

22/11-72

Б-245

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

962/2-72

P2 - 6225



В.С. Барашенков, Н.М. Соболевский, В.Д. Тонеев

НАКОПЛЕНИЕ КОСМОГЕННЫХ ИЗОТОПОВ
В ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТАХ

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

1972

P2 - 6225

В.С.Барашенков, Н.М.Соболевский, В.Д.Тонеев

НАКОПЛЕНИЕ КОСМОГЕННЫХ ИЗОТОПОВ
В ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТАХ

Направлено в журнал "Геохимия"

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Известно, что под действием космического излучения в веществе метеоритов постоянно образуются различные стабильные и радиоактивные изотопы. Количество этих изотопов, а также их вид и распределение по объему метеорита зависят как от химического состава и размеров последнего, так и от условий облучения (интенсивность, длительность, спектр). Поэтому, измеряя содержание космогенных изотопов в выпавшем на Землю метеорите, можно, в принципе, извлечь некоторые сведения о его истории и, что весьма интересно, об истории космических лучей в солнечной системе. К настоящему времени выполнено большое количество таких измерений (см., например, обзоры ^{/1-4/}, где имеется подробная библиография).

Однако для интерпретации данных о содержании космогенных изотопов в конкретных метеоритах необходимо знать скорости образования этих изотопов при фиксированных условиях облучения, имитирующих космическую обстановку. Определение скоростей образования возможно либо в модельных экспериментах на ускорителях, либо теоретическим путем, причём в обоих случаях это — сложная задача.

Расчёты скоростей образования космогенных изотопов в сферических телах метеоритного состава под действием галактического космического излучения выполнялись разными авторами^{/5-14/}. Наиболее полные и систематические вычисления были проведены Лаврухиной с сотрудниками^{/11-14/}. Однако в этих расчётах был сделан ряд упрощающих предположений, неизбежных при аналитическом подходе к проблеме взаимодействия ядерно-активных частиц высоких энергий с веществом: учитывалось только первое поколение вторичных частиц, образующихся при неупругих соударениях первичных протонов с ядрами; предполагалось, что все вторичные частицы движутся в том же направлении, что и инициировавшая их первичная частица (приближение "прямо-вперед"); делалось предположение о независимости энергетического спектра вторичных частиц от глубины в метеоритном теле.

Эти причины побудили нас провести аналогичные вычисления иным методом, свободным от перечисленных выше упрощающих предположений.

Разработанная нами методика расчёта взаимодействия частиц высоких энергий с веществом основана на статистическом моделировании процесса взаимодействия с помощью ЭВМ. При этом прослеживается "судьба" каждой частицы в мишени. Расчёт неупругих пион- и нуклон-ядерных столкновений, являющийся наиболее ответственным моментом при моделировании нуклон-мезонного каскада в веществе, определяющим точность методики в целом, проводится по каскадно-испарительной модели ядерных реакций^{/15/}. Эта модель хорошо зарекомендовала себя при расчёте неупругих соударений частиц с ядрами^{/16,17/}.

В работах^{/18,19/} было показано, что настоящая методика вполне удовлетворительно воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные по взаимодействию частиц с веществом в широком интервале энергий частиц (вплоть до $T \sim 30$ Гэв) и массовых чисел мишени и, следовательно, может быть с успехом использована при решении весьма широкого круга задач.

На основе описанной выше методики были рассчитаны скорости образования радиоактивных изотопов ^{22}Na , ^{36}Cl , ^{40}K и ^{49}V в железных телах сферической формы и различных радиусов R под действием галактического космического излучения. Все вычисления проводились на ЭВМ БЭСМ-6. Полученные данные позволили интерпретировать измеренные активности в некоторых железных метеоритах, о чём будет сказано далее.

Так же, как и в работе ^{/14/}, предполагалось, что на метеорит действует галактическое излучение с изотропным угловым распределением, интенсивностью $J = 0,39$ протон/см²·сек·стер и энергетическим спектром, соответствующим минимуму солнечной активности (спектр 1965 года). Вклад α -частиц и более тяжелых космических ядер не учитывался.

