

623.51

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ

Б. Ю. Левин

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

В межпланетном пространстве движется множество твердых тел и частиц — от бесчисленных пылинок поперечником в доли микрона до глыб в сотни метров и даже километры. Мельчайшие пылинки затормаживаются высоко в атмосфере еще до того, как они раскалятся, но когда они опускаются на поверхность Земли, их в большинстве случаев невозможно отличить от земной пыли. А весьма дорого стоящий сбор космической пыли в верхних слоях атмосферы дает лишь ничтожно малые количества вещества. Более крупные частицы разрушаются и испаряются в атмосфере, давая кратковременные вспышки метеоров или, при больших размерах, более эффектный полет «огненных шаров» — болидов.

Тела от нескольких сантиметров до немногих метров, если они обладают достаточной механической прочностью и в то же время небольшой геоцентрической скоростью (не более 20—25 км/сек), не полностью разрушаются в атмосфере, и в этих случаях полет болида завершается выпадением одного или нескольких метеоритов — оплавленных снаружи, но неизмененных внутри остатков космического тела, влетевшего в земную атмосферу. Встречи Земли с еще более крупными телами происходят крайне редко. К тому же такие тела беспрепятственно пробивают атмосферу и их удар о поверхность дает взрыв, разрушающий само тело и созидающий кратер.

Таким образом, главным источником космического вещества, попадающего к нам в руки, являются метеориты.

За последние десятилетия научное место и роль исследований метеоритов и их происхождения существенно изменились. В начале нашего века, в эпоху ошибочных представлений о гиперболических скоростях болидов и межзвездном происхождении метеоритов, последние рассматривались просто как пример космической эволюции вещества. Когда выяснилось, что метеориты являются членами солнечной системы, образовавшимися вместе со всей системой (как это думали еще в XIX в.), они стали важнейшим источником сведений о ранних стадиях ее формирования. Кроме того, они стали источником сведений о «космическом» обилии нелетучих элементов для развивающихся в последние годы исследований нуклеогенезиса, а также источником сведений о ядерных реакциях, происходящих под действием космических лучей.

Использование данных о метеоритах в последних двух областях опирается на знание хотя бы самых основных черт их истории и в свою

очередь дает много ценного для выяснения их происхождения. Больше того, исследования метеоритов сделали возможными два новых подхода к изучению происхождения солнечной системы. В дополнение к классическому подходу, существовавшему со времен Канта, в котором выяснение процесса формирования системы опирается в первую очередь на ее механические свойства, а остальные свойства служат для последующего уточнения хода процесса, появился подход, опирающийся в первую очередь на физико-химические свойства тел, входящих в систему, а также подход, в котором условия, существовавшие во время формирования солнечной системы, ищутся на основе анализа с точки зрения ядерной физики данных об обилии элементов и об их изотопных отношениях. Начало физико-химического подхода было положено около 1950 г. работами Г. Юри, а ядерный подход содержится пока лишь в работах Гринстейна, Фаулера и Хойла 1962 г.

Метеориты могут быть изучены в лабораториях столь же подробно, как и земные горные породы. Но доступные нам земные горные породы являются продуктом дифференциации недр и последующей переработки на поверхности Земли. В отличие от этого, состав и структура метеоритов, в особенности некоторых типов, гораздо меньше изменились после их возникновения и потому много лучше характеризуют протопланетное вещество.

Количество фактических данных о метеоритах уже огромно, и оно продолжает расти в ускоряющемся темпе *). Но согласно замечанию Брауна, мы находимся на таком этапе накопления знаний, когда увеличение запаса фактических сведений не уменьшает, а, наоборот, увеличивает трудности в понимании происхождения метеоритов. Автор полагает, что эта ситуация вызвана вековым господством двух идей, которые он считает неверными: а) идеи об образовании метеоритов в расплавленных и дифференцированных недрах некоего землеподобного тела или тел; поэтому все усилия были направлены на поиски своего рода магматических или «доменных» процессов для объяснения каменных и железных метеоритов соответственно (исключения делались только для углистых хондритов); б) идеи о том, что метеориты из наших коллекций дают «репрезентативное сечение» единственного или, быть может, типичного родительского тела. Гипноз этих двух неверных идей сужал область поисков и явился главной причиной того, что сегодня мы еще не имеем теории происхождения метеоритов.

Кроме того, фактические данные о метеоритах относятся к различным наукам: астрономии, минералогии, химии, ядерной физике и др., и нет такого энциклопедически образованного ученого, который мог бы критически их оценить и синтезировать. Исследователи метеоритов, будучи весьма осторожными в своих областях, иногда высказывают очень смелые, почти фантастические идеи в смежных областях науки. Они часто меняют свои взгляды на происхождение метеоритов или высказывают одновременно несколько альтернативных гипотез.

§ 2. МЕТЕОРИТЫ И АСТЕРОИДЫ

«Ближайшими родственниками» метеоритов являются астероиды, или, как их иначе называют, малые планеты. Крупнейшие астероиды имеют поперечники в сотни километров, а наименьшие, доступные наблюдениям (но лишь при сближениях с Землей), — в 1—2 км. Однако нет сом-

*) В последние годы наиболее интересные данные стали накапливаться с помощью новых методов: изотопного анализа, анализа рассеянных элементов путем нейтронной активации, рентгеновского микрохимического анализа.

нений в существовании еще меньших астероидов, образующих непрерывный переход к гигантским метеоритам. Орбиты большинства астероидов располагаются между орбитами Марса и Юпитера, но есть и такие, которые заходят внутрь орбиты Венеры в перигелии или удаляются за орбиту Юпитера в афелии. Орбиты определены пока менее чем для 2000 астероидов. Но «черпки» слабых астероидов при помощи крупнейших телескопов показали, что общее число астероидов, доступных наблюдениям, достигает 50—60 тысяч.

В настоящее время все согласны с тем, что метеориты являются обломками астероидов, возникающими при их столкновениях. Но это не значит, что все астероиды, существующие сегодня, являются родительскими телами метеоритов, т. е. телами, внутри которых они были синтезированы и приобрели свой состав и структуру. Большинство современных астероидов слишком малы, чтобы иметь необходимую термическую историю. Многие из них обнаруживают колебания блеска, указывающие на то, что они являются угловатыми обломками более крупных тел.

Имеется целый ряд указаний на теснейшее родство между метеоритами и астероидами.

Статистические исследования распределения радиантов метеоритов ¹⁻⁴ (т. е. направлений их геоцентрической скорости), заключения, основанные на физической теории метеоров ², а также наилучшие определения орбит по визуальным наблюдениям ⁵ показали, что метеориты движутся по короткопериодическим орбитам и приходят из пояса астероидов. Недавно это было подтверждено первым точным определением орбиты метеорита Пшибрам по фотографическим наблюдениям ⁶.

Существование множества астероидов, движущихся по перекрещивающимся путям, изменяемым планетными возмущениями, неизбежно ведет к столкновениям этих тел. Вероятность столкновений достаточно велика, чтобы обеспечить их важную роль. Для 10 крупнейших астероидов Кейпер ⁷ подсчитал, что вероятность столкновения любых из них за $3 \cdot 10^9$ лет составляет 0,1. Согласно расчетам Петровского ⁸, для типичного астероида среднее время жизни между столкновениями составляет 10^8 — 10^9 лет. При наличии десятков тысяч астероидов столкновения должны происходить через 10^4 — 10^5 лет. Это подтверждается существованием семейств астероидов, открытых Хирамом и имеющих, согласно последним оценкам ⁹, продолжительность жизни порядка 10^6 лет. Эти семейства возникают в результате столкновений относительно крупных астероидов.

Для того чтобы осколок мог встретиться с Землей, он вовсе не должен сразу приобрести орбиту, пересекающую земную. Достаточно, чтобы он приобрел орбиту с перигельным расстоянием $q < 1$ астр. ед. Вследствие изменений такой орбиты под действием планетных возмущений обломок раньше или позже столкнется с Землей (или с Марсом). Среднее время жизни, вычисленное для тел, движущихся по орбитам, пересекающим земную и имеющим афелий в поясе астероидов, составляет порядка 10^8 лет ¹⁰. Оно согласуется по порядку величины с так называемыми «космическими возрастами» метеоритов, дающими длительность их облучения космическими лучами в виде небольших тел метровых или меньших размеров, т. е. дающими промежуток времени с момента их откола от родительского тела или полного раскола последнего. Космические возрасты, измеряемые по содержанию изотопов, являющихся продуктами процессов ядерного скальвания, составляют 10^6 — 10^9 лет ¹¹ *).

*) Для двух каменных метеоритов, Колд-Боккевельт и Фармингтон, получилось, что они выпали на Землю менее чем через 200 000 лет после отделения от родительского тела ¹².

Данные о космических возрастах обладают одной непонятной особенностью: возрасты каменных метеоритов в среднем на порядок меньше возрастов железных метеоритов (10^6 — 10^8 и 10^8 — 10^9 лет соответственно). Для объяснения этого Юри¹³ выдвинул гипотезу, что железные метеориты приходят из пояса астероидов, а каменные — с Луны и потому обладают меньшими возрастами. Но после того как для каменного метеорита Пшибрам была определена точная орбита, афелий которой лежит в поясе астероидов⁶, Юри отказался от своей гипотезы. Систематические различия в возрастах могли бы объясняться различной скоростью эрозии каменных и железных метеоритов под действием «солнечного ветра», космической пыли и более крупных частиц¹⁴⁻¹⁷. Однако эксперименты по бомбардировке метеоритов ионами He^+ , Ne^+ и Ar^+ показали, что каменные метеориты разрушаются не быстрее, чем железные^{17a}. В то же время отсутствие у каменных метеоритов корреляции между космическими возрастами и хрупкостью не подтверждает гипотезу о важной роли эрозии под действием ударов космической пыли.

Одно время представлялось непонятным существование группы метеоритов со сходными космическими возрастами, указывающими на их образование при одном и том же акте распада астероида. Казалось бы, высокая частота столкновений должна приводить к практически непрерывной последовательности возрастов. При этом упускалось из виду, что далеко не каждое столкновение порождает обломки, залетающие в район земной орбиты. Относительные скорости астероидов малы, поэтому их типичные столкновения не приводят к появлению подобных орбит^{18, 19}. Однако в некоторых случаях возникают обломки, размером от метеоритов до небольших астероидов, сближающиеся с орбитой Марса. Число небольших тел с подобными орбитами пополняется редкими столкновениями этих сравнительно малочисленных «марсианских» астероидов. Под действием возмущений от Марса некоторая часть этих тел приобретает орбиты, сближающиеся с земной, т. е. приобретает возможность сталкиваться с Землей²⁰.

Только почти центральные столкновения тел сходных размеров могут приводить к полному разрушению их обоих. Столкновения маленьких астероидов с большими должны создавать на последних ударные кратеры, подобные тем, которые существуют на Земле и Луне. Большой объем вещества под дном кратера должен быть сжат и нагрет ударной волной, раздроблен и частично перемешан с веществом ударившего тела. При почти скользящих столкновениях срезание внешних слоев должно ускорять остыивание оставшихся обнажившихся слоев.

Вывод о том, что астероиды (главным образом астероиды, пересекающие орбиту Марса) являются непосредственными предшественниками метеоритов, решает проблему их происхождения как индивидуальных, относительно маленьких тел. Одновременно с этим проблема происхождения метеоритного вещества сливается воедино с проблемой происхождения и развития астероидов. В недрах этих тел метеоритное вещество провело большую часть своей жизни. Возрасты метеоритов, определяемые по нелетучим продуктам распада и характеризующие время с момента образования твердого метеоритного вещества, составляют около $4,5 \cdot 10^9$ лет¹¹. Они много больше «космических» возрастов и, по всеобщему мнению, характеризуют возраст солнечной системы, отсчитываемый от начала формирования планет.

Ключ к решению проблемы родительского тела или тел метеоритов следует искать среди данных о химическом и минералогическом составе метеоритов и об их структурах и свойствах, а также в общих соображениях о происхождении солнечной системы.

§ 3. АТМОСФЕРНАЯ СЕЛЕКЦИЯ

Изучение происхождения метеоритов опирается на данные о метеоритах, выпадающих на Землю и попадающих в наши руки. Но для того чтобы не быть целиком разрушенным во время полета сквозь земную атмосферу, метеорит должен обладать достаточной механической прочностью^{21, 22}. Существование болидов, полет которых не завершается выпадением метеоритов и которые, кроме того, часто имеют заметные угловые размеры вследствие распада на целый рой тел, указывает, что далеко не все крупные метеоритные тела выдерживают это испытание на прочность. В то же время не только прочность железных метеоритов больше, чем каменных; у каменных наблюдается зависимость между структурой и прочностью: наиболее прочны перекристаллизовавшиеся метеориты. Поэтому автор уже давно выдвигает предположение о существовании в межпланетном пространстве метеоритов, еще более хрупких, чем наиболее рыхлые метеориты из наших коллекций, и потому никогда не сохраняющихся при полете сквозь атмосферу и не попадающих в наши руки.

