ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2021, том 84, № 6, с. 490–495

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

АНОМАЛИЯ В СПЕКТРЕ ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОЛИВИНАХ ИЗ МЕТЕОРИТОВ

© 2021 г. Г. В. Калинина[1)], Тан Найнг Со[2)*], Н. И. Старков[2)]

Поступила в редакцию 20.06.2021 г.; после доработки 20.06.2021 г.; принята к публикации 20.06.2021 г.

В настоящей работе исследовалась аномалия в спектре ядер галактических космических лучей в кристаллах оливинов из метеоритов, которая возникла в зарядовом спектре при изучении кристаллов, близко расположенных к поверхности метеорита. При падении метеорита и движении через атмосферу Земли его поверхность сильно нагревается. Была исследована динамика прогрева вещества метеорита, предложено решение уравнения распространения тепла и выполнено его моделирование в среде Borland C++ builder. Получены оценки прогрева вещества палласита за время падения метеорита. Показано, что температура кристаллов оливина вблизи поверхности метеорита может достигать более 1300°C, что может приводить к эффекту отжига треков. Из-за эффекта отжига часть треков исчезает, а другие меняют свои геометрические характеристики. Это может объяснить необычную форму распределения зарядов ядер, найденных в кристаллах оливина вблизи края метеорита.

DOI: 10.31857/S0044002721060088

1. ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории элементарных частиц ФИАН с 2005 г. проводится работа по поиску треков сверхтяжелых ядер в кристаллах оливинов из метеоритов [1]. Два фрагмента палласитов Marjalahti и Eagle Station были переданы из ОИЯИ в ФИАН для проведения исследований с использованием новых технических средств и методов регистрации. В результате начался эксперимент ОЛИМПИЯ (ОЛИвины из Метеоритов — Поиск тяжелых И сверхтяжелых Ядер) по поиску и идентификации тяжелых и сверхтяжелых ядер ГКЛ в кристаллах оливина из палласитов, представляющий собой совместный проект институтов Российской академии наук: ФИАН им. П.Н. Лебедева и ГЕОХИ им. В.И. Вернадского. Подробности эксперимента, методы обработки и анализа данных представлены в работах [2, 3].

Треки ядер тяжелых компонент ГКЛ регистрируются в полупрозрачных кристаллах магний-железосиликатного оливина $(Mg_{0.8}Fe_{0.2})_2SiO_4$, заключенных в железо-никелевой матрице палласита. В отличие от трековых детекторов других типов, эмульсионных или пластиковых, оливин не накапливает фоновые треки от ядер с $Z \leq 24$, что обусловлено высоким порогом удельных энергетических потерь заряженной частицы, необходимым для образования в оливине химически травимого трека (пороговое значение ионизационных потерь энергии для оливина составляет около 18 МэВ/(мг см$^{-2}$) [4]. Это фактически означает отсутствие фоновых событий в этих исследованиях.

Поврежденные из-за прохождения заряженной частицы области кристалла имеют более высокую химическую активность по сравнению с неповрежденным материалом, в результате чего возникает возможность визуализировать трек частицы в кристалле путем его травления в комплексном химическом растворе. Параметры протравленных треков ядер (травимая длина и скорость травления) зависят от ионизации, производимой быстрым тяжелым ионом в веществе кристалла [5, 6].

Исследование кристаллов осуществляется оригинальным авторским методом поэтапной обработки, при котором после фиксации обнаруженных видимых участков треков и измерения их параметров часть кристалла толщиной 50–100 мкм (с точностью до нескольких мкм) удаляется, и процессы обработки поверхности и измерения треков повторяются. При обработке кристалла на каждой новой стадии осуществляется поиск как новых треков, так и продолжений участков, уже найденных на предыдущем этапе; в этом случае производится координатная “сшивка” трека. В результате восстанавливается его полная длина до точки остановки в детекторе. Для установки на микроскоп кристаллы оливина, извлеченные из железо-никелевой матрицы, закрепляются в эпоксидных таблетках по ~15 штук.