Сечение образования изотопа с массовым числом A и зарядом Z при расщеплении ядра-мишени с массовым числом A_1 , нуклоном с кинетической энергией T Мэв вычислялось по эмпирической формуле Рудстама ^{/20/}:

$$\sigma_N(A, Z, A_1, T) = \frac{\sigma(A_1, T) P(T) A_1^{-0,3}}{0,352[(e^{P(T)A_1} - 1) (1 - \frac{0,3}{P(T)A_1}) + 0,3]} \times$$

$$\times \exp [P(T)A - R(A) | Z - 0,486 A + 0,00038 A^2 |^{3/2}] ,$$

где

$$P(T) = \begin{cases} 20 T^{-0,77}, & T \leq 2100 \\ 0,056, & T > 2100 \end{cases}$$

$$R(A) = 11,8 A^{-0,45}$$

$$\sigma(A, T) = \sigma_{\text{геом}} e^{-0,25+0,0074A} \times \begin{cases} e^{1,73-0,0071T} & , T \leq 240 \\ 1 & , T > 240 \end{cases}$$

$$\sigma_{\text{геом}} = 10\pi (1,26 A^{1/3})^2 .$$

Соответствующее сечение пион-ядерного взаимодействия $\sigma_{\pi}(T_{\pi}) = \sigma_N(T_{\pi} + m_{\pi})$, где T_{π} и m_{π} - энергия и масса π -мезона.

При вычислениях учитывался β -распад $^{49}\text{Cr} \xrightarrow{\beta^+} ^{49}\text{V}$; вклады от других возможных распадов пренебрежимо малы.

В работе Лаврухиной и др.^{/14/} выходы изотопов вычислялись по аналогичным формулам.

Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2. Указаны статистические погрешности расчётов, которые особенно заметны для центральных областей метеорита.

Для сравнения на рис. 1 и 2 показаны также результаты приближённых аналитических вычислений^{/14/}. В случае изотопов ^{22}Na и ^{49}V имеет место количественное согласие. Однако намечается тенденция к расхождению результатов двух расчётов с увеличением размеров метеорита, причём наш расчёт даёт более высокие значения скоростей образования, особенно для изотопа ^{49}V . Последнее объясняется тем, что в работе^{/14/} учитывалось только первое поколение вторичных частиц. Это предположение оправдано лишь для метеоритов небольших размеров - порядка одного ядерного пробега. В телах больших размеров каскадные частицы последующих поколений могут уже давать некоторый вклад и тем больший, чем ниже порог образования данного изотопа. Если изотоп ^{22}Na образуется в основном при достаточно высоких энергиях частиц (≥ 600 Мэв), то образование ^{49}V из ^{56}Fe возможно уже при энергиях ~ 100 Мэв и по-

