

Ф-716

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



18/x1-74

4468/2-74

P7-8135

Г.Н.Флеров, О.Отгонсурэн, В.П.Перелыгин

**ПОИСК СЛЕДОВ ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ В МЕТЕОРИТАХ**

1974

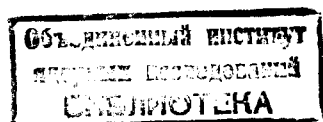
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P7-8135

Г.Н.Флеров, О.Отгонсурэн, В.П.Перельгин

**ПОИСК СЛЕДОВ ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ В МЕТЕОРИТАХ**

Доклад, представленный на
Международный семинар по ускорению частиц
и ядерным реакциям в космосе.
Ленинград, 1974 г.



S u m m a r y

The results of experiments on revealing and identifying the tracks of very heavy cosmic nuclei in olivines from pallasite meteorites are presented. In the Marjalahti meteorite whose cosmic age is 180 million years, the density of the Fe group tracks reaches $(5-6) \cdot 10^6$ l/cm². By taking into account reductions from 13-14 cm to 8 μ m (Fig. 2) in the tracks of the Fe group nuclei under the space conditions it is shown that these tracks are located up to 5-6 cm deep from the preatmospheric surface of the meteorite. For sensitivity calibration, these olivines were bombarded by 5-6 MeV/nucleon Ti, Cr, Fe, Zn, Ge, Kr and Xe ions, and the thermal fading of artificial tracks was investigated (Figs. 4 and 5). The effect of thermal fading does not seem to considerably reduce the tracks of very heavy cosmic nuclei ($Z > 36$).

Measurements were carried out using very long tracks ($R > 360 \mu$ m) in 40 mm³ of minerals from the Marjalahti meteorite (Fig. 7). If one assumes the group of tracks longer than 580 μ m to be due to nuclei of the region from Th to U, their abundance with respect to Fe is $6 \cdot 10^{-7}$ per one Fe nucleus taking into account the fragmentation and retardation processes. The abundance of nuclei with $70 \leq Z \leq 83$ ($R = 360-560 \mu$ m) appears to be $(2.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-6}$ per one Fe nucleus. This agrees well with the available results^{11,12/}. It is not excluded that only three tracks longer than 800 μ m are due to cosmic nuclei ranging from Th to U. In this case their relative intensity (at an energy of 2.5 GeV/nucleon) is nearly 10-20 times less than that in previous experiments. The analysis made in this paper shows that the search and identification of the tracks of superheavy cosmic nuclei should be carried out using crystals located up to 1-2 cm from the preatmospheric surface of meteorites.

В последние годы учеными ряда стран были предприняты многочисленные попытки синтеза и поиска в природных образцах относительно стабильных трансурановых элементов в области атомных номеров Z вблизи 114 /или 126/. Эти исследования охватывают поиски далеких трансурановых элементов в земных минералах, рудах, геотермальных водах, конкрециях, осадках и донных илах, синтез сверхтяжелых ядер в реакциях с ускоренными тяжелыми ионами, а также опыты по поиску и идентификации таких ядер в составе галактических космических лучей.

Подробный обзор теоретических и экспериментальных исследований, посвященных этой проблеме, приведен в работах Г.Н.Флерова^{1/}, Г.Н.Флерова и Ю.Ц.Оганесяна^{2/}, а также Т.Херрманна^{3/}.

Настоящая работа посвящена проблеме поиска далеких трансурановых элементов в составе первичного космического излучения. Ряд обстоятельств указывает на перспективность таких исследований.

Во-первых, это - многообразие космических объектов, в которых может происходить синтез сверхтяжелых ядер. Действительно, если образование элементов солнечной системы явилось, по-видимому, результатом единичного акта нуклосинтеза в r -процессе, то в качестве источников таких ядер рассматриваются пульсары, характеризующиеся высокой плотностью нейтронного вещества^{4/}, квазизвезды^{5/}, белые карлики^{6/}, а также ядра галактик, где может осуществляться нуклосинтез в s -процессе^{7/}.

Во-вторых, механизмы ускорения, реализующиеся в галактических объектах, по-видимому, благоприятствуют ускорению тяжелых ядер ^{/8/}. Так, для солнечных космических лучей наблюдается соответствие интенсивности космических ядер с различными значениями Z и распространенностью соответствующих элементов в солнечной короне для энергий свыше 15 МэВ/нуклон ^{/8/}.

