества в нашей части Вселенной мы уже обсуждали в одном из разделов, здесь же следует сказать о том, что взрыв антивещества неминуемо привел бы к образованию наведенной радиоактивности. Однако никаких радиоактивных аномалий в районе тунгусской катастрофы не наблюдается. Вторым доводом может служить сам характер взрыва.

Как отмечают Н. В. Васильев и др. (1974), в механизмах тунгусского взрыва и надземных ядерных взрывов имеются большие различия. Вся картина тунгусского взрыва не укладывается в картину единого центрального точечного взрыва. Наиболее вероятно, что область генерации взрывной волны имела цилиндрическую форму. Иными словами, взрыв был протяженным — тело двигалось, взрываясь, на протяжении, по крайней мере, нескольких километров. Очевидно, что и плотность энергии тунгусского взрыва в таком случае должна быть намного меньше, чем при ядерных взрывах. Этим можно объяснить тот факт, что непосредственно в центре катастрофы (на расстоянии всего 800—1000 м от эпицентра) уцелели старые кедр, пережившие тунгусский взрыв. Следовательно, вряд ли можно ожидать в

центре взрыва тех температур, которые наблюдаются в центре огненного шара ядерных взрывов.

Далее Н. В. Васильев и др. пишут, что площадь, на которой осела большая часть вещества Тунгусского метеорита, меньше, чем оцениваемая для «классического» ядерного взрыва с таким же эквивалентом. Кроме того, при взрыве ядерного устройства масса испаряющегося вещества (корпус бомбы и непрореагировавшее ядерное топливо) измеряется максимум десятками тонн. При взрыве Тунгусского метеорита его масса составляла 10^5 т или более.

Если принять во внимание все сказанное, станет очевидно, что аналогия с ядерными взрывами неполная. В частности, нельзя переносить на тунгусскую катастрофу совершенно правильный применительно к ядерным взрывам вывод о том, что выпадение сколько-нибудь значительных масс мелкодиспергированного вещества (остатков бомбы) в непосредственной близости от эпицентра воздушного ядерного взрыва невозможно.

Все это позволило предположить, что, несмотря на относительно большую высоту взрыва, поиски мелкодиспергированного космического вещества на сравнительно небольших (до десятков километров) расстояниях от эпицентра не являются абсурдной задачей. Однако следует помнить, что значительные количества материала могли выпасть и на большем расстоянии от места взрыва, образовав шлейф рассеяния.

Для правильной постановки задачи поисков вещества Тунгусского метеорита в стратифицируемых объектах большое значение имеют три обстоятельства: 1) определение направления сноса облака атмосферного аэрозоля, образовавшегося после остывания огненного шара; 2) разработка методик, позволяющих выделять космическое вещество из стратифицируемых объектов; 3) датировка стратифицируемых объектов (выделение в них слоя 1908-го года).

Следует отметить, что предпосылки для развертывания исследований такого рода были заложены в 1961—1962 гг. К. П. Флоренским, впервые предпринявшим попытку изучения распределения космической пыли на большой площади. К сожалению, в тот период не было оперативных методик выделения космической пыли из торфа, поэтому главный упор был сделан на выделение магнетитовой составляющей метеоритной пыли из почв района тунгусской катастрофы. Результаты этих исследований выявили следующее: 1) в почвах междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок присутствует в заметных количествах метеорная пыль; 2) распределение ее на большой площади неравномерно (наибольшая концентрация имеет место в районе, расположенном в 70—100 км на северо-запад от места тунгусского взрыва). На основании этого был сделан вывод, что обнаруженное вещество представляет собой остатки Тунгусского метеорита.

По приблизительному подсчету, общая масса всех музейных образцов метеоритов составляет около 500 т. Большинство этих метеоритов найдено случайно. Самым крупным каменным метеоритом является ахондрит Нортон Каунти, упавший в США (шт. Канзас) в 1948 г.: его масса 1130 кг. Самый крупный железный метеорит Гоба упал в 1921 г. в Юго-Западной Америке: его первоначальная масса около 100 т. К числу крупнейших относится Сихотэ-Алиньский метеорит, упавший на Дальнем Востоке в 1947 г. Этот метеорит, весивший, вероятно, около 70 т, на высоте 4—5 км над Землей распался на множество обломков. Сейчас собрано более 20 т этого метеорита.

Все известные метеориты делятся на три больших класса, различающихся отношением металла к силикату: железные, каменные и железо-каменные. Каждый класс делится на подклассы, группы и подгруппы. Каменные метеориты составляют 92% всех падений и делятся на два подкласса: хондриты, содержащие силикатные шарики (хондры) диаметром несколько миллиметров, и ахондриты, в которых этих шариков нет и которые различны по текстуре и составу. Каждый из этих подклассов подразделяется на группы по вторичным признакам (структуре, содержанию никеля, кальция или двухвалентного железа).

Хондриты занимают самое «почетное» место среди метеоритов из-за своей распространенности (84% всех известных падений) и примитивности состава. В их состав (исключая углистые) входит около 40% оливина, 30% пироксена, 10—12% железо-никелевого сплава, 10% плагиоклаза и 6% троилита.

По всей массе хондритов распределены хондры — округлые образования (одни — в виде стекла, другие подверглись кристаллизации). Хондры не встречаются в земных породах, поэтому являются отличительным признаком хондритов. Цементирующая масса хондритов состоит из мелкоиздробленных кристалликов различных силикатов [оливина ($(Mg, Fe)_2SiO_4$, пироксена ($(Mg, Fe)SiO_3$, плагиоклазового полевого шпата, представляющего собой твердый раствор $CaAl_2SiO_8$ и $NaAlSi_3O_8$, и непрозрачных минералов — никелистого железа, троилита и др.]. В состав углистых хондритов (чрезвычайно редких) входят графит, карбонаты, в состав энстатитовых — минерал энстатит $MgSiO_3$. В табл. 3 приведена классификация хондритов, основанная на традиционных критериях — отношении металлического железа к общему по содержанию, отношениях Fe/Si и Mg/Si , степени окисления железа, которая характеризуется отношением $FeO/(FeO + MgO)$, и т. д.

Некоторые хондры имеют грубокристаллическое строение; они, возможно, подвергались таким физическим процессам, как шлифовка и частичное плавление. В хондритах попадаются частички металла в виде камасита или тэнита. Частички иногда носят следы раскола, причем это разрушение происходит *in situ*. В железных метеоритах ничего похожего на подобные частички

не встречается. Эти частички содержат сидерофильные элементы в различных концентрациях. Содержание троилита в большинстве хондритов составляет 5—6%, однако содержание в нем халькофильных элементов меньше их космической распространенности. Особенно мало индия, таллия, висмута и свинца. В хондритах имеются и другие минералы, например циркон, алмаз, но их слишком мало, чтобы они могли иметь самостоятельное значение. Из хондритов можно получить метеориты других классов, если подвергнуть их химической дифференциации. Частичное плавление может дать металлическую фазу и две силикатные фракции, соответствующие богатым и бедным кальцием ахондритам; низкоплавкая фракция обогащена кальцием и алюминием, а тугоплавкая — магнием. В сильновосстановительных условиях железо переходит в металлическое состояние, давая обедненную никелем металлическую фазу (гексаэдриты) и свободные от железа силикаты (аубриты). Окислительные условия вызовут образование металла, богатого никелем, и силикатов, обогащенных железом.

Хондриты подразделяются, таким образом, на пять групп по степени их окисления, которое фиксируется по химическому состоянию железа. Все хондриты содержат 20—30% железа, распределенного между металлом (никелем, железом), троилитом (FeS) и силикатами — оливином $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$ и пироксеном $(\text{Fe, Mg})\text{SiO}_3$. В самом начале спектра хондритов находятся высокоокисленные углистые хондриты. Они содержат очень мало троилита и ничтожное количество металла. Основная масса содержащегося в них железа представлена в виде двухвалентного, входящего в качестве составной части в силикаты, или даже в виде трехвалентного (Fe_3O_4 , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Отличительной особенностью всех углистых хондритов (их известно около 30) является повышенное содержание летучих и углерода. Углерод присутствует в виде карбонатов и соединений типа CO_2 , CH_4 , CS_2 , CSO вплоть до высокомолекулярных и ароматических углеводородов.

Три средние группы (см. табл. 3) представляют собой обыкновенные хондриты, различающиеся по степени окисления или общему содержанию железа. Содержание металла повышается от 3 до 19%.

В конце спектра находятся энстатитовые хондриты (около 20) — наиболее восстановленные и содержащие железо главным образом в виде металла или троилита. Их основной силикат — энстатит содержит менее 0,1 мол. % двухвалентного железа в виде твердого раствора.

В настоящее время известно около 1800 метеоритов, причем число железных метеоритов-находок значительно преобладает над метеоритами падения, а в случае каменных метеоритов, наоборот, число падений больше находок. Это объясняется хорошей сохранностью железных метеоритов и относительной легкостью

Классификация хондритов (У. Каула, 1970 г.)

Класс	Доля среди паде-ний, %	FeO/(FeO+MgO)	Основные составляющие	Петрографический тип
Каменные: хондриты углистые или С	83,7	0,33—1,00	Ол, Ка, Тэ, Тр, Се, У	
неклассифициро- ванные	0,3			
тип I (C1)	0,7		Нет Ол, преиму- щественно Се	1
тип II (C2)	1,9		Равные количества Ол и Се	2
тип III (оливин- пижонитовые, оранситы, С3) обыкновенные	2,2		Преимущественно Ол	3, 4
LL, амфотери- товые (сокобани- ты)	5,6	0,44	Ол, Ги, Бр, Ка, Тэ, Тр, Пл, Кл Ги, Ол, Пл, Тр, Fe (19—22%)	3, 4, 5, 6
L, гиперстеновые	39,2	0,20—0,33	Fe (20—23%)	3, 4, 5, 6
H (бронзитовые)	32,3	0,10—0,20	Fe (27—30%)	3, 4, 5, 6
энстатитовые (E)			Эн, Пл, Ка, Тэ, Тр	
тип I (НН)	0,4	0,00—0,05	Fe (32—35%) много S	3, 4
тип II	1,6	0,00—0,10	Fe (24—30%) мало S	4, 5, 6
ахондриты	8,5			
эвкриты	3,7	0,48—0,66	Кл, Пл	Подобны земным изверженным породам
богатые кальцием (базальтовые) говардиты	1,7	0,55	СаО (5—25%) Ги, Кл, Пл	Брекчированы
бедные кальцием диоениты	1,1	0,22—0,33	СаО (3%) Ги, Кл	»
урейлиты	0,3	0,16—0,20	Ол, Кл, Ка	Силикатные зерна в черной угли- стой вмещающей массе
аубриты	1,0	0,00—0,07	Эн, Кл	Обычно брекчиро- ваны
Железо-каменные: палласиты	1,7 0,6	0,25	Ка, Тэ, Ол, Тр; Ni—Fe (25— 63%)	Большие кристал- лы Ол в Ni—Fe, вмещающей мас- се
мезосидериты	1,0	0,50	Ги, Пл, Ол, Ка, Тэ, Тр (40— 70%)	Тонкозернистые, сложные

Класс	Доля среди падений, %	FeO/(FeO+MgO)	Основные составляющие	Петрографический тип
Железные: октаэдриты, или O	6,2 5,0	Ка, Тэ, Тр,	Ка, Тэ, Тр, Ш	Ка, Тэ (полосы, параллельные граням октаэдра)
крайне грубо- структурные (Oge) очень грубо- структурные (Ogg) грубоструктур- ные (Og) среднеструктур- ные (Om) тонкоструктур- ные (Oi) очень тонко- структурные (Off) гексаэдриты, или H атакситы, или D	1,0		Ni (5,5—6,5%) Ni (6—7%) Ni (7—9%) Ni (7,5—9%) Ni (8—10%) Ni (10—14%) Ка, Ш, Тр, Ni (4—6%) Тэ, Ка	Ка (балки), 4 мм Ка (балки), 2— 4 мм Ка (балки), 1—2 мм Ка (балки), 0,5—1,0 мм Ка (балки), 0,25—0,5 мм Ка (балки), 0,25 мм Большие кристал- лы Ка Тонкозернистый бесструктурный агрегат
богатые Ni	0,1		Ni (12—38%)	
бедные Ni	0,1			

Примечания.

I. Сокращения: Бр — бронзит, У — углерод, Кл — клинопироксен, Эн — энстатит, Ги — гиперстен, Ка — камасит, Ол — оливин, Ор — ортопироксен, Пл — плагиоклаз, Ш — шрейберзит, Се — серпентин, Тэ — тэнит, Тр — троилит, Пи — пироксен, Fe — железо, S — сера.

II. Петрографические типы хондритов (наиболее распространенные выделены шрифтом): 1 — отсутствие хондр, высокое содержание летучих, тонкозернистый материал; 2 — неоднородность оливинов и пироксенов, высокое отношение Кл/Ор, наличие стекла, богатых никелем сульфидов, некоторого количества С и H₂O; 3 — сильно изменчивый состав Ол и Пи, высокое отношение Кл/Ор, наличие стекла и небольшого количества С, отсутствие Ni в сульфидах; 4 — переходная категория между типами 3 и 5, наиболее четкий признак — около 20% Пи представляет собой Кл; 5 — однородность состава Ол и Пи, очень мало Кл, хондры различимы, но четко не очерчены, хорошо развит Пл (преимущественно микрокристаллический материал); 6 — наиболее перекристаллизованные хондриты, у некоторых почти полностью исчезла первичная структура, значительно развит Пл.

Эти шесть петрографических типов образуют последовательный ряд от неравновесных до полностью равновесных систем. Метеориты одного типа, но различных химических классов могут быть не связаны генетически, хотя и подвергались действию сходных давлений и температуры.

их распознавания. Количественная оценка падений и находок метеоритов выполнена А. П. Виноградовым в 1965 г. Из общего числа железных метеоритов (598 образцов) лишь в 45 случаях наблюдались падения, а среди каменных метеоритов из общего числа 1082 случаи падения составляют 704.

Железные метеориты представляют собой твердые растворы железа, никеля и кобальта (в среднем 90,5; 8,7 и 0,5% соответственно). Содержание никеля в образцах колеблется от 4 до

60%. По структуре они делятся на три класса: октаэдриты, гексаэдриты и атакситы. Октаэдриты имеют, как правило, крупнокристаллическую видманштеттову структуру в виде балок различной ширины, расположенных вдоль плоскостей октаэдра и окаймленных тонкими лентами. Балки состоят из железа, бедного никелем (камасита), ленты — из железа, богатого никелем (тэнита). Гексаэдриты представляют собой монокристаллы кубической системы. Они целиком сложены из камасита. Атакситы обладают мелкозернистой (плесситовой) структурой и представляют собой механическую смесь камасита и тэнита. Они делятся на группы, богатые и бедные никелем.

Образование огромных кристаллов обычно объясняют медленным остыванием и затвердеванием железо-никелевого расплава. Почти все исследователи связывали происхождение железных метеоритов с расплавлением недр родительского тела (или тел) и образованием железного ядра. Только Г. Юри, указывая в 1956 г. на относительное обилие железо-каменных метеоритов (их число среди падений составляет около $\frac{1}{3}$ числа железных метеоритов) и считая их в соответствии со всеобщим мнением переходными между металлом и силикатом, предполагает образование не ядра, а отдельных очагов расплавленного металла. Такая схема может обеспечить необходимое отношение объемов граничной зоны и области сплошного металла (т. е. наблюдаемое отношение падений железо-каменных и железных метеоритов).

Хотя объяснение монокристаллической первичной структуры железных метеоритов их медленным образованием из расплава является простейшим и даже стало привычным, оно не является единственным и, как отмечает Б. Ю. Левин, правильность его не доказана. Например, метеорит Вашингтон Каунти имеет поры неправильной формы, которые заметно округляются при нагреве до 1300°C в течение 100 ч. Такие поры не могли возникнуть при застывании из расплава. Более того, трудно представить себе процесс дифференциации при относительно небольших силах гравитации в малых телах. Ведь даже в Луне как будто нет железного ядра. Наилучшим был бы механизм, обеспечивающий наблюдаемые особенности железных метеоритов и действующий при низких температурах. Об одном из таких механизмов уже говорилось (слипание готовых фрагментов), второй предложили немецкие ученые М. Р. Блох и О. Мюллер в 1971 г. Они провели следующий эксперимент: очищенный фракционной дистилляцией карбонил железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$, представляющий собой жидкость при атмосферном давлении и температуре 100°C , выдерживался в этих условиях в течение нескольких месяцев. В результате разложения карбонила $\text{Fe}(\text{CO})_5 \rightleftharpoons \text{Fe} + 5\text{CO}$ (реакция экзотермическая, происходит с выделением 50 ккал/моль), было получено железо. Это железо имело плотность $5,2 \text{ г/см}^3$, обладало струк-

турой, похожей на метеоритную. В нем имелось включение овальной формы диаметром около 8 мм, содержащее неметаллические материалы (примеси). Возможно, таким путем могут образовываться включения троилитов и фосфатов в метеоритах. М. Р. Блох и О. Мюллер полагают, что носителями карбонила могут быть кометы. Действительно, они содержат СО, железо и никель, поэтому образование в них соединений типа карбонила металлов возможно. При приближении комет к Солнцу и их нагреве до 100°C карбонил разлагается, образуется железо, которое может захватить и силикаты.

Насколько этот механизм реален, трудно сказать. Но он не фантастичнее классического расплава. Во всяком случае, при решении проблемы происхождения метеоритов должно быть объяснено происхождение всех их составных частей, и не исключено, что каждый из описанных механизмов в той или иной степени справедлив.

В то время как железные метеориты являются «представителями» той части метеоритного вещества, которая, возможно, подвергалась длительному воздействию высоких температур, углистые хондриты, содержащие связанную воду и полимеризованные углеводородные соединения, принадлежат наиболее холодной части метеоритного вещества. Присутствие в этих метеоритах легко распадающихся углеводородов, частичек стекла с внутренними напряжениями, исчезающими при небольшом нагреве, и другие признаки показывают, что углистые хондриты никогда не нагревались до температур выше 300°C и могли очень недолго (несколько часов) находиться при температурах 200—300°C. Многие исследователи считают гидратированное и сильно окисленное вещество углистых хондритов если не первичным веществом, аккумуляировавшимся из протопланетного облака, то, во всяком случае, веществом, наименее измененным последующими процессами и потому лучше, чем вещество метеоритов других типов, характеризующим первичное вещество. Образование обыкновенных хондритов они объясняют восстановлением и обезвоживанием, протекавшими в недрах родительских тел при их нагреве. Другие ученые предполагают прямо противоположное направление эволюции и считают, что углистые хондриты возникли из обыкновенных хондритов в результате проникновения в них летучих — воды, углеводородов и др.

Ахондриты (см. табл. 3) характеризуются отсутствием хондр и содержат осколки отдельных минералов. По минеральному составу и структуре ахондриты наиболее близки к земным горным породам.

Железо-каменные метеориты по структуре и минеральному составу делятся на две группы: палласиты и мезосидериты. Первые представляют собой железо-никелевую губку, заполненную стеклообразным минералом — оливином. Мезосидериты — каменные метеориты со значительно большим содержанием желе-

за, чем в обычных хондритах. Железо находится в них в виде крупных включений.

С физико-химической точки зрения чрезвычайно важным свойством метеоритов является одновременное присутствие в них как окисленного, так и металлического железа. Первое входит в железо-магнезиальные силикаты, составляющие основу каменного вещества метеоритов, а второе представлено никелистым железом, встречающимся в виде включений. Окисленное и металлическое железо сосуществуют в самых различных пропорциях: наряду с железными метеоритами, состоящими практически из чистого металла, имеются и содержащие до 10—20% ферросиликатов; железо-каменные метеориты содержат металл и ферросиликат примерно в равных количествах. Наряду с каменными метеоритами, совсем или почти совсем не содержащими металла (ахондриты и некоторые типы хондритов), имеются хондриты, в которых только металлические включения составляют 30% их массы. Как было замечено Прайором, в хондритах наблюдается следующая закономерность (законы Прайора): чем меньше в них металлических включений, тем эти включения богаче никелем и тем богаче железом железо-магнезиальные силикаты.

Дальнейшие исследования подтвердили, что различия в составе хондритов определяются в основном сдвигами окислительно-восстановительного равновесия. Г. Юри еще в 1952 г. показал, что первичное нелетучее вещество в присутствии газов солнечного или космического состава при низких температурах должно быть полностью окисленным. Поэтому различия в составе хондритов в настоящее время связывают с различной степенью восстановления первоначально окисленного вещества (главным образом углеродом и углеводородами). Следует отметить, что, связывая происхождение Солнечной системы со вспышкой Сверхновой и предполагая при этом присутствие водородной атмосферы, можно прийти к противоположному заключению, а именно, что первоначальное вещество было восстановленным.

Сейчас почти не вызывает сомнения, что падающие на Землю метеориты являются осколками более крупных тел. Большинство ученых предполагают, что метеориты приходят из пояса астероидов, расположенного между орбитами Марса и Юпитера. Эта гипотеза была подтверждена вычислениями орбиты метеорного тела Пршибрам чехословацким ученым Цеплехой в 1960 г. на основании данных нескольких обсерваторий, наблюдавших полет этого болида в атмосфере Земли перед его падением, а также по орбите Сихотэ-Алинского метеорита (на рис. 7 приведены орбиты этих метеоритов).

Число астероидов очень велико: около 55 тыс. имеют диаметр более 1 км (наибольший из них — Церера — в поперечнике 770 км). Общая масса астероидного кольца оценивается примерно в 0,1 массы Луны или 0,01 массы Земли.

Астероиды, двигаясь по пересекающимся орбитам, сталкиваются и дробятся. Некоторые особенности структуры метеоритов связаны с действием ударных волн, распространявшихся в астероидах при столкновениях. Б. Ю. Левин относит к особенностям

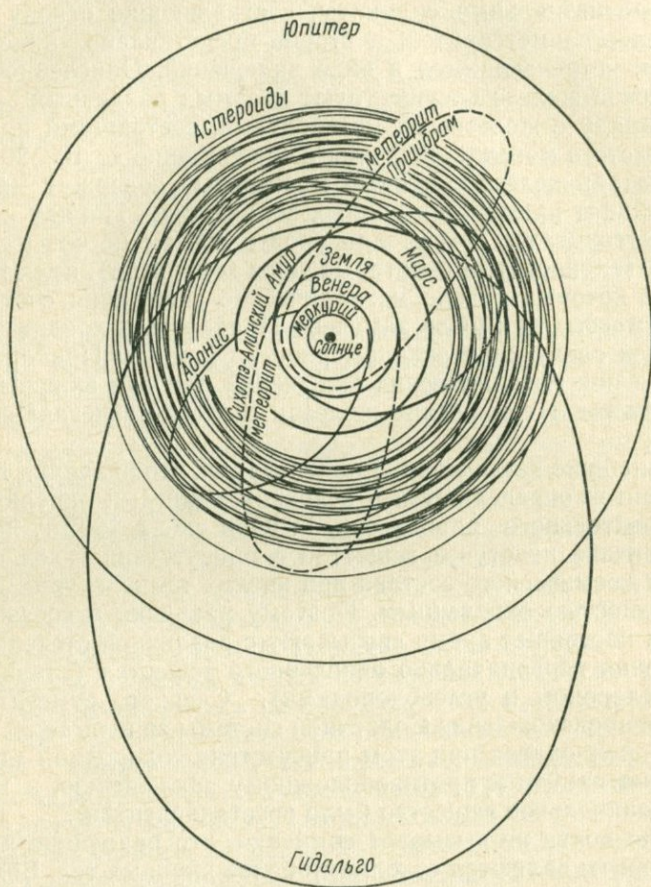


Рис. 7. Пояс астероидов и орбиты метеоритов Пршибрам и Сихотэ-Алинського

структуры неймановы линии, наблюдаемые в некоторых железных метеоритах и указывающие на ударные давления более 100 кбар, жилковатую и пятнистую (псевдополимиктовую) структуру многих каменных метеоритов и присутствие в некоторых метеоритах алмазов. Таким образом, дроблению астероидов и разлету осколков, ставших впоследствии метеоритами, зачастую предшествовали столкновения, которые не сопровождались разлетом, но следы которых сохранились в структуре вещества.

Расчеты показывают, что за время существования Земли (4,5 млрд. лет) примерно 30% астероидов превратилось в мелкие фрагменты и пыль (примерно 10^{10} т в год). Из этого количества на Землю падает ежегодно несколько тысяч тонн в виде метеоров, космической пыли или метеоритов. Дж. Везерилл, используя данные по параметрам орбит, размерам метеоритов и астероидов и результаты определения космического возраста метеоритов, при помощи метода Монте-Карло рассчитал спектр космических возрастов гипотетических осколков астероидов. Оказалось, что не только астероиды, но и все другие тела Солнечной системы при своем распаде или дроблении не могут дать каменные или углистые фрагменты с наблюдаемым спектром космического возраста. Везерилл полагает, что ошибка кроется в принятых значениях параметров орбит метеоритов.

Некоторые ученые полагали, что метеориты имеют лунную или кометную природу, т. е. они были выброшены с поверхности Луны при ударе о нее астероида или даже в результате вулканического извержения. Результаты исследования лунной поверхности заставили отказаться от этой гипотезы. Кометная гипотеза касается главным образом углистых хондритов, она отстаивается французским ученым Э. Эпиком и советским астрономом С. К. Всехсвятским. Поскольку о кометах мы знаем пока еще меньше, чем об астероидах, вопрос остается открытым. Очевидно, что только детальные исследования физического, химического и изотопного состава в соединении с тщательными астрономическими наблюдениями метеоритов могут приблизить нас к пониманию проблемы происхождения метеоритов.

К роду метеоритов относят также тектиты — стеклянные тела, встречающиеся в различных районах земного шара (рис. 8). Первое достоверное сообщение о них относится к 1788 г., когда некто Й. Майер в одном из богемских журналов для любителей природы написал: «В окрестностях Тейн на Молдаве (ныне р. Влтава. — Э. С.) часто встречаются красивые осколки зеленых стеклянных масс, равных по твердости гранатам, очень чистые и просвечивающие, обычно с прекрасной темно-зеленой окраской, продаваемые как хризолиты. Я не замечал у них никакой формы, кроме аморфной в виде круглых галек и валунков; и сейчас они встречаются только в этих формах в рассеянных обломках на полях и вырытых дождевых канавах. Размер обломков очень часто превышает голубиное яйцо, а из некоторых экземпляров могут быть вырезаны набалдашники для тростей в 1 дюйм шириной и до 2 дюймов длиной» (цит. по Г. Г. Воробьеву, 1966).

Термин «тектиты» ввел известный геолог и естествоиспытатель Ф. Зюсс в 1900 г. Он обозначил им необычные природные стекла, найденные в то время в Богемии и Моравии, в Австралии и на острове Биллитон (Индонезия). Затем тектиты были найдены и в других местах. В Советском Союзе стекла, похожие на тектиты, найдены у северо-западной оконечности Аральского мо-

ря вблизи метеоритного кратера в урочище Жамантин. П. В. Флоренский (1975) изучил эти стекла и назвал их иргизитами.

Осколки тектитов часто напоминают плавленные бутылочные стекла и шлаки. Часто их путают с обсидианами (вулканически-

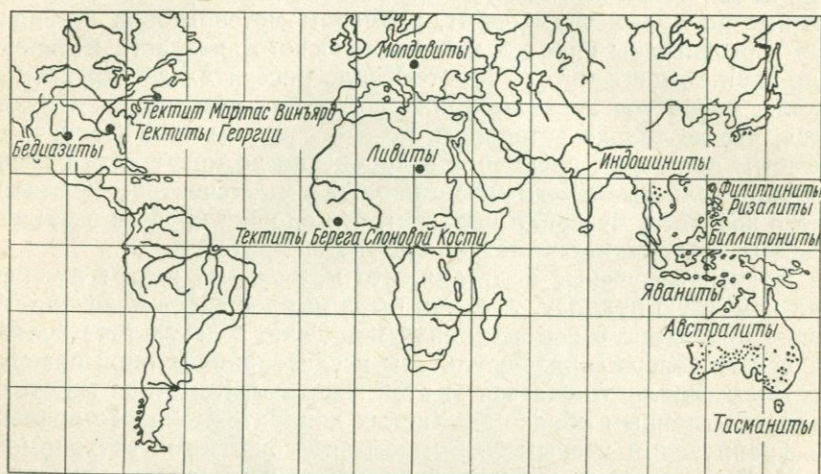


Рис. 8. Карта тектитных полей на земном шаре

ми стеклами): они очень похожи по внешнему виду. Однако сохранные тектиты легко узнать: они целиком оплавлены, их поверхность покрыта многочисленными канавками и извилинами (скульптура). Форма тектитов самая разнообразная, но, как правило, монополярная, т. е. форма капли, груши, конуса, эллипсоида и т. д. Иногда они бывают полые. Масса различна — от десятых долей грамма до нескольких килограммов.

Тектиты находят в верхнетретичных и четвертичных отложениях или на поверхности земли. Особенно часто они выступают из почвы после дождей.

Пещерные жители применяли их в качестве инструментов, в бронзовом веке — в качестве украшений. В Индокитае у древних каменных идолов глаза были сделаны из полированных тектитов. До сих пор туземцы многих районов называют тектиты «громовыми камнями», «лунными камнями», «чертовыми шарами», «экскрементами звезд» и т. д.

В 1831—1836 гг., когда спор о происхождении молдавитов носил местный характер, английский натуралист Ч. Дарвин совершал свое знаменитое путешествие на корабле «Бигль». Отправившись в очередную экскурсию в Тасмании, Ч. Дарвин обнаружил на земле полые шары из черного стекла, немногим более грецкого ореха. Он принял их за вулканические бомбы, однако никаких вулканов поблизости не было. Эта находка послужила

началом многих других находок на территории австралийского материка. Эти черные стекла оказались близкими родственниками молдавитов, и их стали называть австралитами. Нашли их около 10 млн. штук — в среднем по штуке на 1 км² (значительно меньше, чем в Чехословакии).

В 70-х годах прошлого века на оловянных рудниках Малайской оловоносной провинции на острове Биллитон (Индонезия) рабочие нашли кусок черного стекла, который они приняли за алмаз. Голландский ученый П. Ван-Дейк установил, что это не алмаз, а что-то похожее на обсидиан, но явно не вулканического происхождения. В 1898 г. такие же стекла нашли на острове Бунгуран — у берегов острова Калимантан (Борнео), и других островах Индонезии и на Малайском полуострове.

Эти стекла называли биллитонитами (см. рис. 8). В 1926 г. тектиты нашли на Филиппинских островах (филиппиниты) и практически сразу же в Индокитае (Таиланд, Камбоджа, Лаос, Вьетнам) и Южном Китае (индошиниты).

Известный французский минералог А. Лакруа собрал в джунглях Южного Лаоса 2500 обломков индошинита-гиганта, самые большие из которых весили более 3 кг, а общая их масса составила 67,5 кг. По-видимому, это случайно сохранившийся крупный остаток родительского тела, выпавшего в виде дождя над Индокитаем.