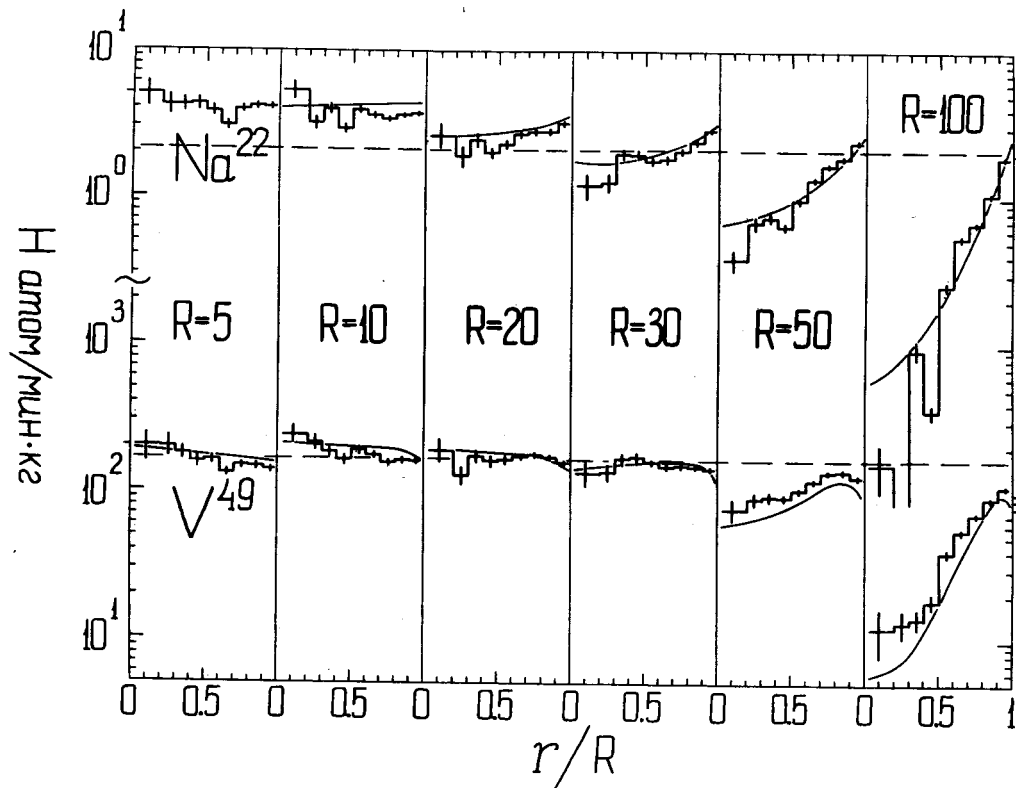


Рис. 1. Скорость образования атом/мин·кг радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{49}V (соответственно верхний и нижний ряд рисунков) в железных метеоритах различных радиусов R (см); r - расстояние от центра метеорита. Гистограммы - наш расчет, кривые - расчет/14/. Пунктирными прямыми показаны средние активности ^{22}Na и ^{49}V в одном из осколков Арус-Ярдымлинского железного метеорита/22/.

