

Изотопный состав пород Земли и метеоритов^{*)}

А. П. Виноградов

В лекции приводятся обширные данные об изотопном составе серы, кислорода, углерода и легких газов в железных, железо-каменных и каменных метеоритах. Делается сопоставление изотопного состава этих элементов, метеоритов и различных материалов земной коры. Сравнительный анализ этих данных приводит автора к ряду важных выводов в области геохимии и космохимии. В частности, рассматривая процесс разделения изотопов в земной коре как результат дифференциации вещества Земли, автор делает заключение об отсутствии процессов дифференциации вещества метеоритов (где такое разделение изотопов не наблюдается), а следовательно, и о происхождении всех видов метеоритов в результате скопления первичной космической пыли.

В подавляющем числе случаев химические элементы представляют механическую смесь изотопов. И, как мы знаем, в космосе распространены одни и те же химические элементы — одни и те же изотопы. С известной долей вероятности, исходя из некоторых теоретических соображений и эмпирических данных о составе Земли, метеоритов и звезд, можно было построить кривую зависимости распространенности атомных ядер в космосе от их массового числа. Эта кривая, в частности, указывает на огромное преобладание в космосе легких элементов, легких атомных ядер. Вместе с тем, несмотря на то что наши знания о составе космических тел еще далеки от совершенства, сегодня мы должны считаться с несомненно различным распределением, в частности, химических элементов даже в пределах планет нашей солнечной системы. С еще большей определенностью можно говорить о различном относительном содержании изотопов легких элементов на планетах и в звездах. Открытие так называемого углеродно-азотного и протон-протонного циклов не только объяснило возможность изменения изотопного состава водорода, углерода, азота, кислорода и других легких элементов в некоторых звездах,

но и вызвало поиски в этом направлении. И, как вы знаете, в результате их были найдены изотопные смещения для водорода, углерода, кислорода и других легких элементов в различных типах звезд.

Очевидно, мы недалеко от истины, когда повторяем, что в галактике происходит непрерывная эволюция ядерного состава космических тел. Причиной этих нарушений изотопных отношений в различных звездах являются термоядерные процессы, звездный нуклеогенез. Но возникает вопрос: объясняются ли только этим первичным «горячим» процессом всевозможные изменения изотопных отношений, которые ныне мы наблюдаем в космических телах?

Именно только к этой стороне вопроса я и хотел сейчас привлечь ваше внимание.

Изотопные изменения, идущие в холодных космических телах, несоизмеримо малы по своей продуктивности, по своему конечному эффекту по сравнению со звездным нуклеогенезом. И, может быть, о них не стоило бы говорить, если бы как угодно малые изменения изотопного состава, например в изверженных породах земной коры или метеоритах, в известной мере не указывали бы на определенные процессы, которые привели к образованию земной коры, ее пород или различных классов метеоритов. Вот почему я решился изложить перед вами некоторые результаты сравнительного изучения изотопного состава

^{*)} Лекция, прочитанная в сентябре 1957 г. в Париже на Международной конференции по применению радиоактивных изотопов в научных исследованиях.

топного состава, единственно доступного сегодня для непосредственного изучения космического материала, а именно, наиболее глубинных изверженных горных пород Земли и вещества метеоритов.

Прежде чем это сделать, я должен очень кратко напомнить, что такое земная кора и различные классы метеоритов.

Земля состоит из ряда concentрических оболочек: атмосферы, гидросферы, биосферы, литосферы, мантии Земли.

Земная кора, или литосфера — поверхностная твердая оболочка, в свою очередь состоит из гранитного и базальтового слоев. Базальтовый слой покрывает всю Землю. Гранитный слой покрывает около половины поверхности Земли. Он отсутствует на дне Тихого океана и, по-видимому, в глубоких впадинах других океанов. Мощность базальтового слоя в среднем около 15—25 км, под океаном она заметно меньше. Гранитный слой достигает максимума 15—20 км на континентах. Земная кора выделяется в структуре Земли не только по химическому составу, но и по сейсмическим свойствам. На глубине около 40 км она отделяется так называемым слоем Мохоровичича от нижележащих пород мантии. Породы мантии Земли, например дуниты, по составу приближающиеся к составу молекулы оливина, иногда достигают поверхности Земли, выполняя зоны наиболее глубоких разломов земной коры. Сверху земная кора прикрыта чехлом осадочных пород.