В-третьих, поскольку со времени образования элементов солнечной системы прошло около $4,5 \cdot 10^9$ лет, для обнаружения далеких трансурановых элементов в природных образцах необходимо, чтобы время жизни наиболее долгоживущего нуклида превосходило 10^8 лет. Для ядер первичного космического излучения эта граница составляет $10^5 - 10^6$ лет; она определяется временем миграции от галактических источников к солнечной системе.

Проведение поисков сверхтяжелых ядер в составе галактических космических лучей осуществлялось в последние шесть лет с помощью больших стопок ядерных эмульсий ^{/9/}, а затем также и полимерных пленочных материалов ^{/10/}, находившихся в течение нескольких десятков часов в верхних слоях атмосферы ^{/11,12/}. Произведение времени нахождения стопок детекторов на площадь превосходит $3000 \text{ м}^2 \text{ час}$ для всех экспериментов, проведенных на шарах-зондах в 1967-1973 гг. ^{/9-12/}.

Однако, несмотря на большую трудоемкость и продолжительность этих исследований, до последнего времени удалось идентифицировать всего лишь несколько частиц в области атомных номеров $Z \geq 90$ и ни одного достоверного события в области $Z > 100$.

В последнее время П.Б.Прайсом был проведен эксперимент по регистрации сверхтяжелых космических ядер на орбитальной станции "Скайлаб" с помощью полимерных детекторов ^{/8/}. Детекторы суммарной площадью около $1,5 \text{ м}^2$ помещались непосредственно в орбитальной станции, под оболочкой кабины /слой поглотителя - около 1 г/см^2 /, что позволяло контролировать процессы регрессии непроявленных треков в пластинках при многомесячном эксперименте.

Произведение площади детекторов на время экспозиции составило $8000 \text{ м}^2 \text{ час}$, что более чем в два раза превышает суммарную экспозицию во всех предыдущих экспериментах. Согласно предварительным данным, в этом эксперименте также не удалось обнаружить следов ядер с $Z > 100$ ^{/13/}.

Таким образом, суммарное время экспозиции, полученное во всех этих экспериментах, достигает сейчас $1,2 \text{ м}^2 \text{ год}$. Это соответствует новой нижней границе для распространенности ядер с $Z > 100$ по отношению к ядрам группы урана - тория на уровне $\leq 10 - 20\%$ для первичного космического излучения.

Дальнейшее проведение таких исследований требует существенного увеличения как площади детекторов, так и времени их нахождения в верхних слоях атмосферы или космическом пространстве.

Другая возможность проведения поисков сверхтяжелых ядер в космических лучах связана с выявлением следов таких ядер в силикатных минералах из поверхностных слоев метеоритов, а также лунных минералах. Космические частицы, постепенно замедляясь, создают вблизи остановки зоны дефектов кристаллической структуры таких минералов. Затем эти треки выявляются с помощью избирательного химического травления. Как показано в работах ^{/14,15/}, выявляемая длина следа пропорциональна заряду Z -частицы, замедляющейся в объеме данного детектора.

На рис. 1 представлен график распределения длин следов от Z тяжелых ядер в минерале оливине ^{/16/}. Как следует из этого рисунка, длина следа ядра 114-го элемента должна быть примерно в 1,5-2 раза больше, чем длина следа от урана.

Необходимо подчеркнуть, что космический возраст таких образцов составляет от 30 до 200 млн. лет для железо-каменных метеоритов; таким образом, исследование одного кубического сантиметра таких минералов эквивалентно проведению эксперимента с одной - двумя тоннами ядерных эмульсий, находившихся в космическом пространстве в течение года /при площади детектора $\sim 100 \text{ м}^2$ /. Однако реализация этой возможности встре-