Впоследствии тектиты были найдены и в других местах земного шара (см. рис. 8).

Образцы тектитов различаются по форме, цвету, составу. Тем не менее они очень близки между собой и совершенно не похожи на другие природные стекла, такие, как обсидианы, силикаглассы, импактиты и фульгуриты.

Почти два столетия (начиная с исследований молдавитов Й. Майером в 1787 г.) не затихают споры ученых о происхождении тектитов. Гипотезы о том, что они являются продуктами вулканической деятельности на Земле или особого вида метеоритами, не могли объяснить их химический состав, физические свойства, распределение тектитных полей на земном шаре, положение их в определенных земных слоях и другие особенности.

Во многих образцах тектитов можно встретить очень крупные (диаметром иногда до нескольких миллиметров) газовые пузырьки. Они почти целиком состоят из углекислого газа, общий объем которого составляет 1 см³ на 10 кг тектитного стекла. При исследовании этих пузырьков были обнаружены включения нефтяного битума. Из навески массой 200 г Г. Г. Воробьеву и И. А. Петерсилье удалось извлечь и исследовать 13 мг битума.

В свете этих данных представляет большой интерес исследование абсолютного и относительного возраста тектитов. В настоящее время известно, что тектиты встречаются преимущественно на поверхности земли, в почве и молодых геологических осадках. В одном из районов Чехии молдавиты концентрируются

в буро-желтом конгломератовом гравии, лежащем на третичных песках верхней буроугольной формации. В Моравии тектитоносный гравий отождествляется по возрасту с онкофоровыми песками гельветского яруса среднего миоцена и покрыт сверху четвертичными глинами и лёссами. В США (шт. Техас) геологический возраст бедиазитов относится к эоцену (формация Джексон). Более детально стратиграфия тектитов изучена в Юго-Восточной Азии и Австралии. На острове Ява тектиты были найдены вместе с ископаемой фауной, достоверно относимой к среднему плейстоцену. В Индокитае тектиты встречаются на глубине 10—15 м в четвертичных речных террасах. Для Южного Китая А. Лакруа датирует находки тектитов эпохой после формирования древних дюн и до излияния четвертичных базальтов. В Австралии их находят в постплиоценовых ледниковых отложениях, руслах высохших рек, современном почвенном покрове и на поверхности земли. Таким образом, находки тектитов ассоциируются с породами и органическими остатками третичного и четвертичного периодов.

Первые определения абсолютного возраста тектитов были проведены при помощи аргонового метода Г. Зюссом в 1951 г. и Э. К. Герлингом с сотрудниками в 1954 г. Этот метод дает время последнего переплавления тектитов. Дальнейшие, более точные определения принадлежат Дж. Царингеру. В табл. 4 приве-

Таблица 4

Аргоновый возраст природных стекол

Природное стекло	Возраст, млн. лет	
	пределы	среднее
Североамериканские тектиты	29,0—35,0	34,0
Молдавиты	14,4—15,1	14,8
Индошиниты, малайзиты	0,51—0,73	0,63
Австралиты	0,44—0,80	0,61
Биллитониты	0,53—0,72	0,60
Тектиты Берега Слоновой Кости	1,19—1,30	1,25
Дарвиново стекло (Австралия)	—	1,5
Ливийское стекло (ливит)	—	0,0
Суевиты кратера Рис (ФРГ)	—	14,9±1
Импактиты кратера Босумтви (Гана)	—	1,3±0,3
Иргизиты (СССР)	4,8; 8,1	6,5±1,6

дены средние значения времени последнего переплавления природных стекол из различных районов, полученные указанными авторами. Как следует из таблицы, все тектиты можно подразделить на три четко очерченные возрастные генерации. Наиболее древними (34 млн. лет) оказываются североамериканские тектиты (шт. Джорджия и Техас, остров Мартас Винъярд), затем молдавиты — 14,8 млн. лет и, наконец, последняя группа, рас-

пространенная от Индокитая до Австралии, — индошиниты, филиппиниты, яваниты, биллитониты, австралиты, которые подвергались последнему переплавлению всего 0,6 млн. лет назад. Возраст тектитов Берега Слоновой Кости измерен всего в трех образцах, причем, как отмечает Царингер, исследованные образцы содержали очень много атмосферного аргона, поэтому полученные значения неточны. То же самое относится и к дарвинову стеклу из Австралии, природа которого неясна и которое лишь условно относят к тектитам. Время переплавления другого загадочного стекла — из Ливийской пустыни — оказалось равным нулю (в геологическом смысле); это подтверждает предположение, что ливиты являются остатками какого-то древнего стеклового производства. По иргизитам данных пока очень мало.

В метеоритных кратерах встречаются стеклянные брекчии, образующиеся в результате переплавления пород в момент удара астероида или кометы о Землю. Возраст импактитов (суевитов) из кратера Рис (ФРГ) совпадает с возрастом молдавитов Чехии, а время образования импактитов кратера Босумтви (Гана) — со временем последнего переплавления тектитов Берега Слоновой Кости, найденных в 250—300 км от этого кратера. Отмечено также некоторое сходство химического состава импактитов и близлежащих тектитов. Последователи импактной гипотезы образования тектитов считают такое совпадение немаловажным доказательством их точки зрения. Возможно, что в результате сверхскоростного удара астероида или кометы о земную поверхность расплавленная земная порода с примесью космического материала была выброшена направленным взрывом (угол расседания 12—15°) и образовала тектитные поля в Чехии и Гане.

Сравнивая тектиты с импактитами, можно отметить, что различий между ними больше, чем сходства. Например, тектиты представляют собой совершенно аморфные стекла, в то время как импактиты (метеоритных кратеров или ядерных взрывов) всегда содержат кристаллические включения. В импактитах содержатся нерастворимые окислы железа (лимонит), поскольку они образуются в атмосферных условиях, когда происходит быстрое окисление железа. Низкое же отношение окисного железа к закисному в тектитах позволяет предположить, что они образовались при очень малых давлениях кислорода.

Рассмотрим некоторые фактические данные. В тектитах найдены металлические шарики, по-видимому, метеоритного происхождения. В то же время тектиты не могли провести в космическом пространстве более 28 тыс. лет, так как не были защищены от действия космического излучения. Заметим, что космический возраст метеоритов исчисляется десятками и сотнями миллионов лет. Время затвердевания вещества тектитов оказывается различным для различных их полей (34; 15 и 0,6 млн. лет) при достаточно близком химическом составе. Поэтому мы вправе ожидать существования либо нескольких подобных родительских

тел (метеоритного типа), либо периодических земных процессов, приводящих к образованию тектитов.

Вещественный состав тектитов не сходен с составом земных пород или метеоритов, причем все данные говорят о том, что они появились на Земле в третичном и четвертичном периодах и их появление связано с какими-то случайными событиями. Никаких следов недавней (например, 0,6 млн. лет назад) крупной катастрофы на Земле нет. Для того же, чтобы разбросать тектиты на австралийском материке, требуется энергия, эквивалентная энергии взрыва сотен миллионов атомных бомб типа сброшенной на Хиросиму.

Аэродинамические исследования показывают, что индивидуальные образцы тектитов не могли быть выброшены вверх через невозмущенную атмосферу, а затем вернуться на Землю и получить свою характерную скульптуру. Они должны были остановиться, пройдя толщу атмосферы, масса которой равна их собственной массе (т. е. несколько сотен метров). В случае «сдувания» атмосферы при чрезвычайно мощном взрыве и образования «столба» вакуума температура должна подняться до 30 000—300 000°C. При этом тектитообразующее вещество должно было полностью испариться.

Г. Г. Воробьев представляет себе механизм образования тектитов следующим образом. Исходное прототектитное вещество было достаточно гомогенным, о чем свидетельствует состав тектитов, дисперсия которого очень незначительна по сравнению с изверженными и тем более осадочными породами на Земле. Принимая во внимание вязкостные и другие свойства, Г. Г. Воробьев предполагает, что состояние гомогенности могло возникнуть при длительном высокотемпературном нагреве и большом давлении, сопровождающемся потерей летучих компонентов и воды. Если допустить, что бадделит в тектитах образовался в результате разложения циркона, то температура этого процесса, по-видимому, превышала 2550°C.

Взрывы в условиях вакуума приводили к отторжению от субстрата блоков (тектиты типа Муонг-Нонг), а также капель жидкого расплава в виде больших пузырей. О взрывном характере этого процесса (удар, сопровождающийся кратковременным, но сильным нагревом) свидетельствует наличие коэсита, существенно углекислый состав газовых включений (если проводить аналогию с вулканическими процессами взрывного характера на Земле), преобладание закисного железа над окисным, магнитные и некоторые другие свойства. На то, что блоки и капли образовались одновременно, указывает ряд физических свойств, измеренных В. Барнсом, в частности форма газовых включений. Если полые стеклянные сферы образовались в земной атмосфере из блоков, что трудно представить, принимая во внимание кратковременность этого процесса, то они должны были унаследовать все свойства блоков или по крайней мере последовательно изме-

нить их. Между тем тектиты Муонг-Нонг содержат газовые включения эллиптической формы, тогда как тектиты нормального типа обычно имеют только сферические включения, которые в процессе вторичного или третичного формообразования становились эллиптическими. Об условиях вакуума говорит не только необычная первичная форма, но и крайне низкое давление в газовых включениях. И еще одна особенность при взрыве: контаминация основным (метеоритным?) веществом и битумом. По данным Г. Г. Воробьева, присутствие железо-никелевых включений сопровождается повышенным содержанием химических элементов основного ряда при значительной количественной дисперсии. Битуминозные включения, по-видимому, не сингенетичны протектитному веществу, в противном случае они разложились бы при нагревании и обогатили состав газовых включений. Они также не эпигенетичны по отношению к тектитам, так как большое давление при образовании стекла изменило его структуру и сделало стойким по отношению, например, к обводнению в земных условиях.

По Г. Бейкеру, взрывы обуславливали разное вращательное движение полых форм, которые в процессе полета приобретали вторичные (сплюснутые либо вытянутые) формы. Статистическое соотношение между этими формами является разным для разных территориальных групп тектитов, что указывает на повторяемость взрывных явлений на основе, возможно, одного вещественного источника.

Тектиты поступали на Землю в виде роев со скоростью порядка 10 км/сек под небольшими углами к горизонту, что допускает вероятность их временного существования в качестве спутников Земли. В верхних слоях атмосферы тектитное вещество подвергалось повторному нагреву, более значительному с поверхности индивидуальных экземпляров, в результате чего стекло в этих местах приобрело характерное напряжение структуры, постепенно уменьшающееся к центру. Радиальные и концентрические формы сколов впервые описаны Г. Кенигсвальдом на примере тектитов Индонезии. Г. Г. Воробьевым для молдавитов описаны только плоские сколы, строго перпендикулярные к направлению удлинения образцов. Одновременно с дроблением происходил и процесс поверхностного размягчения с образованием элементов абляционного и дегазационного скульптурообразования. Дальнейшее развитие этого процесса приводило к полному размягчению и деформации вторичных форм, превращая их в третичные формы — изогнутые и крученые. При этом резче проявлялось флюидальное строение и сферические газовые включения становились эллиптическими. О том, что процессы дробления и размягчения накладывались один на другой, говорят все стадии развития абляционной скульптуры на поверхности сколов.

Тектиты выпадали в виде дождей, образуя поля рассеяния площадью от десятков тысяч до миллионов квадратных километ-

ров, с плотностью, обратно пропорциональной этим площадям. Подобные акты происходили неоднократно в течение геологической истории Земли (во всяком случае, не менее 4 раз). Поля могли накладываться одно на другое.

Каждое поле имеет по физическим и химическим свойствам концентрическое или близкое к нему строение, не отвечающее петрографической и петрохимической картине данного региона. В целом каждое поле настолько же отличается от других полей по ряду признаков (форме, скульптуре, развитию процесса дробления, физическим свойствам, химическому составу), указывающих на иные условия образования и эволюции, насколько имеет с ними много общего, позволяя противопоставлять тектиты, с одной стороны, всем геологическим объектам, с другой стороны, — известным классам метеоритов, а также метеоритным импактитам.

После выпадения тектиты вели себя как рядовые геологические тела и в зависимости от возраста и местных геоморфологических условий подвергались большему или меньшему перераспределению вместе с другими обломочными объектами, концентрируясь в низинных участках, а в фациальном отношении — в молодых песчаных и песчано-галечных отложениях. Интенсивная геологическая транспортировка приводила к частичному дроблению, нивелированию скульптуры, сопровождающемуся уменьшением интенсивности характерного для тектиков блеска; в конечном счете в галечниковых слоях и почве тектиты могут не от-

Таблица 5

Механизм образования и эволюции тектитов (по Г. Г. Воробьеву)

Этап	Процесс	Термодинамический режим
Планетарный	Образование кислого гомогенного стекла	Сильный продолжительный нагрев и медленное охлаждение под большим давлением
Импактный	Отделение блоков стекла и жидких капель-пузырей, контаминированных основным веществом и битумом	Сильный короткий нагрев при большом давлении
Межпланетный	Вторичное формообразование: вытягивание или уплощение сфер	Относительно быстрое охлаждение
Атмосферный	Напряжение структуры и дробление, с третичным формообразованием	Поверхностный нагрев оплавлением, селективным испарением
Геологический	Дробление, шлифовка	Атмосферный

личаться от обычной гальки. Фактор коррозионного воздействия, по-видимому, проявляется в незначительной степени. Изложенный механизм схематически показан в табл. 5.

В 1967 г. автор настоящей книги высказывал соображения о том, что тектиты представляют собой материал ядра кометы, экранированного льдом и замерзшими газами и поэтому не содержащего космогенных нуклидов. Комета прошла через атмосферу, ледяная оболочка испарилась, а силикатная составляющая выпала на Землю, образовав тектитное поле. В зависимости от размеров подобных комет и глубины их проникновения в атмосферу тектитные поля имеют разные размеры и в разной степени богаты тектитами. Можно предположить, что число комет равно числу возрастных генераций тектитов, однако не исключено, что ответственность за образование всех тектитных полей несет одна долгопериодическая комета, которая проходила через земную атмосферу 34, 15 и 0,6 млн. лет назад. Удивительным может показаться высокое содержание кремния в ядре кометы, однако по некоторым косвенным признакам А. К. Лаврухина, например, делает вывод, что это так и есть. Все известные факты, связанные с аэродинамикой полета тел через атмосферу, особенности распределения тектитных полей на земной поверхности, присутствие в текритах металлических сферул, особых форм кремнезема, данные по возрасту тектитного вещества и времени его последнего переплавления и т. д. укладываются в рамки кометной гипотезы. Возможно, уже недалеко то время, когда ученые получат в свои руки кометное вещество, доставленное космическими аппаратами, и тогда мы приблизимся к решению загадки происхождения не только комет, но и тектитов. А пока любая, даже фантастическая, гипотеза требует пристального внимания.

2. Метеоритные кратеры

Проблема столкновения метеоритов с Луной, Землей, с планетами также представляет огромный интерес — и не только в теоретическом плане.

К. П. СТАНЮКОВИЧ. Взрывные кратеры на Земле и планетах

В начале прошлого века ученые с уверенностью могли сказать, что с неба падают железные и каменные тела, но лишь 100 лет спустя было доказано, что эти тела могут оставлять весьма заметные шрамы на поверхности Земли. В 1891 г. американский ученый И. Е. Фут при обследовании Аризонской котловины собрал 137 осколков метеоритного железа массой от нескольких граммов до 91 кг и пришел к выводу, что эта котловина образовалась в результате удара о Землю громадного метеорита.

Аризонский метеоритный кратер имеет чашеобразную форму диаметром 1265 м и глубиной 174 м, а высота вала, образовав-

шегося вокруг кратера, составляет от 37 до 50 м. Этот кратер расположен на гладком плато Аризонской пустыни и находится между горами Уинслоу и Флагстафф, приблизительно в 6 км к востоку от Каньона Дьявола (шт. Аризона, США). Осколки, которые там собирают, называют осколками метеорита Каньон Дьявола. По оценкам ученых, Аризонский кратер образовался около 50 тыс. лет назад в результате падения гигантского железного метеорита массой около 63 тыс. т. Эта огромная глыба железа ворвалась в атмосферу со скоростью 15 км/сек, взорвалась (сила взрыва оценивается в 1,7 Мт тротилового эквивалента) при ударе о поверхность Земли и раздробилась на мелкие осколки. Самый крупный из найденных обломков имеет массу 639 кг, а всего собрано более 20 т.

Следует отметить, что падения таких больших тел чрезвычайно редки. Оценки выпадения на Землю кратерообразующих метеоритов показывают, что в течение последних 2 млрд. лет выпало всего около 100 тыс. метеоритов, которые могли бы образовать кратеры, аналогичные аризонскому, 600 кратеров диаметром более 5 км и около 20 кратеров диаметром около 50 км. Таким образом, за 20 тыс. лет на Землю падал один гигантский метеорит. Метеориты меньшего размера или взорвавшиеся в атмосфере выпадают значительно чаще, но заметных рубцов на земной поверхности они не оставляют. Их кратеры ударные, а не взрывные, однако и крупных ударных кратеров немного. Достаточно сказать, что за последнее тысячелетие случилось лишь одно падение крупного кратерообразующего метеорита — Сихотэ-Алинского (12 февраля 1947 г.), засвидетельствованное очевидцами. Поскольку Сихотэ-Алинский метеорит распался в воздухе, его осколки вызвали лишь механическое разрушение грунта.

Профессор К. П. Станюкович рассчитал, что при скорости метеорита, не превышающей 100 м/сек у поверхности Земли, на месте удара в мягком грунте образуется лунка или яма, по своим размерам сравнимая с размерами метеорита. При скорости 500 м/сек будет происходить дробление как метеорита, так и грунта, и осколки того и другого разлетятся в разные стороны. При скорости выше 500 м/сек размер воронки больше, но механизм образования воронки качественно не меняется. Однако при скорости удара более 3—4 км/сек картина резко меняется. От места удара, как из центра взрыва, распространяется ударная волна, разрушающая как метеорит, так и окружающую среду. При такой скорости твердое тело приобретает свойства сильно сжатого газа, который стремится расширяться, образуя мощную взрывную волну. При скорости удара около 5 км/сек действие всей разрушаемой массы метеорита и грунта эквивалентно действию такой же массы динамита.

Если в ударном кратере находится тело метеорита или его осколки, то в кратерах взрывного типа, как правило, метеоритного

материала почти нет. Основная часть метеорита испаряется при взрыве, а оставшиеся осколки и расплавленная часть метеорита рассеиваются в окрестностях кратера. В кратере же в зависимости от состава и типа коренных горных пород находятся каменная «мука» и переплавленные куски этих пород, образующие стекловатые пузырчатые массы — импактиты (силика-глассы). Взрывные кратеры имеют диаметр не менее 100 м, а вал кратера

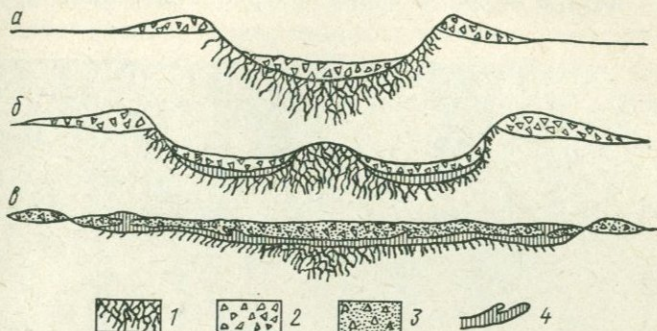


Рис. 9. Типы взрывных метеоритных кратеров:

a — простой, диаметром до 1 км; *б* — сложный, диаметром 3—4 км с центральной горкой; *в* — сложный, диаметром более 10 км с кольцевым поднятием и широким развитием импактитов; 1 — автохтонные брекчии; 2 — аллохтонные брекчии; 3 — брекчии с импактитами; 4 — импактиты

сложен радиально приподнятыми пластами горных пород (рис. 9 демонстрирует типы взрывных кратеров).

До настоящего времени достоверно открытыми считаются только те метеоритные кратеры, которые были образованы при падении железных метеоритов, поскольку в их окрестностях были обнаружены осколки металла. На земной поверхности есть много «подозрительных» кольцевых структур, в окрестностях которых, однако, не находят железных осколков. Вполне вероятно, что эти структуры были образованы падением и взрывом гигантских каменных метеоритов. Однако найти осколки каменных метеоритов, упавших тысячи или миллионы лет назад, — задача практически нереальная, так как они довольно быстро разрушаются.

В Советском Союзе имеется лишь один достоверный метеоритный кратер взрывного типа — Калиярве на острове Саарема в Эстонии (рис. 10). В 20 км к северо-востоку от города Кингисеппа расположена группа из 7 кратеров: 6 ударных и один (диаметром 110 м) взрывной. Метеорное тело раздробилось в нижних слоях атмосферы и лишь один обломок оказался настолько крупным, что достиг земной поверхности с остатками космической скорости. Кратеры Калиярве в настоящее время детально изу-

чаются эстонскими учеными К. Н. Орвику и А. О. Аалоз (последний собрал уже около 500 г мелких осколков метеорита).

В противоположность Луне или Марсу на поверхности Земли очень мало следов космической бомбардировки: зарегистрировано всего несколько десятков достоверных ударных структур диаметром более 9 м. И это при общей поверхности суши около 150 млн. км²!

В отличие от Луны и Марса, Земля — непрерывно меняющаяся планета, а ее современная поверхность — лишь временное



Рис. 10. Метеоритный кратер Калиярве (Эстония)

отражение этих изменений. Удивительно ли, что в подобных условиях мы встречаемся лишь с молодыми ударными структурами, да и то крайне редко. Кратер, если он не перекрыт осадочным чехлом, очень быстро разрушается, осколки метеоритов уносятся, приподнятый вал сглаживается, кольцевая депрессия заполняется продуктами денудации. Последующее оледенение и тектонические перестройки могут привести к полному исчезновению округлой формы. Поэтому распознать древний кратер очень трудно. Канадские геологи Р. В. Робертсон и Р. А. Грив в период с 1950 по 1972 гг. открыли и изучили 19 предполагаемых метеоритных кратеров в Канаде диаметром от 2 до 100 км и геологическим возрастом от 1 до 1700 млн. лет. Большинство из этих кратеров заполнилось водой. А надо сказать, что в «Каталоге метеоритов» М. Х. Хейя (3-е издание) числится всего 115 досто-

верных и предполагаемых кратеров, из них около $\frac{4}{5}$ взрывных.

Изучение кратеров в Канаде началось с исследования в 1950 г. кратера Новый Квебек (Чаб) диаметром 3 км. Удивительное его сходство с лунными кратерами и аризонским метеоритным кратером позволило считать Новый Квебек метеоритным кратером, несмотря на отсутствие в нем осколков метеоритов. После этого открытия в поисках новых ударных структур в Канаде систематически изучались аэрофотоснимки и топографические карты страны. В табл. 6 приведены возможные кратеры Кана-

Таблица 6

Возможные метеоритные кратеры Канады (по Р. Робертсону и Р. Гриву, 1973 г.)

Номер кратера (см. рис. 11)	Местонахождение	Диаметр, км	Возраст, млн. лет	Год открытия
1	Новый Квебек	3	Менее 1	1950
2	Брент	4	450 ± 40	1951
3	Маникуаган	65	210 ± 4	1954
4	Озеро Клируотер Западное	25	285 ± 30	1955
	Озеро Клируотер Восточное	14,5	285 ± 30	1955
5	Холефорд	2	550 ± 50	1955
6	Залив Дип	9	100 ± 50	1956
7	Карсвел	30	485 ± 50	1960
8	Озеро Кутюр	10	300 ± 150	1959
9	Озеро Уэст-Хок	3	150 ± 50	1962
10	Озеро Пайлот	5	300 ± 150	1965
11	Озеро Николсон	12,5	300 ± 150	1965
12	Река Стин	13,5	95 ± 7	1965
13	Садбери	100	1700 ± 200	1966
14	Шарлевуа	35	350 ± 25	1966
15	Озеро Мистастин	20	202 ± 25	1966
16	Озеро Сент-Мартин	24	225 ± 25	1969
17	Озеро Уанапитей	8,5	300 ± 150	1969
18	Озеро Гау	5	>150	1972
19	Озеро Ла-Муанери	8	>150	1972

ды; их местонахождение показано на рис. 11 (по Р. Робертсону и Р. Гриву).

Породы, слагающие метеоритный кратер и предкратерную зону, интенсивно брекчированы и разбиты трещинами. Сеть радиальных и тангенциальных трещин пересекает валы молодых кратеров. Иногда трещины прослеживаются и в глубоко эродированных структурах. Крупные неориентированные блоки раздробленных пород выстилают днища кратеров и слагают их стенки. Эти не испытавшие заметных перемещений образования получили название автохтонных брекчий в отличие от аллохтонных брекчий, сложенных выброшенным под действием удара материалом. Аллохтонные брекчии образуют окружающее кратер поле каменных выбросов и в переотложенном виде встречаются в самом кратере. Однако присутствие брекчий в кратерной структуре не всегда свидетельствует об ее ударно-метеоритном происхождении. По-

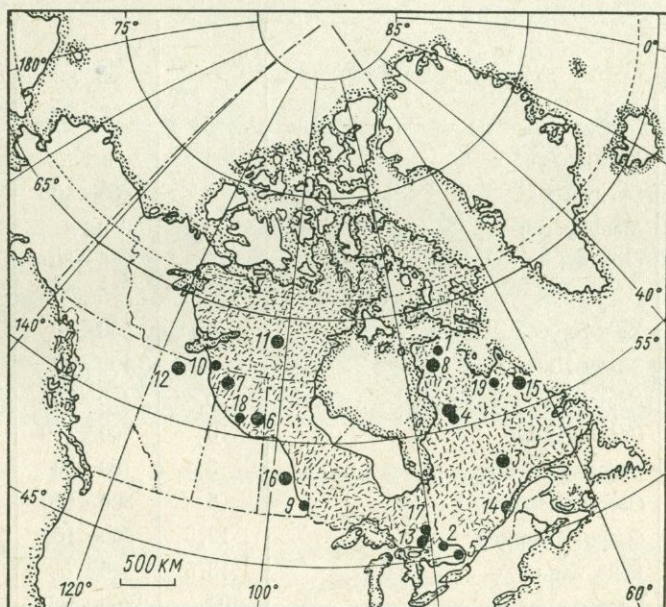


Рис. 11. Расположение астроблем на Канадском щите (названия кратеров даны в табл. 6)

добные образования возникают и при обычных наземных геологических процессах. Таковы, например, эксплозивные брекчии, формирующиеся при вулканических извержениях.

Сверхскоростной удар приводит к резкому повышению давления и температуры как в самом метеорите, так и в окружающих породах. Максимальная величина ударного давления, достигающего 5 Мбар при 3000—4000°C, снижается с увеличением расстояния от места удара. При обычном метаморфизме максималь-

ное давление и температура значительно ниже: соответственно 10 кбар и 1000°C. Энергия мгновенного метеоритного удара в 10^{22} раз превышает энергию, возникающую при тектонических процессах, и порождает совершенно особый тип деформаций — ударный метаморфизм.

В породах, испытавших ударный метаморфизм низкой ступени, развиваются характерные структуры — конусы разрушения, достигающие в длину 2 м. Испещренные тонкими бороздками или неполные конусы образуются в результате растяжения ослабленных поверхностей под действием ударной волны. Если породы с конусами разрушения вернуть в их дократерное положение, вершина конуса будет ориентирована в направлении места удара.

На первой стадии ударного метаморфизма в обычных породообразующих минералах развиваются видимые только под микроскопом системы многочисленных трещин и нарушений. Эти «планарные структуры» располагаются параллельно определенным кристаллографическим направлениям и в зависимости от величины ударного давления имеют различную интенсивность. В кварце и в полевых шпатах планарные структуры возникают, если давление превышает 100 кбар. Однако для их образования в более плотных структурах пироксенов, амфиболов и слюд необходимо значительно более высокое давление, превышающее 300 кбар.

Специфические микроструктуры, возникающие в кристаллах кварца и полевых шпатов под действием высокого давления, слишком малы для оптического или рентгеновского анализа. В породах, испытавших воздействие удара, появляются стеклоподобные минеральные зерна, сохранившие очертания первичного кристалла. Такие «тетоморфные» (принявшие форму кристалла) стекла, подобные маскелиниту, в плагиоклазе характеризуются большей плотностью, чем стекла аналогичного состава, образовавшиеся в результате расплавления; у тетоморфных стекол нет и признаков текучести.

Структурные перестройки в кристаллах кварца и полевых шпатов под влиянием высокого давления происходят одновременно с образованием тетоморфных стекол. В качестве примера можно привести две модификации SiO_2 (кварца) — стишовит и коэсит. Стишовит образуется непосредственно под действием ударных нагрузок, коэсит — из тетоморфного стекла при высоких температурах. Коэсит был обнаружен в тетоморфном стекле кислого состава в кратерах Холефорд и озера Уанапитей (Канада).

Другие минеральные фазы, возникающие при высоком давлении, описаны для Попигайского взрывного кратера Сибири. В породах этой ударной структуры обнаружены алмазы. Ниже мы остановимся на нем более детально.

Для каждого минерала существует определенное критическое давление, при котором температура превышает точку плавления.

Например, при давлении около 500 кбар и 1100°C в породах наряду с расплавленным кварцем и полевыми шпатами присутствуют кристаллические слюды, амфиболы или пироксены. Когда давление и температура достаточно высоки для расплавления всех фаз, быстрое остывание может помешать гомогенизации. Образуется смешанная стекловидная масса, состоящая из извилистых полосок или глобулей (мельчайших капелек и шариков) стекла самого различного состава. Когда давление и температура при ударе достигают уровня, при котором породы начинают плавиться (700 кбар, 2000°C), образуется гомогенный расплав.

В зависимости от того, в каких условиях будет проходить последующее остывание, расплавленный материал может превратиться либо в стекло, либо в кристаллическую породу, которую трудно отличить от обычных вулканитов. Такие испытанные плавление породы — импактиты — присутствуют в виде небольших стекловатых включений в брекчиях или образуют самостоятельные тела, подобно комплексу в Маникуагане (диаметр 65 км, возраст 210 млн. лет, объем 400 км³). По составу импактиты, как правило, близки к породам, из которых они образовались.

При ударах метеоритов, образовавших взрывные кратеры, возникали максимальное давление и температуры, способные расплавить сам метеорит или даже превратить его в пар. При этом расплавленный материал внеземного происхождения и испытывавшая удар расплавленная порода тесно перемешиваются, и никакими методами, за исключением детального геохимического анализа микроэлементов, не удастся выявить первичное метеоритное вещество. Вот почему нельзя полагать, что в крупных ударных структурах имеются осколки неизмененных метеоритов.

Крупные круглые структуры, утратившие первоначальные морфологические особенности, часто захороненные, но сохранившие специфические признаки ударно-взрывного происхождения, называют астроблемами (от греческого «звездная рана»).