Наиболее вероятно, что земная кора, ее изверженные породы образовались за геологическое время в результате выплавки вещества мантии Земли. При этом, по-видимому, для создания высоких концентраций ряда химических элементов в изверженных породах земной коры, например в гранитах, была мобилизована значительная мощность вещества мантии. Состав пород мантии, как это принимается с теми или иными несущественными оговорками большинством ученых, идентичен по химическому составу каменным метеоритам, а именно, хондритам. Впервые мысль об идентичности состава железных метеоритов с ядром Земли, каменных метеоритов — хондритов с наиболее глубинными ультраосновными породами мантии Земли и т. д. была высказана более 100 лет назад французским ученым минералогом Г. О. Добре, академиком Французской ака-

демии наук и членом-корреспондентом Российской академии наук.

Несколько слов о метеоритах.

Все метеориты относятся к трем основным классам: а) каменным; б) железо-каменным; в) железным. Среди каменных преобладают так называемые хондриты. По химическому составу они ближе всего к ультраосновным породам Земли. Наиболее интересной особенностью, отличающей их от изверженных пород Земли, является структура. Они сложены из так называемых хондр — застывших капелек силикатного вещества (рис. 1 и 2).

Эти хондры сцементированы осколками или пылевыми частицами самих разрушенных хондр. Среди цемента хондритов находятся в виде металлической губки железо-никелистый сплав (в среднем около 12% от веса каменного метеорита) и включения троилита FeS .

Железо-каменные метеориты, в частности так называемые палласиты, представляют собой губку металлического железа, в которую включены хондры силикатного вещества (главным образом оливина, энстатита).

Железные метеориты содержат в среднем около 8% никеля. Наиболее обычными включениями их являются троилит FeS и шрейберзит $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$ и др.

Главная масса железа в метеоритах находится в двух фазах — камасите и тэните, которые и определяют характер структуры и состава железных метеоритов (рис. 3).

Следующая коротенькая статистика, в свое время составленная Уотсоном, дает представление о количественном соотношении между каменными и другими классами метеоритов и их прочности в условиях Земли (табл. 1).

Таблица 1
Статистика падений и находок разных классов метеоритов

Название метеоритов	Найдено	Упало
	число случаев	
Железные метеориты .	409	29
Железо-каменные метеориты	46	6
Каменные метеориты .	165	547
Итого . . .	620	582

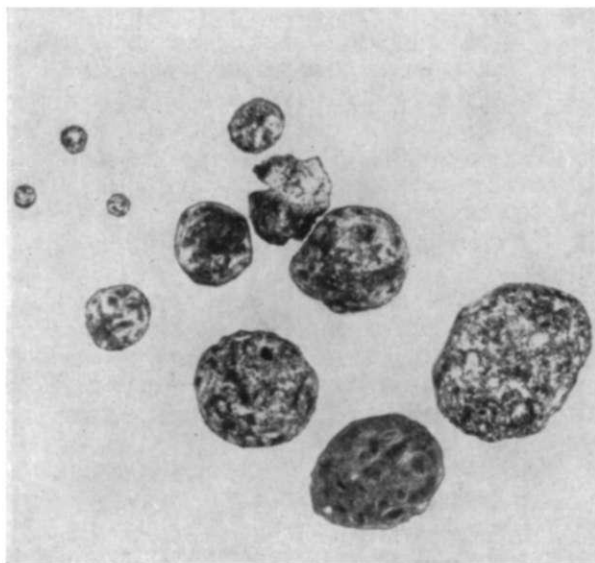


Рис. 1. Хондры из метеорита (Никольское) ($\times 4,5$).

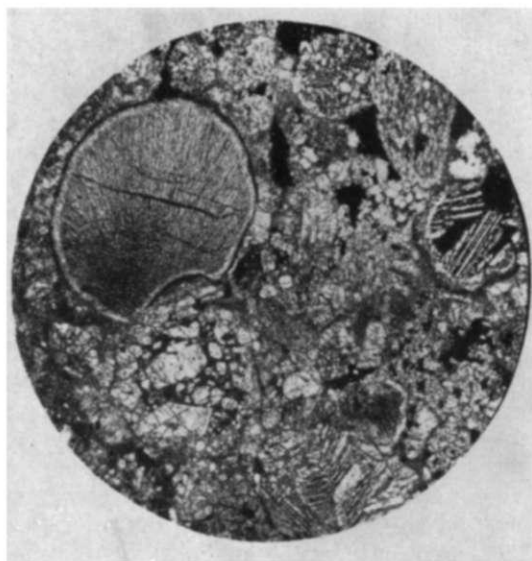


Рис. 2. Хондры. Вид под микроскопом, в проходящем свете ($\times 20$).