Но даже среди механически прочных метеоритов не все типы нам известны. Время от времени находят метеориты с необычной структурой или свойствами. Некоторые типы известны пока лишь в виде включений в полимиктовых брекчевых метеоритах (см. § 5), но еще не попали к нам в руки в виде самостоятельных метеоритов²³.

Поэтому, выясняя происхождение метеоритов, мы должны, конечно, объяснить происхождение метеоритного вещества тех типов, которые имеем в своих коллекциях, но не должны при этом считать, что родительские тела состоят только из вещества этих типов и что они содержат эти типы в тех же пропорциях, что и наши музеи.

§ 4. КОСМОГОНИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Изменения общих идей планетной космогонии, произошедшие за последние десятилетия, имеют очень большое значение для теорий происхождения метеоритов и астероидов. В эпоху господства теорий, рассматривавших образование планет из раскаленных газовых сгустков, гипотеза об одной большой родительской планете (метеоритов и астероидов) была естественной, поскольку образование небольших газовых сгустков невозможно. Но теперь, когда главным строительным материалом считаются твердые частицы, эта трудность отпала. Более того, в теориях О. Ю. Шмидта, Юри, Хойла образование множества тел астероидных размеров является неизбежным этапом эволюции — промежуточным междудою протопланетным облаком и современными планетами*).

Существование почти непрерывных переходов между основными типами метеоритов — каменными, железо-каменными и железными — часто рассматривается как довод в пользу одной родительской планеты. Но эти переходы остаются естественными и в том случае, если существовало много сходных родительских тел, каждое из которых породило метеориты разных типов²².

Другим очень важным следствием современных космогонических теорий является понимание особого положения пояса астероидов на границе между зонами земных планет и планет гигантов^{21, 24a}. На ранней стадии возникновения солнечной системы, когда еще существовала непроп-

*). В 1956 г. Юри изменил свою точку зрения и по причинам, которые автор считает неубедительными, стал вместо тел астероидных размеров рассматривать тела лунных размеров, т. е. попечечником не в сотни, а в тысячи километров.

рачная газово-пылевая туманность, зона астероидов относилась к наружной холодной области, где аккумулировались ледяные тела. Позднее, когда аккумуляция пыли в астероидные тела очистила пространство, астероидная зона стала внешней частью области земных планет, прогреваемой солнечным излучением. Начальное содержание летучих в родительских телах астероидов и метеоритов могло быть очень большим, почти таким же, как и в ледяных ядрах комет²⁵. Возможно, что для объяснения происхождения некоторых наиболее восстановленных групп метеоритов окажется особенно важным рассматривать такие ледяные родительские тела не как льды летучих веществ с вкрапленными нелетучими частицами, а как аморфную неупорядоченную смесь летучих и нелетучих молекул и атомов²⁶.

Особое граничное положение зоны астероидов открывает некоторые возможности объяснения подозреваемых различий в химическом составе родительских тел (см. § 5). Они могут быть вызваны конденсацией первичных твердых частиц при разных температурах (ближе к внутреннему либо к внешнему краю астероидной зоны) или некоторым химическим разделением, которое могло сопровождать большую потерю летучих.

§ 5. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА МЕТЕОРИТОВ

Основными минералогическими составными частями метеоритов являются железо-магнезиальные силикаты (главным образом оливины $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_4$ и ортопироксены $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3$) и железо-никелевый сплав



Рис. 1. Хондрит Саратов.

Хондры, торчащие на поверхности излома ($\times 10$). В углу — часть наружной поверхности с корой плавления.

(в среднем 90% Fe, 10% Ni). В метеоритах найдено более 40 различных минералов, и их число продолжает возрастать. По крайней мере семь из них не обнаружены в земных горных породах²⁷.

Около 92% метеоритов, наблюдавшихся при падении, являются каменными (содержащими до 30% никелистого железа), около 2% явля-

ются железо-каменными (в среднем 50% силикатов, 50% никелистого железа) и около 6% являются железными *). По весу они составляют 85%, 5%, 10% соответственно (метеориты, весящие более 150 кг, слишком малочисленные для статистической обработки, отброшены ²⁹).

Около 90% каменных метеоритов, т. е. более 80% всех метеоритов, являются хондритами (рис. 1). Они содержат хондры — круглые силикатные частицы диаметром около 1 мм (до 3—5 мм), состоящие из кристаллических минералов (преимущественно оливин или пироксен) и стекла (рис. 2). Метеориты с хондровой структурой подверглись в разной степени термальному метаморфизму. Это проявляется в разной степени кристаллизации (или перекристаллизации) хондр и тонкозернистого вмещающего вещества. В сильно метаморфизованных хондриатах граница между хондрами и вмещающим веществом почти исчезает ³⁰⁻³³.

По сравнению с земными породами хондриты обладают замечательно однородным химическим и минералогическим составом. Химическая однородность особенно резко выражена у нелетучих элементов, т. е. когда анализы пересчитаны с исключением воды, углерода, кислорода и серы ^{34, 35, 27}.

С точки зрения физической химии очень важно, что метеориты содержат как окисленное, так и металлическое железо. Для хондритов Прайором в 1916 г. были установлены две закономерности, объединенные им в одной фразе: «Чем меньше содержание никелистого железа в хондриатах, тем богаче оно никелем и тем богаче железом магнезиальные силикаты». Это показывает, что окислительно-восстановительные соотношения определяют состав этих метеоритов, возникших из почти однородного исходного вещества.

В эпоху господства представлений об образовании планет из горячих солнечных газов, содержащих много водорода, казалось естественным считать, что в начальном состоянии вещество было полностью восстанов-

*) Обычно железные метеориты содержат лишь малые количества акцессорных минералов, но иногда встречаются и содержащие до 10—20% силикатов (см., например, ²⁸).

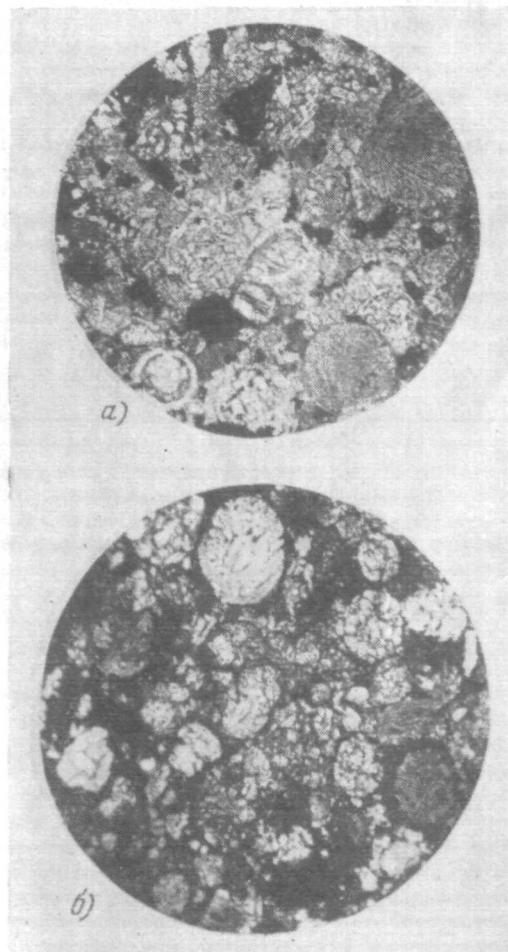


Рис. 2. Микрофотографии тонких шлифов метеоритов с хондрами разного типа.
а) Хондрит Александровский хутор, $d = 3,5$ мм;
б) хондрит Маныч. ($\times 12$).

ленным, и потому Прайор объяснял открытые им «законы» постепенным отделением метеоритов от магмы, проходящей различные стадии окисления. Однако положение изменилось в последние десятилетия, когда было выяснено, что планетная система образовалась из холодного протопланетного облака. Латимер³⁶ и Юри³⁷ показали, что первичные нелетучие вещества должны были быть полностью окисленными в присутствии газов

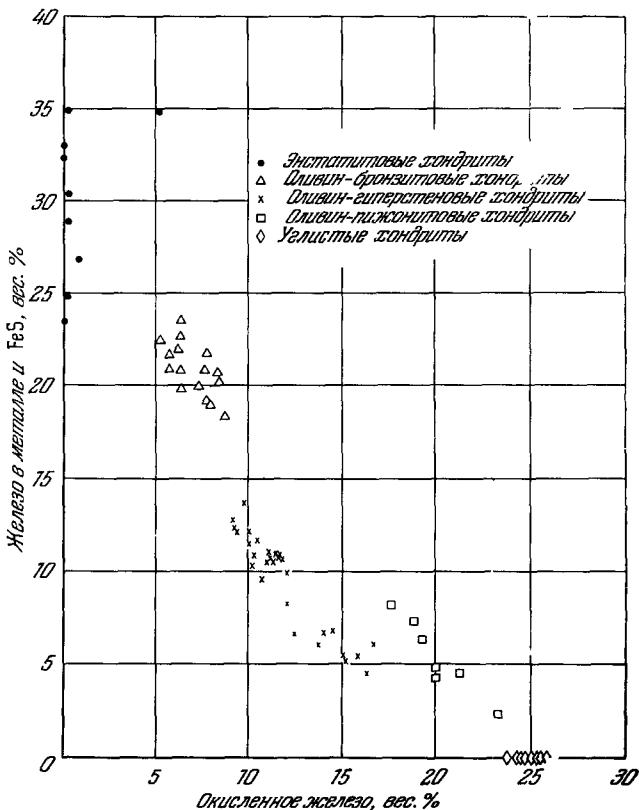


Рис. 3. Соотношение между содержанием окисленного железа и железа в металле и сульфиде в хондриатах, показывающее разделение на отдельные группы и изменения внутри групп (Мэйсон, 1962).

Мэйсон, как и многие другие авторы, относит железо в сульфиде (троилите) к восстановленному железу.

солнечного или «космического» состава при низких температурах. Поэтому теперь различное содержание металла в хондриатах связывают с различной степенью восстановления первоначально окисленного вещества. При этом обсуждается восстановление не водородом, а углеродом и углеводородами, которые поныне присутствуют в углистых хондриатах.

В последние годы общий интерес переместился в сторону признаков, указывающих на существование нескольких отдельных групп хондриотов. В 1953 г. Юри и Крейг³⁸, отбросив ненадежные анализы хондриотов, обнаружили существование двух групп с малым (*L*) и большим (*H*) общим содержанием железа — 22 и 28% по весу соответственно. Они решили, что эти группы состоят из обломков двух родительских тел. Позднее на основании наиболее надежных химических анализов было установлено, что пять групп хондриотов, выделенных ранее на основе их минералогиче-

ского состава, четко отделены одна от другой по содержанию никеля и кобальта, а также по соотношению металлического и окисленного железа (рис. 3) ^{27, 39, 46}. Из оливин-гиперстеновых *) хондритов выделена еще одна группа так называемых амфотеритовых хондритов, или группа Соко Банья ^{41-44, 44a, 19}.

Весьма важным является то, что в оливин-бронзитовых и оливин-гиперстеновых хондритах минералы находятся почти что в состоянии химического равновесия. Например, они содержат оливины с почти одинаковым содержанием железа ^{40, 33, 27, 45}. Но оливин-пижонитовые и углистые хондриты являются неравновесными. Они содержат оливины разного состава, и в последних, кроме того, совершенно нет равновесия между хондрами и вмещающим веществом ^{40, 33, 27, 45, 19}.

Выявление групп хондритов, отделенных одна от другой заметными пробелами, поставило под сомнение реальность «законов Прайора». Поскольку совокупность групп располагается на рис. 3 полосой, соответствующей приблизительно постоянному общему содержанию железа, некоторые авторы считают, что это подтверждает по крайней мере первый закон Прайора, связывающий содержание окисленного и металлического железа. Но другие авторы (Янель ⁴¹, Зюсс ^{24a}, Крейг ^{44a}) с помощью все более и более точных анализов показывают, что в пределах каждой группы содержание окиси железа как в оливине, так и в пироксене практически постоянно и не коррелирует с содержанием в данном метеорите металлического железа. То, что точки для метеоритов отдельных групп на рис. 3 рассеяны вдоль прямых, соответствующих постоянному общему содержанию железа, Крейг приписывает частично ошибкам анализов, частично окислению при процессах выветривания на Земле. Однако это может объясняться различным содержанием оливина и пироксена (в оливине и пироксене, находящихся в равновесии, содержание окисленного железа в оливине больше, чем в пироксене). Следует добавить, что «групповой закон Прайора» выполняется лишь приближенно, поскольку существуют группы метеоритов с различным общим содержанием железа.