[1)]Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия.
[2)]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.
[*]E-mail: dr.thannaingsoe.lpiras@gmail.com

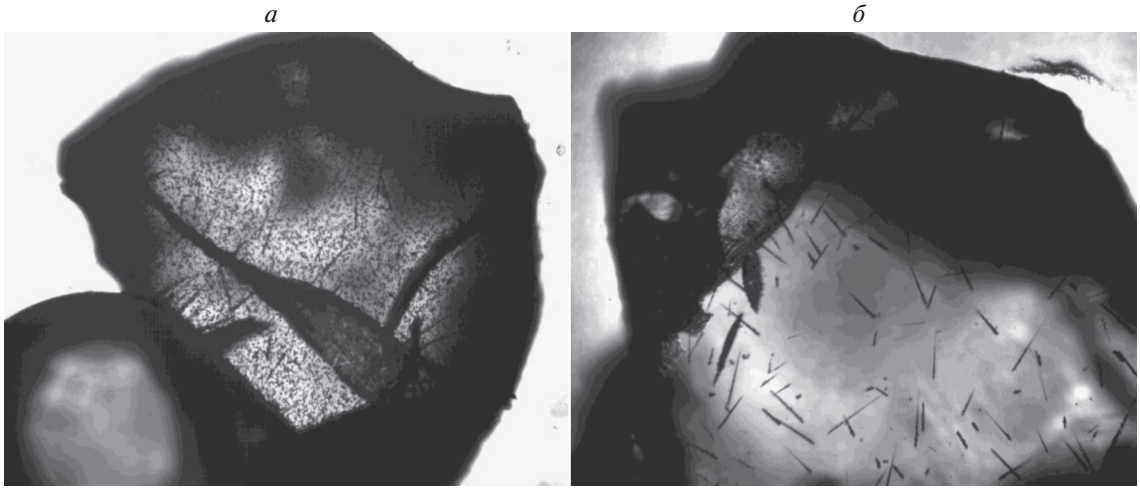

Рис. 1. Фотографии кристаллов оливина после травления. *а* — Типичная сетка ядер группы железа, *б* — изображение кристалла, взятого вблизи края метеорита. Размер поля зрения 550 × 444 мкм.

За время эксперимента было обработано 890 кристаллов из метеоритов Marjalahti и Eagle Station, и определены параметры 28275 треков ядер с $Z > 24$, включая три трека с зарядом 119^{+10}_{-6}. Разработанный с использованием калибровочных данных авторский метод определения заряда ядра, сформировавшего трек [7, 8], позволяет на основе проведенных измерений определять зарядовый спектр зарегистрированных ядер [9].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ТРЕКОВ

В 2019 г. была начата очередная серия обработки кристаллов оливина метеорита Marjalahti.

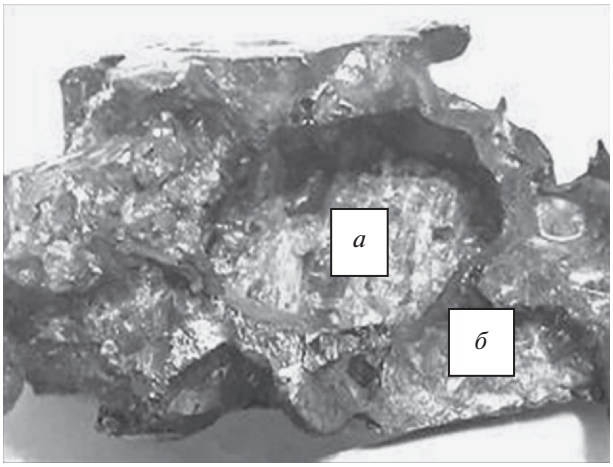

Рис. 2. Фотография части метеорита Marjalahti. *а* — Лунка с кристаллом оливина вблизи края метеорита, часть кристаллов оливина уже вынута; *б* — железоникелевая матрица.