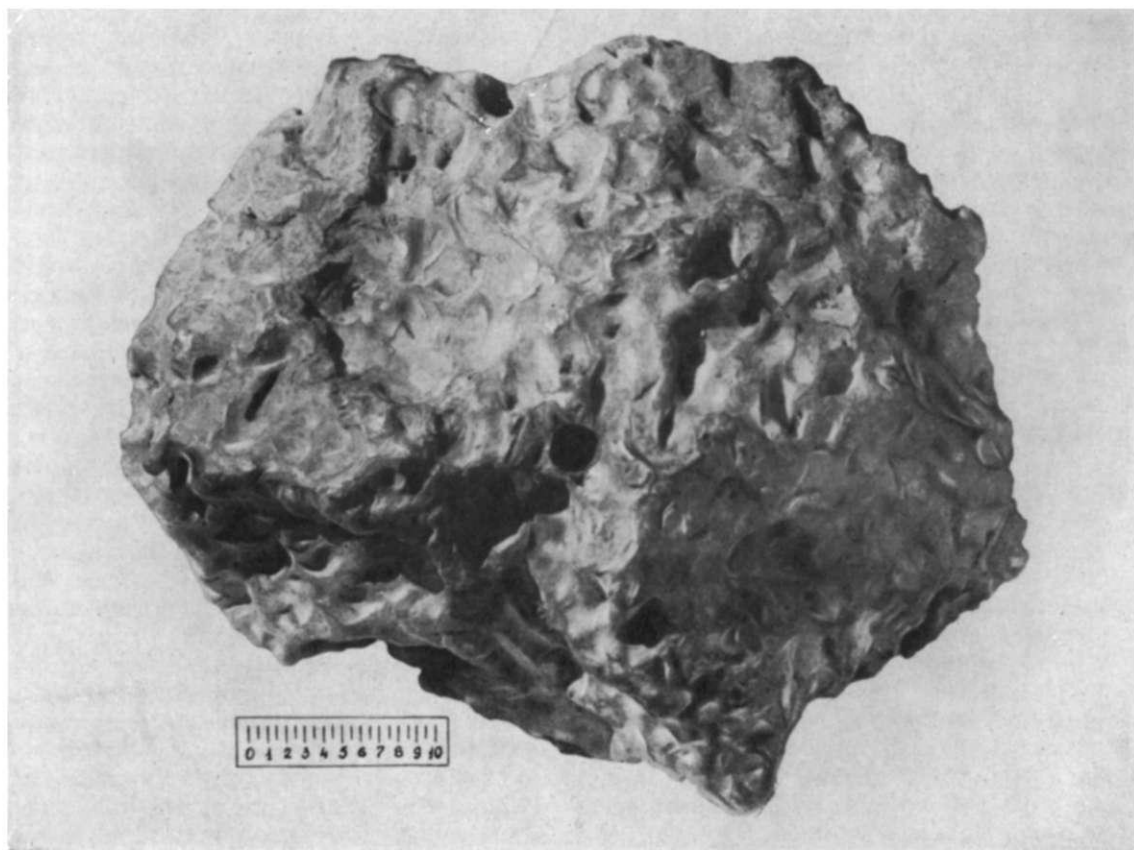


Рис. 3. Кусок железного метеорита (Сихотэ-Алинь). Вид с поверхности.

Теперь мы можем вернуться к изотопному составу ряда элементов, которые наблюдаются в изверженных горных породах Земли и метеоритах.

Можно говорить о трех главных процессах, которые ведут к нарушению изотопных отношений в породах Земли и метеоритах:

1. Радиоактивный распад урана, тория, K^{40} и др.

2. Спонтанное деление урана, тория и ядерные превращения, порожденные α -, β -, γ -излучением урана, тория и др. Ядерные реакции, идущие под влиянием космического излучения нейтронов.

3. Нарушение отношений стабильных изотопов либо в результате изотопного обмена и других аналогичных процессов разделения, либо вследствие примешивания стабильных изотопов радиогенного и другого происхождения.

Что касается естественнорadioактивных веществ, то за очень малым исключением среди всех химических элементов имеются радиоактивные изотопы, либо какая-то часть стабильных изотопов, которые являются конечными продуктами радиоактивного распада соседних радиоактивных изотопов.

Существенную роль в изменении изотопного состава играют здесь в первую очередь конечные продукты радиоактивного распада семейств: уранового, актиноуранового, ториевого и, возможно, нептуниевое ряда, а именно: свинец, гелий, а также продукты превращения $K^{40} \rightarrow E \rightarrow Ar^{40}$ и еще около 20 других аналогичных пар: $Rb^{87} \rightarrow Sr^{87}$; $Sm^{147} \rightarrow Nd^{143}$; $Bi^{209} \rightarrow Tl^{205}$ и т. д. Но, как теперь достаточно известно, этими первичными процессами радиоактивного распада не ограничивается влияние радиоактивных элементов на состав горных пород и метеоритов. Под влиянием излучений α -, β - и γ -лучей естественнорadioактивных элементов в породах и минералах в свою очередь возникают в подходящих геохимических ассоциациях элементов разнообразные вторичные ядерные процессы, например типа (α, n) и $(\alpha, 2n)$ на легких ядрах бериллия, лития, бора и др. Действительно, у нас еще В. Г. Хлопин наблюдал повышенное содержание гелия именно в пегматитовых минералах, богатых либо бериллием, либо литием, бором и т. д. В редкометалльных пегматитах, содержащих уранинит или ториевые минералы, не исключено образование природного источника ней-