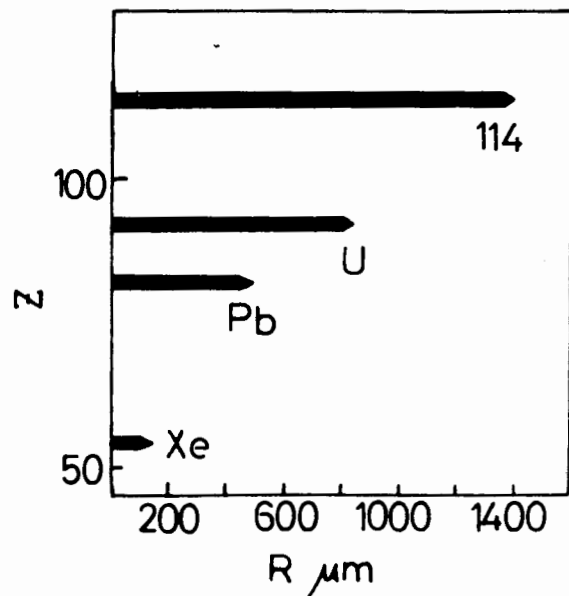


Рис. 1. Травимая длина следов ядер Xe, Pb, U, 114-го элемента в оливинах /расчет/.

тила ряд трудностей, которые пока не позволяли осуществить широкую программу поисков следов сверхтяжелых космических ядер в минералах из метеоритов. До последнего времени было выполнено лишь несколько работ, посвященных выявлению следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в минералах из метеоритов. В 1968 году М. Моретт, Р. М. Уокер и др.¹⁷ обнаружили в кристаллах гиперстена из метеорита Джонстаун след длиной 1030 мкм, который был отнесен к области $Z \geq 83$.

В 1971 г. П. Б. Прайсу и др.¹⁸ удалось выявить в больших кристаллах лунного пиджонита следы длиной свыше 900 и свыше 1000 мкм / область $Z > 83$ /. Отметим, что полученная в опытах с этими минералами верхняя граница для интенсивности сверхтяжелых космических ядер - на уровне $\leq 1 \text{ м}^2/\text{год}$ примерно соответствует значению, полученному во всех экспериментах на шарах-зондах и спутниках - на уровне $\leq 1/1,2 \text{ м}^2/\text{год}$.

В этой связи целью настоящей работы явилось более детальное рассмотрение возможностей и условий выявления и идентификации следов тяжелых и сверхтяжелых космических ядер, содержащихся в минералах из метеоритов.

Первым необходимым условием проведения таких исследований является подбор метеоритов, содержащих прозрачные однородные минералы с размерами, превосходящими длину треков гипотетических ядер /рис. 1/, т.е. свыше двух миллиметров.

Поскольку для таких исследований необходимы десятки и сотни относительно крупных кристаллов, наиболее подходящим объектом исследования являются, по-видимому, оливины из метеоритов типа палласитов. Содержание оливинов в этих метеоритах достигает 40-70% по объему.

Далее, для успешного проведения таких исследований необходимо подобрать образцы, расположенные возможно ближе к первоначальной /доатмосферной/ поверхности метеорита, на глубине не свыше 5-6 см. Действительно, из расчетов соотношения "пробег - энергия" следует, что пробег сверхтяжелых ядер с энергией около 2,5 ГэВ/нукл. примерно в три раза меньше, чем у ядер железа с этой энергией, и составляет примерно 6 см для метеоритов типа палласитов.

Если даже предположить, что интенсивность сверхтяжелых космических ядер подчиняется той же закономерности, что и ядер группы железа /энергетическая зависимость спектра $N(E) \sim N_0 E^{-\gamma}$, где $\gamma = 2,0-2,5/16/$ /, на глубине 6-8 см в палласитах число остановок таких ядер с учетом процесса фрагментации будет в 50-100 раз меньше, чем в поверхностном слое толщиной 1 см¹⁹/.

В связи с этим для выявления образцов, расположенных возможно ближе к первоначальной поверхности, нами были предприняты исследования оливинов из более чем 20 метеоритов, содержащих оливины - в первую очередь палласитов, а также некоторых мезосидеритов.

Наибольшая плотность следов космических ядер группы железа была обнаружена в оливинах из метеоритов

Липовский Хутор и Марьялахти/16/, а в последнее время также в метеоритах Ямышево и Игл Стейшн.

В настоящей работе представлены результаты исследований оливинов главным образом из метеорита Марьялахти. Космический возраст этого метеорита составляет ~ 180 млн лет /23/. В этом метеорите ранее нами были обнаружены кристаллы, расположенные на глубине не свыше 5-7 см от первоначальной поверхности /16/.

