Доклады Академии наук СССР
1955. Том 102, № 5

АСТРОНОМИЯ

А. В. ТРОФИМОВ и К. Г. РИК

ОБ ИЗОТОПАХ МЕТЕОРИТНОГО АРГОНА

(Представлено академиком А. П. Виноградовым 12 II 1955)

С тех пор как выяснилось, что космический гелий в метеоритах, образующийся при разрушении их атомов космическими частицами, состоит на 30% из редкого на земле изотопа He^3, все метеоритные возрасты, полученные по гелиевому методу, подвергнуты серьезному пересмотру ([1], [2]). Одновременно возникли новые перспективы возможности получения добавочных данных о жизненной истории метеоритов по содержанию в них He^3 ([3]). Аргоновый метод определения возраста метеоритов может быть свободен от осложнений, вызванных космическим облучением метеоритов. Э. К. Герлингом и К. Г. Рик ([5], [4]) были вычислены возрасты 12 каменных метеоритов на основании определения в них валового содержания аргона и калия; полученные ими результаты лежали в пределах 1,5—4,5 млрд. лет.

Однако анализы Герлинга и Рик не сопровождались изотопным контролем метеоритного аргона. Калийная радиогенность аргона, выделенного ими из метеоритов (т. е. отсутствие в нем других изотопов аргона, кроме изотопа A^{40}), оставалась недоказанной и полученные значения возрастов поэтому не могли считаться вполне надежными.

Для решения вопроса о радиогенности метеоритного аргона и выяснения его ядерного генезиса вообще нами был определен изотопный состав аргона, выделенного из нескольких метеоритов. Для анализа было взято 7 каменных метеоритов — хондритов, в которых содержание аргона было сравнительно высоким. Метеорит Саратов по петрографической оценке является неизмененным метеоритом; к этой же группе, возможно, относятся хондриты Никольское и Бюрбёлле; все остальные более или менее перекристаллизованы.

Аргон из метеоритов выделялся обычным методом ([4]) — прокаливанием образца в вакууме при температуре 1200° в течение 6—8 час. с последующей очисткой его от химически активных и легких инертных газов. Адсорбированный воздушный аргон удалялся предварительным обезгаживанием в вакууме при 200° в течение 4 час. Тщательно очищенный аргон вымораживался в ампуле на нескольких крупинках обезгаженного активированного угля, ампула отпаивалась над жидким азотом и переносилась в масс-спектрометр для изотопного анализа.

Бралась навеска метеорита от 50 до 100 г. Объем газа, собранного в ампуле, составлял от 2 до 5 $мм^3$. Чтобы можно было анализировать такие малые количества аргона, объем впускной системы масс-спектрометра перед диафрагмой был уменьшен до ~ 100 $см^3$. Это позволило находить отношение A^{36}/A^{40} в 2—3 $мм^3$ с точностью до $\sim 0{,}002$ единицы. Высота изотопных пиков аргона масс 36 и 38 обычно была очень небольшой, поэтому особое внимание было обращено на контроль вакуумного фона в этой области масс. В пределах чувствительности прибора фон был свободен от этих масс.

В анализированном аргоне обычно наблюдалась небольшая примесь массы 28 (до 2—3% от пика 40); всегда наблюдался пик массы 20, обязанный двухзарядному иону A^{40++}, высота которого составляла примерно 10% от высоты пика 40. В табл. 1 приведены результаты анализов.

Таблица 1

Изотопы аргона в метеоритах

Объект	Отношение изотопов		Содерж. изотопов в 1 г образца		
	A^{36}/A^{40}, %	A^{38}/A^{36}	A^{40} см³·10⁶	A^{36} см³·10⁹	A^{38} см³·10⁹
Еленовка	0,022	—	67	15	—
Кашин	0,010	3,0	115	11	3,5
Оханск	0,020	3,0	49	10	3,3
Саратов	0,106	3,5	57	60	17
Жовтневый Хутор .	0,027	1,0	54	15	15
Бюрбёлле	0,061	4,0	40	24	6
Никольское	0,022	1,0	50	11	11
Аргон атмосферный (стандарт)	0,334	5,3			

Примесь изотопа A^{36} к господствующему A^{40} наблюдается всюду в метеоритном аргоне; обычно она очень невелика по сравнению с содержанием изотопа 36 в атмосферном аргоне (0,334%) и неодинакова в разных метеоритах. Больше всего A^{36} содержит неизмененный хондрит Саратов — отношение A^{36}/A^{40} для этого метеорита достигает 32% от соответствующего значения для стандартного воздушного аргона. В остальных образцах доля A^{36} составляет от 3 до 18% от доли его в воздушном аргоне.