тронов, подобных $Be-Ra$ или $Be-Po$ и т. п. Появление нейтронов в веществе пород и минералов в свою очередь вызывает реакцию захвата нейтронов. В настоящее время обнаружены природные ядерные реакции на (n, α) , (n, p) , (n, γ) и т. д. для ряда элементов, например U^{235+n} , которая приводит к делению урана. Как мы увидим несколько позже, эта реакция деления U^{235+n} по продуктивности в природе конкурирует с реакцией спонтанного деления урана и тория. В свою очередь они образуют в природных условиях большую гамму осколков деления. Позже я вернусь к продукции в породах и минералах инертных газов в результате спонтанного деления U^{238} и U^{235+n} . Совершенно так же возникают и вторичные реакции по типу (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ или (γ, n, p) с бериллием или другими ядрами.

Из этого обширного круга радиоактивных превращений некоторые были практически использованы для геологических целей, например для определения абсолютного геологического возраста минералов, пород, коры Земли, возраста Земли или возраста метеоритов. Многие другие цепочки еще требуют детального изучения.

Преследуя основную цель моего выступления, я остановлюсь несколько подробнее лишь на одном или двух примерах распределения некоторых изотопов, возникших в результате ядерных природных процессов в изверженных породах и метеоритах.

Первый пример — изменение изотопного состава свинца и инертных газов в породах и метеоритах. Свинец имеет четыре стабильных изотопа: космический 204, количество которого не растет в изверженных породах, радиогенные 206, 207 и, по-видимому, частично радиогенный и частично космический 208. Изучение изотопного состава свинца железных метеоритов позволило наиболее достоверно определить возраст вещества метеоритов, так как свинец в метеоритах не теряется, а процессы, которые могли бы нарушить его изотопный состав, практически отсутствуют. Далее, на основе нескольких сот определений изотопного состава рудного свинца различного геологического возраста удалось впервые, так сказать, экспериментально оценить возраст Земли. Но наиболее существенным достижением, полученным с помощью изотопного анализа руд и пород свинца, является доказательство отсутствия

в коре или мантии Земли рудного слоя, постоянного депо с одинаковым изотопным составом рудного свинца (аналогично и депо других рудных элементов). Любой рудный свинец отторгается в то или иное геологическое время от магмы или пород Земли и в своем изотопном составе хранит метку времени. Больше того, изотопный состав свинца, находящегося всегда в следах в любых других рудах — железа, меди и т. д., оказывается также метчиком времени процесса отторжения этой руды от пород или магмы. И интересно, что полученные ныне в обширном количестве данные по изотопному составу рудного свинца разного геологического возраста и из разных мест указывают на консолидацию рудного процесса во времени в пределах ограниченного числа тектономагматических циклов земной коры, правда, с довольно большой дисперсией. Мы невольно при этом вспоминаем ранние идеи о металлогенических эпохах Земли. Еще только положено начало использованию изотопных отношений для раскрытия руд-

тах и гранитах на основе законов радиоактивных превращений, несомненно, логически приведет к ответу на вопрос об отношениях базальтов к гранитам — этому сложному и всегда злободневному геологическому вопросу.

В связи с этим я хотел бы обратить внимание на одну любопытную деталь поведения свинцов в каменных метеоритах, базальтах и гранитах (рис. 4).

Если мы, исходя из современного изотопного состава свинца каменных метеоритов, базальтов или гранитов любого геологического возраста, будем экстраполировать возможные изотопные отношения для любой пары изотопов свинца, например Pb^{207}/Pb^{204} , в прошлое, то получим кривые, изображенные на рис. 4. Кривые для каменных метеоритов и базальтов идут параллельно (вдоль кривой «возраст Земли»). Кривые Pb^{207}/Pb^{204} для гранитов очень быстро обрываются. Дальнейшая экстраполяция их приобретает абсурдный характер. Эти кривые указывают, как мне кажется, на то, что материал ультраосновных и основных пород Земли, как и каменных метеоритов, является более «древним», более «первичным», относительно мало претерпевшим изменения и имеет мало нарушенное изотопное отношение свинцов. Материал гранитов претерпел сравнительно более значительные изменения с нарушенным по сравнению с «первичным» нормальным изотопным составом свинца. Это в общем деталь, но она в какой-то мере указывает на характер отношений вещества базальтов к веществу гранитов.