Следующим необходимым условием проведения поисков и идентификации следов космических ядер является исследование чувствительности оливинов к тяжелым заряженным частицам.

С этой целью нами были проведены облучения оливинов из метеоритов ускоренными ионами титана, хрома, марганца, железа, цинка, германия, криптона и ксенона с энергией до 6-7 МэВ/нуклон.

Облучения проводились под углом 30° к поверхности кристаллов. Затем эти же образцы облучались ускоренными ионами ксенона /или криптона/ перпендикулярно поверхности. При последующей химической обработке травитель по перпендикулярно направленным трекам проникал внутрь кристалла и проявлял следы ускоренных тяжелых ионов в объеме детектора. Такая процедура позволяет определить травимую длину следа каждого из указанных выше ионов, за исключением ионов криптона и ксенона, так как для криптона, согласно данным П.Б.Прайса и др./20/, порог выявления непрерывных следов лежит в области 8,3 - 8,5 МэВ/нуклон; порог выявления ионов ксенона находится, согласно нашим оценкам, в области свыше 20 МэВ/нуклон.

С помощью такой процедуры для травимой длины ионов Ti получено около 2 мкм, для ионов ^{54}Cr - 8,5 - 9 мкм, ионов ^{56}Fe - 13,0 - 13,5 мкм, ионов ^{66}Zn > 23 мкм, ^{74}Ge - 35 мкм; длина следов ионов ^{84}Kr , согласно данным работы /20/, составила 60-65 мкм. Таким образом, травимая длина следа быстро увеличивается с ростом атомного номера Z ядра.

Как показали контрольные опыты, критерий травимой длины следа достаточно хорошо характеризует заряд тяжелого иона, замедляющегося до остановки в кристал-

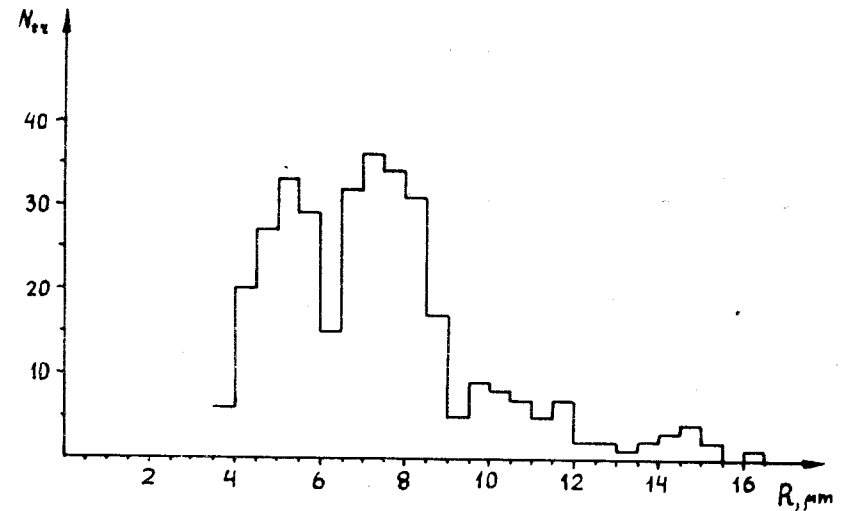


Рис. 2. Распределение длин следов ядер группы железа в оливинах из метеорита Марьялахти.