В процессе работы было обнаружено, что ряд кристаллов оливина обладают некоторыми особенностями по сравнению с другими кристаллами. В частности, было замечено, что в них после травления отсутствуют треки ядер группы железа. Обычно после травления поверхность кристаллов покрыта густой сеткой таких треков длиной 10–15 мкм (рис. 1*а*). Так как эта сетка мешает измерениям геометрических характеристик треков более тяжелых ядер, чей поток на шесть порядков меньше потока ядер группы железа, слой 15–20 мкм убирается с помощью шлифовки поверхности кристалла. На рис. 1*б* для сравнения показана поверхность кристалла, в котором после травления треки группы железа отсутствуют.

Более внимательное изучение необычных кристаллов показало, что основное их отличие от других кристаллов заключается в том, что они взяты из другого места, а именно из небольшой лунки вблизи края метеорита (рис. 2). Толщина железоникелевого слоя до края метеорита в этом месте составляет 3–5 мм. При таком расположении лунки кристаллы оливина в ней могли за время падения прогреться до высокой температуры за счет нагрева поверхности метеорита при его прохождении через атмосферу Земли.

Время пролета метеорита через атмосферу зависит от его скорости, угла, под которым он входит в атмосферу, и его размеров. Влетев в земную атмосферу со скоростью, например, от 11 до 72 км/с [10], метеорит уже на высоте 100–150 км над Землей встречает очень сильное сопротивление воздуха. Воздух перед метеоритом мгновенно сжимается и вследствие этого разогревается. В итоге образуется так называемая воздушная подушка. Поверхность метеорита нагревается очень сильно, до температуры в несколько тысяч градусов. В

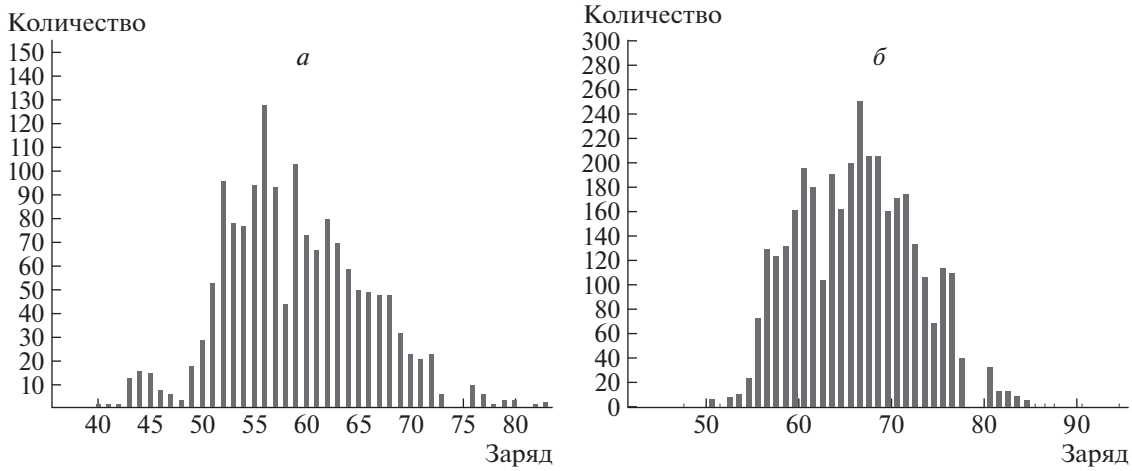

Рис. 3. Распределения количества треков по зарядам ядер в оливинах из метеоритов. *а* — Обычное распределение в кристаллах, взятых из глубины; *б* — аномальное распределение в кристаллах из лунки вблизи края метеорита.