Мы уже упоминали о том, что в результате удара и взрыва при образовании метеоритных кратеров возникает особый класс структур, в который входят в различной степени деформированные и переплавленные породы — взрывные брекчии и импактиты. Брекчии представляют собой обломки и глыбы пород, несущие в себе признаки ударного метаморфизма, в том числе плавление обломков, наличие фрагментов стекла в цементе брекчий. Импактиты — это более переработанные и измененные земные породы, иногда полностью состоящие из стекла. Эти стекла представляют собой застывший силикатный расплав, нередко далеко отлетевший от центра кратера. Импактиты гетерогенны, часто наполнены фрагментами исходных пород, и в них часто присутствует метеоритное вещество в виде железо-никелевых шариков. В крупных взрывных кратерах иногда встречается разновидность импактитов — суевит, напоминающий туф.

Сколько же погребенных взрывных кратеров выявлено в СССР? Оказывается, гораздо меньше, чем в Канаде, и происхождение их до конца не ясно (рис. 12). Исследование кратеров — важная проблема. Если размеры метеоритного кратера измеряются десятками или сотнями километров, то энергия их образования соизмерима с энергией геологических процессов. А это означает, что удары крупных метеоритов о Землю могут служить не только своего рода запалом для геологических процессов (типа заложения геосинклиналей, поднятия мантийного материала на земную поверхность, возбуждения вулканической деятельности и т. д.), но могут быть непосредственно ответственны за образование месторождений алмазов и некоторых строительных материалов. Например, в кратере Рис размером 21×24 км, где сейчас располагается озеро и находится несколько населенных пунктов, спекшиеся суевиты используют для строительства; неко-

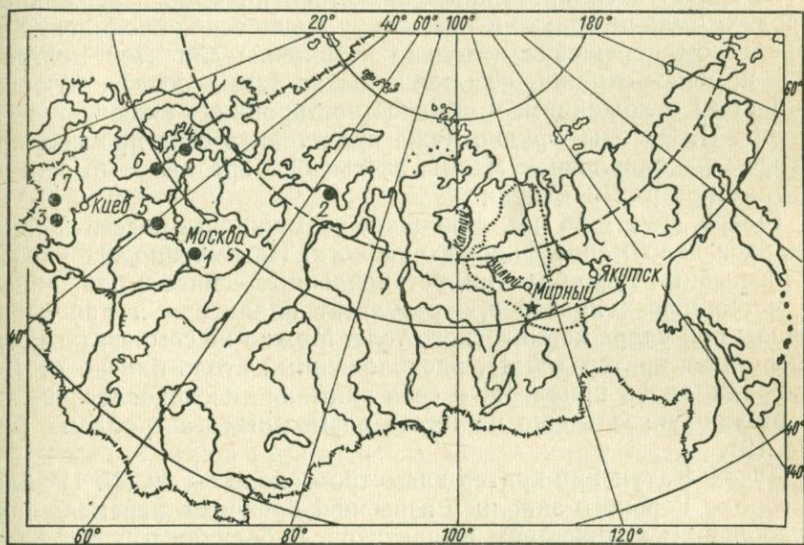


Рис. 12. Древние астроблемы на территории СССР и расположение Якутской алмазоносной провинции (границы провинции по Г. П. Вдовыкину, 1970)

торые астроблемы могут служить источником алмазных россыпей, погребенные ударные структуры могут быть использованы в качестве подземных хранилищ газа или резервуаром для сброса вредных промышленных отходов.

Очевидно, что древние гигантские кратеры лучше всего сохранились на устойчивых континентальных платформах, где геологические пертурбации за протекшие миллионы лет были не столь разрушительны. На территории Советского Союза чрезвычайно перспективными в этом смысле представляются Сканди-

навский, Вольно-Подольский, Алданский и Анабарский щиты. Как известно, на Анабарском щите был обнаружен один из самых больших в мире метеоритный кратер Попигайский (его переключник достигает 100 км, а возраст оценивается в 30 млн. лет).

Любопытную историю имеет исследование крупного финского геолога П. Эсколы. В 1920 г. он обследовал северную часть Ладожского озера. На острове Валаам в валунах среди однообразного гранитного материала его внимание привлекли чужеродные образцы, состоящие из лавы. Направление сноса ледниковой морены указало, что изверженный материал попал из озера Янисъярви. Озеро имеет размеры 14×26 км, расположено близ северной оконечности Ладожского озера, в 25 км от города Сортавалы. В середине озера — два скалистых лавовых островка.

Опытного геолога привело в недоумение строение и состав горных пород, окружающих Янисъярви. П. Эскола писал, что они противоречат всем привычным представлениям об изверженных породах. Дело не только в том, что вулканические проявления на Карельском перешейке довольно нетипичны для этой местности, — не менее странным кажется состав лавы, соответствующий глинистым отложениям, и обилие посторонних включений. По мнению П. Эсколы, трудно даже представить себе процесс, при котором расплавленная магма, застывая, образовала бы странные лавы озера Янисъярви.

Теперь, спустя 56 лет, появилась возможность рассеять справедливое недоумение финского геолога. Несомненно, он наблюдал взрывные туфо-брекчии, установленные сейчас в большинстве метеоритных кратеров, — результат плавления и дробления породы при ударе космического тела. Можно не сомневаться, что теперь этот кратер (№ 4), расположенный столь близко от Ленинграда, вновь привлечет к себе внимание исследователей.

Можно указать еще на шесть возможных астроблем (см. рис. 12).

Пучеж-Катунский кратер диаметром около 80 км (№ 1) вблизи города Горького заполнен взрывной брекчией, перемешанной с небольшим количеством импактитов. В брекчии и в центральном поднятии раздробленного фундамента установлены ударно-метаморфизованные гнейсы и амфиболиты с диаплектовым кварцем (планарные элементы), биотитом и диаплектовым стеклом по плагиоклазу (маскелинитом).

Карская впадина (№ 2) диаметром 50 км образует залив на Югорском полуострове: на поверхность выходят следы каких-то катастрофических пертурбаций, которые можно истолковать как взрыв.

В 40 км к северу от Кировограда (Украина) под слоем осадков находится округлая Болтышская котловина диаметром 25 км (№ 3), которая углубляется в кристаллический фундамент на 300—400 м. В Болтышской впадине развиты импактиты (трахиандезиты), перекрытые меловыми и палеогеновыми осад-

ками. В центре находится поднятие кристаллического основания — раздробленные докембрийские граниты. Импаكتиты отвечают по составу гранитам и включают их многочисленные оплавленные обломки. Присутствуют диаплектовые кварц и полевые шпаты, отмечены диаплектовые кварцевые и полевошпатовые стекла. Кратер, по-видимому, образовался около 100 млн. лет назад.

В районе Калуги под осадочным чехлом толщиной 1 км захоронен древний ископаемый кратер (№ 5) диаметром около 15 км. Бурение позволило извлечь на поверхность гранито-гнейсовые брекчии и импаكتиты (туфы андезитов) — характерный признак ударно-взрывного дробления.

Машиногорский кратер № 6 (диаметр 3—4 км) находится к юго-востоку от города Гдова (Ленинградская область). Деформированные породы палеозоя окружают выходы брекчии с обломками и глыбами пород кристаллического фундамента, содержащие характерные признаки ударного метаморфизма.

След давней катастрофы (№ 7) от столкновения крупного метеорита с нашей планетой обнаружили возле села Ильинцы Винницкой области сотрудники Института геологических наук АН УССР А. А. Вальтер и В. А. Рябенко. Кратер был опознан по характерному кольцевому валу. Его диаметр 4 км. Датировка пород показала, что метеорит упал около 100 млн. лет назад. Энергия, выделившаяся при этом, равнялась энергии взрыва бомбы 120 Мт. Следы разрушения от мощной волны, как показало бурение, четко прослеживаются на глубину более 100 м. Гранитоподобные породы в центре воронки переплавлены в лаву и стеклообразную массу, ниже — смяты, поломаны. Сила удара была такова, что основное тело космического пришельца слилось с окружающими породами и превратилось в своеобразный гибридный внеземного и земного вещества. По немногочисленным сохранившимся обломкам исследователям удалось установить, что метеорит был каменный, состоял в основном из известных на Земле пород типа ортофиоров. Его масса, как предполагают ученые, составляла сотни тысяч тонн.

Выше упоминалось о том, что удар крупных метеоритов о Землю может генерировать вулканизм. Эта проблема стоит того, чтобы остановиться на ней более подробно. Дело в том, что мы довольно хорошо знаем внешние свойства вулканов, а вот о причинах их возникновения не знаем ничего. Обычно извержение лавы объясняют либо спорадическим полным или частичным расплавлением твердого вещества, либо выходом магмы из постоянно существующего жидкого слоя. Последнее соображение, однако, никак не вяжется с данными сейсмологии, которая утверждает, что недра Земли твердые. Значит, первое объяснение более верное, тем более что энергия для такого плавления имеется. Тепловой поток, идущий из недр [около 10^{-6} кал/(см²·сек)], вполне достаточен, чтобы расплавить породы в определенном

месте и в определенное время. Проблема заключается не в том, чтобы найти источник тепла, а в том, чтобы сконцентрировать тепло в настолько малом объеме вещества, чтобы возникла возможность его плавления.

При метеоритных ударах концентрированная энергия воздействует на ограниченный объем вещества. Поверхностный слой Земли нагревается, а образовавшаяся рыхлая масса брекчированных пород служит хорошей термоизоляционной крышкой. Все это резко снижает потери тепла за счет теплопроводности и лучеиспускания, и создаются условия для накопления тепла и создания магматического очага. С другой стороны, удар метеорита может вызвать образование зоны разломов, что приведет к локализации будущей активности, если геотермический градиент повысится.

Возникшее в конечном счете образование будет обладать чертами и ударной, и вулканической структур.

Расчеты показывают, что образование на Земле ударных кратеров диаметром около 300 км может сопровождаться вулканизмом. Возникновение кратеров меньшего диаметра может сопровождаться вулканизмом позднее, если возникнут конвективные течения в верхней мантии.

Доказательства метеоритного удара, сопровождавшегося вулканизмом в случае структуры Садбери (Канада), были подробно описаны американским геологом Р. С. Дитцем в 1964 г. Первоначальный кратер имел диаметр порядка 50 км и глубину 3,2 км. Главными доказательствами удара в Садбери являются брекчия и конусы разрушения. Согласно Дитцу, последующий вулканизм проявился в форме экструзивного лополита.

Дно канадского метеоритного кратера Маникуаган покрыто лавой, которая поднялась в виде кольцевой дайки, расположенной концентрически с кратером. Это подтверждает связь вулканизма с образованием метеоритного кратера.

Еще в древности астрономов поражало обилие кольцевых структур на Луне. Их считали вулканическими кратерами, подобными земным. В XIX в. была выдвинута новая гипотеза, связавшая образование большинства лунных кратеров с ударами астероидов и метеоритов. В последнее время благодаря космическим исследованиям в США и СССР мы получили многочисленные подтверждения этого предположения. Поверхность Луны и Марса действительно подвергалась бомбардировке межпланетными телами различного размера — от микрометеоритов до планетозималий. Не вызывает сомнений, что и Земля была объектом подобного обстрела. Геологическая наука не может пройти мимо ударных структур хотя бы из-за необходимости правильной оценки перспективности структур центрального типа на поиски тех или иных полезных ископаемых, а выиграют от этого и такие науки, как планетология, космохимия, метеоритика и геохимия в целом.

3. Космическая минералогия и алмазы

Выводы геологии не менее важны для планетной астрономии, чем выводы этой последней для геологии, ибо Земля есть единственная планета, которую мы можем изучать во всеоружии с той огромной мощностью, которой обладает методика современного естествознания.

В. И. ВЕРНАДСКИЙ. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения

Начало космической минералогии можно отнести к 1885 г., когда австрийский минералог Г. Чермак опубликовал свою монографию «Микроскопическая характеристика метеоритов», в которой описывалось 16 минералов из метеоритов.

Известный минералог академик АН УССР Е. К. Лазаренко приводит список минералов, открытых в метеоритах:

1885—1960 гг.

Камасит (Fe, Ni)	Троилит FeS
Тэнит (Fe, Ni)	Ольдгамит CaS
Медь Cu	Добреелит* FeCr ₂ S ₄
Алмаз C	Лавренсит* (Fe, Ni)Cl ₂
Графит C	Брейнерит (железистый магнезит)
Клифтонит C*	(Mg, Fe) (CO ₃)
Муассанит SiC	Кальцит CaCO ₃
Когенит Fe ₃ C	Магнетит Fe ₃ O ₄
Шрейберзит* (Fe, Ni) ₃ P	Хромит FeCr ₂ O ₄
Осборнит* TiN	Кварц SiO ₂
Тридимит SiO ₂	Плагиоклаз (Na, Ca)/(Al, Si) ₄ O ₈
Хлорапатит Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl	Маскелинит* (стеклообразный плагио- клаз)
Меррилит (витлокит) Ca ₃ (PO ₄) ₂	Ортоклаз K(AlSi ₃ O ₈)
Оливин (Mg, Fe) ₂ (SiO ₄)	Хлорит-серпентин (Mg, Fe) ₆
Ортопироксены (Mg, Fe) ₂ (Si ₂ O ₆)	(Si ₄ O ₁₀) (O, OH) ₈
Клинопироксены (Ca, Mg, Fe) ₂ (Si ₂ O ₆)	Вейнбергит Na(AlSiO ₄)·3Fe(SiO ₃)

1960—1970 гг.

Сера S	Синоит* Si ₂ N ₂ O
Лонсдейлит* C	Доломит CaMg(CO ₃) ₂
Перрит Ni ₂ Si	Гипс Ca(SO ₄)·2H ₂ O
Макинавит FeS	Эпсомит Mg(SO ₄)·7H ₂ O
Пирит FeS ₂	Бледит (астраханит) Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ × × 4H ₂ O
Сфалерит ZnS	Фаррингтонит* Mg ₃ (PO ₄) ₂
Алабандин (Mn, Fe)S	Графтонит (Fe, Mn) ₃ (PO ₄) ₂
Нинингерит* (Mg, Fe, Mn)S	Саркопсид MnFe ₂ (PO ₄) ₂
Пентландит (Fe, Ni) ₉ S ₈	Панетит* Na ₂ Mg ₂ (PO ₄) ₂
Кубанит CuFe ₂ S ₃	Брайенит* Mg ₃ Ca ₄ Fe ₂ (PO ₄) ₆
Халькопирит CuFeS ₂	Циркон Zr (SiO ₄)
Валлернит Cu ₃ Fe ₄ S ₇	Юриит* (космохлор) NaCr(Si ₂ O ₆)
Джерфишерит K ₃ CuFe ₁₂ S ₁₄	Меррихьюит* (K, Na) ₂ Al ₅ Si ₁₂ O ₃₀
Гентнерит* Cr ₄ Fe ₃ Cr ₁₁ S ₁₈	Реддерит (роддерит)*
Кристобалит SiO ₂	(K, Na) ₂ Mg ₅ Si ₁₂ O ₃₀
Рутил TiO ₂	Рихтерит Na CaMg ₅ (Si ₈ O ₂₂) (OH, F) ₂
Ильменит FeTiO ₃	Криновит NaMg ₂ CrSi ₃ O ₁₀
Шпинель MgAl ₂ O ₄	

* В земной коре неизвестен.

Даже хлорит-серпентин, являющийся главной составной частью некоторых углистых хондритов, был описан впервые лишь в 1948 г. Этот период развития космической минералогии метко охарактеризовал известный американский минералог Б. Мэйсон, президент Минералогического общества США. Он отметил, что еще в 1955 г. всякий, кто занимался минералогией метеоритов, мог быть причислен к «ленивым минералогам», так как ограничивался изучением 2—3 десятков минералов из более 1500 известных минеральных видов.

Резкий перелом в развитии космической минералогии наступил в 60-х годах XX в. За последние 10 лет число минералов, определенных в метеоритах, возросло более чем вдвое. Большинство их — это второстепенные составные части метеоритов, содержание которых значительно меньше 1%. Например, количество циркона в метеорите Муерта составляет около 0,002%.

Отдельные зерна циркона были также открыты автором с сотрудниками в Сихотэ-Алиньском железном метеорите. Этот минерал был обнаружен в силикатной (нерастворимой в соляной кислоте) части метеорита. Из 1450 г метеорита было выделено всего 26 мг нерастворимой фракции, в которой присутствовало около 15% рудной минеральной составляющей. Таким образом, чистой силикатной фракции оказалось 22 мг, что составляет $1,5 \cdot 10^{-8}$ % общей массы. Микроскопическое изучение этой фракции показало, что основная ее часть представлена мельчайшими недиагностируемыми под микроскопом обломками минералов. Тем не менее, было обнаружено 4 зерна циркона размерами $0,25 \times 0,32$ мм²; $0,1 \times 0,03$ мм²; $0,04 \times 0,03$ мм² и $0,03 \times 0,03$ мм². Зерна хорошо окатанные, слабо вытянутые, с нечетко выраженными гранями, алмазным блеском; цвет — светло-розовый.

Остановимся на общих закономерностях распространенности и происхождения минеральных составляющих в метеоритах. При этом мы будем пользоваться в основном материалами Е. К. Лазаренко и А. А. Ясинской (1970).

Как правило, распространенность минерала обусловлена распространенностью элементов, которые входят в его состав, и если сам минерал имеет широкое поле стабильности. Действительно, во всех метеоритах на железо, магний, кремний, титанород приходится свыше 90% как по массе, так и по числу атомов. Поэтому обычными минералами метеоритов являются металлическое никелевое железо, оливин, ромбический пироксен и бедный кальцием моноклинный пироксен.

Редкость же минерала определяется либо содержанием в нем редкого элемента, либо очень ограниченным полем его стабильности. Особенно большое значение имеют минералы с ограниченным полем стабильности, так как по ним точнее, чем по распространенным минералам, определяют происхождение метеоритов.

Наиболее распространенными минералами в метеоритах являются оливин, пироксены, никелистое железо (камасит и тэнит), а

также в отдельных группах метеоритов — плагиоклаз и хлорит-серпентин.

Плагиоклаз является второстепенной составной частью большинства хондритов, однако доминирует в ахондритах. Хлорит-серпентин обнаружен лишь в углистых хондритах, но в этом классе он является доминирующим.

Оливин — главный минерал оливин-бронзитовых (25—40%) и оливин-гиперстеновых (35—60%) хондритов, в значительных количествах встречается в некоторых углистых хондритах, однако не отмечен в энстатитовых хондритах. Состав оливина в метеоритах колеблется от чистого форстерита (энстатитовые ахондриты — орбиты) до разновидностей, почти его не содержащих (гиперстеновые хондриты).

Значительный интерес представляет полиморфная модификация оливина со структурой шпинели — рингвудит, обнаруженная Р. А. Бирсом, П. Дж. Дэвисом и Дж. Ридом (1969) в железном метеорите Тенхам. Согласно экспериментальным данным, превращение оливина состава $(Mg_{0,75}Fe_{0,25})_2SiO_4$ в модификацию со структурой шпинели происходит при давлении около 170 кбар и температуре 900°С. Исследователи считают, что наличие фаз высокого давления в метеоритах, по-видимому, связано с ударными явлениями.

Пироксены — составные части почти всех классов метеоритов. Среди каменных и железо-каменных метеоритов лишь некоторые углистые хондриты и палластиты не содержат пироксенов. Наиболее распространены ромбические пироксены, среди которых по содержанию железа выделяют энстатит (10% $FeSiO_3$), бронзит (10—20% $FeSiO_3$) и гиперстен (более 20% $FeSiO_3$). Однако этот ряд метеоритных пироксенов не является непрерывным. Энстатит, как правило, ближе по составу к $MgSiO_3$. Пироксены, промежуточные между энстатитом и бронзитом, отсутствуют. Не встречаются и ромбические пироксены, близкие к чисто железистой разновидности — ферросилиту.

Метеоритные пироксены, во многих отношениях сходные с пироксенами земных пород, имеют некоторые особенности. В частности, в метеоритах встречается пироксен, близкий по составу к чистому $MgSiO_3$ (98%). Наиболее распространены в метеоритах пироксены клиноэнстатит-клиногиперстенового ряда, почти не встречающиеся в земных породах. Кроме того, среди метеоритных пироксенов чрезвычайно редки разновидности, богатые кальцием и алюминием.

Плагиоклаз характеризуется узким интервалом изменения состава в пределах определенных классов метеоритов. В то время как в земных породах встречаются все члены изоморфного ряда плагиоклазов от альбита до анортита, в метеоритах состав плагиоклазов фактически лимитируется альбит-олигоклазом (5—34% анортита) — в хондритах и битовнит-анортитом (90% анортита) — в ахондритах и мезосидеритах.

Хлорит-серпентин. В 1860 г. Веллер на основании анализов углистого хондрита Голд Боккевельд предположил, что силикатное вещество этого метеорита состоит в основном из серпентина. Однако результаты этого наблюдения были забыты или не принимались во внимание при дальнейших исследованиях. В 1948 г. Л. Г. Кваша определила хлорит в углистом хондрите Старое Борскино, а затем в углистом хондрите Мигеи. В 1962 г. Б. Мейсон, обратив внимание на то, что суммарный состав метеоритов этого класса отличается очень низким содержанием алюминия, отнес его к серпентину. Наличие такого высокогидратированного железо-магнезиального силиката, как хлорит-серпентин, в качестве главной составной части углистых хондритов является важным фактом при суждении о происхождении этих метеоритов.

Второстепенные и акцессорные минералы. Некоторые второстепенные и акцессорные минералы (троилит, хромит, меррилит, магнетит, хлорапатит) широко распространены в метеоритах. Другие минералы встречаются редко, лишь в отдельных классах метеоритов.

Прежде всего следует выделить два класса (углистые хондриты и энстатитовые хондриты), заслуживающих внимания с точки зрения специфики их минерального состава. Так, в углистых хондритах имеются хлорит, кальцит, доломит, магнетит, эпсомит, астраханит и сера. Этими минералами исчерпывается список всех карбонатов, сульфатов и гидратных минералов, известных в метеоритах. Такая парагенетическая ассоциация дает основание утверждать, что эти минералы возникли при низкой температуре, высокой влажности в сравнительно-окислительной обстановке. Парагенезис второстепенных и акцессорных минералов в энстатитовых хондритах и ахондритах иной. Только для этого класса метеоритов известны осборнит, ольдгамит, нинингерит, джерфишерит, кристобалит, синоит, реддерит. Такой специфический состав минералов свидетельствует о сильновосстановительной обстановке и высокой активности серы в первичной внешней среде. Действительно, в этих метеоритах такие литофильные элементы, как кальций, марганец, хром, титан, магний и даже калий, проявляют сродство к сере (халькофильность).

Когенит как акцессорный минерал был впервые обнаружен в 1889 г. в железном метеорите, а затем найден в некоторых энстатитовых хондритах. Отдельные исследователи рассматривают этот минерал как возможный индикатор кристаллизации вещества при высоком давлении. В частности, согласно Е. Рингвуду, все метеориты, содержащие когенит, охлаждались при давлениях выше 25 тыс. атм. Однако это предположение стало предметом дискуссии. Р. Бретт в 1967 г. показал, что присутствие когенита в метеоритах не позволяет однозначно судить о давлении.

Кристобалит был впервые достоверно установлен в энстатитовом хондрите Аби. В последнее время кристобалит был выявлен в ряде энстатитовых хондритов в постоянной ассоциации с

клиноэнстатитом. Известный американский минералог Б. Мейсон считает, что если такая ассоциация первоначально была представлена кристобалитом — протоэнстатитом, находящимися в равновесии, то она указывает на очень ограниченные пределы условий образования. Если давление равно 1 атм, кристобалит устойчив при температуре выше 1470°C, а протоэнстатит плавится инконгруэнтно при 1557°C. Оба минерала являются фазами низких давлений: кристобалит неустойчив выше 5 кбар, протоэнстатит — выше 8 кбар.

Гранат впервые был найден в хондрите Корара, где он замещает зерна оливина, имеющего аномально низкое двупреломление, обусловленное сильными ударными эффектами. На основании детальных исследований Б. Мейсон высказывает предположение, что гранат возник в результате превращения оливина при высоком давлении, возникающем при сильных ударных явлениях по следующей химической реакции: $6(\text{Mg}_{0,75}, \text{Fe}_{0,25})_2\text{SiO}_4 = \text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{Fe} + 3\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ (образование граната сопровождается возникновением магнезиального оливина).

Амфибол впервые был обнаружен Е. Олсеном в железном метеорите Викита Коунти. На основании электронного микроанализа и определения оптических констант он отнесен к натровому тремолиту — рихтериту состава $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$. Он встречается в виде включений в графитовых нодулях, содержащих форстерит, альбит, реддерит, витлокит. Присутствие гидроксилсодержащего амфибола в железном метеорите указывает на специфику условий его образования.

В метеоритах часто присутствуют зерна графита кубической формы — минерал клифтонит. Впервые он был обнаружен В. Гайдингером в 1846 г. в железном метеорите Магура. В настоящее время, как отмечает Г. П. Вдовыкин, клифтонит обнаружен в 9 железных и 2 энстатитовых хондритах. Известный космохимик Г. Юри рассматривает клифтонит как псевдоморфозу графита по алмазу, однако детальное изучение минералогических особенностей метеорита Каньон Дьявола и некоторых других позволяет заключить, что клифтонит в железных метеоритах образовался в результате диффузии углерода — продукта разложения когенита (карбида железа) — с последующей кристаллизацией кубической модификации графита.

Алмаз — самый ценный минерал. Более твердого минерала в природе не существует. Особый интерес представляет факт значительного содержания алмазов в некоторых метеоритах. Впервые их обнаружили в метеорите Новый Урей. Этот метеорит упал 4 сентября 1886 г. около деревни Новый Урей, Краснослободского уезда Пензенской губернии на правом берегу реки Алатыри. Было найдено 3 осколка общей массой 1,9 кг. Это был каменный метеорит черного цвета и очень плотный. В 1888 г. минералог М. В. Ерофеев и химик П. А. Лачинов нашли в этом метеорите довольно большое количество алмазов. За эту находку

Российская академия наук присудила им Ломоносовскую премию. Через 3 года американские ученые обнаружили алмазы в железном метеорите Каньон Дьявола. Затем алмазы нашли в каменном метеорите Гоалпара, который был найден еще в 1868 г. в Индии. Советский исследователь Г. П. Вдовыкин изучал космохимию углерода и в своей книге «Алмазы в метеоритах» дал описание всех известных (до 1970 г.) случаев находок алмазов в метеоритах и рассмотрел вопросы распространенности и происхождения этого минерала.

В табл. 7 приведен список метеоритов, содержащих алмазы. Алмазоносные каменные метеориты были выделены еще в прош-

Таблица 7

Алмазы в метеоритах

Метеорит	Год падения (п) или находки (н)	Масса, кг	Массовое содержание, %	
			углерода	алмазов
Новый Урей	1886 (п)	1,9	2,23	1,0
Гоалпара	1868 (н)	2,8	1,54	0,8
Диалпур	1872 (п)	0,28	2,92	1,0
Норс Хейг	1961 (н)	0,97	4,10	1,5
Динго Пап Донга	1965 (н)	0,12	3,10	1,2
Хаверё	1971 (п)	1,5	2,0	1,0
Каньон Дьявола	1891 (н)	2·10 ⁶	1,5	2·10 ⁻⁴

лом веке в особую группу, которая была названа по первому подобному метеориту Новый Урей — уреилитами.

В изломе все уреилиты очень сходны. Они имеют одинаковый темно-серый цвет. Поверхность излома неровная. Если уреилиты шлифовать, то в аншлифах невооруженным глазом хорошо видны неровные, слегка извилистые пустоты, вытянутые примерно в одном направлении.

Если кусочек уреилита осторожно раздробить на мелкие зерна, из порошка можно выбрать чистую силикатную фракцию. В этой фракции зерна силикатов имеют неправильную форму, они белого цвета, их размер до 1 мм. В такой фракции с зернами силикатов связаны и пластинки никелистого железа (камасита) с поперечником до 1 мм и мелкие пластинки сульфида железа — минерала троилита FeS — размером до 0,7 мм.

В прозрачных петрографических шлифах уреилитов под микроскопом в проходящем свете видно, что уреилиты состоят главным образом из зерен силикатов (оливина и пироксена) и черного непрозрачного под микроскопом вещества. Спорадически рассеяны мелкие зерна никелистого железа и троилита, хорошо ви-

димые в отраженном свете. Силикаты находятся в виде крупных зерен неправильной формы и размером от долей миллиметра до 1—2 мм (и даже 4 мм). Между зернами силикатов находятся участки черного вещества, тоже неправильной формы, размером до 0,3 мм и больше.

Железисто-магнезиальный силикат оливин в уреилитах наиболее распространен, он составляет основную часть силикатов. Зерна оливина имеют очевидные признаки механической деформации. Они разбиты, причем некоторые группы зерен напоминают раздробленные хондры. В отдельных случаях, особенно в уреилите Гоалпара, силикаты превращены в мозаику мелких зерен. Оливин содержит молекулы Mg_2SiO_4 и Fe_2SiO_4 с примерным соотношением 3:1.

Другой силикат — клинопироксен — в уреилитах долго не могли точно определить. Его описывали как авгит, энстатит и т. д. Советский исследователь Л. Г. Кваша на основании петрографического изучения отнесла его к пижониту — довольно редкому в земных условиях минералу переходного типа энстатит-авгита. Зерна пижонита имеют неправильную форму и буроватый оттенок. Иногда они разбиты системой параллельных трещин, и в них наблюдается двойниковое полисинтетическое строение. В зернах и оливина, и пироксена временами наблюдаются тонкие включения черного углеродистого вещества, распределенные в виде вытянутых зон. Направление этих зон совпадает с направлением видимых трещин в силикатных зернах. Общее массовое содержание силикатов в уреилитах достигает 93%.

В количестве, не превышающем 6%, в уреилитах распределены мелкие пластинки камасита.

Содержание углеродистого вещества в уреилитах достигает 3—4%. В уреилитах оно довольно равномерно распределено по объему между силикатными зернами. Это обуславливает общую темную окраску метеоритов. Участки, выполненные углеродистым веществом, имеют неправильную, но близкую к округлой форму; их размер 0,3—0,9 мм. Эти участки, как теперь установлено, являются тонкими сростаниями алмаза и графита. Кроме того, в трех уреилитах, по данным Г. П. Вдовыкина, в небольших количествах присутствует органическое вещество (0,02—0,06%). Это вещество извлекается из метеоритов органическими растворителями и представлено углеводородами парафинового ряда.

Общая структура уреилитов свидетельствует о том, что они испытали сильный удар, при котором зерна разбились. Об этом говорит перекристаллизованный характер зерен силикатов, их мозаичность, поликристалличность камаситовых зерен, возникновение новообразований и т. д.