Другой пример — изотопный состав инертных газов: гелия, неона, аргона, криптона и ксенона — в породах и метеоритах (табл. 2). В их образовании участвуют не только радиоактивный распад урана, тория, K^{40} и деление урана и тория, но и, по крайней мере для метеоритов, реакция глубокого отщепления, идущая под влиянием космического излучения. Поэтому все эти процессы, порождающие инертные газы в породах и метеоритах, я буду рассматривать вместе. Под влиянием ударов космических частиц протонов и др., а также под влиянием вторично возникших нейтронов и мезонов в веществе метеоритов и на поверхности Земли (главным образом в атмосфере) возникают новые радиоактивные и нерадиоактивные ядра. Химический состав атмосферы и, в частности, изотопный состав ее инертных газов, как мы сейчас

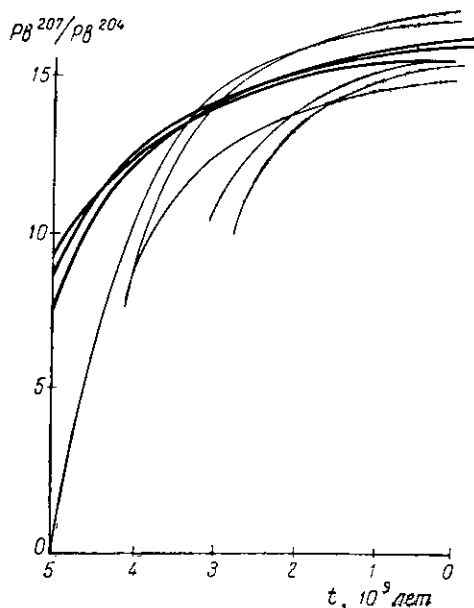


Рис. 4. Изменение Pb^{207}/Pb^{204} во времени. Жирные линии — в ультраосновных, основных породах и в каменных метеоритах; тонкие линии — в кислых породах — гранитах.

ного процесса в земной коре. Мне представляется, что изучение распределения радиоактивных элементов и их продуктов в базаль-

Таблица 2

Изотопный состав некоторых инертных газов атмосферы, изверженных пород и метеоритов

Название материала	Ar ⁴⁰ /Ar ³⁶	Ar ³⁸ /Ar ³⁶	Ne ²¹ /Ne ²⁰	Ne ²² /Ne ²⁰	He ³ /He ⁴
Атмосфера Земли . . .	296	0,187	0,00283	0,097	$\sim 1 \cdot 10^{-6}$
Изверженные породы . . .	—	0,5	—	—	$\sim 1 \cdot 10^{-7}$
Каменные метеориты . .	—	0,6	0,6	0,6	0,02
Железные метеориты .	—	1,6	0,89	0,98	0,3

увидим, отражают состав газов изверженных пород. Больше того, мы принимаем, что многие газы в атмосфере являются результатом дегазации Земли в течение всего геологического времени. Поэтому, зная пай инертных газов, приносимых в атмосферу в результате воздействия космического излучения, мы можем представить состав этих газов из глубинных пород Земли. Что касается действия космического излучения и изотопного состава, в частности, инертных газов метеоритов, то это зависит в первую очередь от их размеров: чем метеорит меньше, тем он больше простреливается космическими частицами, так сказать, насквозь. Таким образом, накопление инертных газов и других продуктов ядерных реакций с космическими частицами зависит от глубины, т. е. положения вещества метеорита — или на его поверхности, или в глубине первичного метеорита. Оно зависит также от длительности облучения метеорита, его возраста, интенсивности облучения и химического состава метеорита.

Гелий, наиболее преобладающий из инертных газов, образуется как радиогенным путем, так и под влиянием действия космических частиц на вещество. Он имеет два изотопа: He³ и He⁴. В атмосфере Земли, в газах и породах, где He⁴ образовался радиогенным путем, его в 10⁶ раз больше, чем He³. Изотоп He³ возникает в атмосфере по реакции $N^{14} + n^0 \rightarrow 3He^4 + T^3(He^3)$ (или по другой, аналогичной) и заметно не увлекается породами Земли. В каменных метеоритах He⁴ возникает в результате радиоактивного распада урана и тория и вместе с He³ — в результате воздействия космического излучения на вещество метеорита. Отношение He³/He⁴ в каменных метеоритах довольно дисперсно и колеблется около 0,02. Наконец, в железных метеоритах, где под влиянием удара космической частицы идет испарение ядер железа, образуются также и He³ и He⁴. Но содержание урана и тория в железных метеоритах ничтожно мало, и, как показал Панет и др., мы имеем отношение He³/He⁴ = 0,3. С глубиной метеорита количество гелия может уменьшаться и He³/He⁴ будет несколько изменяться. Таким образом, породы Земли, каменные метеориты и железные метеориты различаются по He³/He⁴ как в качественном, так и в количественном отношении (табл. 2).