этот момент он становится заметным, как летящий по небу болид. Его остаток, не успевший полностью распылиться, падает на Землю под влиянием силы притяжения, как обыкновенный брошенный камень. В результате полное время пролета метеорита через атмосферу составляет от нескольких секунд до десятков секунд. Находясь в условиях высокой температуры, следы треков ядер в оливине могут подвергаться отжигу и вследствие этого менять свои характеристики или вовсе исчезать.

Вопрос о влиянии нагревания и охлаждения на свойства треков широко обсуждался в литературе в связи с применением методов минералогического и трекового анализа для решения различных геологических и тектонических задач [11]. Это связано с тем, что форма распределения длин протравленных треков от осколков радиоактивных ядер зависит от температурной истории геологических пород, т.е. времени их нагревания и остывания. В результате трековый анализ применяется для оценки скоростей тектонических процессов для различных регионов (Южная Корякия, Камчатка, Российская Арктика, Крым и другие) [12], реконструкций источников сноса терригенного материала и тестирования палеогеографических и палеотектонических моделей. К сожалению, этот опыт мало может помочь в нашей задаче, так как его временная шкала исчисляется сотнями тысяч и миллионами лет.

Другой опыт исследования результатов отжига связан, в основном, с работами В.П. Перелыгина [13]. Им был разработан метод определения зарядов сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов с предварительным отжигом кристаллов. На основе ряда калибровочных измерений им было установлено, что отжиг в течение 32 ч при температуре 430°C приводит к полному исчезновению треков группы железа и укорочению в 6–8 раз треков с $Z > 50$ [13]. К сожалению, эти условия отжига также далеки от тех, что возникают в метеорите при его движении в атмосфере. Тем не менее, на основе этих работ с большой вероятностью можно сказать, что причиной отсутствия треков ядер группы железа является их отжиг.

Другим свидетельством наличия отжига треков в кристаллах, взятых из лунки, является форма распределения зарядов ядер в них. На рис. 3 представлены распределения количества треков по зарядам в кристаллах упомянутой серии, взятых из глубины метеорита (*а*) и из лунки (*б*). Видно, что во втором случае распределение сильно смещено в область больших зарядов. Сравнивая эти рисунки, можно увидеть качественное различие в форме распределений. “Обычное” распределение имеет резкий пик в области $Z = 56$, затем оно круто спадает, сменяясь на более пологую часть при $Z > 70$. В то же время “необычное” распределение имеет высокий и широкий пик в области $65 < Z < 75$. Такое смещение могло быть результатом отжига, чье влияние, как было сказано ранее, тем больше, чем меньше заряд.

Таким образом, находясь в условиях высокой температуры, следы треков ядер в кристаллах оливина, содержащихся в метеоритах — палласитах, могут подвергаться отжигу и вследствие этого менять свои характеристики или вовсе исчезать. Для выяснения этого вопроса были проведены расчеты распространения тепла внутри железо-никелевой матрицы, окружающей оливин, и оливина. Матрица палласита — железо-никелевого метеорита с включениями оливинов — имеет сложную форму. Распространение тепла в объекте такой формы представляет собой непростую задачу, поэтому в настоящей работе мы ограничимся пока упрощенным подходом оценки условий, возникающих в объеме метеорита.