В уреилитах, в частности в Новом Урее и Норс Хэйге, кроме обычного алмаза встречается алмаз с гексагональной структурой, которого нет в кимберлитах. Этот алмаз был назван лон-

сдейлитом (по имени известного специалиста по алмазам Лонсдейла). Такой алмаз был синтезирован искусственно, путем воздействия ударной волны на графит. Советские исследователи Г. П. Вдовыкин с соавторами опубликовали статью, в которой описываются опыты по воздействию ударных волн на углеродсодержащие метеориты (углистый хондрит Мигей и железный метеорит Ярдымлык). Они установили, что синтезированные при взрыве метеоритные алмаз-графитовые сростки в экспериментальных препаратах углистого хондрита Мигей и Ярдымлыкского метеорита по морфологии и составу сходны с природными метеоритными и отличаются от природных земных алмазов. В зависимости от давлений, испытываемых веществом метеорита, происходят превращения: графит — алмаз — лонсдейлит.

Алмазы в каменных метеоритах находятся в сростках с графитом примерно в равном объемном соотношении. Размеры микроструктурных кристалликов алмаза в этих сростках меньше 1 мкм. Встречаются кристаллики алмаза большего размера: например, в метеорите Каньон Дьявола кристаллики алмаза достигают миллиметровых размеров. Известный французский ученый Муасан растворил 53 кг метеорита Каньон Дьявола в соляной кислоте. При этом осталось углеродистое вещество (примерно 800 г), в котором содержались маленькие черные округлые зерна алмаза. Многие исследователи находили и светлые окрашенные зерна алмаза, и даже белые.

Алмазы в осколках метеорита Каньон Дьявола встречаются крайне неравномерно. Они находятся в основном в тех осколках, которые были взяты на валу аризонского кратера, а значит, испытали сильный удар. А в тех образцах метеорита, которые были собраны на равнине, т. е. были продуктом развала метеоритного тела в атмосфере, — алмазы не найдены совсем. В среднем в осколках метеоритов, претерпевших удар, приходится одно включение алмаза на 10 см³ метеорита или шесть включений (размером от 0,05 до 2 мм) на 500 г метеорита. Итак, в метеорите Каньон Дьявола алмазы содержатся только в тех образцах, которые подвергались давлению (при ударе метеорита о землю развивалось давление до 1 млн. атм). При этом около 30% алмазов имеют гексагональную структуру, как и синтетические алмазы, получаемые ударным сжатием из графита. Лонсдейлит, образованный при воздействии ударных волн, близок к метеоритным алмазам по размерам кристалликов, по количественному содержанию среди синтетических алмазов с кубической структурой.

Образование месторождений алмазов на Земле ученые связывают с ударным механизмом. Вот как описывает современное состояние этой проблемы Г. П. Вдовыкин. Все природные коренные месторождения алмазов связаны с особым типом горных пород — кимберлитами. Это специфические породы ультраосновного состава, т. е. породы, бедные кремнеземом и богатые соединениями железа и магния. Свое название они получили от города

Кимберли в Южной Африке, где впервые были обнаружены в 1870 г. Кимберлиты распространены почти на всех древних платформах и щитах в различных участках земного шара — в Южной, Центральной и Восточной Африке, Индии, Бразилии, Северной Америке, на острове Калимантан.

Долгое время алмазосодержащие кимберлиты не были известны в нашей стране. Первый кристалл алмаза нашли в 1829 г. на Урале; находки алмазов у нас в стране были единичными.

Кимберлиты в алмазоносных провинциях имеют разный возраст. Они образовались в различные геологические эпохи — от нижнепалеозойской до мезозойской. В Сибири они образовались в раннемезозойскую эпоху. Тем не менее, по геологическим условиям залегания, вещественному составу и структуре пород они очень сходны. Кимберлиты залегают в виде вертикальных трубчатых тел, уходящих на большую глубину. Поэтому кимберлитовые тела называют трубками взрыва. От основной трубки часто ответвляются более мелкие жилы. В поперечном сечении трубки взрыва имеют различную форму — округлую, овальную, четырехугольную, неправильную. Форма поперечного сечения с глубиной меняется. Размеры кимберлитовых трубок в поперечном сечении — от нескольких метров до 1 км и больше. Наиболее крупная трубка взрыва Мвадуи в Танганьике имеет размеры 1525×1068 м.

Выполняющий трубку взрыва кимберлит представляет плотную монолитную породу сероватого цвета. Недалеко от поверхности он изменен процессами выветривания и имеет синеватый оттенок. Эта «синяя земля», как ее называют южноафриканские геологи, еще выше переходит в «желтую землю» — продукт полного разрушения кимберлита. В разрушенном кимберлите и были впервые обнаружены кристаллики алмазов.

Структура основной массы кимберлитов мелкозернистая, реже — микролитовая. Эти породы состоят из первичных минералов — оливина, пироксена, слюды, граната, магнетита, шпинели, муассанита, частиц углерода, а также вторичных минералов — хлорита, серпентина, карбонатов. В основной массе распределены довольно крупные вкрапленники оливина, пироксенов, красного граната (пироба), алмаза, слюды-флогопита. Чаще всего вкрапленники представлены оливином, размер зерна которого достигает 2 см. Это основной минерал в кимберлитах, его содержание достигает 60%.

В кимберлитах встречаются огромные обломки пород, окружающих трубку взрыва, — так называемые ксенолиты. Часто это известняки, изменения которых от контакта с кимберлитовой породой прослеживаются на несколько десятков сантиметров.

Алмазы в кимберлитовых трубках находятся в виде крупных кристаллов (октаэдров, додекаэдров и других форм). Они рассеяны в кимберлитах очень неравномерно. Иногда в небольшом объеме кимберлита встречается довольно много алмазов, на дру-

гих участках они очень редки. В некоторых случаях отмечалось уменьшение содержания алмазов в кимберлитовой трубке по мере увеличения глубины залегания. Среднее содержание алмазов в трубках взрыва обычно не превышает 1—1,5 карата (или 0,2—0,3 г) на 1 м³ горной породы.

Глубина, на которой происходила кристаллизация алмазов, и источник углерода алмазов в разных гипотезах оцениваются по-разному. Но во всех гипотезах теперь признаются проникновение кимберлитовой магмы в осадочную толщу в результате взрыва и резкое воздействие внедренной магмы на окружающие породы и, в частности, на углерод.

Вернемся к классическому метеориту Каньон Дьявола и его аризонскому кратеру. Метеоритное тело диаметром 60—80 м вошло в атмосферу Земли с большой скоростью. В нижних слоях атмосферы его скорость была, возможно, около 15 км/сек. При встрече с поверхностью Земли давление, по Э. Андерсу, достигало 10 Мбар (10 млн. атм). Этот удар, как соударение любых крупных тел с космическими скоростями, был подобен взрыву.

Ударная волна распространилась в земные горные породы. При этом было выброшено огромное количество материала, часть которого после оседания образовала вал кратера. Под дном образовавшегося кратера горные породы были размельчены, превращены в горную муку и брекчию. Непосредственно под дном и в бортах кратера горные породы были перекристаллизованы. Песчаники изменились, в них образовались плотная и сверхплотная разновидности кремнезема, а также конусы сотрясения.

Вещество самого железного метеорита почти полностью испарилось. В виде обломков сохранилась только внешняя часть тыловой зоны первоначального гигантского метеорита, выброшенная за пределы зоны удара. Более крупные обломки приповерхностной зоны, испытывавшие меньшие давления по сравнению с остальной частью метеорита, выброшены на окружающую равнину. Чуть позже на вал кратера меньшей скоростью выпали мелкие осколки более глубоких зон, испытывавшие более сильный удар.

Вещество этих осколков перекристаллизовалось. Об интенсивной кратковременной перекристаллизации свидетельствует структура никелистого железа, троилита, когенита, шрейберзита. Графит в желваках превращался в алмаз. Чем больше было давление на осколок метеорита или участок обломка, тем благоприятнее были условия для кристаллизации алмаза. Алмазное включение в одном из образцов метеорита, исследованном Г. П. Вдовыкиным, является особенно крупным (до 2 мм). Осколок метеорита, содержащий это включение, претерпел давление до 1 Мбар.

После дробления образцы метеорита Каньон Дьявола на валу кратера в течение нескольких минут охладились от 700—1000°C до нескольких сот градусов. В некоторых случаях, когда обломки

метеорита находились в окружении горячих выбросов горных пород, охлаждение протекало в течение нескольких часов.

Это значит, что алмазы могут содержаться в тех железных метеоритах, при падении которых образовались особенно крупные кратеры взрывного типа. Почти все подобные метеориты проверялись на содержание алмазов, но алмазы найдены не были. Не исключено, что в некоторых особенно сильно перекристаллизованных железных метеоритах алмазы могли образоваться не только во время падения на Землю (Каньон Дьявола), но также при соударении крупных масс в космическом пространстве (в уренлитах).

Космогенные разновидности могут составлять некоторую часть всех исследованных алмазов титаноносных россыпей. Наибольшее количество алмазов с примесью лонсдейлита (до 15%) обнаружено в одной из меловых россыпей центральной части Русской платформы. О точном соотношении метеоритных и астроблемных алмазов судить трудно, так как не выявлены четкие типоморфные признаки обоих. К сожалению, мы пока не знаем надежных признаков отличия космогенных алмазов, не содержащих лонсдейлит или представленных не текстурованными агрегатными зернами, от земных алмазов. Поэтому ближайшей задачей является детальное изучение метеоритных, астроблемных и земных алмазов для выявления их типоморфных признаков.

Выяснению распространенности космогенных алмазов способствовало бы изучение алмазоносности разновозрастных осадков различных регионов и, в первую очередь, систематическое опробование мелкозернистых песков типа титаноносных россыпей, обогащенных тяжелыми устойчивыми минералами. Космогенные алмазы могут присутствовать в известных прибрежно-морских месторождениях титана Австралии, Индии, США (Флорида) и других районов.

Таким образом, космическая минералогия оказывается не столь уже далекой от наших земных дел. И это только начало.

Полевые наблюдения и исследования, такие, как геологическое картирование, океанографические измерения, сейсмометрия, продолжают оставаться важным источником геологической информации. Но полноценная интерпретация этих данных геологом может быть дана лишь в том случае, если в его образе мышления будут присутствовать элементы, свойственные мышлению физиков и химиков.

Дж. ФЕРХУГЕН и др. Земля

Трудно сказать, когда люди от простого созерцания небесных явлений перешли к их изучению. Появление на ночном небе ярких комет с хвостом, падения болидов и их взрывы, остатки метеоритов на Земле, зодиакальный свет (конусообразное свечение над горизонтом в том месте, где зашло или восходит Солнце)¹ привлекали внимание людей еще в глубокой древности, часто вызывая суеверный страх. А что касается проблемы изучения космической пыли, то ею не интересовались фактически до начала космической эры, открытой Ю. А. Гагариным.

Ученые знали, что в межпланетном пространстве движется несчетное количество мельчайших тел, обозначаемых общим названием «метеорные тела», размеры которых различны: от мельчайших (космическая пыль) до нескольких десятков или сотен метров (астероиды и метеориты). Чем меньше метеорные тела по размерам, тем больше их количество, и если крупные тела — редкость, то космическая пыль представляет собой фактически облако, в котором постоянно движутся планеты Солнечной системы.

Результаты первоначальных экспериментов на ракетах и спутниках как будто свидетельствовали о том, что на границе атмосферы на высоте от 80 до 400 км плотность космической пыли особенно высока (на 3—4 порядка больше, чем в более низких слоях атмосферы). Этому даже нашлось объяснение, которое в настоящее время представляется весьма курьезным, поскольку дальнейшие детальные исследования показали, что регистрировались не удары пылинок, а треск обшивки корпуса датчиков в результате резких перепадов температур.

¹ Свечение объясняется рассеянием солнечного излучения пылевыми частицами, движущимися вокруг Солнца. Тонкая пылевая вуаль, по-видимому, охватывает всю планетную систему с наибольшей концентрацией между орбитами Марса и Юпитера.

Ученые Ленинградского физико-технического института сконструировали аппаратуру, которая фиксировала только удары мельчайших пылинок. Оказалось, что в окрестностях Земли космических частиц не больше, чем в среднем в межпланетном пространстве, а именно одна частица на 10 км^3 , или 10^{-22} г/см^3 . Лишь иногда, при прохождении Землей метеорных потоков (скорее всего, продуктов распада комет) число зарегистрированных пылинок оказывалось на 4—5 порядков больше. Таким образом, был закрыт пылевой пояс вокруг Земли, просуществовавший в умах ученых около 10 лет.

Космические пылинки покрупнее представляют реальную опасность при космических полетах, а пылинки с массой в ничтожные доли грамма (до 10^{-10} г) захватываются полем тяготения Земли (во время ее движения по орбите). Значительная их часть, совершив несколько сот или тысяч оборотов вокруг Земли в результате очень малого, но все же имеющего место сопротивления верхних слоев атмосферы, опускается все ниже и ниже и в конце концов сгорает в ее нижних горизонтах либо, если их скорость и масса были незначительными, плавно оседает на Землю. Общая масса космического вещества, постоянно присутствующего в атмосфере, оценивается в 1—2 млн. т (Б. Ю. Левин, А. П. Симоненко, 1973).

Микрометеориты не только представляют опасность при космических полетах и не только рассеивают солнечный свет, восхищая зрителей, но и влияют на образование атмосферных осадков.

Около 10 лет назад австралийский радиофизик Э. Боуэн высказал предположение, что существует связь между обильными и продолжительными дождями и потоками метеоритов. Во время своего путешествия вокруг Солнца Земля время от времени сталкивается с метеорными потоками, из которых наиболее мощными являются Персеиды, которые вот уже 1000 с лишним лет появляются на нашем небе в августе. Боуэн обратил внимание на тот факт, что в Австралии некоторые дожди ливневого характера повторяются с поразительной регулярностью, начинаясь всегда примерно через 4 недели после того, как какой-либо метеорный поток ворвется в атмосферу нашей планеты. Большой метеорный поток создает много центров конденсации молекул воды, в результате чего образуются микроскопические кристаллики льда, которые, в свою очередь, конденсируют водяной пар, выпадающий в конечном итоге в виде дождя. Эти исследования в дальнейшем были подтверждены и советскими специалистами. Таким образом, значительная часть атмосферных осадков, по-видимому, связана с внезапным вторжением космической пыли в атмосферу. Общая масса космической пыли, вторгающейся в атмосферу и оседающей на Землю, оценивается в несколько тысяч тонн в сутки.

Возникает вопрос: сколько же космических пылинок достигает поверхности Земли? Пылинки с массой менее 10^{-14} г оттал-

киваются давлением солнечного излучения и улетают за пределы Солнечной системы, а для частичек большей массы, например 10^{-12} г и более, силы гравитационного притяжения преобладают над силами радиационного отталкивания. Столь малые частички, конечно, невидимы в самый сильный микроскоп, однако их общая масса должна быть весьма значительной, по крайней мере, гораздо больше массы крупных метеоритов, которые падают на Землю раз за несколько тысяч лет (подсчитано, что метеорит с массой 1 млн. т может появиться раз за 1 млн. лет).

Второй вопрос: где взять космическую пыль или ее концентрат и какими методами можно ее исследовать?

Всего 20 лет назад наши возможности ограничивались лишь астрономическими методами наблюдений с Земли, которые позволяли только видеть космическую пыль, входящую в состав Солнечной системы, т. е. межпланетную пыль. Одним из наиболее важных методов тогда было исследование зодиакального света и противосияния. Были получены ценные результаты, особенно в СССР академиком В. Г. Фесенковым. Однако эти исследования не давали ответа на вопросы о происхождении пыли, ее эволюции, вещественном составе, размерах ее составляющих, ее распределении в Солнечной системе и т. д. Частично ответить на эти вопросы помогло развитие техники метеорных наблюдений.

Положение существенно улучшилось в последние годы, когда появились способы, позволяющие иметь непосредственный контакт с космической пылью. На ракетах и спутниках, запускаемых в СССР, США и других странах, наряду с прочей аппаратурой устанавливаются детекторы космической пыли. Они не только улавливают частицы, но и с большой точностью регистрируют их массу и скорость движения. Появились также интересные, хотя еще не совсем отработанные, методы обнаружения космического вещества на Земле. Это химические, радиохимические и другие методы. Их используют, например, при анализе донных океанических отложений. Они позволяют оценивать не только количество выпадающего на Землю космического вещества, но и распределение космических частиц по размерам и даже устанавливать их состав.

В последнее время разработан новый метод изучения влияния космической пыли на лунную поверхность. Результаты столкновения Луны с космической пылью можно видеть непосредственно при исследовании лунных образцов, на которых эти столкновения оставили следы в виде кратеров. Кроме того, космическая пыль вызывает эрозию лунной поверхности: с течением времени под действием многочисленных ударов ее поверхность как бы сглаживается. В этом смысле Луну можно рассматривать как спутник Земли, «запущенный» очень давно и потому несущий следы множества ударов. Изучение поверхности лунных камней позволяет исследовать удары частиц диаметром не менее 10 мкм. Выше уже указывалось на важную роль Луны в качестве поли-

гона для научных исследований и, в частности, на возможность исследования метеоритных и микрометеоритных кратеров.

Многие исследователи оценивали скорость поступления космического материала на Землю (скорость аккреции). При этом они исходили из различных предпосылок: из интенсивности зодиакального свечения (самые мелкие пылинки), количества метеоров, метеоритов, метеоритных кратеров на Земле и Луне, количества и размеров частиц, регистрируемых спутниками, и т. д. Все эти методы давали разные результаты. Скорость аккреции, по оценкам, составляла от 10^2 до 10^9 т/год.

Обзор данных о межпланетных телах и частицах, в том числе и об очень крупных метеоритах, сделал Дж. Хокинс (1964). Он показал, что распределение по массе каменных и железных метеоритов различно. Число каменных метеоритов N с массой m и более, выпадающих на 1 км^2 поверхности Земли за 1 год, подчиняется закономерности

$$\lg N = -0,73 - \lg m. \quad (1)$$

Поток железных метеоритов рассчитывается по формуле

$$\lg N = -3,51 - 0,7 \lg m. \quad (2)$$

Таким образом, интегральное число каменных метеоритов пропорционально m^{-1} , а железных — $m^{-0,7}$. Сводка данных об интегральном числе тел в очень широком диапазоне масс приведена на рис. 13.

Дж. Хокинс полагает, что различие между уравнениями (1) и (2) отражает разницу в происхождении метеоритов. Уравнение (1) аналогично тому, которое соответствует порошкам, образующимся при дроблении и истирании в течение долгого времени, в то время как (2) аналогично уравнению для порошков, образовавшихся при более умеренном дроблении. Если метеориты являются осколками астероидов, образовавшихся при столкновениях в космическом пространстве, то более хрупкие метеориты будут подвергаться более сильному дроблению.

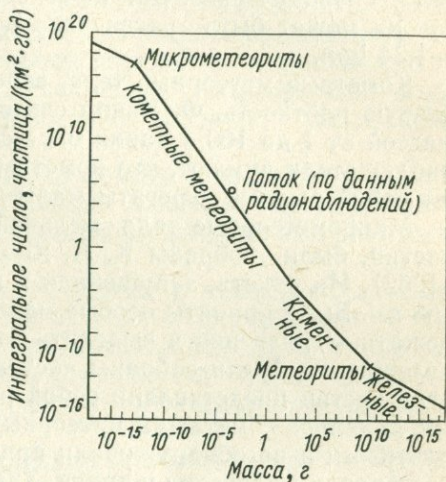


Рис. 13. Зависимость числа частиц внеземного происхождения от их массы (по Дж. Хокинсу)

Размеры частиц можно определить по их массам, если плотность известна. Средняя плотность железных метеоритов равна $7,8 \text{ г/см}^3$, а каменных — $3,4 \text{ г/см}^3$. Однако большая часть внеземного вещества, состоящая из тел с массой менее 100 г , по-видимому, выброшена из комет. По крайней мере 50% этих метеорных тел — спорадические. Они не связаны с метеорными роями, и поток их может быть рассчитан по уравнению $\lg N = +0,41 - 1,34 \lg m$.

Кометные метеорные тела, вероятно, хрупкие и имеют очень низкую плотность. Ф. Уиппл считает, что плотность таких тел с массой от 1 до 100 г равна $0,4 \text{ г/см}^3$. По этой причине многие наблюдатели думают, что кометные метеорные тела представляют собой рыхлые агрегаты малых частиц.

Микрометеорные тела, мельчайшие из изученных внеземных частиц, были собраны К. Л. Хеменгуэем и Р. К. Соbermanом (1962). Их ракета, запущенная в июне 1961 г., достигла высоты 168 км . Были приняты особые меры предосторожности, чтобы избежать загрязнения и выделить только частицы внеземного происхождения. Были собраны частицы трех типов. Некоторые из этих частиц представляли собой рыхлые агрегаты и, по-видимому, являлись кометными метеорными телами. Другие были более плотными и не обнаруживали признаков плавления. Третий тип составляли маленькие шарики. Таким образом, плотность частиц колеблется в широком интервале. Вводя поправку на вертикальное движение ракеты и предполагая, что средняя плотность равна 3 г/см^3 , можно получить следующее выражение для интегрального потока: $\lg N = 12,43 - 0,39 \lg m$. Это уравнение справедливо для частиц диаметром до $2,5 \text{ мкм}$, что соответствует массе 10^{-13} г . Это значит, что кометные метеорные тела существуют вплоть до масс порядка 10^{-13} г .

Был проведен анализ частиц методом нейтронной активации и при помощи рентгеновского микроанализа. Было установлено присутствие Al, Si, Fe, Ni, Ti, Ca, Mg и Cu, но относительное содержание их определить не удалось. Рентгеновский микроанализ частиц, собранных на ракете «Аэроб», запущенной в 1965 г. с полигона Уайт-Сэндс, показал, что частицы неправильной формы состоят преимущественно из Si и Ca, а округлые — в основном из S, K и Cl. У большинства метеорных тел при помощи электронографии не удалось обнаружить кристаллической структуры. Вероятно, они имеют микрокристаллическую природу. Когда такие частицы испаряли при помощи электронного пучка и вновь конденсировали, они давали дифракционную картину, которая соответствовала трем возможным кристаллическим структурам — аустенита, меди и тэнита (последний является составной частью крупных метеоритов).

Затруднения в оценках космических выпадений вызваны тем, что до сих пор ученые не имели в руках достаточного количества космической пыли в чистом виде. Имеется возможность изучать

только смеси, например лунный грунт, донные отложения земных океанов, твердые частицы, выпадающие с дождем или оседающие на ледниках.

В этих случаях задача заключается в том, чтобы определить долю космического материала в этих смесях.

Существуют так называемые химические методы. Эти методы заключаются в том, что изучается распределение элементов, заведомо отличающихся по распространенности в метеоритах и земных породах, в местных скоплениях атмосферной пыли (такими местами могут быть либо ледники, либо ложа океанов).

Оседание космической пыли на Землю происходит в различных районах земного шара с разной степенью интенсивности. Это зависит как от метеорологических глобальных закономерностей, так и сезонных факторов.

Космогенные нуклиды, образующиеся в атмосфере, а также поступившие в виде ядер из космического пространства в земную магнитосферу, выпадают преимущественно на 40-х широтах северного полушария. Оседание космической пыли, наоборот, как будто имеет тенденцию к росту с увеличением геомагнитной широты.

Следует отметить, что последнее заключение требует теоретического обоснования и тщательной экспериментальной проверки. Расчеты Р. А. Шмидта и Ф. Дж. Когена (1962) показывают, что магнитное поле Земли может вызвать увеличение концентрации в высоких широтах только заряженных частиц диаметром менее 0,01 мкм. Любопытно в связи с этим заметить, что глобальное выпадение продуктов ядерных испытаний на 40-х широтах почти на порядок превосходит размеры выпадений на более высоких широтах. Единственным морфологическим критерием оценки космогенности исследуемого материала является наличие оплавленных шариков, в том числе магнитных. Действительно, в снегах Антарктиды или во льдах Гренландии таких шариков относительно много, в то же время в океанических осадках их гораздо меньше. Но этот факт можно объяснить тем, что в снеге или льдах шарики сохраняются в их первозданном виде, в то время как до океанических осадков из их общего количества может дойти лишь небольшая часть. Как показали исследования автора, скорость вертикальной циркуляции водных масс составляет несколько тысяч лет. Если шарики малы по размерам, то время их пребывания в воде будет оцениваться сотнями и тысячами лет. А если они и опустятся в конце концов на дно, то под действием морской воды постепенно растворятся или, например, будут служить центрами кристаллизации марганцевых конкреций.

Вероятнее всего, изменения концентрации космической пыли на поверхности Земли связаны с общим характером циркуляции атмосферы. Не исключено, что определенные районы окажутся

относительно богатыми космической пылью, а другие обедненными.

Большинство исследователей, занимавшихся проблемами космической пыли на Земле, обращали внимание главным образом на черные магнитные шарики, причем предполагалось, что они являются продуктом абляции железных метеоритов.

Вторжение железных метеоритов в земную атмосферу — явление довольно редкое, причем, как показали изотопные исследования, их доатмосферная масса сравнима по порядку величины с выпадающей на Землю. Вряд ли это единственный источник огромного количества металлических шариков, выпадающих на Землю (10^4 — 10^5 т/год). По-видимому, основная масса шариков генерируется в атмосфере из мельчайших металлических пылинок, обладающих относительно небольшой орбитальной скоростью относительно Земли.

В связи с этим устоявшееся мнение о том, что космическая пыль есть продукт дробления астероидов, является сомнительным. Могут возразить, что все, что было раньше в газовой фазе, давно уже сконденсировалось. Возможно, это так, но поступление металлической фазы из астероидного кольца к центру эклиптики должно идти гораздо быстрее, чем силикатной. Поэтому происходит постоянное «отторжение» металлической фазы из пространства за пределами планет земной группы по направлению к Солнцу. А на пути к этому центру расположена гравитационная зона Земли.

Вторым фактором, свидетельствующим против механизма генерации космической пыли дроблением астероидов, является та же значительная доля металлической фазы. Вряд ли железные астероиды рассыпаются на мелкие осколки при своем столкновении.

Остается предполагать, что космическая пыль, которая поступает на Землю (по-видимому, и на другие планеты), представляет собой, во-первых, остатки первоначального протопланетного облака и комет и, лишь во-вторых, — продукт дробления астероидов. Существует мнение (Б. Ю. Левин и А. Н. Симоненко), что первоначальное мелкодисперсное вещество в Солнечной системе не сохранилось: «Оно распылилось во взаимных столкновениях, после чего световое давление вымело из Солнечной системы наиболее мелкие пылинки субмикронных размеров, а наиболее крупные осели на Солнце под действием эффекта Пойнтинга — Робертсона»¹.

¹ Эффект Пойнтинга — Робертсона заключается в уменьшении размеров орбит тел и частиц Солнечной системы в результате торможения последних, поскольку тела и частицы поглощают световую энергию, приходящую от Солнца, и, нагреваясь, излучают ее изотропно, т. е. во всех направлениях. Постоянное действие эффекта приводит к тому, что тела размером от 10 см до нескольких метров медленно приближаются к Солнцу, двигаясь по спиральным орбитам.

Однако эффект Пойнтинга — Робертсона для частичек микронных и субмикронных размеров окажется незначительным, поскольку эти частички будут увлекаться газом, выталкиваемым из пределов Солнечной системы давлением света, и чем дальше от Солнца, тем этот эффект становится меньше, и на периферии Солнечной системы он не будет сказываться даже на более крупных частицах. Об этом говорит, например, факт существования так называемого облака Оорта¹, населенного кометами, которые, как известно, сложены замерзшими жидкостями и газами. Чтобы это облако было уничтожено под действием эффекта Пойнтинга — Робертсона, светимость Солнца должна была бы на несколько порядков превышать сегодняшнюю. Однако даже самые смелые гипотезы (например, Г. Хаяши, 1962) предполагают увеличение светимости Солнца всего на два порядка и то лишь на заключительной стадии гравитационного сжатия, продолжавшейся не более 10^7 лет. Общее количество энергии, потерянной Солнцем на этой стадии в результате излучения, было не больше теряемого им за 10^9 лет.

Таким образом, вопрос о происхождении межпланетной (космической) пыли еще окончательно не решен. Мы рассмотрели несколько точек зрения. Если будет доказано, что количество космической пыли, поступающей на Землю, со временем не уменьшается (масштаб времени должен исчисляться миллионами и миллиардами лет), окажутся правы Б. Ю. Левин и А. Н. Симоненко, которые считают, что первоначальной пыли давно уже не осталось, а то, что попадает на Землю, — продукт дробления комет и астероидов. Действительно, пылевой материал должен где-то постоянно образовываться, и равновесие в скоростях образования и поступления его на Землю должно было бы давно наступить. А если в нем есть составляющая из первоначального облака, то мы должны фиксировать монотонное снижение скорости аккреции пыли Землей.

Мы рассмотрели космическую пыль в теоретическом плане. Далее расскажем о том, как ее находят на земной поверхности и изучают.

¹ Известный голландский астроном Я. Оорт выдвинул гипотезу, что большинство долгопериодических комет нашей планетной системы имеет сильно вытянутые орбиты с периодами от 70 лет и более с наибольшим удалением от Солнца на 30—100 тыс. а. е. На окраинах Солнечной системы, по Оорту, находится около 100 млрд. комет общей массой 0,1—1% массы Земли [по С. К. Всехсвятскому (1967), до 100 масс Земли]. Оценка числа комет очень груба и основана на том, что за 5 тыс. лет (первые наблюдения комет проводились в Китае за 3 тыс. лет до н. э.) их было немногим больше тысячи. Поскольку кометы проводят основную часть своего времени на наиболее далеких от Солнца участках орбиты, (по второму закону Кеплера, скорость движения по наиболее далекому от Солнца участку орбиты — наименьшая), то, утя, какие кометные орбиты встречаются чаще всего, Оорт рассчитал полное их число.

1. Океан и скорость поступления космического вещества на Землю

Человек не может грамотно использовать ресурсы Мирового океана без досконального знания его геохимии.

А. П. ВИНОГРАДОВ (из выступления в ИГФМ АН СССР на праздновании 250-летия АН СССР)

Мировой океан занимает $\frac{2}{3}$ поверхности Земли, и отложения на его дне, их характер и последовательность — это, с точки зрения глобальности эффекта, идеальный справочник по поздней истории Земли (по крайней мере последних 100—200 млн. лет).

Уже давно определение возраста донных отложений и скорости осадконакопления стало центральной проблемой океанологии.

В 1876 г. закончились исследования, проводимые в течение 3 лет на специальном океанографическом судне «Челленджер». Оно прошло 120 тыс. км. Ученые проделали 370 глубоководных промеров, 255 измерений температуры, 240 тралений, измеряли плотность воды; было открыто и описано более 1500 видов морских животных, и, наконец, впервые ученые забили в дно моря трубчатый лот и извлекли пробу грунта (керн) длиной 60 см.

Следует отметить, что материалы, собранные этой экспедицией, полностью до сих пор не обработаны. Но она положила начало новой эры в биологии и океанографии.

Гётеборгский профессор зоологии Г. Петтерссон, добывший несколько кернов из Неаполитанского залива, считал возможным определить год образования отдельных слоев вулканического пепла. Так, один из прослоев Петтерссон относил к 79 г. н. э. — времени большого извержения Везувия, когда погибли города Геркуланум и Помпея.