Группы оливин-бронзитовых и оливин-гиперстеновых хондритов настолько однородны, что каждая из них, вероятно, состоит из обломков одного и того же родительского тела или, быть может, из обломков одного и того же слоя родительского тела. С другой стороны, энстатитовые хондриты сильно различаются по содержанию железа, а углистые хондриты распадаются на группы с разным содержанием летучих и разным минералогическим составом (см. ниже). Такая неоднородность этих групп заставляет предполагать, что каждая из них содержит образчики из разных родительских тел или по крайней мере из разных слоев одного и того же тела.

Надежные определения содержания многих элементов, включая рассеянные элементы, изучаемые преимущественно методом нейтронной активации, показали, что некоторые из них содержатся в разных группах хондритов в весьма различных количествах ^{46-50, 43, 19}. Кроме того, индивидуальные метеориты в пределах каждой группы обнаруживают большие различия в их содержании. Последнее может быть вызвано неоднородностями исходного вещества, быть может, метровых масштабов.

Распределение литофильтных, сидерофильтных и халькофильтных элементов, т. е. элементов, имеющих тенденцию концентрироваться в сили-

*) Названия групп, предложенные Мэйсоном (см. рис. 3), отвергаются Крейгом ^{44a}, как не согласующиеся с терминологией, применяемой в петрологии земных изверженных пород.

катной, металлической и сульфидной (FeS) фазах метеоритного вещества, зачастую существенно отличается от ожидаемого.

Ахондриты, т. е. каменные метеориты, не имеющие хондровой структуры, являются более дифференцированными и грубоクリсталлическими, чем хондриты. В них бывает мало металлического никелистого железа или же оно совсем отсутствует. Некоторые из них похожи на переплавленные силикатные части хондритов, другие подобны силикатной фазе железо-каменных метеоритов и, кроме того, обнаруживают сходство с некоторыми земными горными породами.^{27, 50, 51, 19}

Многие каменные метеориты и некоторые железо-каменные являются брекчиями, т. е. имеют обломочную структуру^{23, 50, 52}. Большинство

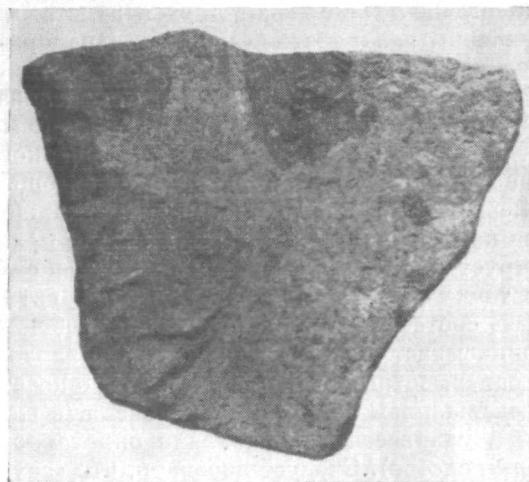


Рис. 4. Хондрит Хобдо — полимиктовая брекчия ($\times 1,8$).

т. е.). Жилковатые каменные метеориты и метеориты со светло-темной (пятнистой) структурой являются разновидностью брекчий метеоритов. Вещество жилок и темных частей имеет почти такой же химический состав, как и светлое вещество, но обладает тонкозернистой или стекловатой структурой. Согласно новейшим данным⁵⁵ жилки и темное вещество возникают под действием ударных давлений в несколько сотен килобар **).

Структуры железных метеоритов тесно связаны с содержанием никеля. Фазовая диаграмма для железо-никелевых сплавов позволяет объяснить эти структуры как результат медленного остывания больших монокристаллов никелистого железа от температур, когда существует только

*) С 1949 г. автор считал, что брекчия метеориты являются указанием на неоднократные полные разрушения и повторную аккумуляцию астероидов⁵⁴. Но теперь он считает, что они могут быть объяснены смешением двух соударяющихся тел или, быть может, даже смешением внутри одного тела.

**) Несколько лет назад было выяснено, что в метеоритах с пятнистой структурой первичные инертные газы, если они имеются в данном метеорите, сосредоточены в темном веществе, измененном ударным давлением (о присутствии первичных газов в метеоритах см. ниже, конец § 5). Повышенное содержание серы в темных жилках, предполагавшееся Андерсоном и его сотрудниками^{25, 98, 19}, остается спорным. Но недавно Рид^{55а} обнаружил повышенное в шесть раз содержание висмута в темном веществе метеорита Пантар, а Влоцка обнаружил в нем повышенное в пять раз содержание углерода. Однако есть подозрение, что в этом метеорите различие между светлым и темным веществом не сводится к действию удара.

из них состоит из одного и того же раздробленного и спрессованного вещества (мономиктовые брекчии). Другие содержат обломки метеоритов нескольких типов (полимиктовые брекчии; рис. 4). Наиболее интересными примерами полимиктовых брекчий являются Нечаево — раздробленный железный метеорит (октаэдрит) со включениями перекристаллизованного хондрита³¹ и Бенкуббин, представляющий собой смесь обломков ахондрита и по крайней мере хондритов трех типов, заключенную в металле⁵³. Брекчия метеориты, несомненно, возникли при столкновениях родительских тел метеори-

γ -фаза (выше 500—800° С для обычных содержаний никеля в метеоритах) через область $\gamma + \alpha$. (В равновесном состоянии α -фаза, называемая камаситом, содержит меньше никеля, чем γ -фаза, называемая тэнитом.) Железные метеориты, содержащие менее 6% Ni, пересекают всю область $\gamma + \alpha$ и достигают области чистой α -фазы, т. е. они целиком перекристаллизованы в камасит. По типу их кристаллической решетки их называют гексаэдритами. Некоторые из них в дальнейшем потеряли гексаэдрическую структуру в результате термального метаморфизма и превратились в бедные никелем атакситы. Чаще всего встречаются железные метеориты, содержащие от шести до 14% Ni. Они состоят из камасита и тэнита (γ -фаза), которые в значительной мере разделены, и это проявляется в видманштеттеновой структуре, выступающей при травлении полированной поверхности. Их называют октатэдритами, так как камаситовые балки воспроизводят октаэдрическую структуру первоначальных кристаллов γ -фазы. С увеличением содержания никеля толщина камаситовых балок убывает, и при 12—14% Ni видманштеттенова структура исчезает. Железные метеориты с еще большим содержанием Ni образуют группу богатых никелем атакситов. Они состоят из плессита — тонкозернистой смеси камасита и тэнита. Так называемые неймановы линии, наблюдающиеся в камасите некоторых железных метеоритов, образовались под действием ударных давлений, превышающих 100 кб^{56, 57}.

Рентгеновский микроанализ изменений содержания Ni поперек балок камасита и тэнита в октаэдритах^{58, 59}, в сочетании с данными о зависимости коэффициентов диффузии от температуры, показал, что остывание от границы $\gamma/\gamma + \alpha$ до 300—400° С длилось порядка 10⁷—10⁸ лет, т. е. скорость остывания была 1—10° за 10⁶ лет. Однако существуют метеориты с исключительно крутым градиентом концентрации никеля, как будто указывающим на очень быстрое остывание порядка 1000—10 000° за 10⁶ лет. Но вероятнее всего эти крутые градиенты связаны с образованием видманштеттеновой структуры в условиях переохлаждения на 100—200°⁶⁰.

Возникновение первичных больших монокристаллов тэнита обычно объясняется кристаллизацией медленно остывавшего расплава никелистого железа. Однако метеорит Вашингтон-Каунти содержит неправильной формы поры, которые заметно округляются при нагреве до 1300° С в течение 100 часов⁶¹.

Янвель⁴¹ разделил железные и каменные метеориты на пять групп с различным содержанием никеля в металле, а Лаверинг, Ничипорук, Чодос и Браун⁶² обнаружили четыре группы железных метеоритов с различным содержанием галлия и германия. Несмотря на большую растворимость этих элементов в тэните по сравнению с камаситом, их содержание убывает с увеличением содержания никеля. Это говорит в пользу того, что метеориты этих групп образовались в разных родительских телах или по крайней мере в разных частях одного тела. Янвель⁶³ показал, что у октаэдритов, относящихся к каждой из этих четырех групп, грубость видманштеттеновой структуры по-разному связана с содержанием железа (см. также^{19, 50}). Это почти несомненно обусловлено разной скоростью остывания. На такие же различия указывает существенное перекрытие между октаэдритами и богатыми никелем атакситами в отношении содержания никеля^{63, 64}. Многие богатые никелем атакситы, вероятно, являются образцами, которые претерпели слишком быстрое охлаждение для того, чтобы могли образоваться видманштеттеновы структуры. Простейшим объяснением этого различия в термических историях является происхождение из родительских тел разных размеров.

В то время как железные метеориты являются представителями наиболее горячих частей метеоритного вещества, которые некогда были при температурах выше 700° С, углистые хондриты представляют противоположную крайность — вещество, которое никогда не было нагрето выше 200—300° С. Они содержат до 20% воды, до 3,5% углерода, свободную серу и неустойчивые органические соединения (углеводороды)^{65—67}. В кусочке стекла с внутренними напряжениями, найденном в углистом метеорите Мигеи, эти напряжения исчезли после отжига при 206° С в течение двух суток⁶⁸.

Винк³⁴ разделил углистые хондриты на три типа, или класса. Отнесенные к I типу содержат наибольшее количество летучих и состоят в основном из практически аморфных гидратированных силикатов (хлорит или, более вероятно, серпентин). В них нет ни хондр, ни оливина. В углистых хондритах II типа, содержащих 10—15% воды, имеется 10—30% оливина, представленного в виде хондр, но главную массу составляют гидратированные силикаты. В метеоритах III типа, содержащих около 1% воды, преобладают оливин и другие дегидратированные силикаты. Они содержат также малые количества никелистого железа.

Углистые хондриты I типа имеют состав, очень сходный с тем, который следует ожидать у твердого вещества, конденсированного в умеренно холодной туманности солнечного состава^{69 *).} Более того, содержание рассеянных элементов в углистых хондритах почти совпадает с их «космическим» обилием, тогда как в обычных хондритах они содержатся в сильно уменьшенных количествах^{43, 47—49}. На основе этих данных теперь считается, что из всех доступных нам в настоящее время веществ углистые хондриты I типа ближе всего к тому первичному веществу, из которого образовались планеты земной группы. В то же время они являются наиболее первичным типом метеоритов^{43, 48, 49, 53, 66, 67, 70, 27, 50, 19 **).}

Загадочным фактом является то, что не только наиболее окисленные углистые хондриты, но и наиболее восстановленные (см. рис. 3) энстатитовые хондриты содержат рассеянные элементы в «космических» количествах. Кроме того, метеориты обеих этих групп содержат большие количества первичных инертных газов.

Около 15 лет назад, когда точность измерений изотопного состава была невелика, было найдено, что ряд химических элементов Земли и в метеоритах (включая уран) имеют практически одинаковый изотопный состав. Это показало, что они образовались из одного и того же достаточно однородного вещества. Позднее, когда точность измерений возросла, было установлено, что изотопные составы О и S из метеоритов и из земных ультраосновных пород являются сходными и не обнаруживают изотопных сдвигов, подобных тем, которые наблюдаются в базальтах и гранитах, т. е. породах, являющихся продуктом дифференциации ультра-

*) Однако, как это неоднократно подчеркивалось Юри, «из современных астрономических наблюдений следует, что отношение железа к другим распространенным элементам на Солнце приблизительно в 2—5 раз меньше, чем в углистых хондритах»⁴³. Причина этого различия, так же как и различия между L- и H-группами хондритов, пока непонятна.

**) Это первоначальное предположение Юри было им позднее отвергнуто, так как выяснилось, что углистые хондриты не обладают точно тем же постоянным содержанием летучих элементов, которого он ожидал^{46, 71}. Оно было заменено идеей, что эти метеориты возникли из обычных хондритов путем неких гидротермальных изменений, что было ранее выдвинуто Заварицким^{30, 31}. Несколько лет назад Дю-Френ и Андерс⁷² предложили сходную гипотезу об образовании углистых хондритов I и II типов в результате воздействия водных растворов на «высокотемпературные» минералы: оливин, пироксен и троилит, образовавшие нечто похожее на вещество углистых хондритов III типа. Однако накопление новых данных заставило Андерса^{49, 67} и Юри⁴³ изменить свою точку зрения.

основных пород ⁷³. Некоторые изотопные аномалии, не связанные с короткоживущими радиоактивными элементами, были найдены для нескольких элементов (см. 11, 19, 49), но их интерпретация пока отсутствует.