Аргон, выделенный точно таким же способом из минералов и земных пород (гранитов), как показали наши опыты, состоит, как правило, из чистого радиогенного A^{40}. Примесь A^{36}, если она есть, лежит у самой границы чувствительности масс-спектрометра, $\pm$ 0,001% от A^{40}. Заметное присутствие A^{36} в аргоне гранитов всегда указывало на загрязненность анализа и не подтверждалось при его повторении. Повторные же анализы метеоритов, например Саратова и Никольское, дали хорошую согласованность по всем трем изотопам. Следовательно, примесь изотопов 36 и 38 в метеоритах не вызвана какими-либо случайными загрязнениями метеоритного аргона.

Тот факт, что соотношение между редкими изотопами 36 и 38 для некоторых метеоритов (Никольское, Жовтневый Хутор) резко отличается от стандартного значения для атмосферного аргона, говорит о вторичном ядерном генезисе одного или обоих редких изотопов аргона. Нам кажутся возможными такие объяснения этого факта: 1) изотопы A^{38} и A^{36} целиком возникли в метеоритах в результате ядерных превращений под действием космического облучения; 2) часть этих изотопов в нормальном отношении ($A^{36}/A^{38} = 5{,}3$) захвачена метеоритами из газовой фазы при затвердевании, а относительный избыток A^{38} образовался позднее вследствие космического облучения метеоритов. Можно допустить также, что некоторые метеориты способны прочно удерживать остатки аргона, адсорбированного ими из атмосферы.

При вычислении возраста метеоритов аргоновым методом должен учитываться только радиогенный аргон с массой 40, образовавшийся в результате распада K^{40}. Присутствие других изотопов аргона в метеоритах ставит вопрос о величине ошибок аргонового метода определения возраста из-за игнорирования примеси редких изотопов и о величине

соответствующих поправок. Очевидно, что величина этих поправок прежде всего будет зависеть от того, какое толкование принять для объяснения самого факта нахождения редких изотопов аргона в метеоритах. Если принять, что A^{36} и A^{38} целиком вторичного происхождения и накопились в метеоритах после их затвердевания под действием космического облучения, то, очевидно, что поправка к A^{40} будет ничтожной — она равна относительной доле редких изотопов в A^{40}, т. е. во всех случаях будет меньше 0,1%. С другой стороны, наибольшая поправка будет соответствовать предположению, что метеориты, в отличие от земных пород, столь прочно адсорбируют воздушный аргон, что он не удаляется полностью при предварительном обезгаживании и что примесь A^{36} целиком обязана аргону атмосферы. В этом случае поправка к A^{40} достигает 32% для метеорита Саратов, 18% для Бюрбёлле, а для остальных она лежит в пределах от 3 до 8%.

Таблица 2

Максимальные поправки и возраст метеоритов

Метеорит	Возраст по Г. и Р. (10^9 лет)	Поправки (10^9 лет)	Возраст с внесением поправки (10^9 лет)
Еленовка .	4,0	0,1	3,9
Кашин . .	3,1	0,0	3,1
Оханск . .	4,5	0,1	4,4
Саратов . .	3,7	0,6	3,1
Жовтневый Хутор . .	3,0	0,05	2,9
Бюрбёлле .	3,6	0,3	3,3

В табл. 2 показано, как изменится возраст метеоритов (по данным Герлинга и Рик), если ввести такие максимальные (завышенные) поправки, исходя из указанного допущения о прочном захвате метеоритами атмосферного аргона.

Оказывается, что введение даже максимальных поправок существенно не изменяет общей картины: значения возраста, определенные по отношению A/K, остаются без существенных изменений и указывают на очень давнее время затвердевания метеоритного вещества, время порядка 3—4 млрд. лет.

Нечувствительность аргонных дат к вводимым поправкам обусловлена тем, что для древних объектов зависимость возраста от отношения A^{40}/K^{40} становится очень пологой. Однако предположение о прочности захвата метеоритами атмосферного аргона едва ли соответствует действительности, и потому истинные возрастные поправки, повидимому, значительно меньше приведенных в табл. 2 и, возможно, близки к нулю.