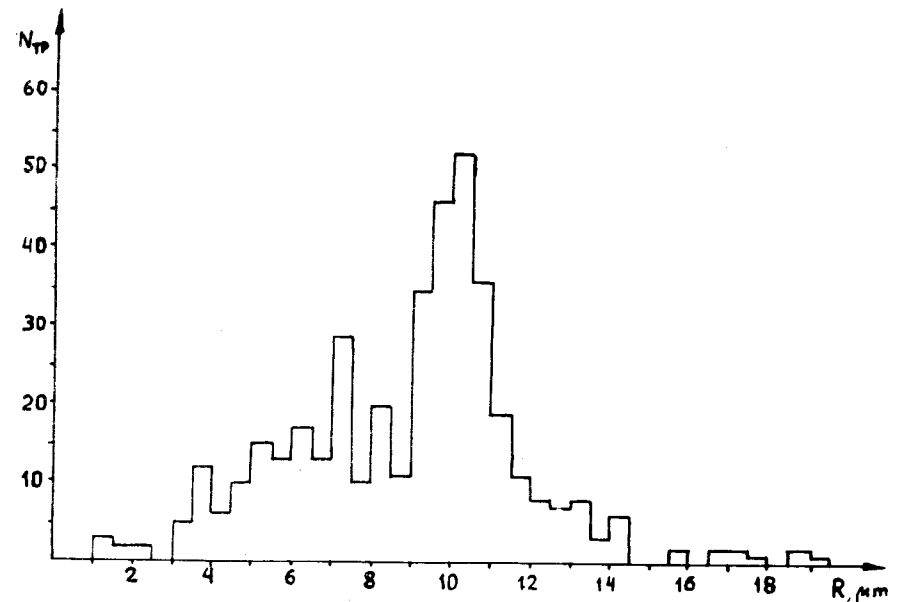


Рис. 3. Распределение длин следов ядер группы железа в оливинах из метеорита Игл Стейшн.

лах оливина. Так, при четырехкратном увеличении времени травления ионов ^{74}Ge среднее значение длины следа возросло с 35 до 37,6 мкм, что соответствует изменению атомного номера Z в пределах $\Delta Z \leq 1$.

Однако проведенные нами исследования спектров длин ядер группы железа в оливинах из различных метеоритов показали, что среднее значение длины наиболее представительного пика составляет 7,5 мкм для оливинов из метеорита Марьялахти /рис. 2/, 8,5 мкм для метеорита Липовский Хутор и 10,3 мкм для метеорита Игл Стейши /рис. 3/, вместо 13,0 - 13,5 мкм для контрольных облучений ускоренными ионами ^{56}Fe . Этот эффект, по-видимому, обусловлен длительным нагреванием метеоритов до относительно невысоких температур - 80-100° в космосе за счет солнечной радиации /16/.

На рис. 4,5 представлены результаты опытов по исследованию сокращения длин треков ускоренных тяжелых ионов под действием контролируемого отжига. Как следует из этих рисунков, при нагревании должно проис-

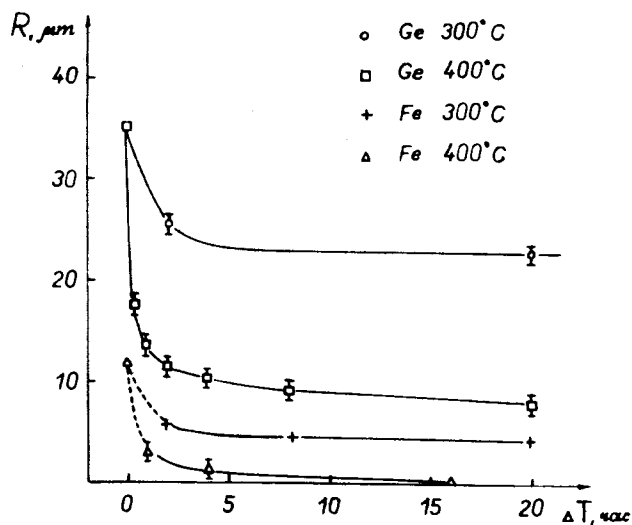


Рис. 4. Изменения травимой длины следов ядер германия и железа в зависимости от температуры и времени отжига.