Несколько иначе ведут себя изотопы неона и аргона.

Происхождение изотопного состава неона атмосферы и, следовательно, изверженных пород достаточно не изучено. Не ясны еще все те реакции, которые приводят к изотопному составу атмосферы. В атмосфере резко преобладает Ne²⁰ (90,9%).

Поскольку многими исследователями было показано, что Ne/Ar для атмосферы ($1,7 \cdot 10^{-3}$), изверженных пород ($3,8 \cdot 10^{-3}$) и природных газов — струй ($2,5 \cdot 10^{-3}$) имеет практически одинаковое значение и, как мы можем еще заметить, что Ne/Ar в каменных метеоритах того же порядка, то можно допустить, что изотопный состав неона Земли есть результат частично деления урана и частично нейтронных реакций с кислородом и фтором. Но, как мы нашли, в железном метеорите Сихотэ-Алинь отношения изотопов неона совершенно иные. Здесь изотопы неона являются также остаточными ядрами от испарения ядер железа под ударами космических частиц. Отношение между тремя изотопами близко к единице. В железном метеорите Сихотэ-Алинь наблюдалось, что количество неона с глубиной несколько уменьшалось без заметного изменения отношения изотопов. Примерно такое же отношение изотопов неона найдено и для каменных метеоритов. В каменных метеоритах в реакцию с космическими частицами вступают преимущественно более легкие ядра, чем железо, поэтому возможно, что вследствие этого изотопный состав неона (так же как и аргона) несколько изменяется.

В породах (а отсюда в атмосфере) преобладает Ar⁴⁰ и основным источником его является процесс $K^{40} \rightarrow E \rightarrow Ar^{40}$. Отношение

Ar^{38}/Ar^{36} в радиоактивных минералах (нейтронные реакции) и в породах приближается к 0,5. Эти два главных источника изотопов аргона и образуют аргон атмосферы. Герлинг предполагает, что источником Ar^{38} может быть и изомер K^{38} . Накопление в каменных метеоритах Ar^{40} зависит от их возраста и также является результатом распада ядер K^{40} . Ar^{38} и Ar^{36} возникают при испарении ядер железа и еще более легких ядер каменного метеорита. Поэтому отношения Ar^{38}/Ar^{36} в железных и каменных метеоритах должны быть близки. В железных метеоритах с глубиной наблюдается пониженное содержание Ar^{38} и Ar^{36} (а также и Ar^{40}).

Несколько слов о тяжелых инертных газах. Тоде и др. показали, что источником ряда изотопов ксенона и криптона на Земле являются два конкурирующих процесса: спонтанное деление U^{238} и деление U^{235} на нейтронах. Изотопный состав $He+Kr$ из радиоактивных минералов лежит между значениями этих двух процессов. При этом в природных процессах наблюдается сдвиг выходов этих газов в сторону тяжелых изотопов. Поэтому газы урановых и других минералов имеют $He/Kr=5$. Хотя газы изверженных пород и атмосферы имеют практически одинаковое отношение $He+Kr/Ar$ ($1,9 \cdot 10^{-4}$ и $1,2 \cdot 10^{-4}$), изотопный состав ксенона и криптона атмосферы резко отличен, отлично и $He/Kr=0,08$.

Наконец, об изотопных отношениях стабильных изотопов в изверженных породах и метеоритах. Как и нужно было ожидать из термодинамических соображений, наибольший эффект разделения изотопов в природных условиях наблюдается у легких элементов. В породах литосферы локально наблюдаются достаточно заметные изменения изотопных отношений для серы, кислорода, углерода, водорода, азота, бора и др. Легко предположить, что причиной нарушения изотопных отношений в природных условиях являются различные физико-химические процессы, происходящие в земной коре (и хорошо воспроизводимые в лабораториях), например испарение, диффузия и т. п. Однако наблюдение и опыт показали, что обычной причиной изменения изотопных отношений и стабильных изотопов в природе является изотопный обмен. Он идет в парах, жидкостях и расплавах. Как хорошо известно, константа равновесия

в этом обмене с ростом температуры приближается к единице, т. е. с увеличением температуры разделение изотопов становится за некоторым исключением все более маловероятным. Геологические масштабы времени вполне достаточны, чтобы этот изотопный обмен пришел в равновесное состояние, например при остывании магмы. Таким образом, изотопное отношение для разных стабильных изотопов пород по существу является местным геологическим термометром процесса, если только он не испорчен позже изотопным обменом застывшей породы со средой.