В керне, поднятом на «Челленджер», ученые нашли маленькие металлические шарики, часть которых по составу близка к железным метеоритам. Уже тогда предполагалось, что эти шарики представляют собой капельки, сорванные с метеоритов, раскаленных при трении о воздух. Сейчас-то мы знаем, что часть этих шариков — действительно, продукт абляции железных метеоритов. Петтерссон предположил, что число обнаруженных в керне космических шариков (а в 1 дм³ красной глины он нашел их около 20) может служить мерилем скорости осадконакопления. Действительно, такую задачу можно решить, если доказать, что в течение миллионов лет метеоритный дождь выпадал с равномерной интенсивностью. К сожалению, это предположение Петтерссона ускользнуло от внимания ученых, и до сих пор никто всерьез не заинтересовался подсчетом числа шариков в различных слоях глубоководных осадков, а также установлением справедливости основной предпосылки постоянства скорости аккреции космического вещества Землей хотя бы за последние несколько миллионов лет.

Какова же толщина осадков в океанах? Сколько лет потребовалось для их накопления и каков возраст самих океанов?

При помощи гидроакустических методов¹ геофизики установили, что в Атлантическом океане мощность рыхлых отложений колеблется от нескольких сот до 3000 м, за ними следует слой более крепких пород толщиной 2000 м, еще ниже — породы фундамента мощностью 4500 м. В Тихом и Индийском океанах мощность осадков не более 300 м. Однако мощность осадков в 3000 м вызывает сомнение. Действительно, если принять скорость отложения осадков равной 1 см за 2700 лет (т. е. 3,7 мм за 1000 лет), то указанная мощность образуется в Атлантике за 2100 млн. лет. А нам известно, что коренные породы фундамента Атлантики — не более ранние, чем палеозойские; их возраст редко превышает 150 млн. лет, а они лежат под наносами. Погрешность определения могла быть вызвана тем, что процесс осадконакопления не был равномерным, имели место оползни, перемещение грунта и пр., второй причиной, по-видимому, была неправильная оценка скорости осадконакопления.

Правильное решение этих вопросов автоматически ограничивает число гипотез о происхождении океанов.

Чтобы оценить скорость осадконакопления в океанах и морях, используют различные изотопные методы. С их помощью можно выяснить не только возраст определенного слоя осадка и скорость осадконакопления, но также оценить степень космогенности того или иного осадка или его составных частей.

Как уже говорилось в предыдущем разделе, на Землю постоянно выпадает огромное количество космического вещества в виде консолидированной материи (пыль, шарики, метеориты) и отдельных атомов элементов.

Распространенность некоторых элементов в космическом веществе резко отличается от распространенности в земной коре, поэтому по количеству этих элементов в исследуемом осадке можно судить о количестве выпадающего на Землю космического вещества. На этом основаны так называемые химические методы определения скорости аккреции космического вещества Землей. В океанах, в местах, достаточно далеко удаленных от областей сноса терригенного материала, осадки должны в значительной степени рекрутироваться из космической пыли.

В табл. 8 приведена скорость аккреции, определенная химическими методами по накоплению в океанических осадках тех элементов, которых явно больше в метеоритном веществе. За основу было взято содержание элементов в обыкновенных хондритах, а с 1964 г. — в углистых хондритах I типа. Предполагалось,

¹ Под водой взрывают специальные патроны. Гидрофоны, подвешенные на буйках на глубине 50 м от поверхности, улавливают отраженную звуковую волну. Мощность отложений высчитывают по запаздыванию второго сигнала, проникающего сквозь толщу наносов и отраженного от коренных пород.

Скорость аккреции космического вещества Землей по данным химических и изотопных анализов

Источник материала	Реперный элемент или нуклид	Скорость аккреции, т/год	Автор, год
Глубоководные осадки	Ni	$4 \cdot 10^5$	Г. Петтерссон, Г. Роши, 1950
Глубоководные илы (Тихий океан)	Ni	$3 \cdot 10^6$	Г. Петтерссон, Г. Роши, 1952
Воздушные пробы	Ni	$1,4 \cdot 10^7$	Г. Петтерссон, 1958
» »	Ni	$2 \cdot 10^8$	Г. Петтерссон, 1958
Атмосферные выпадения (Турция)	Fe	$3,1 \cdot 10^6$	Э. А. Крайкен, 1959
Приземные слои воздуха (Гавайские острова)	Ni	$5 \cdot 10^6$	Г. Петтерссон, 1960
Атмосфера (на высоте 12 км)	Ni	$3 \cdot 10^4$	Э. Л. Файерман, Дж. А. Кистнер, 1961
Снеговые отложения (Антарктида)	Ni	$(3,7-10) \cdot 10^6$	Дж. Брокас, Е. Пиччиотто, 1963
Атмосферные выпадения, (Франция), магнитная фракция	Ni	$2,4 \cdot 10^9$	Г. Гржебайн, 1964
Глубоководные глины (Тихий океан)	Ir	$(6-10) \cdot 10^4$	Дж. Л. Баркер, Э. Андерс, 1964
То же	Os	$5 \cdot 10^4$	Те же
Глубоководные глины (Тихий и Атлантический океаны)	^3He	$3,7 \cdot 10^4$	О. А. Шеффер, Дж. Лигро, С. О. Томсон, 1964
То же	^{36}Cl	$3,7 \cdot 10^5$	О. А. Шеффер, Дж. Лигро, С. О. Томсон, 1964
Океанические отложения	^{14}C	$3,7 \cdot 10^8$	В. И. Саккет, 1964
Красные глины (Тихий океан)	Инертные газы	$2,5 \cdot 10^6$	К. М. Мерихью, 1964
То же	То же	$2 \cdot 10^6$	О. А. Шеффер и др., 1964
» »	Ni	$4 \cdot 10^7$	Ф. Т. Беннер, А. С. Лауренс, 1965
Стратосферная пыль	Fe	$1 \cdot 10^5$	Дж. П. Шедловский, С. Пайслей, 1966
Пробы с фильтров, установленных на самолетах	Fe	10^5	Дж. П. Шедловский, 1966
Тихоокеанские осадки и гренландская пыль	$^{36}\text{Ar} + ^{38}\text{Ar}$	$2,6 \cdot 10^6$	Д. Тиллес, 1966
Гренландская пыль	^{36}Cl	10^6	Д. Тиллес, 1966
Глубоководные осадки	^{26}Al	$4 \cdot 10^6$	Д. Лал, 1966
» »	^{26}Al	$5 \cdot 10^5$	В. С. Ванкатаварадан, Дж. Т. Вэссон, 1967
Гренландский лед	^{26}Al	$3,2 \cdot 10^6$	Р. Х. Маккоркэлл, 1967
Снеговые отложения (Гренландия)	Fe	$3,0 \cdot 10^6$	Р. Х. Маккоркэлл, Э. Л. Файерман, К. К. Лангвей, 1967
То же	Ni	$1,0 \cdot 10^6$	Те же
» »	Co	$0,7 \cdot 10^6$	» »

Источник материала	Реперный элемент или нуклид	Скорость аккреции, $t/год$	Автор, год
Антарктический лед	Ni	$(3-10) \cdot 10^6$	Дж. Брокас, Е. Пиччиотто, 1967
Глубоководные осадки	Os, Ir	$(1-0,5) \cdot 10^5$	Дж. Л. Баркер, Э. Андерс, 1968
Снег (Гренландия)	Fe, Ni	$1,6 \cdot 10^6$	Р. Х. Маккоркэлл, 1968
Океанические отложения	^{26}Al	$(9-90) \cdot 10^4$	С. Ф. Сингер, 1968
Красные глины (Тихий океан)	Ir	$1 \cdot 10^5$	Дж. Л. Баркер, Э. Андерс, 1968
То же	Ir	$8 \cdot 10^4$	То же
» »	Ir	$6 \cdot 10^4$	» »
» »	Os	$5 \cdot 10^4$	» »
Гренландский лед	$^{26}Al/^{10}Be$	$3,6 \cdot 10^5$	Я. Якаяма, 1968
Красные глины (Тихий океан)	Os	$1,3 \cdot 10^7$	Э. В. Собонович и др., 1974
То же	^{14}C	$1,5 \cdot 10^9$	То же
Ледники (Кавказ)	Os	$1,0 \cdot 10^6$	» »
» »	^{14}C	$3,5 \cdot 10^8$	» »

что последние представляют собой первоначальное протопланетное вещество.

Первыми исследователями скорости аккреции с помощью химических методов были Г. Петтерссон и Г. Роши. В 1950 г. они определили содержание никеля в тихоокеанской глине и предположили, что 29% никеля относится к терригенному материалу (если содержание никеля в нем равно 0,012%). При этом они рассчитали, что скорость аккреции равна $1,4 \cdot 10^6 t/год$. Если принять, что в углистых хондритах содержание никеля составляет 1,03%, то скорость аккреции составит 3 млн. $t/год$.

Распространенность иридия и осмия в земных горных породах на 2—3 порядка меньше, чем в метеоритах, поэтому она может служить очень чувствительным индикатором степени космогенности исследуемого вещества. Наличие этих элементов в океанических осадках однозначно указывает на то, что неорганическая составляющая слагается в значительной степени из материала, падающего на Землю из космоса. Т. И. Коромысличенко определяла содержание осмия в красных тихоокеанских глинах. Было сделано 5 анализов проб из одного керна: среднее содержание осмия в нем оказалось равным $1,07 \cdot 10^{-8} g/g$. Степень космогенности красных глин равна 1% при средней космической распространенности осмия $5,6 \cdot 10^{-7} g/g$ и фоновом количестве осмия, равном его земной распространенности.

Зная скорость осадконакопления, можно определить количество космического вещества, поступающего на Землю. В боль-

шинстве глубоководных океанических котловин, наиболее удаленных от источников поступления терригенного материала и расположенных в области низкой биологической продуктивности вод, значения скорости отложения красных глин, определенные разными методами, колеблются в пределах 0,2—2 мм за 1000 лет. Для наших расчетов примем среднюю скорость осадкообразования — 1 мм за 1000 лет. Тогда на всю земную поверхность выпадает $10^{-4} \text{ см/год} \cdot 5,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^2 \cdot 2,5 \text{ г/см}^3 = 12,75 \cdot 10^{14} \text{ г/год} = 1,27 \cdot 10^9 \text{ т/год}$ различных взвесей.

Доля космических компонентов во всей выпадающей на поверхность Земли пыли составляет 1%: это значит, что в год на Землю поступает $1,27 \cdot 10^7 \text{ т}$ космического вещества.

В табл. 8 приведены эти и все известные по состоянию на 1974 г. данные по скорости аккреции, полученные на основании изучения самых различных объектов химическими и изотопными методами, т. е. методами, которые дают суммарные величины поступления космического вещества безотносительно к его физико-химическим, морфологическим, объемным и другим характеристикам.

В дальнейшем мы не раз будем обращаться к этой таблице.

Дж. Брокас и Е. Пиччиотто в 1967 г. определили содержание никеля в антарктическом льде и нашли, что отношение натрия к никелю в нем равнялось примерно 2, что почти в 100 раз меньше, чем в базальтах или изверженных породах. Это обогащение никелем указывает на значительную долю космического материала. Правда, при последующих исследованиях были получены более высокие значения натрий-никелевого отношения; скорость аккреции, по этим данным, равна $(1-2) \cdot 10^6 \text{ т/год}$. Это значение увеличится, если учесть, что за счет атмосферной циркуляции в средних широтах выпадений примерно в 3 раза больше.

Удобным критерием оценки космогенности атмосферной пыли, осаждающейся на ледниках или скапливающейся в глубоководных осадках, являются радиоактивные нуклиды ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al . Конечно, мы должны при этом учитывать, что основная масса ^{14}C , значительная доля ^{10}Be и заметная часть ^{26}Al образуются в верхних слоях атмосферы при ее взаимодействии с космическим излучением. Форма нахождения этих нуклидов в исследуемых материалах на поверхности Земли, таким образом, имеет двойную природу.

Подпадающее количество ^{14}C вступает в кругооборот углерода и попадает в осадки вместе с органическим или карбонатсодержащим веществом. Образующиеся в атмосфере ^{10}Be и ^{26}Al , по видимому, должны адсорбироваться на аэрозолях, затем на гидроксиях или взвесах.

Нуклиды ^{10}Be , ^{14}C и ^{26}Al , образующиеся по реакциям скалывания космической пыли, должны оставаться внутри кристаллической решетки силикатной или металлической фазы космических пылинок.

Поскольку известно, что формы нахождения космогенных нуклидов в земных материалах в разной степени устойчивы к воздействию внешних агентов, то, подобрав соответствующие условия, их можно разделить, и, опираясь на нуклиды, которые находятся внутри кристалликов, оценить долю вещества космического происхождения в донных осадках, ледниковых взвезях, атмосферной пыли. При этом, естественно, необходимо учитывать отношения скоростей образования исследуемых космогенных нуклидов, например $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$. Избыток наблюдаемого отношения по сравнению с рассчитанным для атмосферы можно объяснить выпадением ^{26}Al вместе с космической пылью. Используя именно такой метод, Я. Якаяма в 1968 г. по ^{10}Be нашел для силикатных частиц скорость седиментации в Тихом океане от 0,3 до 0,4 мм за 1000 лет. Верхний предел скорости осаждения силикатного материала на гренландский лед, определенный по ^{26}Al им же, примерно тот же или немного больше. По этим данным, скорость аккреции космических пылинков размером от 1 до 500 мкм находится в пределах 100—1000 т/сутки, т. е. не более 0,36 млн. т/год.

Э. Андерс с сотрудниками в 1973 г. на основании данных анализа лунного грунта, доставленного «Аполлоном — 11, 12, 15», а также «Луной-16», нашли, что выпадение космического материала на лунную поверхность составляет 24 г/(км²·год)*. Оценка проводилась путем определения сидерофильных (Ir, Re, Au, Ni) и летучих (Sb, Ge, Br, Bi) элементов. Эти элементы распространены в метеоритах, но должны быть редкими для поверхностных лунных пород. Это различие обусловлено тем, что сидерофильные элементы концентрируются в металлической фазе, и в процессе формирования планет поверхностные породы оказываются обедненными этими элементами. Так, для Земли этот фактор составляет около 10⁻⁴.

Мы упомянули о некоторых нуклидах, используемых для оценки плотности выпадения космической пыли на Землю, но этот перечень далеко не полон. Например, степень космогенности глубоководных океанических осадков А. Я. Крылов и др. (1973) пытались определять по измерению заключенных в них изотопов ^3He и ^4He . Отношения этих изотопов резко различаются в разных природных образованиях (табл. 9). Как видим, вариации отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ весьма значительны.

Чем же вызываются эти вариации? Очевидно, различиями в происхождении этих изотопов гелия. На Земле ^4He есть продукт радиоактивных превращений урановых и ториевого радиоактивных семейств, а ^3He — главным образом, остаток первоначально гелия, вошедшего в Землю вместе со слагавшим ее веществом,

* На земную поверхность выпадает космических пылинок на 1—2 порядка больше. Действительно, если принять, что на всю поверхность Земли (5,1·10⁸ км²) выпадает 1 млн. т (10¹²г) космического вещества в год, то на 1 км² приходится 200 г/год.

Отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в различных природных образованиях

Космический объект	${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$	Земной объект	${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$
Железные метеориты	10^{-1}	Нижние слои атмосферы	10^{-4} — 10^{-6}
Железо-каменные метеориты	10^{-2}	Породы земной коры	10^{-7} — 10^{-8}
Каменные метеориты	10^{-1}	Радиоактивные минералы	10^{-9} — 10^{-10}
Лунные породы	10^{-4}	Вулканические газы	10^{-5} — 10^{-6}
	10^{-5}	Глубоководные океанические красные глины	$1,4 \cdot 10^{-5}$ — $6,0 \cdot 10^{-8}$
	10^{-6}		

и в некоторой степени продукт ядерных реакций, например, в литиевых минералах под действием α -излучения присутствующих радиоактивных элементов. Поскольку происходит постепенная дегазация мантии, то в атмосферу все время поступает гелий с повышенным отношением ${}^3\text{He}$ по сравнению с тем, который находится в породах земной коры (где много ${}^4\text{He}$, образовавшегося в результате радиоактивного распада). Поэтому понятно, почему в вулканических газах (см. табл. 9) относительно много ${}^3\text{He}$ (как и в лунных породах).

Отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в пробах Тихого океана равно 10^{-5} , что в десятки раз выше, чем это наблюдается в различных породах земной коры. Для красных глин Атлантического океана также отмечается повышенное отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ [$(2-3) \cdot 10^{-6}$], но оно на порядок ниже, чем в поверхностных пробах осадков Тихого океана. Для алевроито-пелитовых и песчаных илов Северной Атлантики отношение изотопов гелия равно 10^{-7} — 10^{-8} , т. е. такое же, как в наиболее распространенных породах земной коры.

Такое распределение отношений ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в океанических осадках можно объяснить присутствием в глубоководных красных глинах гипотетического «мантийного» ${}^3\text{He}$ или обогащением илов ${}^3\text{He}$ за счет космической пыли. И в этом, и в другом случае глубоководные части Тихого океана оказываются наиболее благоприятными зонами. А. Я. Крылов, Ю. И. Силин и Т. И. Мазина (1974) считают, что повышенное количество ${}^3\text{He}$ в илах объясняется присутствием в них космической (метеоритной) пыли.

Однако точно рассчитать степень космогенности по отношению ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ весьма трудно, как и по другим изотопам, поскольку мы не знаем его для космической пыли. По-видимому, эта добавка будет исчисляться процентами в наиболее благоприятных местах океанического дна, где доля терригенного материала относительно невелика. Конечно, во внутренних морях или в зоне

шельфа космогенное вещество маскируется материалом, сносимым с материков, и там его количество будет составлять сотые, тысячные, а то и миллионные доли процента.

В связи с этим первостепенное значение приобретает изучение скорости осадконакопления в морях и океанах. Эта задача, конечно, имеет и большое самостоятельное значение. Для океанологии, морской геологии и для ряда прикладных наук, вплоть до морского строительства или добычи полезных ископаемых, очень важно иметь карты мощности осадков и скоростей их накопления. Нет нужды говорить о том, что данные по скорости осадконакопления в морях и океанах могут быть использованы для установления закономерностей накопления целого ряда рудных элементов, для оценки количества привносимого космического материала и его значения для формирования различных образований на океаническом дне. Как это делается, мы покажем на примере радиоуглеродного датирования.

Радиоуглеродный метод исследования океанических и морских отложений дает важную информацию о скорости осадконакопления и ее изменении во времени, а также о степени космогенности донных осадков. Знание первого обстоятельства имеет большое значение при реконструкциях геологической, географической и геохимической обстановки за последние 40—50 тыс. лет, а второго — для оценки скорости поступления космической пыли на Землю за тот же период времени.

Рассмотрим первый аспект использования радиоуглеродного метода. Основные предпосылки использования радиоуглеродного метода следующие. Под действием космического излучения в атмосфере постоянно образуются радиоактивные атомы углерода ^{14}C со скоростью примерно 2 атом/(см².сек) из атомов азота ^{14}N при захвате ими вторичных нейтронов. Возникшие атомы радиоуглерода окисляются в течение нескольких часов до $^{14}\text{CO}_2$ и включаются в углеродный обмен. Поскольку перемешивание воздуха происходит довольно быстро, концентрация в атмосфере $^{14}\text{CO}_2$ остается практически постоянной, чего нельзя сказать о морской воде, где это перемешивание растягивается иногда на тысячелетия.

Так, автором совместно с Г. Н. Бондаренко и Н. Н. Ковалюхом было установлено, что кажущийся возраст морской воды на глубине 1500—2000 м составляет в Лионском заливе Средиземного моря 500—600 лет, а в Черном море 2700—3000 лет. В то же время в атмосфере равновесие устанавливается, по данным различных исследователей, в течение 4—5 лет.

Таким образом, между атмосферой и гидросферой относительно углекислоты устанавливается подвижное равновесие. В воде углекислота находится главным образом в виде угольной кислоты, бикарбонатов и карбонатов. Животные и растительные организмы усваивают карбонатные соли, а после их гибели поглощенный ими карбонат исключается из углеродного обмена. С этого

момента в остатках организмов происходит уменьшение удельной активности углерода в соответствии с периодом полураспада ^{14}C (5570 лет). Измеряя активность (удельную) углерода в донных осадках по длине керна, можно определить возраст тех или иных стратифицированных горизонтов, а также оценить скорость осадконакопления как в настоящее время, так и в давно прошедшее время.

Любой донный осадок содержит углерод главным образом в виде продуктов разложения растительных и животных организмов. Таким образом, удельное количество углерода прямо пропорционально продуктивности вышележащей толщи морской воды и обратно пропорционально количеству терригенного материала, поступающего с континентов.

Результаты исследований радиоуглеродного возраста и скорости осадконакопления в Тихом океане приведены в табл. 10. Материал был собран во время четвертого рейса научно-исследовательского судна «Академик Вернадский» в западной акватории Тихого океана Э. Жовинским с глубин от 2750 до 5250 м. Почти на всех станциях были подняты фораминиферовые илы и лишь на станции № 274, расположенной в восточной части Центральной тихоокеанской плиты у поднятия Лайн-Туамоту, был извлечен радиоляриевофораминиферовый ил.

Фораминиферовые илы представлены преимущественно раковинками планктонных фораминифер и их обломками. В незначительном количестве они содержат также раковинки и обломки других организмов, пелитаморфный кальцит, обломки вулканического стекла, пемзы, глинистые минералы и единичные зерна терригенных минералов — гематита, пироксена, магнетита и др. Общее содержание карбонатов в фораминиферовых илах 73—98%. Почти во всех случаях в них преобладает фракция менее 0,01 мм.

Как видно из табл. 10, донные осадки поверхностной части океанического дна имеют возраст от 1660 лет (Меланезийская плита) до 16 700 лет (Центральная тихоокеанская плита). Скорость накопления карбонатных пелагических осадков колеблется от 5 до 8,8 мм за 1000 лет.

Обширный комплекс морских геологических исследований, проведенных Институтом геохимии и физики минералов АН УССР в последние годы, позволяет уточнить современные представления о скорости осадконакопления в Азовском море в настоящее время, а также в некоторые моменты его позднечетвертичной истории на основе результатов донных бурений и последующего определения радиоуглеродным методом абсолютно возраста донных осадков и подстилающих отложений. Для анализа профессором Е. Ф. Шнюковым с сотрудниками были отобраны образцы из скважин вдоль северных берегов Азовского моря, удаленных от береговой линии на 5—10 км и из скважины, пробуренной на одной из Арабатских банок в западной части

Скорость накопления осадков в центральной части Тихого океана
(судно «Академик Вернадский»)

Номер станции	Местоположение	Осадки	Глубина, см	Интервал отбора проб, см	Средний возраст, лет	Скорость осадконакопления, мм/1000 лет
274	Центральная тихоокеанская плита	Ил радиоляриево-фораминиферовый	5250	0—4	16 700	5,0
306	Меланезийская плита	Ил фораминиферовый	4475	4—6,5	23 150	
312	»	То же	4155	12—14	18 900	5,2
				0—1,5	22 750	
325	Поднятие Капингамаранги	»	2750	1,5—2,0	1 660	8,8
				0—5	2 800	
				5—10	12 600	5,7

моря, примерно в 20 км от берега. Скважинами были пройдены современные илы, древнечерноморские, новоэвксинские, карангатские и древнеэвксинские слои.

В табл. 11 приведены радиоуглеродные даты для осадков, поднятых с различных глубин и из разных районов Азовского и Черного морей. Судя по этим данным, скорость осадконакопления в различных районах Азовского моря колеблется в значительных пределах. Так, в районе Белосарайской косы скорость осадконакопления (серые илы) составляет в верхней части современного осадочного чехла (скв. 36, интервал 2,0—2,3 м) в среднем 0,91 мм в год, а в пределах всей толщи илов — 0,82 мм в год, что указывает на фактическое сохранение темпа осадконакопления в этом районе в пределах довольно длительного времени. Скорость осадконакопления в Обиточном заливе (скв. 37) колеблется от 0,18 до 0,32 мм/год в карангатское время, достигает 1,83 мм/год в древнеазовское при значительном снижении темпа осадконакопления за последние столетия. В районе Арабатских банок (скв. 40) скорость накопления современных илов составляет 0,32 мм/год, а толщи илов мощностью 3 м — 1,04 мм/год. Эти данные свидетельствуют о снижении темпов осадконакопления в современном Азовском море по сравнению с палеобасейном.

Полученные для четвертичных отложений значения возраста по радиоуглероду позволяют определить скорость осадконакопления не только в современном Азовском море, но и в четвертичном палеобасейне, существовавшем в новоэвксинском и карангатском водоемах.

Рассмотрим скорость аккреции космического вещества Земли. Как мы уже видели, разброс ее значений, по данным разных

Скорость осадконакопления в Азово-Черноморском бассейне

Местонахождение	Номер скважины	Глубина отбора проб, м	Возраст по ^{14}C , лет	Скорость осадконакопления, мм/год
Арабатская стрелка, Азовское море	38	17,9—21,3	$35\,750 \pm 1\,800$	$0,55 \pm 0,02$
	38	17,9—21,3	$36\,900 \pm 1\,850$	$0,53 \pm 0,02$
	38	12,8—17,9	$29\,660 \pm 1\,200$	$0,52 \pm 0,02$
	38	12,8—17,9	$30\,800 \pm 12\,500$	$0,50 \pm 0,015$
	38	8,0 \pm 12,8	$27\,390 \pm 1\,100$	$0,37 \pm 0,02$
Арабатские банки, Азовское море	40	0,0—0,2	308 ± 90	$0,32 \pm 0,09$
	40	3,0—3,1	$3\,145 \pm 150$	$1,04 \pm 0,09$
	40	9,0 \pm 9,2	$14\,020 \pm 95$	$0,56 \pm 0,01$
Белосарайская коса, Азовское море	36	2,0 \pm 2,3	$2\,360 \pm 95$	$0,91 \pm 0,04$
	36	2,0 \pm 2,3	$10\,320 \pm 100$	$0,83 \pm 0,02$
	36	11,9 \pm 12,2	$15\,670 \pm 120$	$0,65 \pm 0,04$
	36	11,9 \pm 12,2	$15\,670 \pm 120$	$0,65 \pm 0,04$
Обиточный залив, Азовское море	37	0,2 \pm 0,4	690 ± 100	$0,43 \pm 0,33$
	37	2,7 \pm 3,4	$2\,755 \pm 90$	$1,83 \pm 0,12$
	37	6,1 \pm 6,2	$20\,420 \pm 120$	$0,18 \pm 0,02$
	37	7,5 \pm 7,7	$25\,100 \pm 105$	$0,32 \pm 0,02$
Бухта Ярылгач, Черное море	6	4,0	$29\,400 \pm 200$	$0,14 \pm 0,01$
Поднятие Галицина, Черное море	2	2,3	$12\,050 \pm 470$	$0,19 \pm 0,01$
	2	2,3	$12\,360 \pm 500$	$0,18 \pm 0,01$
	1	2,0	$10\,200 \pm 450$	$0,20 \pm 0,01$

авторов, весьма значителен (см. табл. 8). По-видимому, изотопные методы можно считать наиболее надежными. Однако и тут встречаются большие трудности. Действительно, количество образующихся космогенных нуклидов будет зависеть от размеров метеорных тел и их прядестории. Большинство космогенных нуклидов образуется при облучении метеорных тел, движущихся в межпланетном пространстве, высокоэнергетичными протонами с энергией 10—100 Мэв. Глубина проникновения протонов с энергией 10 Мэв в силикатный материал примерно 500 мкм. При этом образуются, например, ^3H , ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al на ядрах ^{26}Mo , ^{27}Al , ^{28}Si .

Не говоря о самом долгоживущем из приведенных нуклидов ^{10}Be ($T=2,5 \cdot 10^6$ лет), даже для ^{26}Al ($T=7,4 \cdot 10^5$ лет) максимальный уровень наведенной радиоактивности в веществе хондритного состава будет достигнут лишь за 1 млн. лет. Но так долго «живут» лишь крупные частицы — размером более 1 см (Уипл, 1967): ни в более мелкой, ни в более крупной составляющей космической пыли насыщение не достигается, поэтому по ^{26}Al (а тем бо-

лее по ^{10}Be) мы всегда будем получать заниженные значения скорости аккреции. В этом отношении целесообразнее использовать ^{36}Cl ($T=3 \cdot 10^5$ лет), который образуется из ^{40}Ca или из изотопов железа. А еще лучше использовать ^{14}C ($T=5570$ лет), относительно которого будет насыщена довольно мелкая пыль даже микронного размера.

К сожалению, мы не располагаем данными об образовании космогенных нуклидов в частицах различного размера. Эти данные имеются только для метеоритов, но метеориты при полете через атмосферу теряют почти весь поверхностный слой, и принятие оставшейся части в качестве образца для сравнения относительно, например, красных глин неминуемо приведет к завышению оценок скорости аккреции космического вещества Землей.

2. Шарики космического происхождения

Задача астрономии — сдать Землю геологам.
В. Г. ФЕСЕНКОВ (из выступления в Институте геологических наук АН УССР)

Мы уже упоминали о том, что в течение последнего столетия ученые находили загадочные шарики микронного и даже миллиметрового размера в самых различных осадочных породах. Эти шарики бывают силикатные и металлические. В 1884 г. Дж. Муррей и А. Ренард впервые выполнили химический анализ магнитных шариков, извлеченных из глубоководных океанических глин, поднятых «Челленджером». Шарики заинтересовали ученых, их стали искать, собирать и анализировать. Шарики собирали различными способами: например, улавливали пыль с помощью установленных на поверхности земли (лучше на высотах, в горной местности) открытых лотков, дно которых было покрыто слоем этиленгликоля толщиной в несколько миллиметров; топили гренландский лед и фильтровали большие объемы воды через бумажные фильтры; добывали из почвы, из океанических отложений.

Методика обычно состояла в отборе проб отложений с известным возрастом и местоположением, в выделении находящихся в пробе магнитных шариков и в изучении природы и концентрации этих шариков. Результаты одного такого исследования были описаны В. А. Кассиди (1964). Шарики были получены из океанических отложений значительно ниже современного дна океана, так что можно было считать, что современное промышленное загрязнение их не коснулось. Шарики были проанализированы без нарушения их структуры методом нейтронной активации, и результаты были сопоставлены с результатами анализа частиц трех других типов: а) частиц, собранных в планктонных сетях; б) частиц сажи и дыма, по-видимому, «летающего пепла»; в) шариков, образующихся при сварке металлов. Главной целью это-

го исследования было установить различия между естественными и искусственными шариками. Второй целью было выяснить, можно ли получить данные о составе естественных шариков методом нейтронной активации, не разрушая самих шариков. Результаты исследования показали, что естественные шарики можно отличить от искусственных шариков некоторых типов, кроме железных.