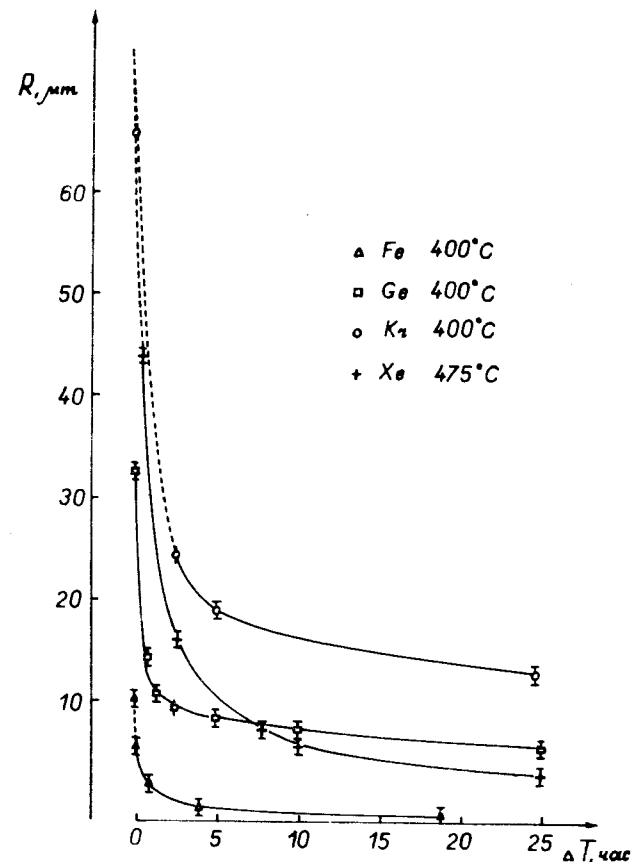


Рис. 5. Изменение травимой длины следов ядер железа, германия, криптона и ксенона при отжиге.

ходить сокращение длин следов всех заряженных частиц, в том числе и следов гипотетических сверхтяжелых ядер. Этот эффект сводится к повышению порога выявления треков /21/. Оценки воздействия термической регрессии в космических условиях, проведенные в работе /16/ для метеорита Марьялахти, показали, что этот эффект приводил к сокращению длин следов в области $Z > 36$, примерно на 20-25% от первоначальной длины. Воздействие длительного нагревания в метеорите приводит к постепенному сокращению длин следов и некоторому

размыванию спектра за счет непрерывной регистрации новых частиц /рис. 6/.

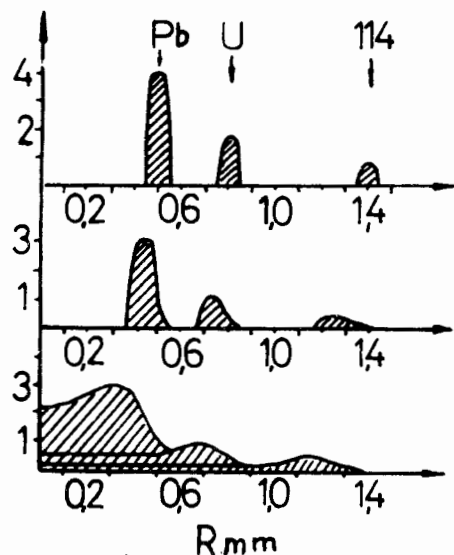


Рис. 6. Воздействие отжига на спектры длин следов ядер РЬ, U, 114-го элемента в оливинах /оценка/. а/. В отсутствие отжига. б/. Учет эффекта регрессии для оливинов в метеорите Липовский Хужор. в/. Непрерывное уменьшение длин следов с течением времени.

Таким образом, отсутствие калибровок ускоренными тяжелыми ионами в области атомных номеров $Z > 36$, необходимость учета эффекта регрессии треков в космических условиях, а также трудности в теоретической оценке травимой длины следа пока не позволяют провести идентификацию атомных номеров тяжелых частиц в минералах из метеоритов с точностью, лучшей, чем $\pm 10\%$.

В этих условиях мы предприняли попытку идентификации атомных номеров наиболее тяжелых космических ядер $/Z \geq 70/$ по распределениям длин следов, основываясь на измеренной в опытах с эмульсиями и пластиками относительной интенсивности ядер в области $70 \leq Z \leq 83$ и $Z = 90-92/^{11,12/}$.

В этой части спектра длин следов должны наблюдаться минимумы, соответствующие отсутствию достаточно стабильных ядер в области $83 \leq Z < 90$, а также $94 < Z < 110$.

В связи с этим мы провели просмотр большого количества кристаллов оливина из метеорита Марьялахти, расположенных по возможности ближе к поверхности этого метеорита. Плотность следов от остановок ядер группы железа в этих кристаллах составляла $4-6 \cdot 10^6 / \text{см}^2$, что с учетом космического возраста и термической регрессии следов соответствует глубине расположения оливинов $\leq 5-6$ см от первоначальной /доатмосферной/ поверхности метеорита Марьялахти.