Мы нашли, что сера железных и сера каменных метеоритов совершенно идентичны по изотопному составу. Изотопный состав серы изверженных пород земной коры, высокотемпературных сульфидных руд и метеоритов дал значительную дисперсию (табл. 3).

Таблица 3
Средние данные для изотопного состава серы изверженных пород, руд и метеоритов

Название материала	Число случаев	S^{32}/S^{34}
Каменные метеориты	13	22,20
Железные метеориты	10	22,20
Вулканическая сера	15	22,21
Ультраосновные породы (дуниты)	4	22,20
Базальты	2	22,178
Граниты	2	21,780
Магматогенные сульфиды	7	22,138
Гидротермальные сульфиды	32	22,148
Сульфаты высокотемпературные	—	21,885
Сульфаты морские	13	21,75

Этот разброс замечается уже у наиболее высокотемпературных магматогенно-ликвационных сульфидов, первично отделяющихся от магмы. Еще больше этот разброс в изотопном составе серы отмечается у гидротермальных сульфидов. И вместе с тем изотопный состав серы изверженных пород — базальтов и гранитов — также отличен от изотопного состава серы метеоритов. Только сера ультраосновных пород, близких по химическому составу к каменным метеоритам, в частности сера дунитов, отвечает изотопному составу серы метеоритов. Наконец, сера вулканов. Ее изотопный состав близок, если не идентичен, к изотопному составу серы метеоритов.

Таким образом, изотопный состав серы железных, железо-каменных и каменных метеоритов, пород мантии Земли и серы вулканов близок и имеет определенный постоянный состав. Породы литосферы и руд содержат серу со значительно измененным изотопным составом. Еще большая дисперсия в изотопном составе серы достигается в биосфере.

Можно частично рассчитать те равновесия, которые возникают в системе $\text{Fe} - \text{S} - \text{O}_2$ в момент отторжения руды от магмы. В этом процессе происходит уже разделение изотопов серы.

Очевидно, ничего подобного не происходило при образовании различных классов метеоритов, поскольку все они имеют идентичный состав серы. Следовательно, их вещество не претерпело процессов, подобных магматической ликвации или фракционной дифференциации, какие мы наблюдаем для пород земной коры.

Совершенно та же тенденция нарастания эффекта разделения изотопов для пород земной коры от более глубинных к поверхностным обнаруживается и для изотопов кислорода. Изотопный состав O_2 каменных метеоритов наиболее близок к O_2 ультраосновных пород. Не только нами была отмечена наибольшая дисперсия изотопного состава O_2 у гранитов по сравнению с дисперсией изотопного состава O_2 других изверженных пород. Действительно, для гранитов этот разброс имеет $\Delta = 7,7-12,2\%$, а для основных пород (базальтов) — $\Delta = 6,7-7\%$. Таким образом, наибольшее различие в изотопном составе O_2 можно найти у гранитов и каменных метеоритов (табл. 4). Повышение содержания O^{18} в кислых породах — гранитах — связано с высоким содержанием O^{18} в молекуле кварца SiO_2 подобно тому, как молекула CO_2 накапливает наибольшее

количество O^{18} . Влияние O^{18} кварца на изотопный состав O_2 породы особенно заметно для пород осадочного цикла, которые обогащаются коллоидной SiO_2 .

Отсюда легко понять, что еще большая дисперсия изотопного состава O_2 , как и других легких ядер, встречается в биосфере.

Несмотря на огромное количество данных по изотопному составу $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$, их очень трудно сравнить. Поэтому я вынужден опираться главным образом на данные своей лаборатории. В среднем изотопный состав углерода железных и различных классов каменных метеоритов одинаков. Однако дисперсия в изотопном составе углерода значительно выше у железных метеоритов, чем у каменных. В железных метеоритах, помимо рассеянного углерода, в массе железа встречаются, правда редкие, включения карбида Fe_3C — когенита. По Крейгу в метеорите Каньон Дьявола углерод железа имел $\text{C}^{12}/\text{C}^{13} = 89,45$, а углерод когенита — $\text{C}^{12}/\text{C}^{13} = 90,51$. Возможно, наблюдаемая дисперсия может быть объяснена различием отношения когенита к рассеянному углероду в железе разных метеоритов (табл. 5).