В 1956 г. Герлинг и Левский ⁷⁴ открыли присутствие удивительно больших количеств инертных газов в ахондрите Старое Песчаное. Количество газов и изотопные составы показали, что они являются в основном первичными. В последующие годы рядом исследователей было установлено, что первичные газы присутствуют в малых количествах почти во всех обычных хондритах и в значительно больших количествах в углистых и энстатитовых хондритах. Механизм их захвата и последующие процессы изотопного разделения при диффузионных потерях остаются неясными ^{11, 19, 49}. Исследования первичных газов очень тесно связаны с определениями возрастов метеоритов и с изучением изотопных аномалий, порожденных распавшимися короткоживущими радиоактивными элементами.

§ 6. ГИПОТЕЗЫ «ОГНЕННО-ЖИДКОГО» ПРОИСХОЖДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ

В течение более чем столетия многие ученые пытались развить гипотезу Ольберса об одной крупной родительской планете, почему-то распавшейся и породившей астероиды (а согласно его последователям, также и метеориты). С середины XIX в. считалось, что эта гипотеза подкрепляется предполагаемым сходством между составом метеоритов разных типов и составом внутренних оболочек Земли (предположения о последних делались по аналогии с доменной печью). Именно это предположение толкало исследователей метеоритов на поиски магматических или вулканических процессов их образования *).

В последние годы отсутствие правдоподобных физических причин для распада единственной планеты, открытие групп метеоритов (§ 5) и современные идеи об аккумуляции планет заставили принять существование нескольких родительских планет, которые могли сталкиваться и разрушать друг друга. Тем не менее родительские планеты считались почти одинаковыми. Обычно пытались объяснить все особенности отдельных метеоритов их образованием в одном и том же «типовом» родительском теле.

Развитие родительской планеты рассматривалось в течение долгого времени чисто качественно. Только недавно начались попытки найти количественные указания на то, что метеоритное вещество некогда находилось под высоким давлением, т. е. находилось в недрах довольно крупного тела.

Первой из этих попыток мы обязаны Брауну и Паттерсону ⁷⁶. Исходя из распределения никеля и некоторых других элементов между металлом и силикатом каменных метеоритов, они пытались показать, что эти фазы некогда находились в равновесии при давлении 10^5 — 10^6 бар (при 2000—3000°). Эти расчеты были очень раскритикованы ^{77, 38}. Аналогичная попытка Лаверинга ⁷⁸ была основана на распределении никеля между металлом и силикатом в палласитах и между металлом и сульфидом в железных метеоритах. Но его расчеты были раскритикованы Юри ⁷⁹, а использованные данные — Янелем ⁸⁰.

Другой подход к этому вопросу основан на металлургическом изучении структур железных метеоритов. Например, несколько авторов ^{81—83}

*) Кроме того, оно толкало на неверный путь исследования внутреннего строения Земли, подкрепляя веру в гипотезу железного ядра. (На основании ряда геофизических и космогонических доводов автор является сторонником гипотезы Лодочникова — Рамсея, согласно которой ядро состоит из «металлизированных» силикатов ⁷⁵.)

считают, что существует довольно резкая граница между октаэдритами и богатыми никелем атакситами вблизи содержания никеля 12—13%; используя фазовую диаграмму никелистого железа, они пытаются показать, что эта граница может быть объяснена лишь в том случае, если остывание никелистого железа происходило при давлении 10⁵ бар. Однако при таком давлении коэффициент диффузии столь мал, что образование видманштеттеновых фигур заняло бы время, превышающее возраст солнечной системы⁸⁴. Кроме того, нет никаких доказательств того, что все железные метеориты являются частями одного и того же ядра родительской планеты и потому остывали с одинаковой скоростью. Наоборот, как уже отмечено в § 5, граница между октаэдритами и атакситами в действительности очень не резка, и это указывает на различную скорость остывания различных железных тел^{63, 64, 19}. На это же указывают различия в градиенте концентрации никеля вблизи границ камасита и тэнита в октаэдритах⁶⁰. Следует добавить, что фазовые диаграммы для никелистого железа как при низких, так и при высоких давлениях не способны объяснить наблюдаемое содержание никеля в камасите и тэните^{83, 85, 86, 19}. Предполагается, что это обусловлено неизвестным влиянием малых примесей. Но в таком случае на основании фазовой диаграммы для чистого никелистого железа никакие надежные заключения невозможны.

Обстоятельный анализ всех металлургических аргументов привел Андерса¹⁹ к заключению, что «больше нет никаких убедительных оснований предполагать образование железных метеоритов при высоких давлениях; наоборот, все имеющиеся данные представляются находящимися в хорошем согласии с образованием при низких давлениях, тогда как представление об образовании при высоких давлениях приходится подкреплять множеством специальных искусственных предположений».

Совершенно неубедителен довод в пользу существования у родительской планеты железного ядра, основанный на наличии у каменных и железных метеоритов доземных магнитных моментов^{85, 87, 88}. Они интерпретируются обнаружившими их исследователями как вызванные магнитным полем, которым обладали родительские тела во время медленного охлаждения. Предполагается, что источником этого магнитного поля было расплавленное железное ядро. Это объяснение принято также и Андерсом^{19, 25}. Однако чтобы создать магнитное поле, ядро должно было быть конвективным, а это крайне невероятно в железном ядре, почти лишенном радиоактивных элементов и окруженному мантией из силикатов, богатых этими элементами*).

Следует добавить, что Юри вообще не согласен с представлением, что все металлическое железо было собрано в железном ядре родительской планеты. Он придерживается обычной идеи, что палласиты (железо-каменные метеориты с металлом в виде сплошной структуры, подобной сотам) возникли в граничной зоне между расплавленным металлом и силикатом, но указывает на довольно большое отношение числа палласитов к железным метеоритам. Чтобы объяснить это отношение как отношение объемов граничной зоны к области чистого металла, Юри предполагает образование железных метеоритов не в большом ядре, а во многих очагах металла, разбросанных по всему объему родительского тела (модель «булки с изюмом»)⁸¹. Эти очаги должны были бы иметь весьма различные скорости остывания. Однако, как показывает Андерс¹⁹, нали-

*.) Удивительные магнитные свойства метеорита Бондок, на поверхности которого имеются десятки магнитных полюсов⁸⁹, Андерс (частное сообщение) склонен объяснять его брекчевой (обломочной) структурой.

чие многочисленных очагов расплавленного металла не привело бы к увеличению общего объема палласитового вещества.

Начиная с 1956 г., присутствие алмазов в метеоритах рассматривается Юри⁸⁴ (а с 1957 г. и Лаверингом⁷⁸) в качестве довода в пользу крупного родительского тела. Давления, необходимые для их образования, могут существовать стационарно в телах лунных размеров и круче. В 1961 г. Липштутц и Андерс⁹⁰ выдвинули объяснение, что алмазы в метеоритах образовались под действием ударных давлений при столкновениях астероидов или при ударах метеоритов о земную поверхность. В 1963 г. Юри⁹¹ согласился с тем, что присутствие алмазов не может более считаться указанием на большое родительское тело. Но в 1964 г. он вернулся⁹² к этому аргументу, ссылаясь на статью Картера и Кеннеди⁹³, которые настаивают на образовании метеоритных алмазов в условиях статического давления.

В 1960 г. Рингвуд⁹⁴ указал, что когэнит ($(Fe,Ni)_3C$), который присутствует в некоторых железных метеоритах, неустойчив при температуре в сотни градусов. Он стабилизируется давлением, и поэтому Рингвуд принял, что железные метеориты, содержащие когэнит, остывали при давлении, превышающем 25 кбар. Предположение Липштутца и Андерса⁹⁰, что когэнит стабилизован фосфором, было опровергнуто экспериментами⁹⁵. Но недавно Липштутц и Андерс⁹⁶ показали, что давление может всего в 10 раз увеличить время распада когэнита, тогда как в действительности он просуществовал в 10^{10} — 10^{11} раз большее время. Таким образом, предполагаемая роль давления опровергнута. Замедление распада эти авторы предположительно приписывают медленности образования зародышей в больших правильных кристаллах метеоритного когэнита. Важно отметить, что недавно⁹⁷ в железном метеорите Кендалл-Каунти был открыт тридимит — модификация кварца, которая при любой температуре неустойчива при давлении, превышающем 3 кбар*).

Против гипотезы крупного родительского тела или тел можно выдвинуть три главных возражения (см. также^{98, 19}).

1. Суммарная масса современных астероидов составляет около 0,03 лунной массы. Это не согласуется с гипотезой о родительском теле лунных размеров (и тем более нескольких таких тел). Распад астероидов протекает слишком медленно⁸, чтобы можно было рассматривать теплещие астероиды как небольшой остаток.

2. Как это неоднократно подчеркивалось Юри^{84, 99, 100}, термическая история тела лунных размеров не согласуется с предполагаемой термической историей родительского тела метеоритов. Остывание железных метеоритов, в которых образовались видманштеттеновы фигуры, должно было быть достаточно медленным и, следовательно, должно было происходить внутри родительского тела до его разрушения. Но, как показывают расчеты^{37, 101, 102}, центральные части тела лунных размеров, если они когда-то были горячими, должны оставаться расплавленными до настоящего времени**) и, таким образом, являются совершенно неподходящим местом для образования железных метеоритов. Трудности еще возрастают, если учесть, что возрасты каменных метеоритов, определяемые по удержанию ими газов радиогенного происхождения и характеризующие,

*) Присутствие тридимита в каменных и железо-каменных метеоритах известно давно, но эти метеориты можно было считать обломками внешних оболочек родительской планеты.

**) Простейшая формула $x = \sqrt{k t}$ показывает, что за $5 \cdot 10^9$ лет при температуропроводности горных пород $k \approx 10^{-2}$ существенные количества тепла успевают переместиться лишь на расстояние в сотни километров, тогда как тела лунных размеров имеют радиус в тысячи километров (радиус луны 1738 км).

с точки зрения гипотезы крупного родительского тела, время его распада (сопровождавшегося потерей ранее накопленных газов), очень велики и составляют $(4,5-4,6) \cdot 10^9$ лет ¹¹. Они практически совпадают с возрастом всей солнечной системы, и, следовательно, распад родительской планеты должен был произойти примерно через 10^8 лет после ее образования. Очень быстрый разогрев ее недр может быть предположительно приписан короткоживущим радиоактивным элементам, но ее охлаждение за этот короткий промежуток времени невозможно.

Недавно Юри, который на протяжении последних 10 лет неоднократно изменял свою точку зрения, сам натолкнулся на эту трудность. В 1953—1954 гг. он рассматривал образование метеоритов в астероидных телах. В 1956 г., после того как он обратил внимание на алмазы в метеоритах, он стал рассматривать первичные родительские тела лунных размеров, которые полностью разрушались при столкновениях, а их обломки вновь аккумулировались во вторичные тела ^{84, 13}. Эта гипотеза позволила избежать трудности с термической историей. Однако метеориты не являются случайными собраниями обломков, и потому эта идея была отброшена и Юри снова рассматривает только одно поколение родительских тел, но теперь — лунных размеров ⁹¹. Трудности с термической историей еще усиливаются последней идеей Юри о том, что на ранней стадии своего существования родительские тела метеоритов интенсивно разогревались извне, потому что находились в центре массивных сжимающихся газовых шаров ⁹².

3. Все попытки объяснить образование хондр и хондритов той или иной формой вулканической активности представляются несостоительными. Хотя Фредрикссону и Рингвуду ¹⁰³ удалось получить хондроподобные шарики, имитируя в лаборатории вулканализм взрывного характера, серьезные возражения, выдвинутые Вудом ¹⁰⁴ против вулканических гипотез, остаются в силе. Рингвуд ⁴⁰ считает, что метеориты, находящиеся в нашем распоряжении, дают репрезентативное сечение родительской планеты. 90% каменных метеоритов, падающих сейчас на Землю, являются хондритами. Но ведь невозможно, чтобы вулканализм превратил в хондрическое вещество всю силикатную мантию родительской планеты. (Недавняя гипотеза Мюллера ¹⁰⁵ об огненных тучах *) в итоге родительских тел представляется почти фантастической.)

Чтобы избежать этой трудности, Юри ⁹² делает противоположное предположение, что наши коллекции в высшей степени нерепрезентативны. Искажения, вносимые атмосферной селекцией (§ 3), должны преумножать, но никак не преувеличивать, долю хондритов, которые менее прочны, чем метеориты других типов. Искажения могут быть сколь угодно большими, если допустить, что «марсианские» астероиды, являющиеся непосредственными предшественниками выпадающих на Землю метеоритов (§ 2), представляют собой обломки лишь некоторых слоев крупного родительского тела. Но даже образование тонкого слоя со структурой и составом хондритов трудно объяснить вулканическими процессами.