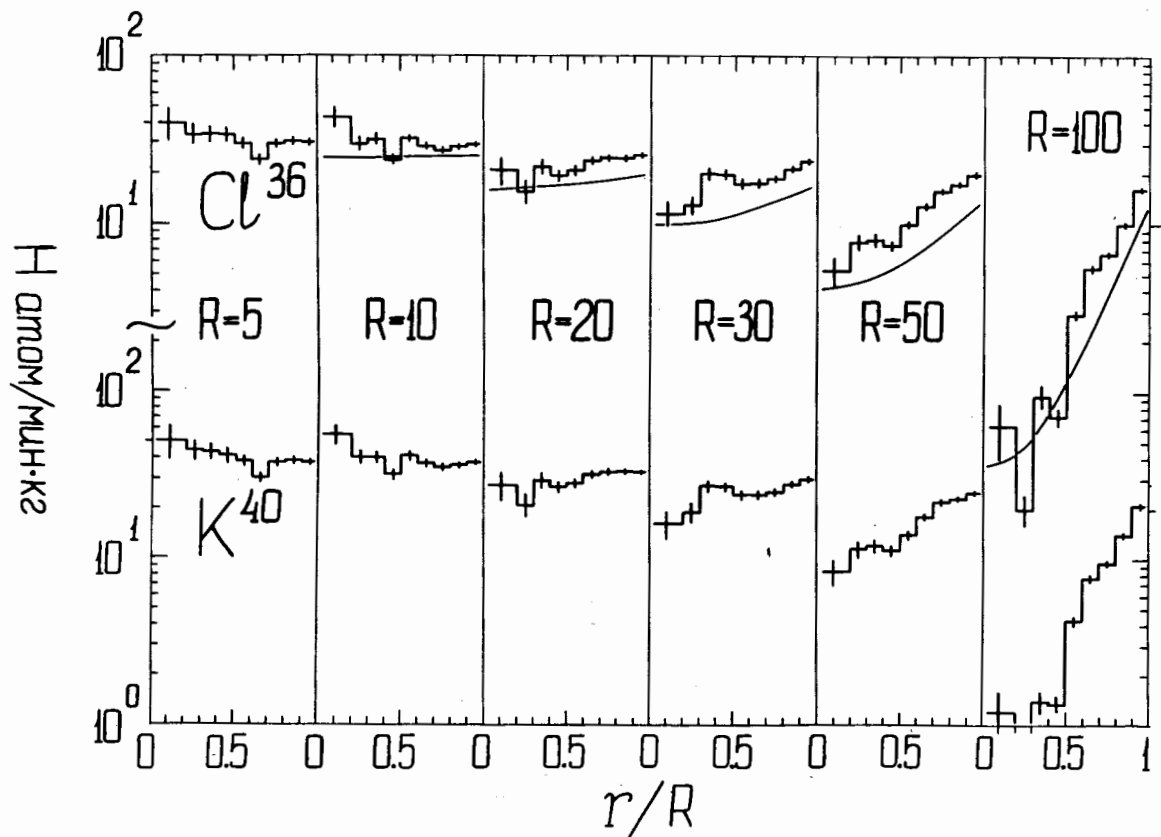


Рис. 2. Скорости образования изотопов ^{36}Cl и ^{40}K в железных метеоритах различных радиусов. Обозначения - как на рис. 1.

тому в заметной степени может происходить в результате взаимодействий с частицами второго, а быть может и более поздних поколений. (В наших расчётах все поколения вторичных частиц учитываются автоматически).

Для изотопа ^{36}Cl монте-карловский расчёт при всех R даёт более высокие скорости накопления, чем это получено в работе ^{/14/}.

Основываясь на полученных данных, рассмотрим следующие два вопроса.

1. Доатмосферный размер Арус-Ярдымлинского железного метеорита
Предложенный в работе ^{/21/} способ определения доатмосферного радиуса метеорита по активности космогенных изотопов в его осколках основан на сравнении активностей каких-либо двух изотопов, имеющих по возможности наибольшее различие в глубинной зависимости скоростей образования ^{x/}. Указанное различие имеет место в том случае, если один из этих изотопов образуется в основном первичным излучением, а другой — как первичными, так и вторичными частицами. Кроме того эти изотопы должны иметь близкие периоды полураспада, что позволяет исключить влияние возможных вариаций интенсивности космического излучения. Для свежесвыпавших железных метеоритов наиболее подходящей парой являются изотопы ^{22}Na ($\tau_{1/2} = 2,58$ года) и ^{49}V ($\tau_{1/2} = 330$ дней).

Согласно измерениям ^{/22/}, средние значения активностей изотопов ^{22}Na и ^{49}V в одном из осколков Арус-Ярдымлинского метеорита равны соответственно 2,1 расп/мин·кг и 164 расп/мин·кг. На основе этих данных в работе ^{/21/} был определен доатмосферный радиус метеорита — 26 см и его масса — 550 кг.

^{x/} Напомним, что скорость образования изотопа и его равновесная активность равны между собой ^{/2/}.

Близкое значение дает и наш расчёт. На рис. 1 пунктиром показаны экспериментальные активности натрия и ванадия. Легко видеть, что активность изотопа ^{22}Na - 2,1 расп/мин.кг могла бы наблюдаться в метеоритах с радиусами $R \geq 20$ см, а активность изотопа ^{49}V - 164 расп/мин.кг - в метеоритах с $R \leq 30$ см. Таким образом, искомый радиус заключен в пределах $20 < R < 30$ см, что согласуется с результатами работы /21/. Улучшив статистическую точность расчетов, можно сузить найденные пределы.

Следует заметить, что масса обнаруженных осколков Арус-Ярдымлинского метеорита равна 150 кг.

2. Временные вариации интенсивности галактического излучения

Сведения о вариациях галактического излучения за длительный период времени (порядка миллиарда лет) представляют интерес в связи с проблемой эволюции Галактики и происхождением самих космических лучей. Единственным индикатором этих вариаций является содержание космогенного ^{40}K ($t_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$ лет) в железных метеоритах и в железной фазе каменных метеоритов с различными космическими возрастaми /23/. Сравнивая скорость накопления этого изотопа при современной интенсивности галактического излучения с его активностью в метеорите с известным космическим возрастом t , можно судить, происходили ли вариации интенсивности излучения за время t . При этом, чтобы исключить влияние геометрических факторов, следует рассматривать отношение активностей ^{40}K и какого-либо другого изотопа с возможно более близкой глубинной зависимостью скорости накопления. Необходимо также, чтобы за интервал времени порядка периода полураспада этого изотопа интенсивность излучения была постоянной. Перечисленным условиям удовлетворяет ^{36}Cl ($t_{1/2} = 3 \cdot 10^5$ лет).

