



УДК 523.6

Палласиты: облучение космическими лучами и ударно-тепловая история по данным трековых и термолюминесцентных исследований

А.И. Ивлиев¹, Г.В. Калинина¹, Л.Л. Кашкаров¹, Н.Г. Полухина², В.А. Царев²¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН²Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Палласиты — железокаменные метеориты, главные компоненты которых оливин и никелистое железо, имеют особое значение, так как оливин — один из наиболее пригодных минералов для трековой регистрации тяжелых ядер космических лучей. Нами были изучены пять образцов палласитов: Brenham, Eagle Station, Piimaes, Marjalahti и Omolon. Исследования проводились с использованием трекового и термолюминесцентного (ТЛ) методов. Исходя из результатов измерений искусственно наведенной ТЛ в образцах оливина, перенесших ударную нагрузку ~20–30 ГПа, был получен главный вывод о том, что оливин из палласитов в течение всей истории их существования не подвергался ударному воздействию с нагрузкой, превышающей ~10 ГПа. Характер распределения плотности треков ядер группы железа СКЛ и ГКЛ, наблюдаемого в кристаллах оливина из палласита Brenham, может быть объяснен, исходя из предположения об облучении вещества этого метеорита на стадии, предшествующей формированию его родительского тела.

ПАЛЛАСИТИ: ОПРОМІНЕННЯ КОСМІЧНИМИ ПРОМЕНЯМИ ТА УДАРНО-ТЕПЛОВА ІСТОРІЯ ЗА ДАНИМИ ТРЕКОВИХ І ТЕРМОЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, Івлиєв А.І., Калініна Г.В., Кашкаров Л.Л., Полухіна Н.Г., Царьов В.А. — Палласити — залізно-кам'яні метеорити, головні компоненти яких оливін і нікелісте залізо, мають особливе значення, оскільки оливін — один з найбільш придатних мінералів для трекової реєстрації важких ядер космічних променів. Нами були вивчені п'ять зразків палласитів: Brenham, Eagle Station, Piimaes, Marjalahti та Omolon. Дослідження проводилися з використанням трекового та термолюмінесцентного (ТЛ) методів. Виходячи з результатів вимірювань штучно наведеної ТЛ в зразках оливина, що зазнали ударне навантаження ~20–30 ГПа, був отриманий головний висновок про те, що оливін з палласитів впродовж всієї історії їх існування не зазнавав ударної дії з навантаженням понад ~10 ГПа. Характер розподілу густини треків ядер групи заліза СКЛ та ГКЛ, спостережуваного в кристалах оливина з палласита Brenham, може бути пояснено, виходячи з припущення про опромінення речовини цього метеорита на стадії, що передувала формуванню його батьківського тіла.

PALLASITE METEORITES: COSMIC RAY IRRADIATION AND SHOCK-THERMAL HISTORY BY THE DATA OF TRACK AND THERMOLUMINESCENCE ANALYSIS, by Ivliev A.I., Kalinina G.V., Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Tsarev V.A. — Pallasites are specific stony-iron class of meteorites are mixtures of olivine and Fe-Ni. Olivine is one of the suitable silicate mineral for registration heavy cosmic ray nuclei with help of chemically etched tracks. Five meteorites of this class were selected for study by the track and thermoluminescence (TL) methods: Brenham, Eagle Station, Piimaes, Marjalahti and Omolon. For measurement of the natural and artificially induced TL it was used high-sensitive TL equipment. The significant difference of the typical glow-curve shapes between pallasites under investigation was determined. The total difference was observed in comparison with TL glow-curves, measured in artificially shocked olivine samples. Note that our TL observations indicate on chief connection with the olivine crystal microstructure and the very low level of possible shock influence recorded in all analysed olivine crystal samples. It was obtained that the shape of the track-density distribution, observed in the Brenham olivine crystals, supports assumption, that this distribution resembles determined irradiated on pre-compaction stage crystals, when the predominant part of tracks represent an addition from the solar cosmic ray VH-nuclei.

Ключевые слова: палласиты; космические лучи; ударно-тепловая история; термолюминесцентные исследования.

Key words: pallasites; cosmic rays; shock-thermal history; thermoluminescence analysis.

1. ВВЕДЕНИЕ

Палласиты — это железокаменные метеориты с различной структурой, главные компоненты которых — магнезиальный оливин и никелистое железо — обычно присутствуют в соотношении 2:1 по объему. В среднем палласиты состоят почти целиком из оливина (66 об. % Fa_{11-21}), металла (32 об. %, 7–16 об. % Ni), троилита (2,3 об. %) и шрайберзита (1,2 об. %), кроме этого присутствуют хромит и фосфаты [1,2]. Поскольку оливин относится к одним из наиболее пригодных силикатных минералов для трековой регистрации тяжелых ядер космических лучей ($Z > 23$), то он представляет особый интерес для изучения как истории облучения космическими лучами, так и ударно-тепловой истории палласитов. Не менее важной задачей при этом является изучение степени возможного влияния ударно-тепловых событий в истории палласитов на эффективность регистрации и сохранности треков, образованных в кристаллах оливина на разных этапах формирования этих метеоритов.

Таблица 1. Параметры треков ядер группы железа, наблюдаемых в зернах оливина разных размерных фракций, выделенных из палласита Brenham

(*) Размерная фракция кристаллов	Число изученных зерен оливина	Число зарегистри- рованных треков	$S, 10^{-2} \text{ см}^2$	(**) $\rho_{av}, \times 10^3 \text{ см}^{-2}$
А	10	57	1.4	4.1 ± 0.5
В	37	56	1.5	3.7 ± 0.5
С	6	8	0.12	7.0 ± 2.5

(*) А, В и С — группы кристаллов, средний размер которых составляет ≥ 200 мкм, $100 - 200$ мкм и ≤ 100 мкм;

(**) ρ_{av} — средняя величина плотности треков, образованная за счет ядер СКЛ и ГКЛ.