Просмотр кристаллов по объему проводился путем последовательного чередования операций полировки кристаллов /на глубину 30-40 мкм/, травления, просмотра и измерений треков под микроскопом. Всего было просмотрено 40 мм^3 кристаллов оливинов. Отбирались следы длиной свыше 360 мкм, что соответствует, согласно нашим оценкам ^{/16/}, области атомных номеров $Z \geq 70$.

Результаты этих измерений приведены на рис. 7. Как следует из распределения длин следов, представленного на этом графике, в спектре можно выделить группы в области 580-700 мкм /30 треков/ и свыше 800 мкм.

Если предположить, что группа следов длиной свыше 580 мкм обусловлена космическими ядрами урана-тория, то их распространенность по отношению к ядрам группы железа /с учетом процессов замедления и фрагментации для глубины 5-6 см в палласите/ составляет $< 6 \cdot 10^{-7} \text{ ат/ат}$, что находится в удовлетворительном согласии с данными предыдущих исследований в этой области атомных номеров $Z/^{11,12/}$. В этом случае для относительной интенсивности ядер в области $70 \leq Z < 83$ /длины следов 360-560 мкм/ получается величина $/2,5 \pm 0,8/ \cdot 10^{-6} \text{ ат/ат}$, что также согласуется с известными экспериментальными данными.

Однако пока нельзя исключить также и второго предположения, что три следа длиной свыше 800 мкм обусловлены замедлением ядер урана-тория. В этом случае их относительная интенсивность примерно в 10-20 раз

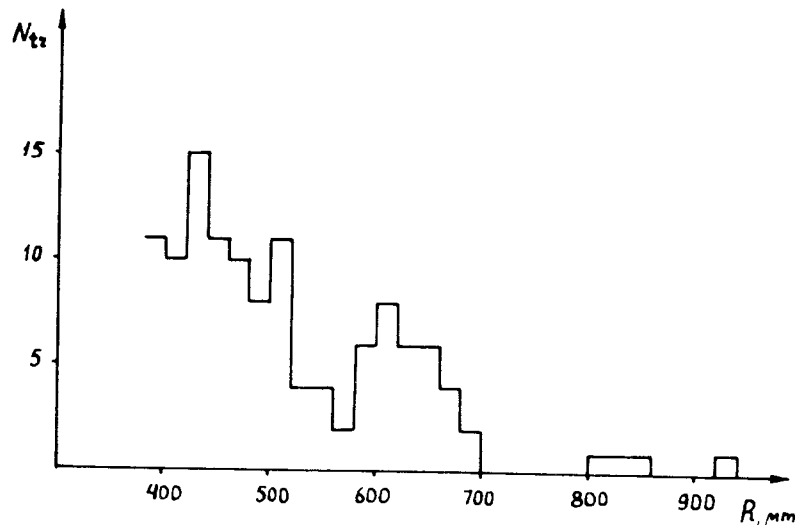


Рис. 7. Распределение длин следов ядер в области $Z \geq 70$ для 40 мм^3 оливинов из метеорита Марьялахти.

меньше, чем измеренная в экспериментах с ядерными эмульсиями и пластиками. Это обстоятельство может быть обусловлено относительно более быстрым спадом интенсивности ядер с $Z > 83$ в области энергии таких частиц свыше 2 ГэВ/нуклон , либо соответствием их относительной интенсивности в космических лучах с распространенностью этих элементов в солнечной системе /А.Камерон / 22/.

В связи с этими обстоятельствами в настоящее время наиболее целесообразным представляется проведение исследований образцов, расположенных на глубине не свыше $2-2,5 \text{ см}$ от первоначальной поверхности метеорита, что соответствует энергии ядер группы урана - тория не свыше $1,0 - 1,5 \text{ ГэВ/нуклон}$, т.е. охватывает область энергий, исследовавшуюся в проведенных ранее экспериментах с ядерными эмульсиями и пластиками. Проведенные нами недавно совместно с П.Пелласом исследования ряда метеоритов показали, что таким образом мо-

жет служить палласит Игл Стейшн. Этот метеорит имеет космический возраст около 45 млн лет /23/. В нем были обнаружены минералы, содержащие $1,0 - 1,6 \cdot 10^7 \text{ I/см}^2$ треков ядер группы железа, что соответствует слою, удаленному не более чем на $2-3 \text{ см}$ от первоначальной поверхности.