Юри недавно вернулся ⁴³ к своим взглядам 1953 г. ³⁸, согласно которым удары обломков столкнувшихся родительских тел о поверхность сохранившихся тел создают местный разогрев и разбрызгивание силикатных капель, застывающих в хондры. Правда, теперь, описывая этот процесс, создающий, по его мнению, поверхностный слой хондрического вещества, Юри ссылается на эксперименты Фредрикссона и Рингвуда ¹⁰³.

*) Огненные тучи (nuées ardantes) — это облака раскаленного пепла, выбрасываемые при некоторых вулканических извержениях (например, при извержении Мон-Пеле в 1902 г.). Пепел длительно держится во взвешенном состоянии благодаря турбулентным движениям в облаке, и оно стекает по склону вулкана подобно жидкости.

по лабораторному моделированию взрывного вулканизма. Следует добавить, что вокруг метеоритных и взрывных (искусственных) кратеров на Земле никогда не находили хондр.

Делались попытки объяснить огненно-жидкое происхождение метеоритов, но не в больших родительских телах, а в телах астероидных размеров. Около 10 лет назад анализы метеоритов давали столь большие значения содержания в них урана и тория, что использование этих значений в математических расчетах термической истории астероидов вело к заключению, что долгоживущие радиоактивные элементы были способны расплавить недра тел поперечником от 200 км и больше 106 . В то время казалось, что астероиды средних и больших размеров могли быть местом образования метеоритов. Однако расчеты для современных значений содержания урана, тория и калия показали, что тепло, генерируемое этими элементами, могло расплавить лишь недра тел размером более 1000 км 107 .

Тем не менее Андерсу и его сотрудникам удалось развить идею об образовании метеоритов в телах астероидных размеров, имевших расплавленные недра 25 , 98 . Расплавление они приписали присутствию в протопланетном веществе короткоживущих радиоактивных изотопов (Al^{26} , Fe^{60}). (Эта идея была высказана Юри в 1955 г., но потом он ее отбросил.) Образование хондр они приписали вулканической активности и предложили циклический механизм для устранения халькофильных элементов из хондрической оболочки. В настоящее время сам Андерс 19 критикует эту гипотезу и сейчас предпочитает другую гипотезу образования хондрических, основанную на идеях Вуда (см. § 7).

Как уже было сказано в § 5, несколько лет назад Андерс и Дю-Френ считали, что гидратированные минералы в углистых хондрических образовались в результате действия водных растворов на «высокотемпературные» минералы. Для того чтобы совместить это с представлением о родительских телах астероидных размеров, неспособных удерживать на своей поверхности атмосферу и гидросферу, они выдвинули 72 идею о «внутренней атмосфере» и зоне жидкой воды внутри родительских тел. В теле, разогреваемом изнутри и имеющем наружную температуру около 150°K , должен существовать подповерхностный слой вечной мерзлоты, простирающийся до глубины, на которой достигается температура 273°K . Дальше вглубь, в интервале температур от 273 до $\sim 400^{\circ}\text{K}$, может существовать жидкая вода. Слой вечной мерзлоты, являющийся самозалечивающимся, может вести к сохранению «внутренней атмосферы» и играть важную роль в удержании инертных газов. Время существования такого слоя составляет от 10^6 лет около внутреннего края пояса астероидов до 10^{10} лет, т. е. много больше возраста солнечной системы, около внешнего края. Эта важная идея Андерса и Дю-Френа должна учитываться и использоваться во всех теориях происхождения метеоритов.

§ 7. ГИПОТЕЗЫ ПЕРВИЧНОСТИ ХОНДР

Трудность с объяснением происхождения хондр и хондрических минералов представляется главной для гипотез, рассмотренных в предыдущем параграфе. В поисках выхода из этого положения, Слонимский и автор 108 предложили в 1957 г. гипотезу, что хондры образовались в солнечной туманности путем прямой конденсации нелетучих молекул в твердые частички *). Однако при низких температурах, когда возможно образование аморфных

*) В 1949 г. конденсация хондр в горячей планетной атмосфере предполагалась Зюссом 109 .

шариков, конденсация является неселективной. Поэтому трудно объяснить минералогическую чистоту хондр и происхождение частиц никелистого железа и троилита, не говоря уже о происхождении железных метеоритов. Следуя Юри ^{13, 84, 100, 110}, который предполагал, что железо-никелевые включения в хондриях не образовались на месте, автор ⁵⁴ в то время считал возможным, что они образовались где-то еще до родительских тел хондриев и вошли в состав последних во время их аккумуляции. Таким образом, законы Прайора оставлялись без внимания. Положительной чертой этой гипотезы было то, что для объяснения термометаморфизма в хондриях надо было предположить лишь умеренный нагрев внешних частей родительских тел, тогда как более разогретые центральные части этих тел могли рассматриваться как места образования некоторых типов ахондриев. Однако эта попытка оказалась неудачной.

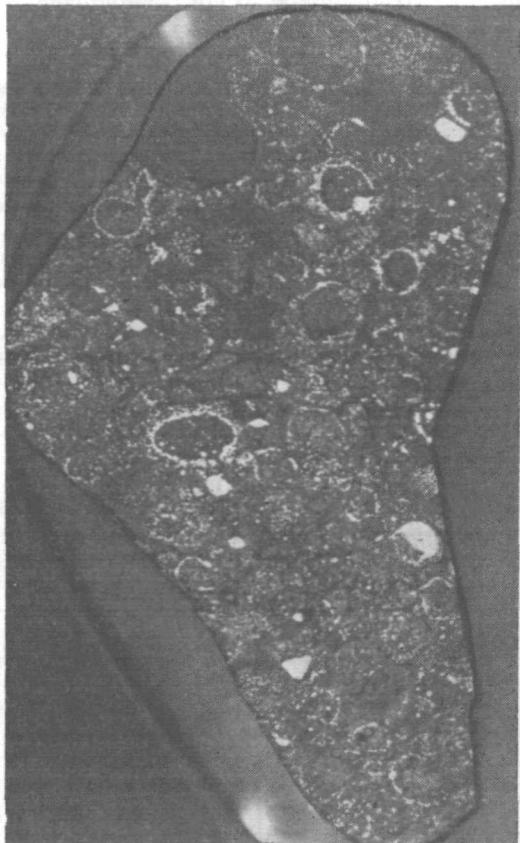


Рис. 5. Углистый хондрит Ренаццо — единственный содержащий много никелистого железа.

Полированная поверхность в отраженном свете. Видны многочисленные крупные хондры, окруженные ободками из металлических зерен.

Потом ¹⁰⁴ новый расчет необходимых температур и давлений в туманности показал, что такой процесс невозможен, и было признано, что конденсация приводит к образованию сильно окисленной пыли. Предполагается, что часть пыли была вновь нагрета и при этом восстановлена ударными волнами, порожденными мощными извержениями на молодом Солнце, и образовала силикатные и металлические капли, застывшие затем в хондры и металлические частицы. Сильно восстановленные хондры плюс металлы составили «высокотемпературную» фракцию первичного вещества, из которого аккумулировались родительские тела метеоритов, а сильно окисленная пыль составила «низкотемпературную» фракцию этого вещества. Пыль явилась вмещающим веществом для хондр и металла. Согласно Вуду, метеорит Ренаццо (рис. 5) представляет собой

В последние годы новые исследования металлических частиц в метеоритах, проведенные Квашей ¹¹¹, Ноксом ¹¹², Рамдором ¹¹³ и Андерсоном ¹⁹, дали достаточно убедительные указания на то, что большинство этих частиц образовалось на месте. Но в некоторых метеоритах они сломаны и сдвинуты с мест их возникновения во время приобретения брекчевой структуры.

В 1958 г. другая гипотеза первичности хондр была предложена Вудом ¹¹⁴. В первом варианте предполагалась конденсация жидких капель силикатов и железа во время остывания солнечной туманности.

почти неизменную неравновесную смесь обеих этих фракций, тогда как углистые хондриты I типа содержат лишь чистое вмещающее вещество. Считается, что другие хондриты содержат различные количества этих двух фракций и претерпели больший или меньший термальный метаморфизм. Происхождение железных, железо-каменных метеоритов и ахондритов объясняется обычным образом, как результат процессов плавления и дифференциации в родительских телах.

Недавно Меррихью¹¹⁵ нашел, что хондры из метеорита Брудерхейм обогащены избыточным ксеноном-129 и обеднены первичным ксеноном по сравнению со всем метеоритом. Можно считать это указанием на то, что хондры образовались раньше, чем родительские тела метеоритов. Однако нет уверенности, что это заключение правильно. В интерпретации изотопных аномалий ксенона есть много неясного^{11, 49, 19-116}.

С 1963 г. Андерс^{49, 19} принимает схему Вуда, которую он считает лучшей. Тем не менее, он делает некоторые критические замечания и допускает, что накопление новых данных может привести к ее замене.

Автору настоящего обзора представляется в высшей степени невероятным, чтобы ударные волны в протопланетном облаке, порожденные солнечными извержениями, могли проходить 300—500 миллионов километров в слое пыли, осевшей к центральной плоскости этого облака, достигая зоны, в которой образовались современные астероиды.

§ 8. ГИПОТЕЗА НЕРАСПЛАВЛЕННЫХ РОДИТЕЛЬСКИХ ТЕЛ

В 1960 г. Мэйсон⁷⁰ предложил гипотезу, что обыкновенные хондриты образовались из исходного вещества, сходного с углистыми хондритами I типа путем дегидратации и частичного восстановления при температуре выше 600° С. Первоначально он считал, что углистые хондриты содержат хлоритовые хондры, которые могут в твердом состоянии перекристаллизоваться в оливиновые и пироксеновые хондры. Но последующие исследования показали, что хлоритовых или серпентиновых хондр не существует, и потому была предположена сферолитовая кристаллизация оливина и пироксена, замещающих аморфное серпентиновое вещество^{117, 27}. Хотя оливин и пироксен являются минералами с высокой температурой плавления, их присутствие не обязательно означает образование при высокой температуре. Боуен и Туттл¹¹⁸ показали, что форстерит Mg_2SiO_4 может образовываться из серпентина при температуре ниже 400° С, а термодинамические данные Беннингтона¹¹⁹ указывают на то, что оливин и пироксен могут образовываться из вмещающего вещества углистых хондритов при умеренных температурах (оливин и серпентин сосуществуют в термодинамическом равновесии при низких температурах вплоть до 200° С). Мэйсон¹¹⁷ отметил, что «несмотря на присутствие значительного количества окисленного железа, оливии в углистых хондритах II типа почти или совершенно свободен от железа, что характерно для оливина, образовавшегося в результате термического распада серпентина».

Мэйсон в книге²⁷ называет образование хондр сферолитовой кристаллизацией; это дало основание Вуду¹⁰⁴ написать, что Мэйсон считает хондры порфиробластами. Так в геологии называют минеральные образования, возникшие путем перекристаллизации в твердом состоянии. Однако наиболее первичные хондры в углистых хондритах и в других неметаморфизованных хондритах являются лишь частично кристаллическими. Они содержат стекло и потому не могут считаться в строгом смысле слова продуктом кристаллизации или перекристаллизации.

Существование несмешиваемости в силикатных расплавах известно давно, но ее роль в геохимических процессах остается неясной. В последние

годы прогресс в технологии изготовления стекла и стеклокерамики (стеклолов) прояснил важную роль несмесимости в стеклах ниже температуры солидуса^{120, 121}. Разделение стекла на две метастабильные жидкости может происходить не только в тех случаях, когда при более высоких температурах возможно возникновение двух стабильных жидкостей, но и тогда, когда поле двух жидкостей на фазовой диаграмме не поднимается выше линии ликвидуса (рис. 6). Маленькие шарики, образующиеся в лаборатории при таком метастабильном разделении, являются, как и

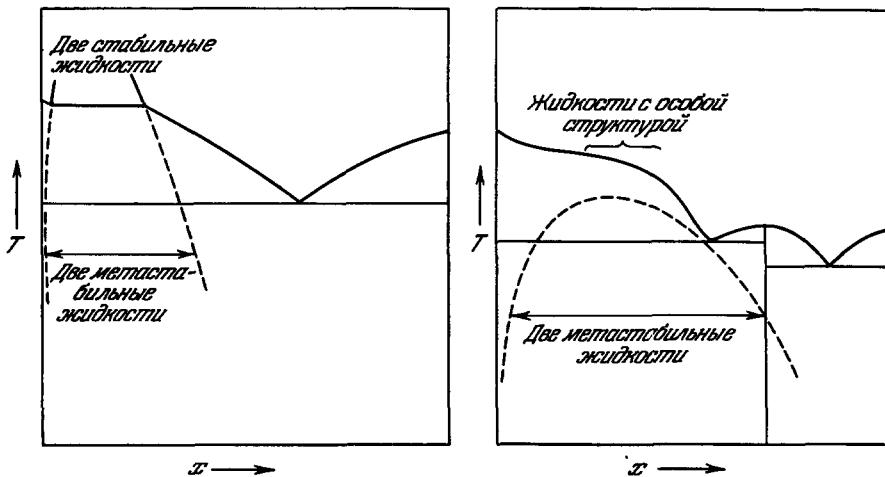


Рис. 6. Схематическое представление простых бинарных систем, в которых две несмешиваемые жидкости могут метастабильно разделяться при термической обработке стекла ниже линии солидуса.