Даже если естественное происхождение собранных шариков установлено, следует рассмотреть возможность того, что они могут быть вулканического, а не внеземного происхождения. Эта возможность обсуждалась в ряде работ Ф. Е. Райта и П. В. Ходжа (1964—1965). Они нашли, что при извержениях вулканов различного типа образуются магнитные шарики размером 10—100 мкм. Однако состав таких частиц (как от древних, так и от недавних извержений) обычно заметно отличается от состава частиц предположительно внеземного происхождения, найденных в отложениях полярных льдов. Кроме того, они нашли, что отношение числа шариков к числу частиц неправильной формы для вулканической пыли заметно отличается от такого же отношения для частиц из ледовых отложений.

В процессе геологических исследований донных осадков южной части Норвежского моря на научно-исследовательском судне «Михаил Ломоносов», совершавшем в 1965 г. свой 18-й рейс (станция 1423 расположена в Норвежском желобе в 300 км к северо-западу от Бергена), с глубины 270 м дночерпателем «Океан-50» был поднят желтовато-серый фораминиферовый ил. Еще в судовых лабораториях он подвергся исследованию на содержание в нем микрофауны, предварительному изучению минералогического состава, физико-механических свойств, геохимических констант и др. В Институте геохимии и физики минералов АН УССР К. Н. Алексеева изучила эту пробу более детально и нашла в ней кроме раковин различных микроорганизмов и обломков вулканогенных пород металлические шарики размером 1—2 мм в диаметре. Всего было найдено 24 шарика на площади 2500 см² (примерно 1 шарик на 100 см² площади дна). Плотность шариков, их магнитные свойства, содержание никеля и кобальта, морфологические особенности заставляют предполагать их космическую природу.

Сведения о природе и механизме образования шариков внеземного происхождения были получены при исследованиях рассеянного метеоритного вещества из районов падений крупных метеоритов. Примером является Сихотэ-Алиньский железный метеорит, исследованный Е. Л. Криновым (1964). Метеоритный дождь образовался в результате разрушения первоначально единого метеоритного тела при прохождении его через атмосферу. Большинство мелких частиц имело угловатую неправильную форму. Небольшую часть составляли сферические или почти сферические частицы. Очень немногие магнитные частицы были

полностью покрыты корой плавления, однако большая часть шариков имела гладкую поверхность. Диаметр шариков составлял от 4 мкм до 0,7 мм. Некоторые шарики были пустотелыми или пористыми, многие покрыты бороздками. Отдельные частицы по форме напоминали капельки (имели грубоовальную форму и острый хвостик); другие были похожи на пустотелые колбочки сферoidalной формы с вытянутыми бороздчатыми шейками.

Первые наблюдения за атмосферной пылью с конца 20-х — начала 30-х годов XX в. проводились преимущественно в районах развития пылевых бурь. В изучении вещественного состава атмосферной пыли огромную (хотя и не вполне осознанную) роль сыграли геологи, отстаивающие эоловую гипотезу образования лессов. В атмосферной пыли были определены кварц, полевые шпаты, кальцит, биотит, мусковит, гидробиотит, гидромусковит, каолинит, монтмориллонит и смешанослойные образования.

Электронно-микроскопический анализ атмосферной пыли, принесенной пылевой бурей 1967 г., позволил установить, что по своим размерам и морфологии частиц минералы, слагающие вещество атмосферной пыли, не отличаются от подобных им минералов лессов, лессовидных пород и почв. Да иначе не могло и быть, поскольку во время пылевой бури в основном выдувались находящиеся на дневной поверхности почвы, лессы и лессовидные суглинки. Огромное количество минералов и обломков пород, переносимых ураганскими ветрами во время пылевых бурь, стимулировало проявления космического компонента в атмосферной пыли. Поэтому для изучения космической составляющей необходимо исследовать атмосферную пыль в обычных условиях. Такие работы проводились американскими учеными на острове Барбадос. В течение 4 лет нейлоновой сетью, установленной на самой высокой вершине острова, улавливали аэрозоль морской атмосферы. Сеть была сплетена из нейлонового волокна диаметром 0,3 мм и имела 50% открытой поверхности. Несколько раз в день сеть омывалась водой. Определяли гранулометрический состав и массу частиц сухого пылевого остатка, а по рентгеновским дифрактограммам и оптическими методами — их минералогию. Преобладающим минералом атмосферной пыли был кварц. Он имел форму прозрачных крупинок в основном размером до 0,2 мм, однако встречались зерна и до 2 мм. Значительной была примесь силикатов — каолинита, хлорита, мусковита (определенных рентгеновскими методами). Найдено было также большое число свежих стекловатых осколков, небольшое количество известняка органического происхождения и мельчайшие частицы циркона и апатита. Было установлено, что пыль над океаном переносится в главном потоке на высоте 3—4 км.

Для изучения вещественного состава атмосферной пыли автором совместно с М. И. Жилкиной и С. И. Рыбалко использовались образцы дождевой воды, отобранные в различное время года под Ленинградом.

В результате исследований установлено, что шарики, находящиеся в атмосферных осадках, по своему составу и распределению элементов неоднородны. Были выделены: 1) шарики, состоящие из железа; 2) полые железные шарики; 3) железо-марганцевые шарики (50% Fe и 27% Mn); 4) железные шарики с кристаллом в центре; 5) железо-никелевые шарики (84% Fe, 11% Ni,

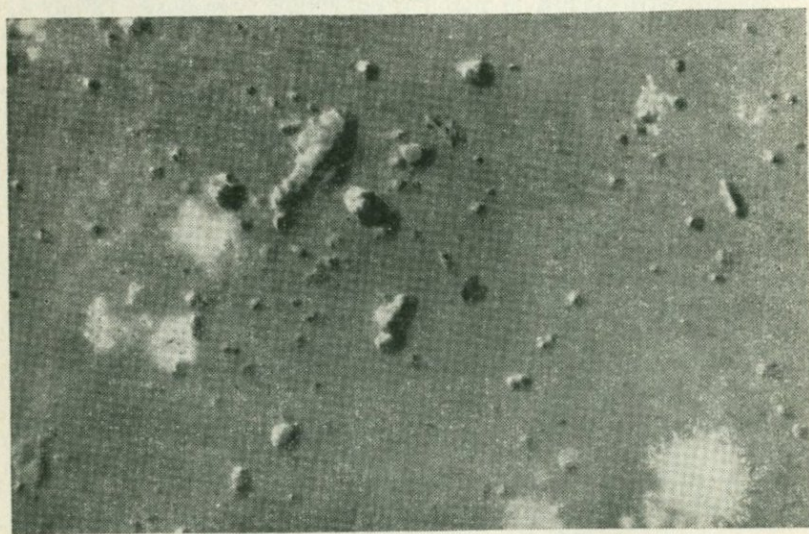
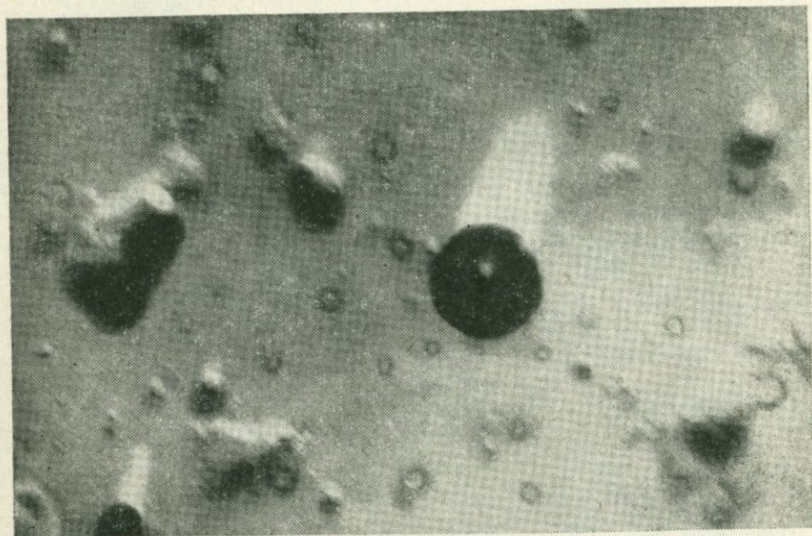


Рис. 14. Сферические (магнетитовые) частицы в атмосферных осадках (увел. 20000)

3% Мп) сложного строения (они имели кальциевую оболочку); 6) железо-марганцевые шарики, включающие в себя более мелкие из чистого железа (рис. 14).

Исследования Н. В. Васильева с сотрудниками в 1973 г. проб торфа в окрестностях одного из городов и вдали от источников промышленных загрязнений, на севере Томской области свидетельствуют о том, что вблизи промышленных центров наблюдается огромное загрязнение верхних слоев торфа сферическими частицами как металлическими, так и силикатными. Сферулы весьма разнообразны по цвету, форме поверхности, структуре. Большая часть их имеет силикатный состав. Авторы убеждены в промышленном происхождении этой пыли. В подповерхностных слоях (начиная с глубины 18—21 см) содержание шариков резко уменьшается. На глубине 35—40 см число шариков не превышает единиц или нескольких десятков на 1 дм². Спад кривой происходит плавно, без вторичных возмущений (рис. 15). Результаты этих экспериментов, проведенных на четырех колонках, показывают, что подавляющее большинство сферических частиц, находящихся в воздухе в настоящее время, имеет промышленное происхождение. Это требует соблюдения правил стерильности при поисках космических сферул в природных объектах.

Эти выводы были подтверждены в ходе изучения колонок, взятых на севере Томской области. И здесь наиболее богатыми сферическими оплавленными частицами оказались верхние слои, хотя число частиц в них значительно меньше, чем в окрестностях Томска. Как и в предыдущем случае, имеет место резкое уменьшение числа частиц по мере углубления в торфяную залежь, и отсутствуют какие-либо вторичные возмущения, которые бы формировали дополнительные максимумы.

Анализ первых колонок, взятых в районе тунгусского падения, показал, что распределение шариков в них существенно отличается от наблюдаемого в Томской области. В отдельных точках района верхние слои торфяной залежи относительно богаты силикатными шариками — по-видимому, мелкодисперсная фракция

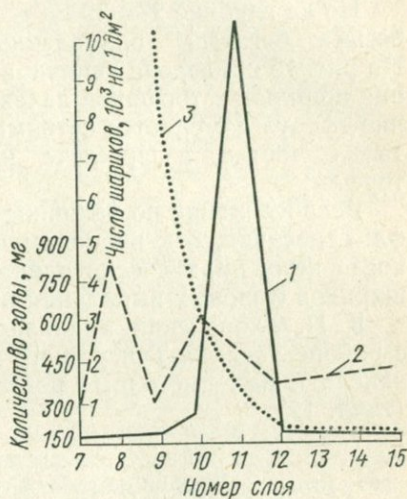


Рис. 15. Кривые распределения шариков по слоям торфа: 1 — в районе тунгусской катастрофы; 2 — золность, там же; 3 — в районах промышленных центров (по Н. В. Васильеву, 1974)

индустриальной пыли заносится и сюда, хотя ее количество несравненно меньше, чем в Томской области. Затем, как и в других местах, на глубине 20—27 см число шариков резко уменьшается. Небольшое число их обнаруживается и в наиболее глубоких слоях колонки (как правило, несколько шариков на 1 дм² поверхности).

Но на глубине 27—39 см во многих точках района лежит слой, весьма богатый оплавленными сферическими частицами. На рис. 15 приведена типичная для этих мест кривая распределения шариков в торфяной залежи. В отдельных случаях содержание сферул измеряется сотнями, тысячами, а иногда и десятками тысяч частиц в пересчете на 1 г минерального компонента торфа.

Распределение по величине шариков, найденных в слоях торфа, относящихся к периодам либо до тунгусского взрыва, либо после него, практически одинаково. Подавляющее большинство шариков фоновых выпадений имеет размер 20—60 мкм.

К. П. Флоренский, анализируя частицы (шарики), найденные в районе падения Тунгусского метеорита, определял содержание никеля в них методом рентгеноспектрального микроанализа (табл. 12).

Таблица 12

Шарики из района тунгусской катастрофы

Образец	Диаметр шарика с ядром, мкм	Содержание, %		
		Fe	Ni	Co
Шарик № 1 с ядром				
ядро	40	22	76	1,4
оболочка	160	72	2,2	0,2
Шарик № 2 с ядром				
ядро	70	10	90	1,6
оболочка	172	71	2,3	0,4
Шарики без ядра				
№ 3	296	68	4,4	0,4
№ 4	276	66	7,3	0,4
№ 5	286	69	3,3	0,3
№ 6	220	66	4,4	0,3

Эти шарики, скорее всего, имеют космическое происхождение и заставляют думать о том, что черные магнетитовые шарики, в которых нет никеля, потеряли его в процессе окисления железоникелевого сплава во время нахождения в почве, донных отложениях и т. д.

Х. Фехтиг и К. Ютех утверждают, что существуют указания на то, что шарики внеземного происхождения осаждались на

Землю в течение всей ее геологической истории. Однако шарики из третичных и более древних отложений содержат мало или совсем не содержат никеля, а присутствие никеля считается признаком внеземного происхождения частиц. Авторы делают вывод, что древние шарики некогда содержали железо-никелевое ядро и что оно постепенно растворилось. Они изучали тонкие шлифы шариков из глубоководных отложений четвертичного периода и обнаружили коричневую зону, окружающую железо-никелевое ядро, которая, как они полагают, является первой стадией растворения ядра. Они указывают также, что современные космические шарики не всегда содержат железо-никелевое ядро.

Несколько частиц внеземного происхождения было собрано при помощи возвращаемых зондирующих ракет, в частности при помощи устройства, называемого ловушкой («Венус-Флай»). Почти все частицы были субмикронного размера и имели неправильную форму, и лишь малую часть составляли рыхлые или сферические частицы.

Высокогорные ледники аккумулируют космическую пыль наряду с атмосферной и индустриальной. Из всей массы космической пыли, выпадающей на Землю (от 10^5 до 10^7 т ежегодно), удастся индивидуализировать по морфологическим признакам лишь черные магнитные шарики размером 10—100 мкм, доля которых, по оценке И. В. Иванова и К. П. Флоренского, составляет 2—10%. Поэтому определение степени разбавления космической пыли земным материалом представляет известные трудности.

В. Д. Виленский (1974) изучил распределение по размерам стеклянных сферических микрочастиц в ледниковом покрове Антарктиды на станциях Новолазаревская, Молодежная, Мирный и Восток. Оказалось, что вклад мелких шариков (10—20 мкм), несмотря на их относительно большое число, по массе составляет около 20%. Если исключить методическую погрешность, то основное положение о том, что чем меньше частицы (до 10^{-12} г), тем их больше по массе, оказывается неправомочным. По данным В. Д. Виленского, этот перегиб начинается уже от частиц с массой менее 10 мкг.

Помимо стеклянных частиц на ледниках изучались и металлические шарики. Автором с сотрудниками из ледниковых взвесей кавказских ледников была выделена магнитная часть, которая содержала заметные количества магнитных шариков. На рис. 16 показаны эти сферулы. Они по виду не отличаются от найденных в атмосферной пыли (см. рис. 15).

Любопытно, что некоторые из этих шариков значительно загрязнены ураном. На рис. 17 приведена микрофотография металлического шарика с ледника Гарабаши (Эльбрус), подвергнутого облучению нейтронами. На фотографии ясно видно сгущение треков осколков деления урана на периферийных зонах. По-видимому, этот уран имеет адсорбционную природу и не связан с шариками общим происхождением.

Темные магнитные шарики, аналогичные найденным на ледниках и в морских отложениях, были обнаружены в концентратах ильменита плейстоценовых и современных прибрежных осадков в Бразилии, Флориде и Южной Каролине (США), в Крыму и других местах. Для их выделения слой песка толщиной в

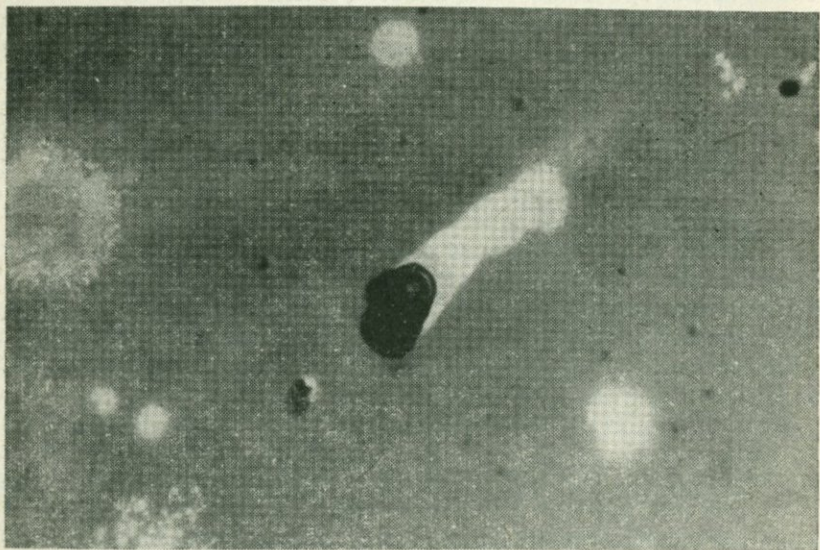
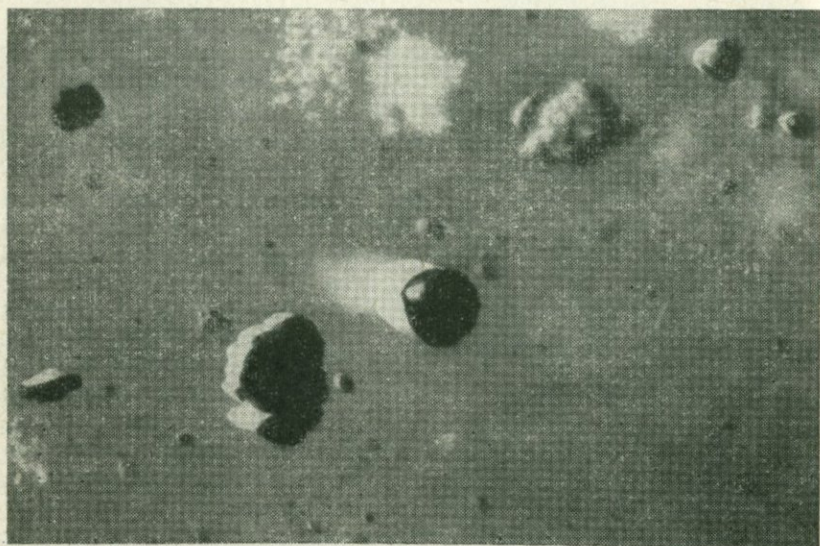


Рис. 16. Магнетитовые сферулы из ледниковых взвесей (увел. 18000)

несколько сантиметров пропускался через магнитный сепаратор.

Сферические космические микрообразования найдены в нижнепермских соляных отложениях. Для выделения их из соли И. В. Иванов и К. П. Флоренский (1968), В. Н. Костров и

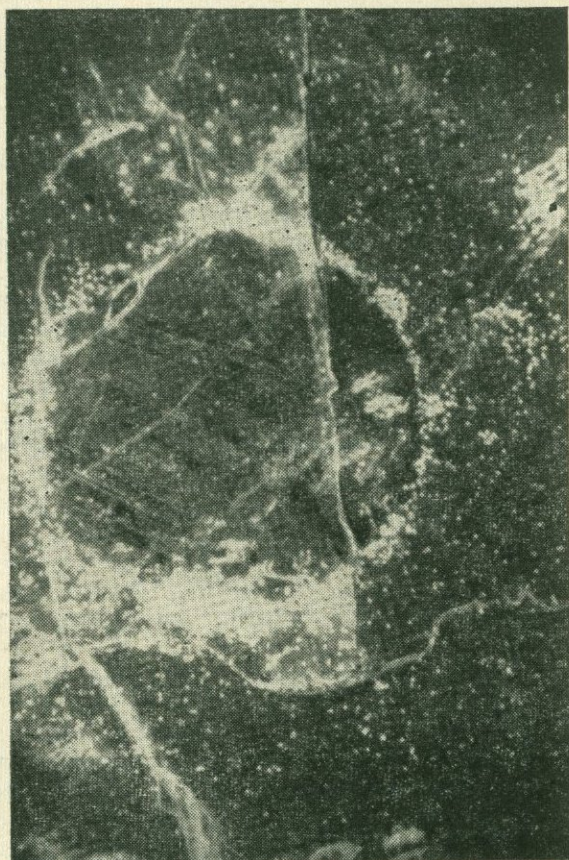


Рис. 17. Распределение треков осколков деления урана в металлическом шарике из ледниковых взвесей (отраженный свет, увел. 260)

В. Г. Потапов (1973) растворяли в воде отмытый с поверхности блок соли и осадок, состоящий в основном из гипса, обрабатывали раствором нитрата магния для увеличения растворимости сульфата кальция (гипса). Нерастворившийся материал подвергался магнитной сепарации.

Среди образований отмечены сплошные сферические, полые сферические, а также сложные формы: каплевидные, гантелеоб-

разные, грушевидные, сросшиеся. Автор указывает на сходство найденных образований с частицами из района тунгусской катастрофы.

В. Н. Костров, В. Г. Потапов и А. С. Кривохатский («Проблемы космохимии», 1974) исследовали пять проб каменной соли Кунгурского яруса одного из куполов в районе озера Баскунчак. Эта соль имеет высокую степень чистоты: содержание нерастворимых в воде примесей составляет 0,8—4,0%. Основная масса зерен нерастворимых в воде минералов имеет размер от 1 мм до нескольких микрон. Способ извлечения не позволял выделять частицы размером менее 10 мкм.

Магнитные и слабомагнитные фракции рассматривались под микроскопом, при этом проводились сортировка и измерение диаметров обнаруженных гранул. Эти исследования позволили выяснить следующие типы оплавленных сферических микрообразований: железистые, силикатные и сложного состава (состоящие из видимых под микроскопом силикатной и железистой частей). Вообще можно сказать, что по своим морфологическим особенностям эти частицы ничем не отличаются от найденных на месте тунгусской катастрофы или, например, в ледниках.

Гранулометрический состав исследованных А. С. Кривохатским и др. микрочастиц приведен в табл. 13. Железистые шар-

Таблица 13

Гранулометрический состав железистых гранул

№ пробы	Масса пробы, кг	Масса осадка, г	Общее число частиц в пробе	Размер гранул, мкм									Масса частиц в пробе, мг	Масса частиц в 1 кг соли, мг	
				15	30	45	60	75	90	105	120	135			150
				1	93,6	2581	3361	1443	942	702	201	60			9
2	45,0	1963	617	273	139	109	42	41	13	8	6	3	3	206	4,60
3	73,0	743	267	145	50	39	17	6	5	3	1	1	—	54	0,75
4	44,2	1519	875	346	207	115	81	69	46	11	—	—	—	270	6,10
5	95,4	736	185	96	28	21	17	10	6	—	4	2	1	63	0,18

ки в основном имеют размеры 15—75 мкм. Корреляции между количеством нерастворимого в воде осадка и количеством силикатных сферул не отмечается. Для пробы № 1 количественное соотношение всех видов гранул можно выразить в виде: железистые : силикатные : смешанные = 16 : 3 : 1. Полное соответствие внешнего вида, формы и плотности с микрочастицами, найденными в районе падения Тунгусского метеорита, а также

наличие в соли космического «бородавчатого» магнетита с включениями в него силикатных и магнетитовых сферических образований — все это свидетельствует об их космическом происхождении. Однако присутствие в отдельных пробах вулканического стекла и повышенное содержание в них микрообразований, возможно, указывает на то, что какая-то их часть имеет земное, вулканическое происхождение.

Различие содержания микрочастиц в пробах, отобранных с разных глубин и участков месторождения, а также зависимость их содержания от количества присутствующих в соли водонерастворимых минеральных примесей можно объяснить миграцией терригенного материала (вместе с космическими частицами) в период формирования Кунгурского соляного бассейна. Кроме того, не последнюю роль при этом играют последующие деформации и перемещения соляной толщи при образовании соляных куполов.

Такие сложные процессы формирования соляных месторождений (куполов) не позволяют с достаточной степенью точности определить количество космических выпадений в различные периоды кунгурского времени.

Магнитные и слабوماгнитные сферулы найдены также Ю. О. Беркером и др. в 1973 г. в палеозойских и протерозойских отложениях Южного и Среднего Урала, сформировавшихся 240—1800 млн. лет назад. Наибольшее содержание металлических сфер отмечено в шлихах карбонатных пород, хотя установлено их наличие в отложениях разного петрографического состава и фациального облика, а также в толщах со значительным метаморфизмом вплоть до амфиболитовой фации. Авторы относят их к числу полигенных образований космического и земного происхождения.

Частицы, найденные во льдах, в океанических осадках, собранные из атмосферы, выделенные из ильменитовых концентратов, палео- и протерозойских отложений, имеют, по-видимому, одну и ту же природу. Они состоят в основном из гематита и вюститита и имеют форму шариков, капелек, гантелек, колбочек и другие аэродинамические формы. Есть шарики, состоящие почти целиком из магнетита, и шарики, состоящие из магнетитовой оболочки и металлического ядра с высоким содержанием никеля. Шарики, собранные на ледниках, в значительной степени космического происхождения. Многие из них имеют ядра из чистого металлического железа, никеля или железо-никелевого сплава. Единичные зерна представлены титаномагнетитом, ильменитом, гематитом и пироксеном и скорее всего имеют земное происхождение (вулканические извержения, сильные лесные пожары, индустриальная пыль в современных слоях льда). Так, 30 шариков, выделенных А. Рейлом и Р. Шмидтом из глубоководных осадков Атлантического океана, диаметром от 60 до 450 мкм были разделены на 4 группы по составу и структуре: I группа — магнитные

шарики, содержащие никель и кобальт, окруженные оболочкой, богатой кремнием; II группа — гомогенный магнетит с малыми количествами кобальта и никеля; III группа — магнетит, богатый кремнием, и IV группа — неправильные частицы с низким содержанием железа, но иногда с включениями (в виде хлопьев), богатыми никелем. Эти авторы полагают, что шарики первых двух групп имеют космическое происхождение, а двух других — земное. Плотность космических шариков колеблется от 4,5 до 5,2 г/см³. В то же время плотность сферул вулканического происхождения составляет в среднем 2,75 г/см³.

В тонкозернистом материале с поверхности Луны содержится большое число округлых сферических частиц. Это железо-никелевые, железные, силикатные, стеклянные частицы, подобные по составу тектитам. Несомненно, что часть этих шариков представляет собой межпланетное вещество.

Поскольку сферулы, выделенные из донных осадков, неоднородны, Р. Шмидт и А. Рейл решили исследовать химический состав оболочки, ядра, «хлопьев» и прочих видимых структурных единиц. В табл. 14 приведены некоторые результаты их исследований. Основным компонентом является железо, затем никель (иногда наоборот). Все остальные элементы находятся в подчиненном положении.

Вообще говоря, отношения никель — железо, никель — кобальт, никель — медь в среднем хорошо согласуются с таковыми для метеоритов. Поэтому есть основания считать, что исследованные шарики имеют космическое происхождение.

Любопытно, что в тектитах Г. Г. Воробьевым (1961), Е. Чао и Дж. Аблером (1962) также найдены магнетитовые шарики, которые включены в стеклообразную массу. Иногда эти шарики содержат ядра из чистого железа.

Оседание космической пыли происходит в различных районах земного шара с разной степенью интенсивности. Это зависит как от глобальных метеорологических условий, так и от различных сезонных факторов. Космогенные нуклиды, образующиеся в атмосфере, а также поступающие в виде ядер из космического пространства в земную магнитосферу, выпадают преимущественно на 40-х широтах северного полушария. Оседание космической пыли, наоборот, имеет тенденцию к увеличению с увеличением геомагнитной широты.

Крайние значения величины выпадения черных магнитных шариков, по данным различных исследователей, колеблются в пределах от 10⁸ до 10² т/год. Несомненно, что различные методы определения количества шариков имеют разную погрешность, как систематическую, так и случайную. Считают, что наиболее достоверным значением, полученным по атмосферным выпадениям и по многолетним снеговым отложениям Гренландии и Антарктиды, является значение (1—2) · 10⁵ т/год. Следует учесть, что черные магнитные шарики составляют примерно четверть всего кос-

Содержание главных элементов в шариках глубоководных осадков
 Атлантического океана, % (нехватка до 100% приходится на кислород)

Шарьки	Fe	Ni	Co	Mn	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Gr
I группа	64,2	1,93	0,27	0,03	0,33	0,20	0,08	0,02	0,89	0,02	0,07
оболочка треворит	41,0	20,2	0,38	0,09	0,77	2,70	0,36	0,10	0,87	0,30	0,03
ядро	21,6	77,5	1,19	0,08	0,02	0,05	—	0,02	0,03	0,04	0,02
II группа											
срез 2	64,6	1,62	0,38	0,02	0,02	0,03	—	0,02	0,02	0,02	0,02
срез 3	68,2	0,72	0,25	0,02	0,02	0,02	—	0,02	0,02	0,02	0,02
срез 12	64,0	0,41	0,20	0,02	0,06	0,06	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02
III группа											
основная масса	53,3	0,20	0,15	0,07	1,1	1,7	0,35	0,15	0,40	0,06	0,82
IV группа											
основная масса	42,2	0,02	0,08	0,32	2,0	1,8	1,33	1,17	1,0	0,9	0,34
хлопья	48,0	0,47	—	—	2,0	—	—	—	—	—	—

мического материала с размерами частиц в 10—500 мкм, выпадающих на Землю. Следовательно, эта скорость выпадения должна быть увеличена до 1 млн. т/год. Кроме того, чем мельче частица, тем больше ее встречаемость, тем больше общая масса таких частиц. Например, установлено, что шариков с массой 10^{-4} г примерно в 50 раз меньше, чем шариков с массой 10^{-5} г. Если провести такую экстраполяцию до космических пылинок массой 10^{-12} г, то получится огромное число. Мы, правда, видели раньше что такая экстраполяция неправомерна. Тем не менее не исключено, что крайние значения скорости аккреции космической пыли Землей, полученные некоторыми авторами (10^9 т/год), не окажутся слишком далекими от реальности. Даже если интенсивность выпадения космического вещества на Землю была постоянной на протяжении геологической истории Земли (4 млрд. лет), то это даст толщу осадков, сравнимую по мощности с осадочным чехлом земной коры.

Характеристика шариков из ледниковых покровов Антарктиды дана в статье В. Д. Виленского, где он подвел итоги многолетних исследований шариков из Антарктического льда. Он рассматривает вопросы, связанные с распределением сферических микрочастиц в снежном покрове ряда районов Антарктиды. Приводятся данные о концентрации черных сферических микрочастиц в снежном покрове районов станций Молодежная, Мирный, Восток и на участке Мирный — Восток, а также рассчитанные из этих данных значения интенсивности выпадения указанных частиц. Обнаружено резкое уменьшение интенсивности выпадения частиц на земную поверхность при перемещении от побережья в глубь Антарктиды. Интенсивность выпадения частиц в районах станций Молодежная и Мирный значительно колеблется из года в год (табл. 15), причем эти колебания различны для каждого района.