Исследования спектров длин треков, содержащихся в 1 см^3 оливинов из этого метеорита, позволит в десятки и сотни раз повысить чувствительность поисков далеких трансурановых элементов по сравнению со всеми другими методами.

Необходимо подчеркнуть также, что исследования кристаллов, расположенных на различных расстояниях от поверхности этого метеорита, позволяют получить сведения также и об энергетических спектрах групп ядер с различными атомными номерами Z .

В заключение авторы выражают глубокую признательность Е.Л.Кринову, Л.Г.Кваше, Ш.Б.Вику, П.Пелласу, В.И.Коломенскому, Б.В.Шевякову за предоставление в наше распоряжение многочисленных образцов минералов из метеоритов. Авторы благодарны также Г.Б.Жданову, Р.М.Уокеру и М.Моретту за полезные обсуждения.

Литература

1. G.N.Flerov. *International Conf. on React. between Complex Nucl.*, Nashville, USA, July 10-14, Ed. ORNL, vol. 2, 1974.
2. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян. *Сообщение ОИЯИ, Д7-6013, Дубна, 1973.*
3. G.Herrmann. *MTP Internat. Review of Science. Ser. 2, Radiochemistry, 1973.*
4. Д.А.Киржниц. *Международная конференция по физике тяжелых ионов, Дубна, 11-17 февраля 1971 г., ОИЯИ, Д7-5769, стр. 1 /1971/.*
5. J.L.Greenstein. *Sci. Amer.*, 209, 54 (1963).
6. R.Cowsik, P.B.Price. *Phys. Today*, 24, 30 (1971).
7. T.P.Amiet, H.D.Zeh. *Phys.Lett.*, 25B, 305 (1967); *Z.Physik*, 217, 485 (1968).
8. P.B.Price. *Space Sci. Review*, 15, 69 (1973).
9. P.H.Fowler, R.A.Adams, V.G.Cowan, Y.M.Kidd. *Proc. Roy Soc.*, A301, 39, (1967).

10. D.O'Sullivan, P.B.Price, E.K.Shirk, P.H.Fowler, J.M.Kidd, E.J.Kobetich, R.Thorne. *Phys.Rev.Lett.*, 26, 463 (1971).
11. E.K.Shirk, P.B.Price, E.J.Kobetich, W.Z.Ozborne, L.S.Pinsky, R.D.Eandi, R.B.Rushing. *Phys.Rev.*, D7, 3220 (1973).
12. G.E.Blanford, M.W.Fridlander, J.Klarmann, R.M.Walker, J.C. Wefel. *Phys.Rev.*, D8, 1702 (1973).
13. P.B.Price. Nashville, July 10-14 1974, *Private Communications*.
14. В.П.Перелыгин, С.П.Третьякова, М.Д.Никитин. Авт. свид. СССР № 233113 с приоритетом от 30.12.65. *Бюллетень изобретений* № 12. 1968. R.L.Fleischer, P.B.Price, R.M.Walker, M.Maurette, J.Geophys. Research., 72, 331 (1967).
15. E.J.Kobetich, R.Katz. *Phys.Rev.*, 170, 397 (1968).
16. О.Омзонсурэн, В.П. Перелыгин. *Сообщение ОИЯИ, Р7-7406, Дубна, 1973.*
17. M.Maurette, P.Thro, R.M.Walker, R.Webbik. *Meteorite Res.*, 12, 286 (1968).
18. P.B.Price, R.Rajan, E.K.Shirk. *Proc. of the II Lunar Sci. Conf.*, v. 3, 2622, MIT press (1971).
19. D.Lal, *Space Sci. Review*, 14, 3 (1972).
20. P.B.Price, D.Lal, A.S.Tamhane, V.P.Pereygin. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 19, 377 (1973).
21. A.Kapuscik, V.P.Pereygin, S.P.Tretiakova, N.Ch.Shadieva. *Proc. VI Internat. Conf. on Nucl. Photography, Florence, July 7-II, 1966, ed. CEPI, Roma, p. 458.*
22. A.G.W.Cameron. *Origin and Distribution of Elements of Solar System. Ed. L.H.Ahrens, Pergamon Press, p. 126 (1967).*
23. G.H.Megrue. *Journ. Geophys. Res.*, 73, 6, 9027 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
22 июля 1974 года.