хондры, частично стеклянными, частично кристаллическими. Хотя процесс образования хондр, предложенный Мэйсоном, включает дегидратацию и восстановление, он представляется более похожим на это метастабильное разделение двух несмешиваемых жидкостей, чем на сферолитовую кристаллизацию.

Недавно Мюллер^{122, 105} изучил микроструктуры углистых хондридов, и его результаты как будто подтверждают идеи Мэйсона. В углистых хондриях I типа он находил крохотные стеклянные шарики и крохотные округлые кристаллики оливина, а иногда и других «высокотемпературных» минералов. Многие из этих шариков и кристалликов содержат небольшие ядрышки, вероятно, из никелистого железа и троилита. В углистых хондриях II и III типов количество и размеры этих зернышек увеличиваются и имеется тенденция к объединению отдельных кристалликов с ядрышками в более крупные шарики — хондры. Зарождение и рост многочисленных маленьких шариков и их последующая агрегация в хондры, по-видимому, лучше согласуется с экспериментальными данными, накопленными при производстве стекла.

Если опустить эти детали, нуждающиеся в дальнейшем изучении, то получается, что общее направление эволюции, предложенное Мэйсоном и принимаемое автором этой статьи, таково: углистые хондриты I типа (хондр нет) → углистые хондриты II типа (хондры, образующиеся вследствие распада серпентина) → углистые хондриты III типа (серпентин полностью преобразован в оливин + пироксен, но эти «высокотемпературные» минералы еще неравновесны) → обычновенные хондриты («высокотемпературные» минералы в равновесии). Мэйсон включает энстати-

товые хондриты в качестве последнего члена этого ряда (см. рис. 3). Однако почти «космическое» содержание в них многих рассеянных элементов, которые дефицитны в обычновенных хондритах, и высокое содержание первичных инертных газов заставляют предполагать, что они, быть может, подобны углистым хондритам III типа в отношении стадии их развития, но образовались в некотором более восстановительном окружении *).

Несколько лет назад углистые хондриты рядом авторов считались продуктом гидротермального метаморфизма обычновенных хондритов. Сейчас эта точка зрения оставлена. Но, тем не менее, некоторые структуры, на которые указывалось, как на возникшие в результате гидротермальных изменений ^{30, 31, 72, 124}, вероятно, реальны. Они могут быть объяснены существованием в некоторых из родительских тел «внутренней атмосферы» и слоя жидкой воды (см. § 6).

Углистые и обычновенные хондриты, имеющиеся в наших руках, иллюстрируют общее направление эволюции, но не являются «замороженными» образцами последовательных стадий строго одного и того же эволюционного пути. В большинстве углистых хондритов II типа хондры больше, чем в углистых хондритах III типа. Метеорит Ренаццо по своей минералогии и составу сходен с углистыми хондритами II типа, но он уникален в том отношении, что содержит много крупных хондр и около 12% никелистого железа **). Группы *L* и *H* обычновенных хондритов отличаются друг от друга по общему содержанию железа. Очевидно, хондриты в наших коллекциях являются образчиками нескольких родительских тел, несколько отличавшихся по составу и эволюционному пути.

Два важных процесса термальных изменений в метеоритах, протекавших в твердом состоянии, признаются всеми: а) превращение γ -фазы никелистого железа в α -фазу, сопровождавшееся во многих случаях образованием видманштеттеновой структуры, и б) перекристаллизация хондритов, сопровождавшаяся исчезновением хондр ***). Третий важный процесс такого же рода предложен Мэйсоном: дегидратация серпентина, восстановление железа и образование хондр, состоящих из «высокотемпературных» минералов. Автор настоящей статьи предлагает расширить область действия процессов диффузии и перекристаллизации в твердом состоянии так, чтобы она охватывала практически всю эволюцию метеоритного вещества и образование метеоритов всех типов, включая железные, железо-каменные и ахондриты ¹²⁶. Этот процесс протекал во многих родительских телах астероидных размеров, наибольшие из которых были подобны крупнейшим из современных астероидов.

Образование видманштеттеновой структуры при 350—500° С длилось примерно 10^7 — 10^8 лет. Коэффициенты диффузии сильно зависят от температуры и при больших температурах гораздо большие изменения должны происходить за тот же промежуток времени. Но чтобы полностью

*) Различия в окружении Мэйсон предположительно приписывает образованию метеоритов на весьма различных расстояниях от Солнца ⁴⁵. Однако это противоречит астрономическим данным. Особое положение пояса астероидов на границе между земными планетами и планетами-гигантами естественно объясняет это разнообразие окружающих условий (см. § 2).

**) В то время как Буд ¹⁰⁴ и Андерс ¹⁹ считают Ренаццо примером почти неизменного первичного вещества — смеси «высокотемпературной» и «низкотемпературной» фракций (см. § 7), Мэйсон и Винк ¹²⁵ приводят указания на то, что хондры, по-видимому, находились в стадии роста, когда процесс был «заморожен». Они считают, что Ренаццо образует переход к энстатитовым хондритам.

***) В железных метеоритах выделение рабдита $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$, когенита $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$, а также небольших включений троилита FeS явилось результатом распада пересыщенных твердых растворов P , C и S в никелистом железе, т. е. оно тоже происходило путем диффузии в твердом состоянии ^{126, 127}.

осознать вероятную роль диффузии в твердом состоянии, надо учесть, что центральные части крупнейших астероидов находились в течение нескольких сотен миллионов лет при температурах $800-1000^{\circ}\text{C}$ ¹⁰⁷.

Если представить себе, что термальные изменения хондритового вещества продвинулись дальше вперед за перекристаллизованные хондриты, то, очевидно, мы перейдем к некоему более измененному и дифференцированному нехондритному веществу. Попробуем проследить это на примере никелистого железа. В углистых хондритах III типа металлическое железо присутствует в виде маленьких зернышек несколько различных размеров. Большая растворимость меньших зерен, связанная с ролью поверхностной энергии (поверхностного натяжения), приводит к сортированию никелистого железа в большие включения и рассасыванию малых включений. Это происходит (путем диффузии в твердом состоянии) во время преобразования углистых хондритов в обычновенные. Хотя поверхностное натяжение стремится сделать поверхность минимальной, металлические включения в хондритах обычно имеют губчатую форму вследствие большей пластичности металла по сравнению с силикатами. Меррилл (1928) отметил, что они похожи на губчатое железо, образующееся при восстановлении железной руды при температурах $700-800^{\circ}\text{C}$. В хондритах температуры, вероятно, были ниже, но длительность процесса много больше.

В тех частях родительских тел, которые достигали температур порядка 1000°C , сортирование никелистого железа во все большие и большие тела вполне могло зайти так далеко, что образовались «включения» размером в несколько метров, т. е. размером с крупнейшие железные метеориты, найденные на Земле¹⁰⁸). Для того чтобы это было достигнуто за 10^9 лет, коэффициент диффузии D должен был быть порядка $10^{-9}-10^{-10}\text{ см}^2/\text{сек}$. В действительности при 1000°C достигаются даже еще большие значения (рис. 7)**). Предполагаемый медленный рост обеспечивает образование больших кристаллов γ -фазы.

Таким образом, автор подобно Юри считает родительские тела чем-то подобным «булке с изюмом», но, в отличие от Юри, полагает, что железные включения никогда не были расплавленными.

При столкновениях и разломах родительских тел большие железные включения должны были отделяться от окружающих силикатов вследствие различий в плотности и упругих свойствах. Эти окружающие силикаты должны были быть очень дифференцированными и почти или полностью свободными от никелистого железа. Образчиками этого вещества, очевидно, являются ахондриты. Действительно, как это было отмечено Прайором (1918), многие ахондриты сходны с силикатными частями некоторых железо-каменных метеоритов.

*). Наличие в Аризонском метеоритном кратере и его окрестностях значительного количества никелистого железа дает основание многим авторам считать, что этот кратер образован ударом железного метеорита поперечником около 30 м. По аналогии предполагается, что и другие еще большие «метеоритные» кратеры на Земле образованы ударами железных тел поперечником в сотни метров и даже километры. Однако это вполне могли быть каменные тела, небольшие астероиды, содержащие 10-20% железных включений.

**). На рис. 7 единственные данные о диффузии железа через силикаты относятся к его диффузии сквозь форстерит Mg_2SiO_4 . Они дают низкие значения D . Однако измерения проводились для очень плотных образцов, которые получались путем спекания порошка при температуре 1600°C и давлении около 1000 атм. Диффузия железа сквозь весьма пористое силикатное вещество метеоритов, вероятно, протекает значительно быстрее. (Использованы данные, приведенные в ¹³⁴ на графике. Формула для $D(T)$, приведенная в тексте, дает в 10 раз большие значения D , по-видимому, вследствие опечатки.)

Железо-каменные метеориты, по-видимому, являются образцами вещества, в которых разделение металла и силикатов было остановлено на некоторой промежуточной стадии вследствие охлаждения. Они возникли не на каком-то ответвлении процесса, а на главном пути образования железных метеоритов. Когда силикаты оказывались запертыми внутри металла, те, которые диффундируют легче, ускользали, а те, которые диффундируют хуже, оставались захваченными. Вероятно, таков был процесс образования палласитов. Преобладание оливина в палласитах, возможно, объясняется его высокой температурой плавления. При температурах более чем на 500° ниже точки плавления он, вероятно, обладает

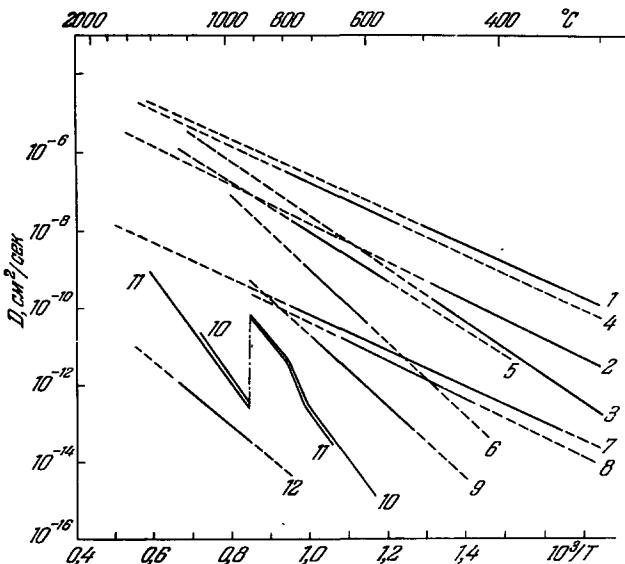


Рис. 7. Зависимость коэффициента диффузии от температуры

1 — Литий в кварце 129; 2 — натрий в кварце 129; 3 — калий в кварце 129; 4 — радиев в альбите 130; 5 — радиев в микроклинином перитите 130; 6 — свинец в альбите 130; 7 — свинец в микроклинином перитите 130; 8 — сера в железе 131; 9 — фосфор в стали 131; 10 — никель в железе 132; 11 — железо в железе (самодиффузия) 133; 12 — железо в фторстериите 134. В кристаллах скорость диффузии зависит от направления. Прямые 1—7 дают D для кристаллографического направления, в котором скорость диффузии при температуре порядка 1000° С максимальна. Сплошными линиями выделены интервалы температур, в которых проводились измерения.

малым коэффициентом диффузии, а возможно, и малой растворимостью в железе. Палласиты с округлыми или с угловатыми зернами оливина должны были образоваться при разных температурах, лежащих в таком интервале, в котором температурные зависимости «силы кристаллизации» и поверхностного натяжения пересекаются.

Нетрудно понять, что диффузия железа может превратить метеорит, подобный Майнси (рис. 8), с металлом, рассеянным в виде мелких зерен, в другой метеорит, подобный Эстервилю (рис. 9), с металлом, собранным в сгущении. Но происхождение самого метеорита Майнси понять очень трудно. Единственным правдоподобным объяснением представляется дробление с небольшим последующим метаморфизмом. (Существование брекчий среди железо-каменных метеоритов хорошо известно.)

Обычно считается, что палласиты, а также большие включения троилита и графита в металле, образовались в расплаве. Однако скорость гравитационной дифференциации должна быть очень большой, даже когда гравитация мала (Андерс, частное сообщение). С другой стороны, тенденция к разделению фаз, существующая при температурах расплава,

во многих случаях продолжает существовать и при меньших температурах. Но в твердом состоянии нужны огромные промежутки времени, чтобы эта тенденция к разделению фаз могла проявиться. Метеориты, вернее, родительские тела метеоритов, имеют историю, которая как раз удовлетворяет необходимым условиям.