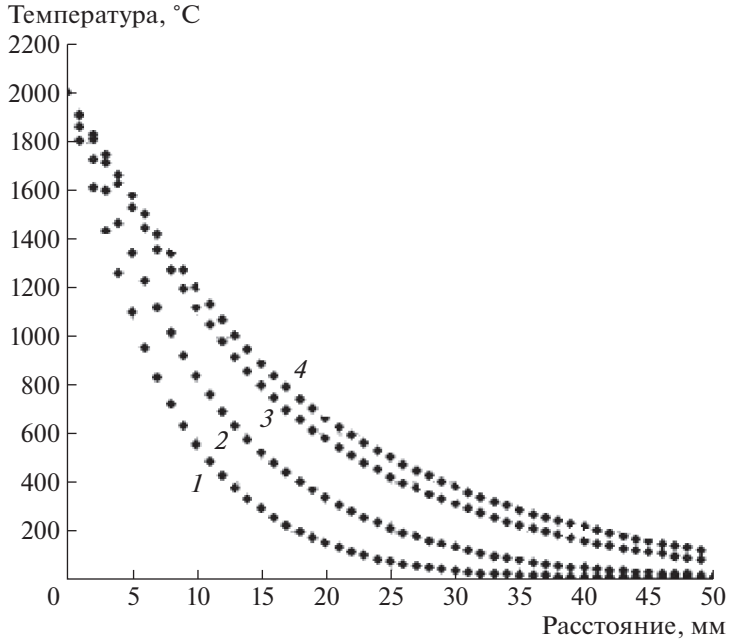

Рис. 4. Зависимость температуры от расстояния до конца стержня и времени. Время прогрева: *1* — 5 с, *2* — 10 с, *3* — 20 с и *4* — 25 с.

Процесс распространения тепла в полубесконечном железном стержне, свободный конец которого поддерживается при постоянной температуре в 2000°C, а начальная температура самого стержня одинакова по всей его длине и равна 0°C, описывается уравнением теплопроводности, показывающим изменение температуры T на расстоянии x от его конца в зависимости от времени t

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(T)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \qquad (1)$$

Коэффициент $\alpha(T)$ называется коэффициентом температуропроводности. При постоянной величине $\alpha(T) = \mathrm{const}$ решение уравнения (1) известно в аналитическом виде [14]. Однако в нашем случае ситуация сложнее, так как коэффициент температуропроводности $\alpha(T)$ зависит от температуры, поэтому будем решать уравнение (1) численно.

Для решения уравнения (1) будем использовать явную разностную схему [15] с учетом температурной зависимости коэффициента $\alpha(T)$. Условие сходимости используемой схемы, в которое входит и коэффициент $\alpha(T)$ накладывает ограничение на шаги как по времени Δt, так и по длине стержня Δx: $\Delta t < \Delta x^2/2/\alpha(T)$. В качестве рабочих значений были выбраны величины $\Delta x = 0.05$ см, $\Delta t = 0.0005$ с. Задачей расчета является оценка прогрева материала на определенную величину вдоль стержня за время падения метеорита.

Чтобы оценить температуру его разогрева за время пролета метеорита через атмосферу (от нескольких до десятков секунд), приведем результаты расчета для нескольких значений времени. Результаты расчетов для полубесконечного стержня представлены на рис. 4 в виде зависимости температуры как функции расстояния от края стержня для $t = 5$, 10, 20 и 25 с. За это время материал метеорита прогревается до значительных величин на глубину до 2–3 см, а на расстоянии 7 мм достигает 1200–1300°C, что близко к температуре плавления оливина (1400°C).

Полубесконечный стержень — это очень приближенная модель для железо-никелевой матрицы метеорита класса палласитов, тем не менее, дает картину эволюции температурных условий.

Рассмотрим более близкую к метеориту модель в виде железной решетки, в ячейки которой размером 5 мм встроен оливин. На краю решетки при $Y = 0$ поддерживается температура 2000°C. Сама решетка в начальный момент времени имеет температуру 0°C. Двумерная модель распространения тепла описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right). \qquad (2)$$

Как и ранее, для его решения будем использовать явную разностную схему с теми же параметрами $\Delta x = 0.05$ см, $\Delta t = 0.0005$ с, которые удовлетворяют условиям сходимости и для двумерного случая.