Таблица 5

Средние данные изотопного состава углерода известняков, метеоритов и изверженных пород

Название материала	Число случаев	Дисперсия $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$	Среднее $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$
Известняки . . .	92	88,1—89,5	89,0
Железные метеориты	13	89,6—91,8	90,6
Каменные метеориты	26	89,6—91,2	90,6
Изверженные породы	13	90,3—91,2	90,8

Изотопный состав $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$ изверженных пород очень близок к $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$ метеоритов и, сколько можно заметить по ограниченному числу данных в этом направлении, имеет тенденцию к уменьшению содержания C^{13} . Это заключение имеет ту логику, что в литосфере и биосфере происходит более значительное разделение $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$ в породах, в частности, вследствие отложения больших масс CaCO_3 и т. п., молекулы которых имеют максимальное накопление C^{13} .

За это короткое время я едва успел коснуться, на мой взгляд, самого основного —

Таблица 4

Средние данные изотопного состава кислорода пород и каменных метеоритов

Название материала	Число случаев	$\text{O}^{18}/\text{O}^{16} \%$
Граниты	11	4,5
Основные и ультраосновные породы	8	7,0
Каменные метеориты	3	7,0

разнообразия процессов, идущих в веществе пород земной коры и метеоритов под влиянием радиоактивных элементов и космического излучения, которые непрерывно изменяют их изотопный состав.

Я думаю, вы меня правильно поняли, что каждый из рассмотренных процессов, нарушающих изотопный состав вещества, вносит разный пай. Радиоактивный распад для пород Земли имеет первостепенное значение. Реакция на α -частицах или нейтронах, как производное радиоактивного распада, вносит принципиально меньший пай. Для метеоритов значительную роль играет космическое излучение.

Изменения изотопных отношений преимущественно для легких атомных ядер в изверженных породах и метеоритах, как мы видели, носят систематический характер, но по своей величине редко достигают больших значений.

Однако мы не можем сегодня говорить о постоянстве их изотопного состава. Эти небольшие сдвиги изотопных отношений для свинца, инертных газов, ряда легких элементов и т. д. представляют исключительное значение в геохимии и космохимии, являясь индикаторами генезиса пород и метеоритов. Мы с вами убедились в различии изотопных отношений для разных изверженных пород, а также между их изотопным составом и изотопным составом метеоритов. Мы убедились также, что изотопный состав стабильных легких элементов определенным образом изменяется от глубины к поверхности земной коры. Вместе с тем подобного изменения изотопного состава метеоритов мы не наблюдаем. Изотопный состав легких элементов в разных классах метеоритов имеет значительно меньшую дисперсию, чем те же элементы в изверженных породах Земли. Накопление инертных газов и их изотопный состав в породах Земли (а отсюда состав газов атмосферы) и в метеоритах различны и определяются в первом случае главным образом естественной радиоактивностью, а во втором — главным образом космическим излучением и т. д..

Это своеобразие изотопного состава пород и метеоритов позволяет, как мне кажется, сделать основной вывод о том, что и процессы, которые привели к образованию из-

верженных горных пород земной коры и разных метеоритов, должны быть различны. Изотопный состав свинца и других стабильных изотопов и т. д. для пород мантии и земной коры не противоречит гипотезе выплавления пород земной коры и образования атмосферы путем дегазации в течение геологического времени вещества мантии.

Но изотопный состав метеоритов, а именно: идентичность состава стабильных изотопов легких элементов у всех классов метеоритов, каменных и железных, наличие инертных газов иного, чем на Земле, изотопного состава и т. д., указывает, как мне кажется, на отсутствие в процессе образования метеоритов разных классов процессов выплавления, ликвации, гидротермальных процессов и других аналогичных процессов фракционной дифференциации вещества, подобно тем, которые мы имеем в земной коре, на Земле.

Мне представляется, например, что образование железных и каменных метеоритов не является процессом выплавления железа из первичного метеоритного Fe-силикатного вещества, как обычно это представляется (тогда бы, кстати сказать, в каменных метеоритах исчезли хондры), а есть результат взаимной аккумуляции застывших капелек вещества с железом (в случае образования железо-каменных метеоритов). Тогда при этих относительно высоких температурах ($\sim 2000^\circ \text{K}$) изотопы серы или углерода и др. поровну распределяются в веществе силикатов и железа. Лишь появление при этих высоких температурах новых фаз, например для углерода — образование карбидов, может вызвать известное разделение изотопов и т. п. Факты как будто этому не противоречат. Одним словом, изучение изотопного состава природных объектов, нахождение им объяснения вселяют в геохимиков надежду на более глубокое проникновение в грандиозные процессы образования космических тел. И если я путем своего скучного сообщения привлек хотя бы одного энтузиаста, то вы должны признать, что использование изотопов в геохимии — великолепный метод.

Я очень благодарю вас за внимание.

Поступила в редакцию 30 I 1958 г.