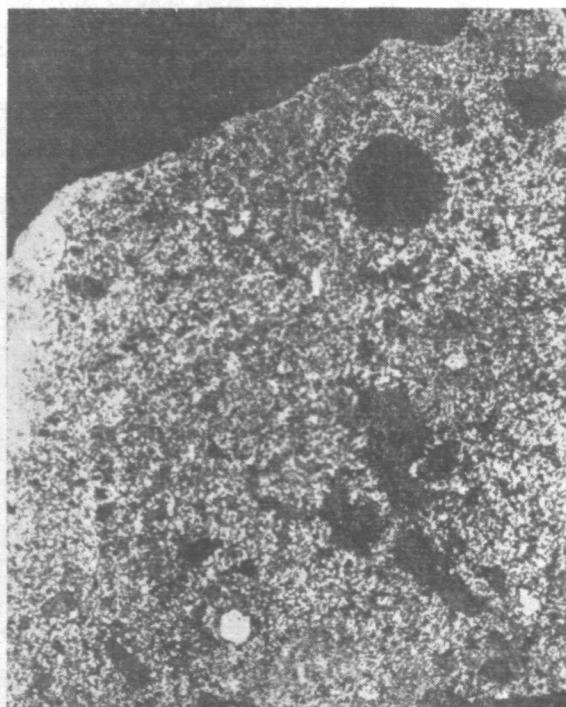


Рис. 8. Железо-каменный метеорит Майнси.
Полированная поверхность, на которой видны маленькие зернышки металлического железа (белые), распределенные по всему силикатному вмещающему веществу.

Если в родительских телах метеоритов протекали процессы диффузии крупного масштаба, то химическое разделение путем диффузии должно было быть очень действенным. Возможно, этим путем можно объяснить разделение рассеянных элементов в метеоритах, а также переменный характер поведения некоторых из них в отношении проявления литофильных, сидерофильных и халькофильных свойств. Последнее может объясняться различиями в окружении и температурах.

Термальный метаморфизм, протекавший при разных температурах и в течение разных промежутков времени,— очень гибкий механизм, включающий многие процессы, имеющие каждый свою теплоту активации, т. е. свою зависимость от температуры. Это дает основание полагать, что разнообразие типов и структур метеоритов можно будет объяснить различиями в тепловых историях родительских тел и их отдельных слоев.

Автор надеется, что пересмотр интерпретации наблюденных свойств метеоритов подтвердит, что диффузия в твердом состоянии была определяющим процессом в родительских телах, недра которых никогда не были расплавлены.

К сожалению, пока это только надежды на будущее. Сегодняшняя ситуация в вопросе о происхождении метеоритов еще соответствует словам

Вуда⁵⁰: «Пожалуй, имеется столько взглядов на происхождение метеоритов, сколько есть исследователей метеоритов. Вероятно, ни в какой другой области естественных наук нет такого сочетания изобилия фактических данных и отсутствия согласия в их интерпретации». Но завтра, т. е. в самом недалеком времени, ситуация может стать совсем иной. Под влиянием новых фактических данных, получаемых с помощью новых, тонких методов исследования, происходит пересмотр многих устоявшихся

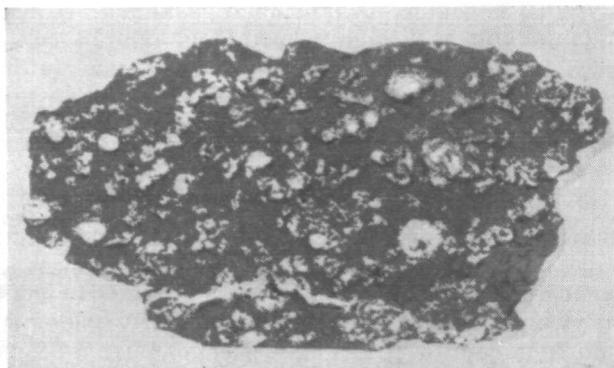


Рис. 9. Железо-каменный метеорит Эстервиль.
Полированная поверхность, на которой видно, что никелистое
железо (белое) имеет тенденцию встречаться в виде сгущений.

представлений о метеоритах, и в эволюции взглядов отдельных ученых есть тенденции к сближению. Ученые, изучающие метеориты, являются представителями разных отраслей науки. Они применяют различные экспериментальные методы и теоретические подходы и не всегда легко понимают друг друга. Поэтому то «завтра», когда тенденции к сближению взглядов приведут к существенному прояснению происхождения метеоритов, наступит, вероятно, не раньше, чем через 3—5 лет. Но это совсем не долгий срок!

§ 9. НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ

1. Метеориты являются обломками астероидов, возникающими при их столкновениях. В свою очередь большинство современных астероидов является обломками более крупных родительских тел. Только крупнейшие из современных астероидов являются сохранившимися представителями этих первоначальных тел. (Есть, однако, ученые, считающие и эти астероиды обломками еще более крупных тел.)

Эволюция метеоритного вещества протекала в крупнейших «первоначальных» астероидах, поперечником в сотни километров (а по мнению некоторых исследователей, в еще более крупных телах), недра которых разогревались до высоких температур радиогенным теплом. Таким образом, проблема происхождения и эволюции метеоритного вещества является в то же время проблемой происхождения и эволюции вещества астероидов.

2. Типичные столкновения типичных астероидов, движущихся между орбитами Марса и Юпитера, не порождают обломков, орбиты которых, эволюционируя под действием одних только планетных возмущений, могли бы в дальнейшем пересечь земную орбиту и привести к выпадению обломка на Землю. Такие обломки могут возникать лишь при столкнове-

нии астероидов, заходящих внутрь орбиты Марса, и именно они являются непосредственными предшественниками метеоритов, выпадающих на Землю. Эти немногочисленные «марсианские» астероиды, вероятно, являются представителями лишь некоторых из первичных астероидов, а возможно, даже лишь некоторых их слоев.

3. Долгое время господствующее положение занимали гипотезы, целиком связывающие возникновение метеоритов всех типов с магматическими и вулканическими процессами в недрах и на поверхности родительских тел лунных и даже еще больших размеров. В последние годы основными сторонниками этой точки зрения являются Юри и Рингвуд. Однако основные доводы в пользу этих гипотез оказались опровергнутыми или поставлены под сомнение. Кроме того, сторонникам этих гипотез так и не удалось удовлетворительно объяснить возникновение хондровой структуры, которой обладают 80% метеоритов.

4. Радикальное изменение за последние десятилетия космогонических представлений о процессе формирования солнечной системы недавно привело к появлению гипотез, непосредственно связывающих некоторые особенности метеоритов со свойствами того твердого вещества, из которого аккумулировались родительские тела метеоритов. В первую очередь это относится к углистым хондритам, содержащим углерод и углеводороды, воду и свободную серу и состоящим в основном из аморфных гидратированных силикатов (типа серпентина). Углистые хондриты I типа, содержащие наибольшее количество летучих и не содержащие металлического железа, считаются в настоящее время наиболее первичным типом метеоритов, наиболее близким по составу и структуре к твердому веществу протопланетного облака.

5. Андерс, развивая идеи Вуда, предполагает существование двух фракций исходного вещества: а) весьма окисленной пыли, явившейся прямым продуктом конденсации нелетучих веществ в протопланетном облаке и состоящей в основном из аморфных гидратированных силикатов, и б) дегидратированных и восстановленных хондр из оливина и пироксена плюс металлические частички. (По гипотезе Вуда вторая фракция возникает из первой при ее нагреве в восстановительной водородной среде ударными волнами, порождаемыми вспышками на Солнце.) Существование метеоритов разных типов объясняется тем, что эти фракции оказались смешанными в разных пропорциях и затем в различной степени подверглись термальному метаморфизму или даже расплавлению.

6. По гипотезе Мэйсона образование хондр и металлических частиц происходило при низких температурах и уже в родительских телах, аккумулировавшихся из окисленного гидратированного вещества (подобного первой фракции Вуда — Андерса, а также углистым хондритам I типа). Дегидратация серпентина с образованием оливина, наблюдаемая в лаборатории лишь при высоких температурах, согласно термодинамическим данным может происходить и при низких температурах, хотя, конечно, весьма медленно. Параллельно с дегидратацией и сферолитовой кристаллизацией образующихся «высокотемпературных» минералов происходило восстановление железа углеродом и углеводородами. Все эти процессы должны были протекать путем диффузии в твердом веществе.

7. Достаточно успешно объясняя образование хондритов, гипотеза Мэйсона оставляет без рассмотрения происхождение каменных метеоритов — ахондритов, а также железных и железо-каменных метеоритов. Развивая точку зрения Мэйсона, автор указал, что во внутренних частях родительских тел, длительное время находившихся при температуре порядка 1000° С, процессы диффузии в твердом веществе должны были привести к значительному разделению металлической и силикатной фаз.

Собирание металла (никелистого железа) в крупные включения, вызванное действием поверхностного натяжения (поверхностной энергии), привело к образованию железных метеоритов, а окружающее силикатное вещество, лишенное металла и сильно изменившее свою структуру вследствие длительного пребывания при высоких температурах, образовало ахондриты. Там, где понижение температуры остановило диффузионное разделение металла и силиката еще до его завершения, образовались железо-каменные метеориты.

Поскольку хондры, как правило, содержат большие или меньшие количества стекла, автор, в отличие от Мэйсона, считает процесс их образования не сферолитовой кристаллизацией, а аналогом разделения стекла на две метастабильные жидкости, усложненным процессами дегидратации силикатов и восстановления железа.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. A. Newton, Amer. J. Sci. **36**, 1 (1888).
2. Б. Ю. Левин, Астрон. ж. **23**, 83 (1946).
3. F. L. Whipple and R. F. Hughe, в сб. Meteors (Ed. R. Kayser), 1955, стр. 149 (см. перевод в сб. «Метеоры», М., ИЛ, 1959).
4. J. A. Wood, Mon. Not. RAS **122**, 79 (1961).
5. C. C. Wylie, Pop. Astron. **43**, 657 (1935); **47**, 549 (1939); **48**, 306 (1940); **56**, 273 (1948).
6. Zd. Cepelcha, J. Rajchl and L. Segnal, Bull. Astr. Inst. Czechoslov. **10**, 147 (1959); Zd. Cepelcha, Bull. Astr. Inst. Czechoslov. **12**, 21 (1961); 3. Цеплеха, Метеоритика **20**, 178 (1961).
7. G. P. Kuiper, Astron. J. **55**, 164 (1950).
8. S. Piotrovsky, Astron. J. **57**, 23 (1952); Acta Astr. Krakowiana, Ser. a**5**, 115 (1954).
9. C. Jaszchek and M. Jaszchek, Astron. J. **68**, 108 (1963).
10. E. Opik, Proc. Roy. Irish Acad. **54**, 165 (1951); Advances Astron. and Astrophys. **2**, 219 (1963).
11. E. Anders, Rev. Mod. Phys. **34**, 287 (1962); гл. 13 в сб. The Solar System, vol. 4 (Eds. B. Middlehurst and G. P. Kuiper), 1963, стр. 402.
12. E. Anders, Science **138**, 431 (1962).
13. H. C. Urey, J. Geophys. Res. **64**, 1721, 1959.
14. F. L. Whipple and E. L. Fireman, Nature **183**, 1315 (1959).
15. E. L. Fireman and J. De Felice, Geochim. Cosmochim. Acta **18**, 183 (1960).
16. P. Eberhardt and D. C. Hess, Astrophys. J. **131**, 38 (1960).
17. D. E. Fisher, Nature **190**, 244 (1961).
- 17a. D. Heymann and J. M. Fluit, J. Geophys. Rev. **67**, 2921 (1962); D. Heymann, J. Geophys. Res. **69**, 1941 (1964).
18. E. Opik and S. F. Singer, Trans. Amer. Geophys. Union **38**, 566 (1957).
19. E. Anders, Space Sci. Rev. **3**, 583 (1964).
20. J. R. Arnold, гл. 23 в сб. Isotopic and Cosmic Chemistry (Eds. H. Craig, S. L. Miller and G. J. Wasserburg), 1964, стр. 347.
21. Б. Ю. Левин, Метеоритика **7**, 113 (1950).
22. Б. Ю. Левин, Метеоритика **11**, 47 (1954).
23. W. Wahl, Geochim. Cosmochim. Acta **2**, 91 (1952).
24. Б. Ю. Левин, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 11, 1323 (1957).
- 24a. H. E. Suess, гл. 25 в сб. Isotopic and Cosmic Chemistry (Eds. H. Craig, S. L. Miller and G. J. Wasserburg), 1963, стр. 385.
25. R. A. Fish, G. G. Golos and E. Anders, Astrophys. J. **132**, 243 (1960).
26. Б. Ю. Левин, Астрон. ж. **39**, 763 (1962).
27. B. Mason, Meteorites, New York, 1962 (см. перевод: Б. Мэйсон, Метеориты, М., Изд-во «Мир», 1965).
28. E. Olsen and R. F. Mueller, Nature **201**, 596 (1964).
29. Б. Ю. Левин, С. В. Козловская и А. Г. Старкова, Метеоритика **14**, 38 (1956).
30. А. Н. Заварыцкий, Метеоритика **8**, 100 (1950).
31. А. Н. Заварыцкий и Л. Г. Кваша, Метеориты СССР, М., 1952.
32. Л. Г. Кваша, Метеоритика **16**, 156 (1958).
33. J. A. Wood, Geochim. Cosmochim. Acta **26**, 739 (1962).
34. H. B. Wink, Geochim. Cosmochim. Acta **9**, 279 (1956).