Таблица 15
Среднегодовые значения интенсивности выпадения сферических микрочастиц в районах станций Молодежная и Мирный

Дата анализа	Интенсивность выпадения, 10^{-2} частица/(см ² ·год)	
	Молодежная	Мирный
1964	8,0±2,2	8,0±1,4
1965	24,4±2,8	4,4±1,1
1966	35,0±6,0	1,5±0,4
1967	22,8±3,7	49,9±6,2
1968	7,0±1,9	24,5±3,6
Среднее	19,4±1,5	17,7±1,5

Современные выпадения космических сферул на Землю

Характер пробы и место отбора	Размер частиц, мкм	Количество, т/год	Автор, год
Атмосферная пыль	> 1	$1,2 \cdot 10^5$	Т. Бэдхью, 1950
Донные осадки (Тихий океан)	> 25	10^2	Т. И. Левасту, О. Меллис, 1955
То же	> 30	$(2,4-5) \cdot 10^3$	Г. Петтерссон, К. Фредрикссон, 1958
Атмосфера (Калифорния, Аляска, Канада)	3—15	$5 \cdot 10^5$	П. В. Ходж, Р. А. Уилдт, 1958
Атмосфера	—	$3,6 \cdot 10^6$	К. Крайкен 1959
Средиземноморские осадки	> 30	$3,3 \cdot 10^3$	Г. Петтерссон, 1960
Тихоокеанские донные отложения	—	$(1-5) \cdot 10^3$	»
Илы мелководного моря (США)	5—35	$(3-15) \cdot 10^4$	В. Д. Крозер, 1960
Стратосферная пыль	> 3	$3 \cdot 10^4-3 \cdot 10^5$	Э. Л. Файерман, Дж. А. Кистнер, 1961
Антарктический лед (Южный полюс, станция Бэрд, шельфовый ледник Росса)	15—180	$1,94 \cdot 10^5$	Е. Тэйл, Р. А. Шмидт, 1961
Тихоокеанские донные отложения	10—230	$1,25 \cdot 10^2$	Т. И. Левасту, О. Меллис, 1961
Стратосферная пыль	> 3	$3 \cdot 10^4-3 \cdot 10^5$	Э. Л. Файерман, Дж. А. Кистнер, 1961
Атмосферные осадки (Нью-Мехико)	—	$9 \cdot 10^4$	В. Д. Крозер, 1961
То же	5—38	$1,4 \cdot 10^5$	»
»	5—15	$1,1 \cdot 10^5$	В. Д. Крозер, 1962
»	15—100	$5 \cdot 10^4$	»
»	5—100	$1,6 \cdot 10^5$	»
Стратосферная пыль	—	$3 \cdot 10^4$	П. В. Паркин, В. Хантер, 1962
»	> 3	$2 \cdot 10^5$	Ф. В. Райт, П. В. Ходж, 1962
Антарктический снег	> 10	$1,2 \cdot 10^5$	Р. А. Шмидт, 1963
Гренландский лед	> 5	$2 \cdot 10^5$	Ф. В. Райт, П. В. Ходж, 1963
Гренландский снег	> 5	$9,1 \cdot 10^5$	К. К. Лангвей, 1963
»	5—100	$2 \cdot 10^5$	Ф. В. Райт, П. В. Ходж, К. К. Лангвей, 1963
Антарктический снег	> 3	$1,2 \cdot 10^5$	Дж. Брокас, Е. Пиччиотто, 1963
Лед (Южный полюс)	> 5	$5 \cdot 10^4$	П. В. Ходж, Ф. В. Райт, К. К. Лангвей, 1964

Характер пробы и место отбора	Размер частиц, <i>мкм</i>	Количество, <i>т/год</i>	Автор, год
Антарктический лед	10—170	$(0,4—2,4) \cdot 10^5$	Р. А. Шмидт, 1964
Средиземноморские донные отложения	—	$6 \cdot 10^5$	Т. Гржебайн, и др., 1964
Гренландский лед	> 5	$2,1 \cdot 10^5$	К. К. Лангвей, 1965
Гренландский фирн (Кемп Сэнгури)	> 5	$6,6 \cdot 10^5$	»
Атмосферные осадки (Нью-Мехико)	5—60	$1 \cdot 10^5$	В. Д. Крозер, 1966
Атмосферная пыль (Барбадос)	> 1	$2 \cdot 10^5$	П. В. Паркин и др., 1967
Стратосферная пыль	4—10	$8,4 \cdot 10^4$	К. Е. Мелтон, 1967
Антарктический снег (Мак-Мердо)	> 10	$7 \cdot 10^4$	М. Шима, Х. Ябуки, 1968
Антарктический снег (Сева)	> 10	$3 \cdot 10^4$	Те же
Стратосферная пыль	> 1	$2 \cdot 10^5$	Н. Бхандфи и др., 1968
Атмосферная пыль (Тихий океан)	15—100	$6,2 \cdot 10^5$	В. И. Баранов, В. Д. Виленский, 1968
То же	3—30	$5 \cdot 10^4$	Те же
Атмосферная пыль (Антарктида, Сева)	> 10	$2,5 \cdot 10^5$	М. Шима, Х. Ябуки, А. Окада, 1969
То же	> 10	$1,3 \cdot 10^6$	Те же
Атмосферная пыль (Тихий океан)	> 15	$(1,5—6) \cdot 10^6$	В. И. Баранов, В. Д. Виленский, Ю. В. Краснопецев, 1970
Стратосферная пыль	> 10	$1,3 \cdot 10^5$	Х. Ябуки и др., 1970
Антарктический снег: Молодежная	10—15	$1,28 \cdot 10^4$	В. Д. Виленский, 1972
Мирный	10—75	$1,36 \cdot 10^4$	То же
Пионерская	> 10	$7 \cdot 10^3$	»
Восток-2	> 10	$8 \cdot 10^3$	»
Комсомольская	> 10	$8 \cdot 10^3$	»
Восток	10—75	$1,39 \cdot 10^3$	»
Тихоокеанская красная глина	10—100	$1,4 \cdot 10^3$	Э. В. Собонович, П. И. Пивень, Т. И. Коромысличенко, 1974

Предполагается, что причиной наблюдаемого пространственного и временного распределения отложения микрочастиц в снежном покрове Антарктиды являются процессы переноса в атмосфере.

В. Д. Виленский пишет: «Как следует из приведенных данных, интенсивность выпадения сферических микрочастиц в районах станций Молодежная и Мирный значительно колеблется от года к году, причем ход этих колебаний совершенно различен для каждого района. При сопоставлении среднегодовых значений разли-

чия интенсивности выпадения сферических микрочастиц в этих районах могут достигать ~ 20 раз (как, например, в 1966 г.). Однако при осреднении значений за 5 лет интенсивность выпадения сферических микрочастиц становится практически одинаковой. Интересно отметить, что средние значения за 1964—1968 гг., полученные по среднегодовым значениям интенсивности выпадения и по средним концентрациям микрочастиц в толще снега и средней скорости снегонакопления, очень хорошо согласуются, что подтверждает возможность использования средних значений концентрации сферических микрочастиц для характеристики района».

В табл. 16 приведены значения современной интенсивности выпадения черных сферических микрочастиц в расчете на площадь Земли. Данные, полученные В. Д. Виленским, относятся только к черным частицам с гладкой поверхностью, плотность которых принята равной $4,8 \text{ г/см}^3$. Для учета вклада черных сферических микрочастиц с «изъеденной» поверхностью приведенные значения следует увеличить в 1,5—2 раза, что будет соответствовать полной интенсивности выпадения черных сферических микрочастиц, относящихся к различным группам.

Как видно из табл. 16, количество выпадающих на земную поверхность сферических частиц оценивается различными авторами по-разному: от 10^3 до 10^6 т/год . Конечно, при этом первую роль играют размеры учитываемых частиц. Одни авторы использовали для расчетов диапазон частиц от 1 $\mu\text{м}$ и выше, другие — от 10 $\mu\text{м}$, а некоторые — лишь определенные размеры частиц, например от 10 до 75 $\mu\text{м}$. Большое влияние на результат также оказывает способ выделения и идентификации сферул. И, наконец, метеорологические условия, господствующие на нашей планете.

Как уже отмечалось, самыми подходящими концентраторами космических шариков помимо ледниковых покровов являются глубоководные океанические осадки, удаленные от областей сноса терригенного материала. В табл. 16 достаточно полно представлены данные по выпадениям шариков в моря и океаны.

Автором совместно с П. И. Пивнем и Т. И. Коромысличенко было изучено распределение магнитных (черных) и силикатных (прозрачных) шариков по глубине керна. Для исследования был взят керн красной глины, любезно предоставленный А. П. Лисициным (Институт океанологии им. П. П. Ширшова), и района Тихого океана (станция 0518, судно «Дмитрий Менделеев», рейс 8, 1972 г., координаты $14^{\circ}29'$ с. ш., $119^{\circ}20'$ в. д.). Пробы были взяты по глубине керна приблизительно через равные интервалы, а именно: 61—62 см (1-я), 151—152 см (2-я), 231—232 см (3-я), 356—357 см (4-я), 479—480 см (5-я).

Полученные результаты изображены на графике распределения магнитных и силикатных шариков по глубине керна (рис. 18). Можно видеть, что резких изменений числа сили-

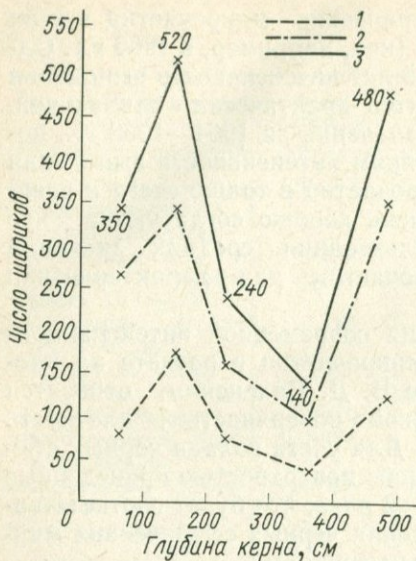


Рис. 18. Распределение магнитных и силикатных шариков по глубине керна красной глины из Тихого океана: 1 — силикатные; 2 — магнитные; 3 — общее число шариков

катных и магнитных шариков нет. Кривые как для силикатных, так и для магнитных частиц в достаточной степени повторяют друг друга. По мере увеличения глубины керна число шариков уменьшается, а затем снова возрастает. Для 1, 2 и 5-й проб получены значения почти одного порядка, а для 3-й и 4-й проб они значительно занижены. Причины могут быть две — неравномерные скорости осадконакопления и поступления частиц на Землю.

Более ранние работы зарубежных исследователей указывают на вероятность первой причины, так как они наблюдают четкое изменение литологического состава, в том числе наличие прослоев, не характерных для красных глин.

Из этой же навески Т. И. Коромысличенко определила распространенность осмия. Результаты распределения осмия по колонке красной глубоководной глины приведены на рис. 19. Вид кривой распределения осмия повторяет кривую суммарного распределения шариков. Построив график зависимости между содержанием осмия и числом шариков в кернах, получаем прямую (рис. 20). Пересечение прямой с осью X дает фоновое содержание в красной глине осмия, равное $2,5 \cdot 10^{-9}$ г/г. Таким образом, приток осмия космогенного происхождения равен общему содержанию осмия без учета фона. Эти количества оказались следующими (г/г):

- 1) $0,88 \cdot 10^{-8}$; 2) $1,28 \cdot 10^{-8}$;
- 3) $0,93 \cdot 10^{-8}$; 4) $0,31 \cdot 10^{-8}$;
- 5) $0,65 \cdot 10^{-8}$.



Рис. 19. Распределение осмия по глубине керна красной глубоководной глины из Тихого океана

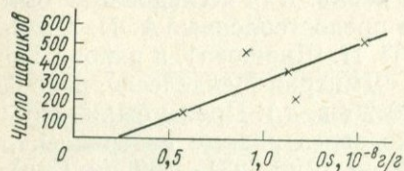


Рис. 20. График корреляционной зависимости между содержанием осмия и количеством шариков в красной глубоководной глине из Тихого океана

Принимая распространенность осмия в хондритах $5,6 \cdot 10^{-7}$ г/г в качестве средней распространенности в веществе, выпадающем на Землю, можно оценить степень космогенности частей зерна в каждой исследуемой точке: 1) 1,57%; 2) 2,29%; 3) 1,66%; 4) 0,5%; 5) 1,16%.

Рассчитав массу найденных шариков по формуле $P = \frac{4}{3} \pi r^3 d n$ (d — средняя плотность, n — число шариков) и просуммировав силикатные и магнитные шарики в каждой точке, получаем: 1) $P = 1,05 \cdot 10^{-4}$ г; 2) $P = 1,50 \cdot 10^{-4}$ г; 3) $P = 0,55 \cdot 10^{-4}$ г; 4) $P = 0,45 \cdot 10^{-4}$ г; 5) $P = 1,37 \cdot 10^{-4}$ г.

Интересно определить, какую часть космического материала, выпадающего на Землю, составляют подсчитанные нами шарики размером от 10 до 100 мкм. Проведя расчеты и приняв скорость осадконакопления равной 1 мм в 1000 лет, находим скорость аккреции шариков, равную $1,42 \cdot 10^3$ т/год. Исходя из степени космогенности нашего зерна (в среднем 1,5%), получаем, что скорость аккреции космического вещества составляет $1,28 \cdot 10^7$ т/год. Таким образом, доля шариков размером 10—100 мкм равна 0,01% содержащегося в красной глине космического материала. По данным И. В. Иванова и К. П. Флоренского, это значение выше на 2—3 порядка.

Небезынтересно проверить справедливость полученных результатов независимым методом. Для этого привлечем данные о распределении частиц внеземного происхождения, выпадающих на Землю. Масса шарика размером 40—50 мкм составляет $2,6 \cdot 10^{-7}$ г. Проектируя это значение на кривую зависимости интегрального числа частиц от их массы (см. рис. 13), находим, что частиц с массой, аналогичной нашему шарiku, приходится $5 \cdot 10^9$ на 1 км^2 в год. Число шариков, подсчитанных нами для той же площади, составляет $5,3 \cdot 10^6$ на 1 км^2 в год, т. е. частиц сферической формы среди других около 0,1%.

Таким образом, мы имеем три оценки содержания шариков размером 40—50 мкм в космической пыли, различающиеся в пределах двух порядков от 0,01% до целых процентов. Статистика как в наших экспериментах, так и в известных из литературы, очень неполная, требуется дальнейшая работа по накоплению данных, касающихся как общего числа шариков, так и их распределения по размерам и их доли в общем количестве выпадающей на Землю космической пыли.

В результате проделанной работы установлена корреляция между содержанием шариков и осмия, причем найден путь определения фонового содержания осмия, а следовательно, и любого другого реперного, в смысле космогенности, элемента в исследуемой совокупности проб. Вариации в содержании шариков и осмия по длине зерна скорее всего вызываются изменениями скорости осадконакопления, на что указывают данные нейтронно-активационного анализа по фтору, кремнию и алюминию.

Сравнение данных табл. 8 и 16 указывает на то, что доля шариков в выпадающем на Землю материале варьирует от долей до целых процентов.

3. Космическое вещество на ледниках

Природа... не держится за свои тайны, она готова разбазаривать их налево и направо, рассказывать, когда угодно и кому угодно — нашелся бы умеющий слушать и понимать.

Д. С. ДАНИН. *Неизбежность странного мира*

На протяжении жизни ледников на их поверхности оседает атмосферная и космическая пыль. Ежегодно поверхность ледников покрывается снегом, который, уплотняясь, превращается в конечном счете в лед. При таянии ледника осевшая ранее пыль оказывается в талой воде.

Высокогорные ледники, удаленные от источников промышленных загрязнений, являются одним из перспективных объектов для поисков космогенного вещества, выпадающего на земную поверхность с атмосферными осадками. Степень космогенности концентрата взвесей и солей, извлеченного из льда ледников, будет тем больше, чем меньше в нем содержание примесей земного происхождения. Минимальное содержание во льду взвешенных веществ и солевого фона — один из критериев при поиске и выборе объектов исследований. Кроме того, знание химического состава льда необходимо для разработки методики концентрирования космогенного вещества, а также для оценки влияния среды на внеземное вещество, в частности на возможность перехода части космической пыли в растворенное состояние.

И вот в Советском Союзе в течение полевых периодов 1969—1972 гг. были организованы широкие комплексные исследования кавказских ледников силами Радиевого института им. В. Г. Хлопина и Института геохимии и физики минералов АН УССР при участии сотрудников географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, сотрудников Тебердинского заповедника и, наконец, горноспасательной службы. Руководителями экспедиций были Ю. В. Кузнецов, О. С. Цветков и автор этой книги.

Были обследованы запыленность и солевой фон практически всех крупных кавказских ледников. В 1969 г. работы проводились на ледовой базе в зоне питания ледников Гарабаши и Терскол. Было переработано 36 м³ талой ледниковой воды.

В 1970 г. в качестве полигона для отработки методики был выбран ледник Алибек, хотя его загрязненность терригенным материалом была значительно больше, чем эльбрусских ледников.

Сотрудники Института геохимии и физики минералов АН УССР проводили осаждение взвесей и коллоидов из талой воды ледника Алибек (рис. 21) на гидроокиси железа. В средней части ледника была выбрана и расширена трещина глубиной



Рис. 21. Ледник Алибек (Домбайское ущелье)

около 5 м и объемом примерно 20 м³. Она служила емкостью, в которую собирали талые воды и проводили осаждение гидроокиси вводимого железа. После осаждения и созревания осадок фильтровали под давлением. Таким образом было пропущено около 500 м³ воды. Гидроокись железа затем растворяли либо в лимонной, либо в разбавленной соляной кислоте, остаток центрифугировали на ультрацентрифуге и взвешенные частицы сепарировали по размеру и плотности. Ледник Алибек расположен на небольшой высоте, поэтому в талых водах очень много терригенного материала и большой солевой фон (150 мг/л).

Летом 1971 г. этим же институтом совместно с Радиевым институтом проводились работы по выделению взвесей и гидролизующихся элементов из талых вод ледника Гарабаши.

Ледник Гарабаши стекает с южного склона Эльбруса (рис. 22). Последний расположен в центральной части Большого Кавказа, в геологическом отношении находится в северной части кристаллического ядра Кавказа. На юге Эльбрус обрывается очень крутыми высокими склонами с высоты 3100—3300 м к вер-

ховьям долин, днища которых расположены на высоте 2100—2300 м. Ледник Гарабаши расположен между лавовыми грядами, поднимающимися над поверхностью ледника не более чем на 200 м. Конец ледника висит на уступах лав в виде широко рас-

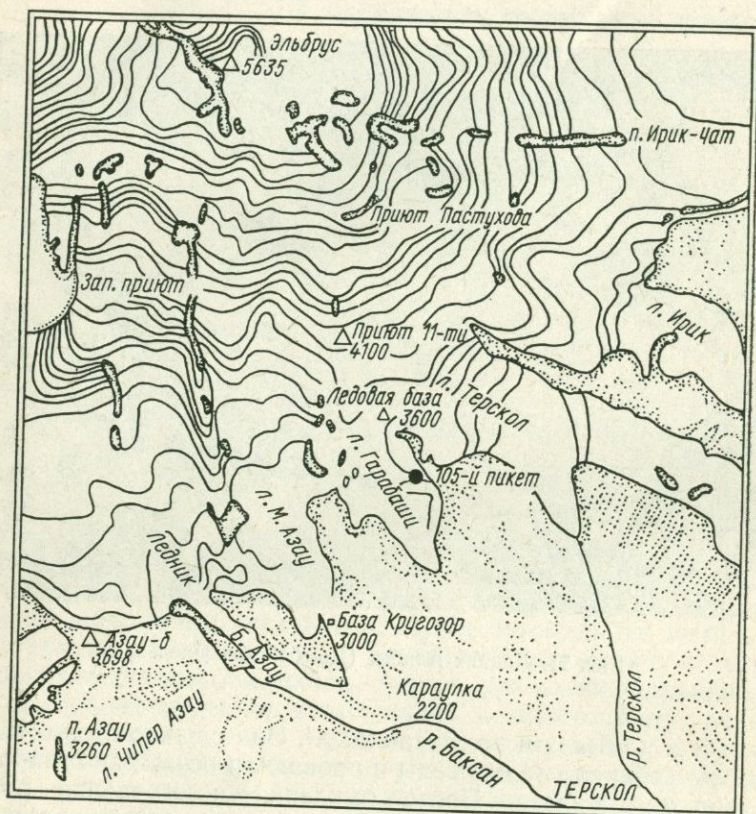


Рис. 22. Схема расположения ледников Эльбруса

члененных лопастей. Его верхняя часть расположена восточнее скал Приюта девяти на высоте около 4300 м, а «языковая» часть достигает высоты 3250 м. Площадь ледника 2,7 км², длина 4,1 км. Средняя мощность ледника 50 м, т. е. объем его составляет около 140 млн. м³.

Ниже ледника Гарабаши повсеместно распространены породы нижнего палеозоя-протерозоя, метаморфические породы, прорванные палеозойскими интрузиями. Встречаются и лавовые потоки. В геологическом отношении они представлены жилой туфовой пачкой пород.

Солевой фон ледника составляет всего 2 мг/л. Талые воды этого ледника содержат ничтожное количество взвесей. Выделе-

ние взвесей, коллоидов и гидролизующихся элементов солевого фона производилось на специальной проточной установке, сконструированной в Радиевом институте, изготовленной и работающей по типу обычных водоочистных сооружений. В качестве

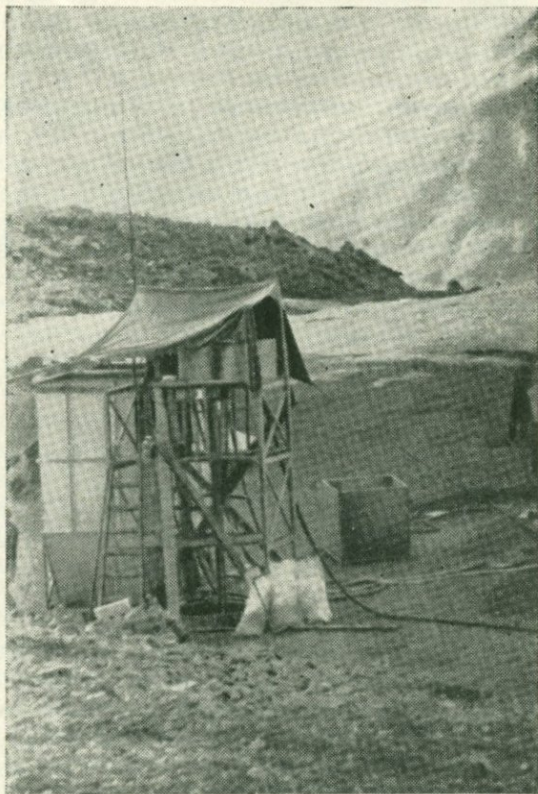


Рис. 23. Установка для выделения взвесей и гидролизующихся элементов, размещенная в районе 105-го пикета (3400 м над уровнем моря) на боковой морене ледника Гарабаши

коллектора использовалась гидроокись железа и никеля (рис. 23). При растворении гидроокиси железа соляной или лимонной кислотами часть металлических или магнетитовых шариков растворяется, а гидроокись никеля растворяется в избытке аммиака, который не взаимодействует с металлическим или окисным железом.

Процесс концентрирования взвесей основан на адсорбции взвешенных частичек, коллоидов и псевдоколлоидов на высоко-

развитой поверхности гидроокиси железа или никеля. Поступавшая из трещины ледниковая вода подавалась на установку (рис. 23), где при концентрации железа 20 мг/л, полиакриламида до 2 мг/л и с добавкой NaCl при pH=8,5 проводилось осаждение в динамических условиях с последующим отстаиванием и декантацией осветленной части или с последующей фильтрацией. Для учета химического и минералогического фона были собраны пробы коренных пород и делювиальных отложений со стоков ледника Гарабаши.

Гидроокись железа, полученная в результате обработки 200 м³ талой ледниковой воды, в дальнейшем исследовалась в лабораториях Радиевого института и Института геохимии и физики минералов АН УССР. Прежде всего пульпа гидроокиси железа подвергалась магнитной сепарации для выделения магнитной части взвеси. Для этого был сконструирован сепаратор, на котором выделялось приблизительно 70% магнитных частиц. Затем гидроокись железа растворяли в азотной кислоте и путем отстаивания и центрифугирования (с промывкой бидистиллированной водой) выделяли силикатную часть взвеси с размером частиц более 5—10 мкм.

Таким образом, в результате обработки пульпы гидроокисью из 100 м³ талой воды железа была выделена магнитная (8,02 г) и силикатная часть взвесей (860 г).

Выделенная взвесь анализировалась на содержание самых различных элементов, в частности на Ni, Co, Cu, Fe, Os, космогенных нуклидов ³H, ³He, ⁴He, ⁷Be, ¹⁰Be, ¹⁴C, искусственных нуклидов ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и естественных изотопов ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U, ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb, ²¹⁰Pb.

В магнитной фракции взвесей, которая составляла меньше 1%, никеля содержалось 0,083%. Химический состав образцов туфа (усредненный для трех образцов), делювия из реки Гарабаши и силикатной части взвеси по содержанию Fe, Ni, Co, Cu и Os идентичны (табл. 17). Во взвеси из ледниковой воды обнаружены также и магнитные шарики. Шлифы показали, что некото-

Таблица 17
Химический состав взвесей, делювия и коренных пород, %

Образец	Fe	Ni	Co	Cu	Os
Туфы	—	6,0 · 10 ⁻⁴	3 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	8,0 · 10 ⁻⁷
Делювий	1,4	6,0 · 10 ⁻⁴	3 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	5,2 · 10 ⁻⁷
Взвеси (силикатная фракция)	1,5	6,0 · 10 ⁻⁴	3 · 10 ⁻⁴	5 · 10 ⁻⁴	4,5 · 10 ⁻⁷
Взвеси (магнитная фракция)	17,1	8,3 · 10 ⁻²	3 · 10 ⁻³	2 · 10 ⁻²	1,7 · 10 ⁻⁶

рые из них полые. По морфологическим признакам они аналогичны шарикам, найденным в полярных льдах и морских отложениях, описанных выше.

Было отмечено повышенное содержание осмия и никеля в магнитной части взвеси. Это обстоятельство позволяет оценить долю космического вещества в ледниковых взвесьях. Концентрация никеля, как уже упоминалось, равна 0,083%. Если вычесть фоновое содержание никеля, то при космической распространенности его 1,35% степень космогенности ледниковой взвеси составляет примерно 0,05%. Приняв содержание осмия в хондритах, равное $5,6 \cdot 10^{-5}$, за его среднюю космическую распространенность, находим, что доля космического вещества в выделенной взвеси составляет 0,025% (табл. 18).

А. Я. Крылов, Ю. И. Силин и Т. И. Мазина исследовали отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в сериях проб, отобранных О. С. Цветковым для характеристики взвешенных частиц на различных этапах их миграции с ледниковыми водами (табл. 19). Как видно из таблицы, примесь космогенного вещества во взвесьях ледниковой воды значительна. Она соизмерима с таковой в красных глубоководных глинах Тихого океана. Характерно, что тонкая взвесь содержит космогенной составляющей на порядок больше, чем грубая. В последнем случае значительна примесь материала от разрушения подледных пород. Следует отметить, что эти значения, вероятно, будут сильно колебаться от пробы к пробе, в зависимости от количества примесей терригенных частиц окружающих пород.

Таблица 18

Доля космического вещества во взвеси ледника Гарабаш

Способ оценки	Доля космического вещества, %
Концентрация никеля	$0,050 \pm 0,020$
Концентрация осмия	$0,025 \pm 0,010$
Отношение Fe/Ni	$0,05 \pm 0,02$
Содержание ^{14}C	$0,14 \pm 0,12$

Оно весьма неравномерно (это видно по цвету льда, его «запыленности»). Приведенные цифры, вероятно, правильно характеризуют порядок величин. Далее, в мелком песке ручья, вытекающего из-под ледника, отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ тоже значительно выше — $4,5 \cdot 10^{-6}$, что указывает на заметную примесь космогенного вещества. Ниже, у подножья Эльбруса, в реке Баксан, питающейся ледниковыми водами, отношение $^3\text{He}/^4\text{He} = 5,1 \cdot 10^{-8}$, как в наиболее распространенных земных породах гранитоидного типа. Здесь космогенная добавка совершенно «затерялась» среди терригенных частиц, образовавшихся при разрушении окружающих пород.

Отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ во взвесах вод ледников Эльбруса

Место взятия пробы	Тип взвесей	He, 10^{-6} см ³ /г	$^3\text{He}/^4\text{He}$
Ледник Гарабаши	Тонкая взвесь (пелит)	4,1	$5,5 \cdot 10^{-5}$
» »	Грубая взвесь (алеврит)	7,7	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Ручей, вытекающий из-под ледника	Мелкий песок	8,1	$4,5 \cdot 10^{-6}$
Река Баксан (под ледником)	» »	13,0	$5,1 \cdot 10^{-8}$

Наблюдения исследователей за положением конца ледника Гарабаши позволяют говорить о значительном его отступлении и сокращении объема за последние 100 лет. Так, с 1887 по 1957 г. ледник сократился в длину на 882 м. Соответственно уменьшилась и толщина ледника, так что боковые его части, погребенные под мореной, отделились от основного потока и потеряли самостоятельное движение. Таково происхождение подморенного льда в районе 105-го пикета.

На уровне границы питания ледника (граница между областью накопления и областью расходования льда) за год стаивает около 1000 мм снега и льда. С известными допущениями эта цифра может быть принята средней для всего ледника. Тогда годовой объем стаивания окажется равным 2,7 млн. м³. Поделив объем (140 млн. м³) ледника на величину его стаивания за год, получим, что время возобновления массы ледника составляет 50 лет.

Однако такой расчет слишком примитивен. Известный советский гляциолог Г. Н. Голубев (который рекомендовал место для работы экспедиции), учитывая все нюансы поведения ледника Гарабаши, пришел к выводу о том, что на 99% масса этого ледника возобновляется за 230 лет. Полагая, что боковые части ледника в районе 105-го пикета и Ледовой базы отделились от основного потока около 100 лет назад, Г. Н. Голубев оценил возраст этого подморенного льда примерно в 330 лет.

Представляли интерес определение возраста подморенного льда радиоуглеродным методом и сопоставление его с гляциологической датировкой. Толщина моренного покрова в месте отбора анализируемого льда достигала 1—1,5 м. После его удаления верхний слой льда до глубины 0,8 м был вырублен и отброшен. Лед для анализа отбирался с глубины 0,8—1,5 м. Всего было вырублено около 1,3 м³ льда.