Соотношение двух редких изотопов A^{36} и A^{38} в метеоритах непостоянно — оно колеблется от 1 до 4. Точность определения этого отношения (около 10%) невелика, так как относительное содержание обоих изотопов в аргоне обычно очень низко.

Но сам факт относительного обогащения нерадиогенной компоненты аргона метеоритов изотопом 38 кажется несомненным, и космическое происхождение A^{38}, по крайней мере его избытка,— единственно возможным. Весьма вероятно, что и A^{36} метеоритов также частично или даже, может быть, полностью, космического происхождения (так же как и небольшая доля A^{40}), но это не следует из приводимых данных с такой очевидностью как для A^{38}.

Возможными источниками космического A^{38} могут быть прежде всего элементы, ближайшие к аргону по атомному номеру — Cl, K и Ca. Так, например, прямо или косвенно (через переходные неустойчивые ядра Cl^{38} и K^{38}) изотоп A^{38} получается из обоих изотопов хлора ([7]) — при реакциях типа (αn), (αp), $(n\gamma)$ и $(p\gamma)$, из стабильных изотопов калия — по реакциям типа (γn), $(n\alpha)$ и $(p\alpha)$ и из гораздо более распространенного в метеоритах кальция — по реакции Ca^{40} (d, α).

В любом случае накопление в метеоритах космического A^{38} должно зависеть: 1) от степени экранирования, т. е. глубины залегания изучае-

мой пробы в теле первичного метеорита; 2) от концентрации того или тех главных элементов, из которых образуется A^{38}, и 3) от интенсивности и длительности облучения метеорита космическими лучами.

Первый космический элемент, найденный в метеоритах, был гелий. Теоретический подсчет продуцирования гелия космическими лучами в железных метеоритах приводит [3] к величине $(5 \pm 1{,}5) \cdot 10^{-14}$ см^3 He на 1 г в год. Порядок соответствующей величины для космического A^{38} можно подсчитать из данных табл. 1: содержание A^{38} в 1 г метеоритов колеблется от 3 до $17 \cdot 10^{-9}$ см^3. Аномальный избыток A^{38} по сравнению с земным отношением A^{36}/A^{38} колеблется в пределах от 1,5 до $12 \cdot 10^{-9}$ см^3/г.

Если допустить, что максимальное накопление A^{38} соответствует наименее экранированным частям метеорита и длительность облучения равна возрасту метеорита, то максимальное значение годового продуцирования космического аргона получим для метеорита Жовтневый Хутор; оно равно $12 \cdot 10^{-9}/3 \cdot 10^9 = 4 \cdot 10^{-18}$ см^3/г в год. Следовательно, максимальная (из найденных) скорость накопления космогенного A^{38} в метеоритах примерно в 10000 раз меньше, чем гелия, и в 3000 раз меньше скорости накопления изотопа He^3.

Можно полагать, что A^{38} — второй после гелия элемент космического происхождения, обнаруженный в метеоритах — не будет последним. Накопление других вторичных элементов, образующихся в метеоритах, будет, вероятно, такого же малого порядка, как и для A^{38}. Поэтому обнаружить какой-либо новый изотоп космического генезиса можно только при отсутствии или при очень низком уровне первичного фона этого элемента в метеоритном веществе.

Такое условие хорошо выполнено, например, для неона, особенно для его редкого изотопа Ne^{21}.

Институт геохимии и аналитической химии
им. В. И. Вернадского
Академии наук СССР

Поступило
12 II 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] F. A. Paneth, Geochem. et Cosmochem. Acta, **2**, 516, 300 (1952). [2] G. R. Martin, Geochem. et Cosmochem. Acta, **3**, № 6, 257 (1953). [3] S. F. Singer, Astrophys. J., **119**, 291 (1954). [4] Э. К. Герлинг, К. Г. Рик, Метеоритика, **10**, 37; **11**, 117 (1953). [5] Э. К. Герлинг, К. Г. Рик, ДАН, **101**, № 3 (1955). [6] А. Н. Заварицкий, Л. Г. Кваша, Метеориты СССР, 1952. [7] W. H. Fleming, H. A. Thode, Phys. Rev., **90**, 857 (1953).