В работе /23/ из сравнения среднего экспериментального отношения активностей ^{40}K / ^{36}Cl = $1,2 \pm 0,4$ для группы железных метеоритов с космическими возрастaми от 0,3 до 0,9 млрд. лет со средним расчетным значением $N(^{40}\text{K})/N(^{36}\text{Cl}) = 3,2 \pm 1,2$, полученным для метеоритов с радиусами $10 \leq R \leq 200$ см при современной интенсивности излучения, сделан вывод, что 0,3 + 0,9 млрд лет назад интенсивность галактического излучения была в $2,7 \pm 0,8$ раза ниже современной.

Однако согласно нашим расчетам (см. рис. 3), отношение $N(^{40}\text{K})/N(^{36}\text{Cl})$ при современной интенсивности излучения для метеоритов с радиусами $5 \leq R \leq 100$ см равно $1,2 \pm 1,9$, что близко к экспериментальному значению $1,2 \pm 0,4$. Таким образом, за указанный выше период времени заметных вариаций интенсивности галактического излучения не происходило.

Полученные результаты показывают целесообразность применения метода статистического моделирования для расчета взаимодействия космического излучения с веществом метеоритов. Существует, однако, ряд специфических неопределенностей, ограничивающих возможности извлечения информации из анализа содержания космогенных изотопов в метеоритах. Так, неизвестен точно спектр и интенсивность космического излучения вдоль метеоритных орбит; в расчетах используется спектр, измеренный в околоземном пространстве. Возможна эрозия метеоритного тела под действием солнечного ветра и космической пыли. Возможны также диффузионные потери инертных газов. Не исключена возможность дробления метеоритного тела в космосе задолго до выпадения на Землю. С другой стороны, имеющиеся в настоящее время данные о сечениях образования изотопов под действием частиц высоких энергий недостаточно полны, особенно для нейтронов и π -мезонов.

Из вышеизложенного ясно, что, сопоставляя экспериментальное содержание изотопов в метеоритах с теоретическим, можно уловить лишь весьма существенные изменения в космической обстановке.