На рис. 5 представлены результаты расчетов по распространению тепла вдоль решетки в зависимости от расстояния до ее нагретого края

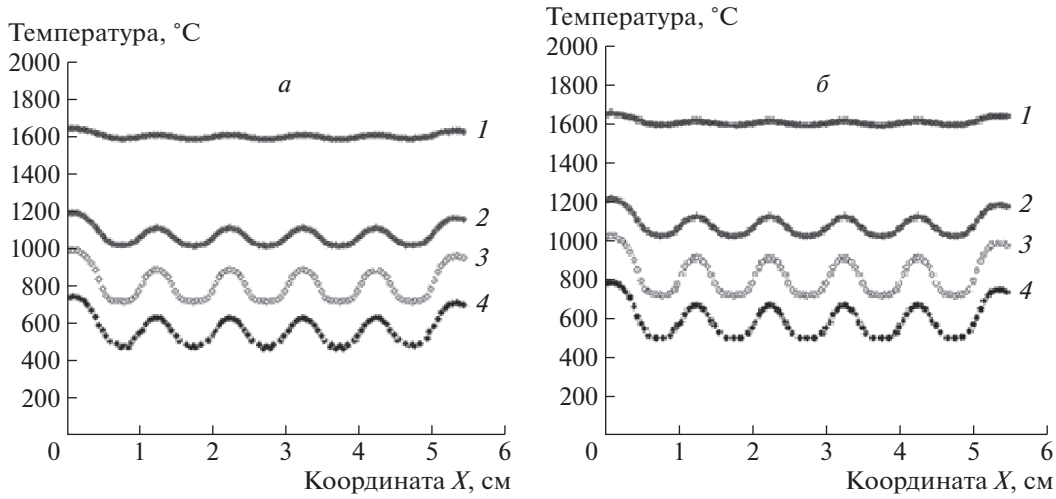

Рис. 5. Распределение температуры вдоль координаты X при фиксированных координатах Y при разных значениях времени: *а* — $t = 10$ с и *б* — 20 с. Номера рядом с кривыми соответствуют координатам Y: *1* — 3 мм, *2* — 7 мм, *3* — 9 мм и *4* — 12 мм.

(координата Y) и времени. Видно, что величины немного отличаются от тех, что показаны на рис. 4, т.е. форма объекта нагрева влияет на результат, но значения температуры близки на обоих графиках. Таким образом, можно сделать вывод, что разогрев метеорита на расстоянии 5 мм от оплавленного края может достигать 500°C через 10 с и 1100°C через 20 с падения. Это вполне может повлиять на характеристики трека.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Близость отдельных кристаллов оливина к оплавленному и по этой причине сильно разогретому краю метеорита привела к отжигу треков за счет нагревания метеорита при его прохождении через атмосферу во время падения на Землю. При отжиге треков происходит их укорачивание, причем в разной степени, в зависимости от заряда ядра [5, 6]. Этот эффект, как показали проведенные исследования, привел к существенному изменению геометрических характеристик треков и, следовательно, к появлению аномалии в зарядовом распределении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Л. Гинзбург, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Е. Л. Фейнберг, В. А. Царев, Докл. Акад. наук **402**, 472 (2005).
2. V. Alexeev, G. Kalinina, T. Pavlova, A. Bagulya, M. Chernyavsky, A. Gippius, L. Goncharova, S. Gorbunov, N. Konovalova, N. Okatyeva, N. Polukhina, N. Starkov, T. N. Soe, T. Shchedrina, A. Volkov, M. Gorshenkov, *et al.*, Astrophys. J. **829**, 120 (2016), doi: 10.3847/0004-637X/829/2/120
3. В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Е. Волков, А. А. Гиппиус, Л. А. Гончарова, С. А. Горбунов, Г. В. Калинина, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Т. А. Павлова, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Т. Н. Сое, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина, Краткие сообщения по физике ФИАН **44** (11), 41 (2017) [Bull. Lebedev Phys. Inst. **44**, 336 (2017), doi: 10.3103/S1068335617110069].
4. P. Horn, M. Maurette, and W. Von Oertzen, Z. Naturforsch. **22a**, 1793 (1967), doi: 10.1515/zna-1967-1117
5. С. Дюррани, Р. Балл, *Твердотельные ядерные детекторы* (Энергоатомиздат, Москва, 1990) [S. A. Durrani and R. K. Bull, *Solid State Nuclear Track Detection: Principles, Methods and Applications* (1987)].
6. Р. Л. Флейшер, П. Б. Прайс, Р. М. Уокер, *Треки заряженных частиц в твердых телах, т. 1, Методы исследования треков* (Энергоатомиздат, Москва, 1981) [R. L. Fleischer, P. Buford Price, R. M. Walker, *Nuclear Tracks in Solids* (Univ. California Press, Berkeley, 1975)].
7. А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров, Л. А. Гончарова, А. И. Ивлиев, Г. В. Калинина, Л. Л. Кашкаров, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Н. Г. Полухина, А. С. Русецкий, Н. И. Старков, В. А. Царев, Краткие сообщения по физике ФИАН **35** (7), 19 (2008) [Bull. Lebedev Phys. Inst. **35**, 205 (2008), doi: 10.3103/S1068335608070038].
8. А. Б. Александров, В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Б. Дашкина, М. М. Чернявский, А. А. Гиппиус, Л. А. Гончарова, С. А. Горбунов, В. М. Грачев, Г. В. Калинина, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Т. А. Павлова, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Тан Найнг Со и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **46** (12), 23 (2019) [Bull. Lebedev Phys. Inst. **46**, 383 (2019), doi: 10.3103/S1068335619120042].