Углекислота из ледовых проб выделялась на легкой разборной установке (рис. 24). Измельченный лед помещали в гер-

метически закрываемые емкости из нержавеющей стали (каждая объемом 135 л), соединенные между собой. Систему продували инертным газом, лед оплавляли с поверхности и образовавшуюся талую воду выливали. Емкость нагревали бензиновыми или газовыми горелками. Систему вторично продували инертным га-

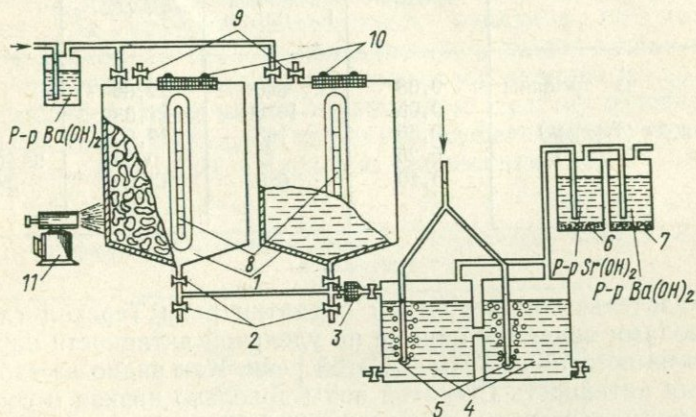


Рис. 24. Схема установки для плавления льда и выделения углекислоты:

1 — металлические баки; 2 — краны; 3 — фильтр; 4 — сосуды для барботаж; 5 — барботеры; 6 — склянки для поглощения CO_2 ; 7 — предохранительная склянка; 8 — смотровые стекла; 9 — предохранительный клапан; 10 — крышка; 11 — бензиновая горелка

зом и расплавляли оставшийся лед. Вода поступала в барботеры, где подкислялась серной кислотой до 0,01 М для перевода бикарбонатов в CO_2 . При помощи барботирования инертным газом углекислоту выделяли и улавливали насыщенным раствором гидрата окиси стронция. Полученный осадок карбоната отфильтровывали и помещали в полиэтиленовые банки для последующей обработки в лабораторных условиях.

Аналогичным образом углерод выделяли из прочих вод, так или иначе связанных с ледником. Как видно из табл. 20, наибольшей удельной активностью обладает талая ледниковая вода из трещины. По-видимому, она является продуктом таяния льда, образовавшегося во время интенсивных ядерных взрывов в атмосфере в 50-х — начале 60-х годов. Несколько меньшая активность фирна обусловлена уменьшением глобальной концентрации радиоуглерода после объявления моратория в 1964 г.

Вода реки Терскол содержит углерод с еще меньшей удельной активностью, чем фирн, что, очевидно, вызвано подпиткой грунтовыми водами и выщелачиванием «мертвого» углерода из обломков пород и взвесей. Эти образцы показывают будущий возраст. Они несут в себе следы испытаний ядерного оружия.

Удельная активность ^{14}C в образцах льда и воды ледника Гарабаши

Образец	Концентрация HCO_3^- , мг-экв/л	Требуемое количество образца для получения 1 мл C_6H_8 , л	Удельная активность образца, распад/(мик·г)	Формальный возраст, лет
Талая вода из трещины	0,08	840	22,02	
Фирн	0,05	1330	21,08	
Речная вода (Терскол)	0,35	193	19,80	
Нарзан	5,25	13	0,33	$28\ 200 \pm 400$
Лед	0,10	680	13,03	340 ± 50

Доказательством вероятной подпитки реки Терскол глубинными водами являются данные по удельной активности нарзана, взятого из источника в долине этой реки. Как видно из табл. 20, удельная активность CO_2 этой воды довольно низкая и соответствует формальному возрасту в $28\ 200 \pm 400$ лет.

Радиоуглеродный возраст подморенного льда оказался равным 340 ± 50 годам.

Как уже указывалось, ядра тяжелых элементов, входящие в состав космического излучения, замедляются в верхних слоях стратосферы и вместе с космической и стратосферной пылью выпадают на земную поверхность в основном с атмосферными осадками. Стратосферная и космическая пыль (особенно ее мелкодисперсная часть) может рассматриваться в качестве коллектора радиоактивных нуклидов во время пребывания ее в атмосфере и в условиях ледника.

При изучении глобальных выпадений радиоактивных нуклидов уже давно экспериментально установлено наличие максимума в кривой широтного распределения на земной поверхности таких радиоактивных нуклидов, как ^7Be , ^{90}Sr , ^{137}Cs , имеющих искусственное и естественное происхождение. Максимальная концентрация указанных нуклидов в атмосфере приходится на 30° с. ш., а в дождевых водах этот максимум приходится на 40 — 50° с. ш. Можно полагать, что мелкодисперсная часть космической пыли (до 1 мкм) и космогенные нуклиды будут выпадать также преимущественно в районе 40-х широт северного полушария.

Высокогорные ледники Приэльбрусья являются гигантским аккумулятором космической пыли и космогенных нуклидов. Вместе с тем Приэльбрусье представляет собой один из наименее загрязненных объектов, что находит свое отражение в ультрамалой минерализации льда и атмосферных осадков (1 — 10 мг/л), а также в незначительном содержании взвешенных частиц.

Е. Н. Елизарова, М. М. Шац, Л. И. Густова, Ю. В. Кузнецов и др. в 1974 г. провели радиометрическое и радиохимическое исследование выделенных из талых вод концентратов взвесей и гидролизующихся элементов. Они исходили из того, что некоторые нуклиды могут быть использованы в качестве трассеров космогенных нуклидов. В частности, ${}^7\text{Be}$ и ${}^{137}\text{Cs}$ могут рассматриваться как аналоги космогенных нуклидов по механизму выпадения их на земную поверхность, а также использоваться для установления возраста отдельных зон ледника и талой воды.

Данные по содержанию и изотопному составу основных γ -излучателей, обнаруженных этими исследователями в концентрате, приведены в табл. 21. Сравнение содержания ${}^7\text{Be}$, ${}^{137}\text{Cs}$ и ${}^{144}\text{Ce}$ в

Таблица 21

Содержание и изотопный состав γ -излучателей, обнаруженных в концентрате

Изотоп	Энергия γ -излучения, кэВ	Период полураспада	Содержание к моменту отбора пробы, 10^{-12} кюри/л	Отношение нуклидов
${}^{144}\text{Ce}$	144	284 дн.	4,4	${}^{144}\text{Ce}/{}^{137}\text{Cs}=4$
${}^{108}\text{Ru}$	497	39,4 дн.	—	
${}^{106}\text{Ru}$	515, 620	372 дн.	2,9	${}^{106}\text{Ru}/{}^{144}\text{Ce}\approx 0,7$
${}^{137}\text{Cs}$	661	30 лет	1,1	
${}^{95}\text{Zr}$	756, 722	65 дн.	1,6	${}^{95}\text{Zr}/{}^{144}\text{Ce}\approx 0,4$
${}^{95}\text{Nb}$	764	35 дн.	6,9	
${}^7\text{Be}$	477	53 дн.	$\sim 5,4$	${}^7\text{Be}/{}^{137}\text{Cs}\approx 5$

концентрате и пробах свежеснеженных атмосферных осадков позволяет заключить, что талая вода ледника Гарабаши в среднем на $9/10$ разбавлена водой, образовавшейся при таянии льда, имевшего возраст свыше 30 лет. Отношения нуклидов удовлетворительно согласуются с данными по радиоактивным выпадениям в умеренных широтах для осени 1969 г.

В табл. 22 приведены данные А. Н. Елизаровой и др. по содержанию ${}^{230}\text{Th}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{231}\text{Pa}$, ${}^{228}\text{Th}$, ${}^{225}\text{Ra}$, ${}^{238}\text{U}$ в ледниковых водах, рассчитанные на основании радиохимического анализа концентратов, выделенных из этих вод.

Ледниковые воды по содержанию в них урана относятся к наименее ураноносным водам гидросферы. Так, концентрация урана в ледниковых водах почти в 100 раз ниже, чем в океанических, и в 10 раз ниже, чем в речных. В то же время содержание изотопов тория и протактиния (${}^{231}\text{Pa}$) в ледниковых водах примерно такое же или даже несколько превышает концентрацию указанных элементов в морских водах.

Содержание естественных радиоактивных нуклидов в ледниковых водах Приэльбрусья (ледник Гарабаши)

Нуклид	Содержание, г/л	Количество нуклида, необходимое для поддержания радиоактивного равновесия с обнаруженным в воде ураном, г
^{231}Pa	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
^{230}Th	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$0,8 \cdot 10^{-12}$
^{228}Th	$1,2 \cdot 10^{-17}$	—
^{232}Th	$3,4 \cdot 10^{-8}$	—
^{238}U	$3,8 \cdot 10^{-8}$	—
^{226}Ra	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-14}$
^{210}Pb	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-16}$

Из приведенных в табл. 22 данных следует, что в пределах точности определения ^{230}Th и ^{226}Ra находятся в ледниковых водах в радиоактивном равновесии с ураном. Отмеченное превышение ^{231}Pa над ураном, возможно, связано с погрешностями определения ультрамалых концентраций протактиния и в некоторой степени с погрешностями определения урана. Если нуклиды, входящие в состав уранового ряда (^{230}Th , ^{226}Ra , ^{231}Pa), находятся в радиоактивном равновесии с ураном, содержащимся в ледниковых водах, то это дает основание предположить, что основные количества ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{231}Pa и ^{238}U в этих водах приурочены ко взвесям терригенного происхождения, для которых характерно существование векового радиоактивного равновесия. Этот вывод следует также из того, что в ледниковых водах абсолютное содержание ^{230}Th , ^{232}Th , ^{231}Pa и ^{226}Ra близко к содержанию этих нуклидов в морских водах, в которых абсолютная величина содержания урана почти на два порядка выше, чем в ледниковых. Но если в морских и океанических водах процессы дифференциации изотопов тория и урана ярко выражены, то в ледниковых водах подобная дифференциация, по-видимому, еще не имеет места, и основная часть указанных изотопов связана с твердой фазой ледниковых вод.

Для датирования молодых образований можно использовать радиоактивный изотоп свинца ^{210}Pb с периодом полураспада 22 года. Метод был предложен Е. Гольбергом в 1963 г., и в настоящее время он находится в стадии детальной разработки, совершенствования и расширения ассортимента объектов. Известно небольшое число публикаций, посвященных определению возраста с помощью свинцового метода, в основном хронологии антарктического снега и гренландских фирнов. В работе Е. Пиччиотто (1966) изучено распределение ^{210}Pb в леднике Кесельванд-

фернер (Австрийские Альпы), и одна работа посвящена датировке озерных отложений (С. Кришпасвату и др., 1971 г.).

Изотоп ^{210}Pb образуется при распаде ^{222}Rn , являющегося членом гомологического ряда ^{238}U . В свою очередь ^{222}Rn образуется при распаде ^{226}Ra и, эмануруя из горных пород, попадает в атмосферу. Средняя концентрация радона в атмосфере оценивается в $6 \cdot 10^{-18}\%$ и меняется в зависимости от высоты, метеорологических условий и природы местности. Образующийся ^{210}Pb адсорбируется на аэрозолях и попадает на поверхность Земли, оседая в основном вместе с осадками (дождем и снегом). Среднегодовое выпадение ^{210}Pb на 1 м осадков равно 15 атомам в 1 мин на 1 см² поверхности. Время жизни ^{210}Pb в тропосфере, установленное по отношению родительских и дочерних элементов, составляет от 5 до 20 дней. Результаты определения содержания ^{210}Pb в осадках некоторых районов земного шара свидетельствуют о неравномерной его распространенности. Так, для южных полярных областей, удаленных от выхода коренных пород на дневную поверхность, характерно низкое содержание ^{210}Pb в воздухе и соответственно в осадках. В 1958 г. средняя концентрация ^{210}Pb в Антарктиде была в 20 раз меньше, чем в северном полушарии. Однако, судя по немногочисленным наблюдениям, для каждого данного района содержание ^{210}Pb в осадках остается примерно постоянным, что, впрочем, не исключает значительных годовых колебаний. Так, в Альпах удельная активность ^{210}Pb в снеге варьирует от 3 до 7 распадов/(мин·кг). Поэтому при геохронологической интерпретации экспериментальных данных по распространности ^{210}Pb трудно выбрать точку отсчета для определения возраста. Действительно, кроме годовых колебаний возможны отличия современной активности ^{210}Pb от активности в прошлом — 50 или 100 лет назад. Эти различия могут быть вызваны производственной деятельностью человека, планетарным изменением климата. Учитывая, что в снеге, выпадающем на фирновые поля ледника, происходят процессы обмена, для установления нулевой точки автором совместно с Г. Н. Бондаренко определялась активность свинца в снеге, претерпевшем воздействие весенних и частично летних дождей. При этом мы допускали, что по содержанию ^{210}Pb такой снег наиболее приближается к тому материалу, из которого формируется фирн и впоследствии лед. Средняя удельная активность ^{210}Pb в таком снеге за последние 2 года в районе Кавказа в среднем составила 4,5 распадов/(мин·кг).

На рис. 25 и 26 приведены схемы ледников Алибекбаши и Гарабаши, на которых обозначены точки отбора проб и возраст льда. Следует отметить некоторые особенности, которые учитывались при отборе проб. Как было установлено, в зоне таяния ледника поверхностный слой льда содержит ^{210}Pb , активность которого на два порядка больше по сравнению с нижележащими слоями. Поэтому присутствие в пробе 0,01% поверхностного льда может исказить возраст 50-летнего льда на 7 лет. Некоторое за-

нижение возраста льда возможно за счет ^{210}Pb , содержащегося во взвесах. Расчеты показывают, что занижение возраста для 100-летнего льда не превышает 2 лет, что находится в пределах погрешности радиометрических измерений.

Пробы льда отбирались Г. Н. Бондаренко с поверхностного слоя, а также из трещины с глубины 10—15 м. Активность ^{210}Pb в приповерхностных пробах, удаленных друг от друга на 50—100 м, но расположенных вдоль одного сезонного слоя, была практически одинакова, соответственно одинаков и возраст.

Пробы из трещин отбирали в точках, удаленных друг от друга на расстояние 10—15 м по линии, перпендикулярной к сезонным слоям. При этом неизменно образцы оказывались разновозрастными. В одних случаях более «молодой» лед оказывался в верхних слоях, в других — в нижних. Эти данные свидетельствуют о сложной динамике движения ледников, не исключающей перемешивания отдельных масс льда, особенно на ледоломах. Наиболее интересную информацию о времени жизни ледников можно получить из данных определения возраста льда на их «языке». Учитывая возмож-

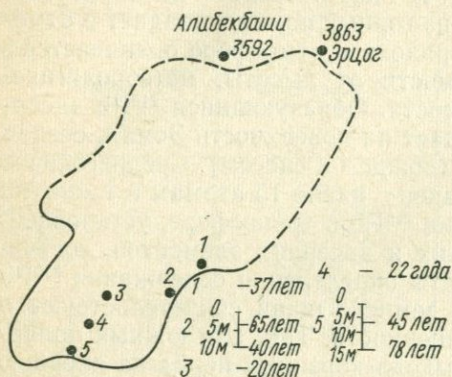


Рис. 25. Схема отбора проб на леднике Алибек (в точках 2 и 5 указана глубина отбора проб)

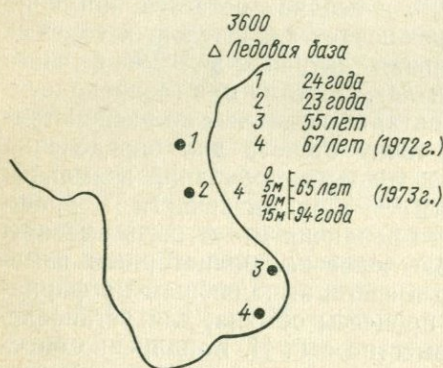


Рис. 26. Схема отбора проб на леднике Гарабаши (в точке 4 указана глубина отбора проб)

ность перемешивания, пробы отбирали с максимальным удалением по линии, перпендикулярной к сезонным слоям. Наибольший возраст, полученный на «языке» ледника Алибек, составил 80 лет, на леднике Терскол — 100 лет.

Такая же работа на леднике Гарабаши была выполнена Ю. В. Кузнецовым, О. С. Цветковым и М. М. Шац (1974). Точки отбора проб были несколько иными. Ими изучался не возраст, а миграция свинца.

Результаты определения ^{210}Pb в различных пробах, отобранных в Приэльбрусье, показывают, что наибольшая концентрация ^{210}Pb происходит в поверхностном слое льда (глубина до 3 см), где его содержание ($3,37 \cdot 10^{-10}$ кюри/л) приблизительно в 100 раз выше, чем в дождевой воде, фирне, ледниковой и речных водах [$(1,5-6,0) \cdot 10^{-12}$ кюри/л]. Концентрация ^{210}Pb в пробах свежевыпавшего снега, собранного на леднике Гарабаши, близка к концентрации этого нуклида в атмосферных осадках. Наблюдаемый в поверхностной зоне стократный избыток ^{210}Pb обусловлен сорбцией свинца мелкодисперсной взвешенной фазой, а также концентрацией взвешенных веществ и изотопов свинца в поверхностном слое льда на «языке» ледника в результате таяния и испарения льда.

Вернемся вновь к оценке скорости выпадения космического вещества на Землю, выполненной автором Г. Н. Бондаренко и Т. Н. Коромысличенко на основе материалов, собранных во время экспедиции на ледник Гарабаши в 1972 г. Приведем конкретный пример расчета.

На уровне границы питания ледника (граница между областью накопления и областью расходования льда) за год стаивает около 1 м снега и льда. С известными допущениями это значение может быть принято для всего ледника. Если площадь ледника составляет $2,7 \text{ км}^2$, годовой объем стаивания окажется равным $2,7 \text{ млн. м}^3$. В 1 м^3 талой ледниковой воды содержится $8,7 \text{ г}$ взвесей, следовательно, за год с ледника уносится $23,49 \text{ т}$ взвесей. Поскольку общее отступление ледника Гарабаши довольно медленное, в первом приближении можно считать, что столько же взвесей в год приносится на ледник атмосферными осадками. Степень космогенности этих взвесей составляет $0,02\%$. Это означает, что на всю поверхность ледника поступает $4,7 \text{ кг}$ космической пыли в год, а на 1 км^2 — $1,74 \text{ кг}$. Предположив равномерное поступление космического материала на всю поверхность Земли ($5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2$), получаем значение в 890 тыс. т/год .

Выше уже обсуждалась оценка скорости аккреции космического вещества Землей на основании изучения распространенности осмия в океанических красных глинах. По нашим данным, она равна $1,27 \cdot 10^7 \text{ т/год}$.

Таким образом, скорость аккреции по содержанию осмия в глубоководных глинах на порядок выше полученной на основании содержания осмия в ледниковых взвесах. Если учесть, что взвеси составляют лишь часть космического материала, выпадающего на ледник, следует отдать предпочтение значению 10^7 т/год .

Вместо заключения

В предыстории практика, естественно, опережала теорию, ныне же теория обязана провидеть пути практики, ибо за всякое невежество, проявленное сейчас, человечеству дорого придется заплатить потом.

Ст. ЛЕМ. Сумма технологии

То, что Земля является песчинкой мироздания и что само ее существование неотделимо от ближнего и дальнего космоса, люди поняли уже давно. Однако это понимание было чисто теоретическим. И те ученые, которые отдавали себя исследованиям связей Земли с космосом, считались чудаками и чуть ли не мистиками, а их научные воззрения казались абстрактными.

В последние 15—20 лет положение резко изменилось. Стимулом явился первый полет человека в космос и начавшееся исследование ближнего космоса — Солнечной системы. Слова В. И. Вернадского о неразрывности связей Земли с космосом наполнились практическим смыслом. Теперь уже нет сомнения в том, что энергетические ресурсы, полезные ископаемые, климатические изменения и все остальное, чем жив человек, заложено в механизмах формирования Земли как планеты, в эволюции слагающего ее вещества, в современных связях Земля — Луна — Солнце — Солнечная система — Галактика.

Одним из проявлений связей Земли с космосом является вещество, постоянно выпадающее на Землю. Об огромных масштабах этого явления еще несколько десятков лет назад ученые и не догадывались.

На ранних этапах существования нашей планеты космического вещества выпадало, конечно, значительно больше. Оно составляло внушительную долю осадочной оболочки земной коры и, в частности, принимало активное участие в создании термоизоляционных слоев, способствуя накоплению радиогенного тепла в отдельных участках земной коры.

Планомерное исследование космической пыли только начинается, но мы уже представляем себе, насколько это важно для теоретической геологии и геохимии. А раз это необходимый ингредиент теории, которая освещает путь практике, можно не сомневаться и в практических результатах подобных исследований.

Природные ресурсы не бесконечны, поэтому теоретическая геология должна дать прогнозную оценку возможных запасов. Например, на сколько лет человечеству хватит запасов нефти? Не пора ли уже ограничить ее добычу с тем, чтобы использовать только в крайнем случае. Так, установлено, что разведанных запасов нефти в США хватит на 15—20 лет, в Европе — на 5—10, если не будет сокращен экспоненциальный рост ее добычи. Какое отношение имеет эта злободневная, казалось бы, чисто экономическая проблема к исследованию метеоритов, космиче-

ской пыли или Луны? Оказывается, имеет и весьма прямое. Нефть, по мнению большинства ученых, есть продукт жизнедеятельности организмов былых геологических эпох. Раз так, то ее запасы не могут быть достаточно велики. Существует другая точка зрения: нефть — вся или частично — результат определенных неорганических химических реакций, поэтому ее запасы могут быть огромны, и, более того, она даже в наше время может синтезироваться в глубинах планеты.

Спор длится со времен Д. И. Менделеева, и от установления истины зависит многое. Как и на что тратить нефть? Хватит ли ее нашим детям и внукам? Где ее искать? Может ли она быть на «мертвых» планетах? В условиях Земли этот спор, по-видимому, кончится не очень скоро. Действительно, в той поверхностной пленке Земли, которая доступна непосредственному изучению при помощи самых глубоких буровых скважин (около 7 км), нет места, не загрязненного органикой. Чистый эксперимент поставить невозможно. Недавно советские ученые даже в гранитах нашли раковины моллюсков. Таким образом, даже если мы найдем нефть в гранитных массивах, мы не сможем утверждать, что нефть имеет неорганическое происхождение.

Другое дело на Луне. Там не обнаружено ни малейших признаков жизни. Окажется там нефть — значит, и на Земле она способна возникать без участия живых организмов. Не окажется — вопрос остается открытым. Существуют прямые экспериментальные доказательства присутствия простейших органических радикалов в спектрах некоторых комет. Найдены довольно сложные органические соединения в некоторых типах каменных метеоритов. Правда, эта органика мертвая (с нашей, земной точки зрения) в противоположность многим органическим соединениям нефти, но тем не менее эти данные льют воду на мельницу сторонников неорганического происхождения нефти.

Луна, с точки зрения геолога, кузница Плутона. На ней нет атмосферы, гидросферы, биосферы. Она предстает перед нами обнаженной со времен творения. Правда, тут необходимы некоторые поправки: лунные породы подвергаются воздействию колоссальных перепадов температур (от +200 до —200°), радиации, т. е. постоянному облучению космическим излучением и, в частности, солнечным ветром, они постоянно бомбардируются метеоритами. Однако все эти явления затрагивают лишь самую верхнюю часть лунной почвы (даже при ударе крупного метеорита или астероида — максимум на десятки или сотни метров). Поэтому «лунный мир» должен отражать мир земных недр, скрытый ныне в результате процессов эрозии. Над нашей одной-единственной планетой не поставить эксперимент, над Луной, кстати, тоже. Человеческая жизнь по сравнению с жизнью планет — меньше, чем миг. Но человечеству важно знать: где, почему и как концентрируются руды; можно ли управлять процессами рудообразования; что такое землетрясения и как их предсказывать?

Вопросы задает сама жизнь, а ответ... Есть все основания думать, что освоение космоса, как ни что другое, поможет ответить на эти вопросы. Ибо природа сама ставит эксперименты. Если химик желает знать, как поведет себя объект при повышенной температуре, он ее повысит. С земной корой так не поступишь. Но есть планета Венера, чья кора нагрета с поверхности куда сильнее, чем земная; есть Меркурий — раскаленная планета, причем в различных своих областях по-разному.

Неясно, какую роль в распределении элементов и рудообразований играет поле тяготения Земли. Гравитация Луны слабее... Марс занимает промежуточное положение. О планетах-гигантах, по-видимому, обладающих огромной гравитацией, мы пока ничего определенного сказать не можем.

Однако не это главное. История свидетельствует о том, что самым важным часто оказывается не то, чего ждешь, а наоборот, то, чего заранее нельзя предвидеть. Никто не ожидал от Нового Света кукурузы и картофеля. Никто не знал, что животный мир Галапагосских островов подскажет Дарвину идею возникновения видов. Таких примеров можно привести очень много. Более того, часто уже сделанные изобретения и открытия далеко не сразу признаются современниками, но, если они казались человеку привлекательными, он настойчиво пытался их использовать. Посмотрите, с какой быстротой произошло внедрение телевизоров. Еще быстрее внедрились транзисторы.

Всем известны слова К. Э. Циолковского, что Человечество не может жить вечно в колыбели. И это диктуется далеко не одной извечной любознательностью человека, но самой жизнью. Земной шар ограничен, и мы это уже сейчас ощущаем. Все меньше остается девственных необжитых уголков. Более того, немислимо в условиях Земли бесконечно развивать промышленность и энергетику. Во-первых, мы будем завалены отходами производства даже при самом разумном их использовании, а, во-вторых, просто повысится температура Земли, и она окажется весьма негостеприимной планетой. Значит, производство должно выйти за пределы Земли. Плацдарм для этого выхода надо готовить сейчас. Поэтому когда мы говорим, что изучение Космоса — Луны, далеких планет, метеоритов, космической пыли служит всему человечеству, то в этих словах заключен великий смысл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амбарцумян В. А. Проблемы эволюции Вселенной. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1968.
- Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. М., Гостоптехиздат, 1962.
- Васильев М. В., Станюкович К. П. Сила, что движет мирами. М., Атомиздат, 1969.
- Вдовыкин Г. П. Алмазы в метеоритах. М., «Наука», 1970.
- Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., «Наука», 1965.
- Взрывные кратеры на Земле и планетах. Сб. Пер. с англ. Под ред. К. П. Станюковича. М., «Мир», 1968.
- Виленский В. Д. Современное отложение сферических микрочастиц в снежном покрове Антарктиды. — «Геохимия», 1972, № 5, с. 592.
- Власов Н. А. Антивещество. М., Атомиздат, 1966.
- Войткевич Г. В. Происхождение и химическая эволюция Земли. М., «Наука», 1967.
- Воробьев Г. Г. Что вы знаете о тектитах? М., «Наука», 1968.
- Всехсвятский С. К. Природа и происхождение комет и метеорного вещества. М., «Просвещение», 1967.
- Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Черные дыры во вселенной. — «Природа», 1972, № 4, с. 33.
- Каула У. Введение в физику планет земной группы. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
- Комаров В. Что было вначале? — «Вокруг света», 1972, № 11, с. 54.
- Кринов Е. Л. Метеоритные кратеры на поверхности Земли. — «Метеоритика», 1962, вып. 22, с. 3.
- Крылов А. Я. Изотопы гелия в осадках океанов. — «Геохимия», 1973, № 2, с. 284.
- Лаврухина А. К. О дифференциации элементов в протопланетном облаке. — «Метеоритика», 1973, вып. 32, с. 7.
- Лазаренко Е. К., Ясинская А. А. Некоторые современные аспекты космической минералогии. — «Минералогический сборник Львовского университета», 1970, № 24, вып. 4., с. 267.
- Ларин В. Н. Верна ли главная догма геологии? — «Химия и жизнь», 1974, № 1, с. 33.
- Левин Б. Ю., Симоненко А. Н. Земля среди пыли и камней. — «Природа», 1973, № 4, с. 7.
- Масайтис В. Л. Геологические последствия падений кратерообразующих метеоритов. Л., «Недра», 1973.
- Проблемы космохимии. Сб. Под ред. Э. В. Собоновича. Киев, «Наукова думка», 1974.
- Проблемы космохимии и метеоритики. Сб. Под ред. Э. В. Собоновича. Киев, «Наукова думка», 1971.

- Проблемы Тунгусского метеорита.** Сб. Под ред. Н. В. Васильева. Томск, изд. Томского гос. ун-та, 1967.
- Пухляков Л. А.** Обзор геотектонических гипотез. Томск., изд. Томского гос. ун-та, 1970.
- Робертсон Р. В., Грив Р. А. Ф.** Астрооблемы Канады. — «Природа», 1973, № 9, с. 70.
- Рудник В. А., Собонович Э. В.** Ранняя история Земли. Л., «Недра», 1973.
- Сафронов В. С.** Эволюция допланетного облака и образование Земли и планеты. М., «Наука», 1969.
- Семененко Н. П.** Кислородно-водородная модель Земли. Препринт ИГФМ, 1974.
- Собонович Э. В.** Изотопы свинца в геохимии и космохимии. М., Атомиздат, 1970.
- Собонович Э. В.** Изотопная космохимия. М., Атомиздат, 1974.
- Субботин С. И., Наумчик Г. Л., Рахимова И. Ш.** Мантия Земли и тектогенез. Киев, «Наукова думка», 1968.
- Тамразян Г. П.** Некоторые главнейшие планетарные тектонические закономерности и их причинные связи. — «Изв. вузов, сер. геология и разведка», 1967, № 11, с. 3.
- Трошичев Б. И.** О возможном влиянии крупных космических тел на горные породы земной коры и на изменение условий в атмосфере Земли. — «Изв. Всесоюз. геогр. об-ва», 1971, вып. 103, № 1, с. 42.
- Фесенков В. Г.** Тунгусское падение и связанные с ним проблемы. — «Метеоритика», 1968, вып. 28, с. 107.
- Флоренский К. П.** Новое в изучении Тунгусского метеорита 1908 г. — «Геохимия», 1962, № 2, с. 187.
- Хаин В. Е.** Общая геотектоника. М., «Недра», 1973.
- Шама Д.** Современная космология. Пер. с англ. М., «Мир», 1973.
- Эйнасто Я. Э., Ийвээр М. М.** Галактика Андромеда. — «Природа», 1972, № 11, с. 75.
- Subotowicz M.** Postepy astronautyka. 1970, N 1 (8), str. 5—24.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Родословная космического вещества	8
1. Беспорядок в мире звезд	14
2. Антивещество во Вселенной	25
3. Солнечная система	34
Глава 2. Влияние космического окружения на Землю	51
1. Метеориты и тектиты	57
2. Метеоритные кратеры	79
3. Космическая минералогия и алмазы	91
Глава 3. Космическая пыль	102
1. Океан и скорость поступления космического вещества на Землю	110
2. Шарики космического происхождения	121
3. Космическое вещество на ледниках	140
Вместо заключения	154
Список литературы	157

Эмлен Владимирович Соболевич

КОСМИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Редактор Г. М. Пчелинцева
Художественный редактор А. Т. Кириянов
Технический редактор Н. А. Власова.
Обложка художника И. Д. Богачева
Корректор О. Р. Харламова

Сдано с набор 17. XII. 1975 г. Подписано к печати 25. III. 1976 г. Т-03286. Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 10,67. Тираж 5000 экз. Цена 1 р. 08 к. Зак. изд. 73049. Зак. тип. 830.

Атомиздат, 103031. Москва, К-31, ул. Жданова, 5.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

1 р. 08 к

1911

АТОМИЗДАТ