35. B. Mason, Amer. Mus. Novitates, No. 2085, 1 (1962).
36. W. M. Latimer, Science 112, 101 (1950).
37. H. C. Urey, The Planets, New Haven, 1952.
38. H. C. Urey and H. Craig, Geochim. Cosmochim. Acta 4, 36 (1953).
39. H. Brown and C. R. McKinney, Trans. Amer. Geophys. Union 38, 388 (1957).
40. A. E. Ringwood, Geochim. Cosmochim. Acta 24, 159 (1961).
41. А. А. Явнель, ДАН СССР 102, 477 (1955); Геохимия, № 2, 78 (1956); Астрон. ж. 34, 445 (1957).
42. А. А. Явнель, Метеоритика 23, 36 (1963).
43. H. C. Urey, Rev. Geophys. 2, 1 (1964).
44. B. Mason and H. B. Wink, Geochim. Cosmochim. Acta 28, 533 (1964).
- 44a. H. Craig, гл. 26 в сб. Isotopic and Cosmic Chemistry (Eds. H. Craig, S. L. Miller and G. J. Wasserburg), 1963, стр. 401.
45. B. Mason, Geochim. Cosmochim. Acta 27, 1011 (1963).
46. G. Edwards and H. C. Urey, Geochim. Cosmochim. Acta 7, 154 (1955).
47. G. W. Reed, K. Kigoshi and A. Turkevich, Geochim. Cosmochim. Acta 20, 122 (1960).
48. L. Greenland, J. Geophys. Res. 68, 6507 (1963).
49. E. A. Anders, в сб. Origin of the Solar System (Eds. A. G. W. Cameron and R. Jastrow), 1963, стр. 95.
50. J. A. Wood, гл. 12 в сб. The Solar System, vol. 4 (Eds. B. Middlehurst and G. P. Kuiper), 1963, стр. 337.
51. С. В. Могоге, в сб. Researches on Meteorites (Ed. C. B. Moore), 1962, стр. 164.
52. Л. Г. Кваша, Метеоритика 14, 14 (1956).
53. J. F. Lovering, в сб. Researches on Meteorites (Ed. C. B. Moore), 1962, стр. 179.
54. Б. Ю. Левин, Chemie d. Erde 19, 286 (1958); Метеоритика 17, 55 (1959).
55. K. Fredriksson, P. S. De Carlo and A. Aramäe, Space Res. III, Proc. 3th Space Sci. Symp. (1962), 1963, стр. 974.
- 55a. G. W. Reed, J. Geophys. Res. 68, 3531 (1963).
56. H. H. Uhlig, Geochim. Cosmochim. Acta 7, 34 (1955).
57. R. E. Maranger and G. K. Manning, в сб. Researches on Meteorites, (Ed. C. B. Moore), 1962, стр. 123.
58. А. А. Явнель, И. Б. Боровский, Н. П. Ильин и И. Л. Марчукова, ДАН СССР 123, 256 (1958); Метеоритика 18, 77 (1960).
59. M. Feller-Knepfle and H. H. Uhlig, Geochim. Cosmochim. Acta 21, 257 (1961).
60. J. A. Wood, Preprint (1964).
61. R. E. Czech, Geochim. Cosmochim. Acta 26, 993 (1962).
62. J. F. Lovering, W. Nichiporuk, A. Chodos and H. Brown, Geochim. Cosmochim. Acta 11, 263 (1957), W. Nichiporuk, Geochim. Cosmochim. Acta 13, 233 (1958).
63. А. А. Явнель, ДАН СССР 131, 1049 (1960); Метеоритика 20, 114 (1961).
64. Т. В. Massalski, в сб. Researches on Meteorites (Ed. C. B. Moore), 1962, стр. 107.
65. G. Mueller, Geochim. Cosmochim. Acta 4, 1 (1953).
66. B. Mason, Space Sci. Rev. 1, 621 (1963).
67. E. Anders, Ann. New York Acad. Sci. 108, 514 (1963).
68. E. R. Du Fresne and E. Anders, Geochim. Cosmochim. Acta 23, 200 (1961).
69. H. C. Urey, Дискуссия в сб. Nuclear Processes in Geologic Settings, 1953, стр. 49.
70. B. Mason, Nature 186, 230 (1960); J. Geophys. Res. 65, 2965 (1960).
71. H. C. Urey, J. Geophys. Res. 66, 1988 (1961).
72. E. R. Du Fresne and E. Anders, Geochim. Cosmochim. Acta 26, 1085 (1962); гл. 14 в сб. The Solar System, vol. 4 (Eds. B. Middlehurst and G. P. Kuiper), 1963, стр. 496.
73. А. П. Виноградов, Атомная энергия 4, 409 (1958); А. П. Виноградов, Е. И. Донцова и М. С. Чупахин, Геохимия, № 3, 187 (1958).
74. Э. К. Герлинг и Л. К. Левский, ДАН СССР 110, 750 (1956); Геохимия, № 7, 59 (1956); Метеоритика 16, 24 (1958).
75. Б. Ю. Левин, Тр. ГеоФИАН, № 26 (153), 11 (1955) (см. также Mem. Soc. R. Sc. Liege, XV ser., 7, 39 (1962)).
76. H. Brown and C. Patterson, J. Geol. 56, 85 (1948).
77. I. M. Klotz, Science 109, 248 (1949).
78. J. F. Lovering, Geochim. Cosmochim. Acta 12, 253 (1957).
79. H. C. Urey, Geochim. Cosmochim. Acta 13, 335 (1958).
80. А. А. Явнель, Метеоритика 22, 74 (1962).
81. H. H. Uhlig, Geochim. Cosmochim. Acta 6, 282 (1954).
82. J. F. Lovering, Geochim. Cosmochim. Acta 12, 238 (1957).
83. A. E. Ringwood and L. Kaufman, Geochim. Cosmochim. Acta 26, 999 (1962).

84. H. C. Urey, *Astrophys. J.* **124**, 623 (1956).
85. J. F. Lovering and L. G. Parry, *Geochim. Cosmochim. Acta* **26**, 361 (1962).
86. T. B. Massalski and F. R. Park, *J. Geophys. Res.* **67**, 2925 (1962).
87. J. F. Lovering, *Amer. J. Sci.* **257**, 271 (1959); F. D. Stacey and J. F. Lovering, *Nature* **183**, 529 (1959); F. D. Stacey, J. F. Lovering and L. G. Parry, *J. Geophys. Res.* **66**, 1523 (1961).
88. B. I. Потчарев и Е. Г. Гуськова, *Геомагн. и аэрономия* **2**, 749 (1962); Е. Г. Гуськова, *Геомагн. и аэрономия* **3**, 378 (1963).
89. H. H. Ninninger, *Science* **139**, 345 (1963).
90. M. E. Lipschutz and E. Anders, *Geochim. Cosmochim. Acta* **24**, 83 (1961); M. E. Lipschutz, *Science* **143**, 1431 (1964).
91. H. C. Urey, гл. 4 в сб. *Space Science* (Ed. D. P. Le Galley), N. Y., 1963.
92. H. C. Urey, *Preprint* (1964).
93. N. L. Carter and G. C. Kennedy, *J. Geophys. Res.* **69**, 2403 (1964).
94. A. E. Ringwood, *Geochim. Cosmochim. Acta* **20**, 155 (1960).
95. A. E. Ringwood and M. Seabrook, *Geochim. Cosmochim. Acta* **26**, 507 (1962).
96. M. E. Lipschutz and E. Anders, *Geochim. Cosmochim. Acta* **28**, 699 (1964).
97. U. B. Marvin, *Nature* **196**, 634 (1962).
98. E. Anders and G. G. Golos, *J. Chem. Educ.* **38**, 58 (1961).
99. H. C. Urey, *Year Book of the Phys. Soc. (London)*, 1957, стр. 14.
100. H. C. Urey, *Proc. Chem. Soc.*, **67** (1958).
101. D. W. Allan and J. A. Jacobson, *Geochim. Cosmochim. Acta* **9**, 256 (1956).
102. Б. Ю. Левин и С. В. Малева, *ДАН СССР* **133**, 44 (1960); Б. Ю. Левин, в сб. «Новое о Луне», 1962, стр. 157; С. В. Малева, *ДАН СССР* **159**, 294 (1964).
103. K. Fredriksson and A. E. Ringwood, *Geochim. Cosmochim. Acta* **27**, 639 (1963).
104. J. A. Wood, *Icarus* **2**, 152 (1963).
105. G. Mueller, в сб. *Advances Orig. Geochemistry*, 1964, стр. 119.
106. Е. А. Любимова и А. Г. Старкова, *Астрон. ж.* **31**, 429 (1954).
107. С. В. Малева, *Изв. Ком. физ. планет Астросовета*, № 1, 105 (1959); № 4 (1964).
108. Б. Ю. Левин и Г. Л. Слонимский, *ДАН СССР* **113**, 62 (1957); *Метеоритика* **16**, 30 (1958).
109. H. E. Suess, *Zs. Electrochem.* **53**, 237 (1949); в сб. *Origin of the Solar System* (Eds. A. G. W. Cameron and R. Jastrow), 1963.
110. H. C. Urey and T. Mauder, *Geochim. Cosmochim. Acta* **17**, 113 (1959).
111. Л. Г. Кваша, *Метеоритика* **20**, 124 (1961).
112. R. Knoch, *Geochim. Cosmochim. Acta* **27**, 261 (1963).
113. P. Ramdor, *J. Geophys. Res.* **68**, 2011 (1963).
114. J. A. Wood, *Nature* **194**, 127 (1962).
115. C. M. Merrihue, *J. Geophys. Res.* **68**, 325 (1963).
116. W. B. Clarke and H. G. Thode, гл. 28 в сб. *Isotopic and Cosmic Chemistry* (Eds. H. Craig, S. L. Miller and G. J. Wasserburg), 1963, стр. 471.
117. B. Mason, *J. Geophys. Res.* **66**, 3979 (1961).
118. N. L. Bowen and O. F. Tuttle, *Bull. Geol. Soc. Amer.* **60**, 439 (1949).
119. K. O. Bennington, *J. Geol.* **64**, 558 (1956).
120. Symposium on Nucleation and Crystallization in Glasses and Melts, 1962; см. статьи: S. D. Stoekey, R. D. Maurer, W. Vogel and K. Gerth, R. Röy, S. M. Ohlberg, H. R. Golob and D. W. Strickler, W. B. Hellig.
121. И. И. Китайгородский, Э. М. Рабинович и В. И. Шелюбский, *Стекло и керамика* **20**, 1 (1963).
122. G. Mueller, *Nature* **196**, 929 (1962).
123. Г. П. Довыкин, *Геохимия*, № 7, 678 (1964).
124. Л. Г. Кваша и Х. Б. Виник, *Метеоритика* **24**, 204 (1963).
125. B. Mason and H. B. Wiik, *Amer. Mus. Novitates*, No. 2106, 1 (1962).
126. A. A. Явнель, *Метеоритика* **22**, 83 (1962).
127. J. I. Goldstein and R. E. Ogilvie, *Geochim. Cosmochim. Acta* **27**, 623 (1963).
128. Б. Ю. Левин, Доклад на 11-й конференции по метеоритам, Москва, май 1964; см. также *Nature* **204**, 946 (1964).
129. J. Verhoogen, *Amer. Mineralogist* **37**, 637 (1952).
130. J. T. Rosengqvist, *Univ. Bergen Arbok. Naturvit. Rekke*, No. 4 (1952).
131. R. Barrer, *Diffusion in and through Solids*, Cambridge, 1951.
132. K. Hirano, M. Cohen and B. L. Averbach, *Acta Met.* **9**, 440 (1961).
133. F. S. Buffington, K. Hirano and M. Cohen, *Acta Met.* **9**, 434 (1961).
134. J. J. Naughton and J. Fujikawa, *Nature* **184**, BA-54 (1959).