9. V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, A. Gippius, L. Goncharova, S. Gorbunov, M. Gorshenkov, G. Kalinina, N. Konovalova, Jie Liu, Pengfei Zhai, N. Okatyeva, T. Pavlova, N. Polukhina, N. Starkov, Than Naing, Soe, *et al.*, Astrophys. J. **829**, 120 (2016), doi: 10.3847/0004-637X/829/2/120
10. E. A. Silber, M. Boslough, W. K. Hocking, M. Gritsevich, and R. W. Whitaker, Adv. Space Res. **62**, 489 (2018).
11. P. B. Price, D. Lal, A. S. Tamhane, and V. P. Perelygin, Earth Planet. Sci. Lett. **19**, 377 (1973).
12. А. В. Соловьев, *Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового датирования и структурного анализа* (Наука, Москва, 2008); Труды ГИН РАН, вып. 577.
13. V. P. Perelygin, S. G. Stetsenko, H. J. Crawford, and T. J. M. Symons, Z. Phys. A **338**, 435 (1991).
14. Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов, *Уравнения в частных производных математической физики* (Высшая школа, Москва, 1970), с. 451.
15. Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков, *Численные методы* (Наука, Москва, 1987), с. 512.

ANOMALY IN THE NUCLEI SPECTRUM OF GALACTIC SPACE RAYS IN OLIVINES FROM METEORITES

G. V. Kalinina[1], Than Naing Soe[2], N. I. Starkov[2]

[1] *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS), Moscow, Russia*
[2] *Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

In this work, we investigated the anomaly in the spectrum of galactic cosmic ray nuclei in olivine crystals from meteorites, which arose in the charge spectrum when studying crystals close to the meteorite surface. When a meteorite falls and moves through the Earth's atmosphere, its surface is very hot. The dynamics of heating of the meteorite substance was investigated, a solution to the heat propagation equation was proposed and its modeling was carried out in the Borland C++ builder environment. Estimates of the heating of the pallasite material during the meteorite fall are obtained. It is shown that the temperature of olivine crystals near the surface of a meteorite can reach more than 1300 degrees Celsius, which can lead to the effect of track annealing. Due to the annealing effect, some of the tracks disappear, while others change their geometric characteristics. This may explain the unusual shape of the distribution of nuclear charges found in olivine crystals near the edge of the meteorite.