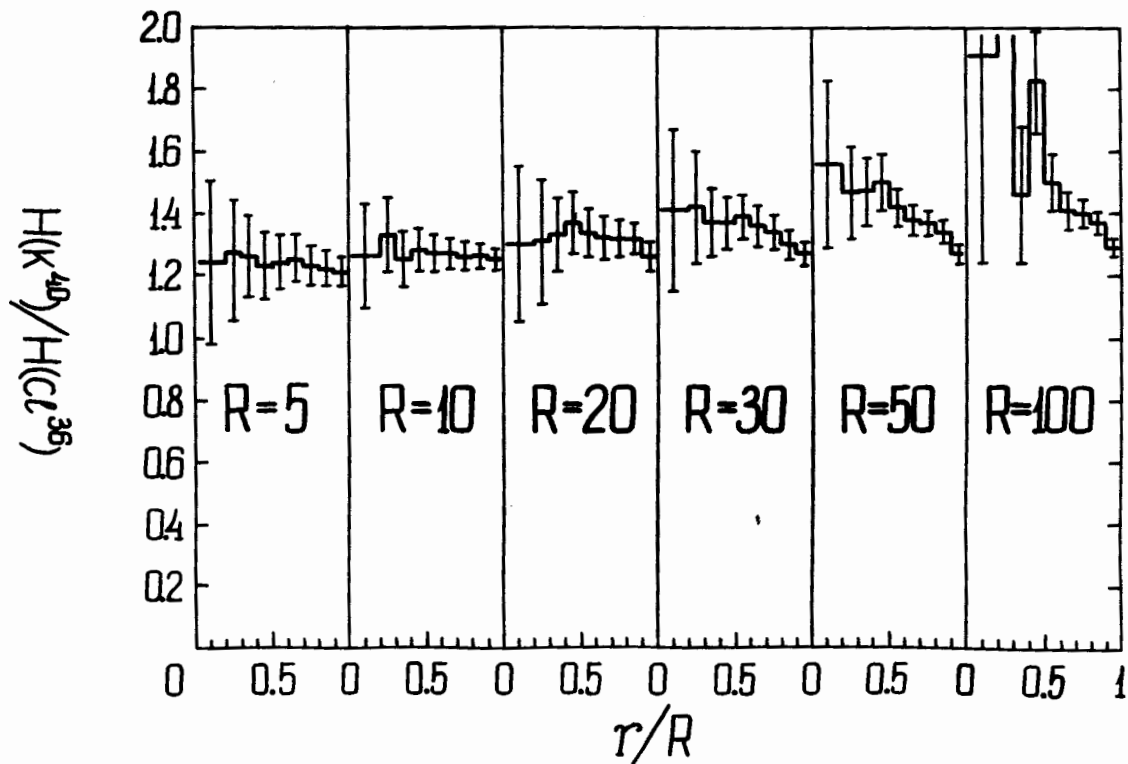


Рис. 3. Отношение скоростей образования изотопов ^{40}K и ^{36}Cl в железных метеоритах разных радиусов R ; r — расстояние от центра метеорита.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить А.К. Лаврухину за обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. J.R. Arnold. Ann.Rev.Nucl.Sci., 11, 349 (1961).
2. E. Anders. Rev.Mod.Phys., 34, 287 (1962).
3. А.К. Лаврухина. В сб. Ядерная химия, "Наука", 1965.
4. М. Honda, J.R. Arnold. Handbuch der Physik, Bd 46/2, 613 (1967).
5. С.А. Bauer. Phys.Rev., 72, 354 (1947).
6. G.R. Martin. Geochim.et cosmochim. acta, 3, 288 (1953).
7. К.Н. Ebert, Н. Wanke. Z.Naturf., 12a, 766 (1957).
8. Н. Wanke. Z. Naturf., 15a, 953 (1960).
9. P.S. Goel. Researches on Meteorites. John Wiley and Sons Inc. New York - London, 1962.
10. J.R. Arnold, М. Honda, D. Lal. J.Geophys.Res., 66, 3519 (1961).
11. А.К. Лаврухина, Г.К. Устинова. Астр. Ж., 44, 1081 (1967).
12. А.К. Лаврухина, Л.Д. Ревина, Т.А. Ибраев, Л.В. Юкина. Геохимия, №1, 1967.
13. А.К. Лаврухина, Г.К. Устинова, Т.А. Ибраев. Геохимия, №11, 1967.
14. А.К. Лаврухина, Л.Д. Ревина, Л.В. Юкина. Геохимия, №3, 1968.
15. В.С. Барашенков, К.К. Гудима, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ, P2-4065, P2-4066, Дубна, 1968. Acta Phys.Polon., 36, 415 (1969).
16. В.С. Барашенков, К.К. Гудима, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ, P2-4313, P2-4402, Дубна, 1969. Acta Phys.Polon., 36, 457, 887 (1969).
17. В.С. Барашенков, А.С. Ильинов, Н.М. Соболевский, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ, P2-5507, P2-5549, Дубна, 1970.
18. В.С. Барашенков, Н.М. Соболевский, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ P2-5719, Дубна, 1971. АЭ, 32, 123 (1972).

19. В.С. Барашенков, Н.М. Соболевский, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ Р2-6056, Дубна, 1971. АЭ, 32, 217 (1972).
20. G. Rudstam. Z.Naturf., 21a, 1027 (1966).
21. А.К. Лаврухина. ДАН СССР, 168, 1275 (1966).
22. М. Honda, J.R. Arnold. Geochim. et cosmochim. acta, 23, 219 (1961).
23. А.К. Лаврухина. Изв. АН СССР, сер. физ., 33, 1870 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел
12 января 1972 года.