С этой целью нами были изучены пять образцов палласитов: Brenham, Eagle Station, Pimaes, Marjalahti и Omolon. Исследования проводились с использованием трекового и термолюминесцентного (ТЛ) методов.

2. ТРЕКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения трековых исследований были отобраны кристаллы оливина из палласитов Brenham, Eagle Station, Marjalahti и Omolon. Наибольший интерес среди этих метеоритов представляет палласит Brenham, оказавшийся необычным по двух главным аспектам: (1) Хотя этот метеорит номинально классифицируется как палласит, однако в нем обнаружены инертные газы солнечного типа, которые до настоящего времени не были зафиксированы ни в одном из метеоритов этого класса [3]; (2) Было отмечено также, что кристаллическая микроструктура оливина из Brenham, вероятно, несет следы процессов ударного воздействия, возможного, в частности, при брекчировании исходного вещества метеорита.

На первом этапе трековых исследований нами были измерены следы торможения тяжелых заряженных частиц космического излучения в кристаллах оливина, выделенных из образцов оливина метеоритов весом около 0.1 г. Отметим, что в кристаллах силикатных минералов из метеоритов могут ожидать треки, образованные от нескольких источников: от осколков спонтанного и, наведенного под действием ядерно-активных вторичных частиц космического излучения деления ядер U^{238} и вымершего Pu^{244} , а также от ядер очень тяжелых галактических (ГКЛ) и солнечных (СКЛ) космических лучей с зарядом $Z > 23$ (группа железа).

Величина плотности треков от ядер ГКЛ во всех изученных в настоящей работе палласитах, не превышает по порядку величины $\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$, что соответствует глубине залегания исследуемых кристаллов оливина от поверхности до атмосферного тела метеорита, превышающей 5–10 см. Присутствие в веществе метеоритов треков с плотностью, превышающей, по крайней мере, 10^4 см^{-2} , обусловлено возможностью их образования за счет облучения ядрами тяжелых элементов СКЛ при условии экранирующего слоя вещества толщиной не более $\sim 10^{-3} \text{ г/см}^2$. При этом одновременное облучение кристаллов низкоэнергетичными ионами солнечного ветра является одним из наиболее вероятных источников газов солнечного типа, обнаруженных в палласите Brenham. Наблюдаемое число химически травимых треков в каждом из исследуемых микро-кристаллов палласита Brenham составило от 0 до 7. Соответствующие величины плотности треков (ρ) для 53 изученных кристаллов этого метеорита (размерная фракция в пределах $\sim 50 - 300$ мкм) находится в интервале от $\leq 10^3 \text{ см}^{-2}$ до $\sim 1.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Полученные результаты приведены на рис. 1 и в табл. 1. Как следует из гистограмм, для всех трех групп кристаллов оливина, выделенных, исходя из среднего размера кристаллов, наблюдается очень широкий (до трех порядков величины) диапазон разброса плотности треков. При этом подавляющая часть ($\sim 80\%$) всех изученных нами зерен оливина имеет $\rho \leq 10^3 \text{ см}^{-2}$, что соответствует потоку ядер ГКЛ. Более высокие величины могут быть отнесены только к ядрам СКЛ, в зависимости от вклада которых полная доза облучения индивидуальных зерен оливина будет существенно различаться. В связи с этим необходимо отметить достаточно высокое, практически двукратное увеличение средней плотности треков, наблюдаемой в зернах оливина, входящих во фракцию с минимальным размером зерен.

Исходя из полученных данных трековых исследований можно принять, что обнаруженные в веществе палласита Brenham газы солнечного типа могли быть привнесены в виде ионов солнечного ветра. Внедрение ионов могло происходить или на стадии, предшествующей формированию родительского тела метеорита и/или на более поздней стадии в условиях формирования реголита. Последний сценарий, однако, для палласитов не представляется реальным.

3. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Явление термолюминесценции можно охарактеризовать как способность кристаллов накапливать энергию ионизирующего излучения и сохранять ее вплоть до последующего нагрева, в процессе которого запасенная энергия может быть освобождена в виде светового излучения. Термическая стимуляция

эмиссии света и обуславливает явление, называемое термолюминесценцией (ТЛ). Термолюминесцирующий материал должен содержать различные дефекты кристаллической решетки: химические примеси, вакансии и т.д., которые действуют как электронная или дырочная ловушки, позволяющие сохранять в течение определенного времени захваченные заряды. Длительность пребывания электронов в ловушках определяется «глубиной ловушки», величина которой колеблется в диапазоне 0,5–2 эВ. Среднее время нахождения зарядов в ловушках, главным образом, зависит от температуры окружающей среды и колеблется в очень широком интервале от ~ 1 до $\sim 10^5$ с. Экспериментальное измерение ТЛ заключается в регистрации светового излучения фотоэлектронным умножителем при линейной скорости нагрева образца. Для каждого образца проводится измерение двух типов ТЛ: естественной — накопленной при облучении кристаллов космическими лучами и продуктами распада радиоактивных элементов, входящих в состав исследуемых образцов, а также искусственной — наведенной путем облучения исследуемых образцов ионизирующим излучением от внешнего источника в лабораторных условиях. Зависимость светового потока ТЛ от температуры нагрева образца регистрируется кривой свечения ТЛ. Площадь под этой кривой в определенном температурном интервале является количественной характеристикой интенсивности свечения ТЛ.

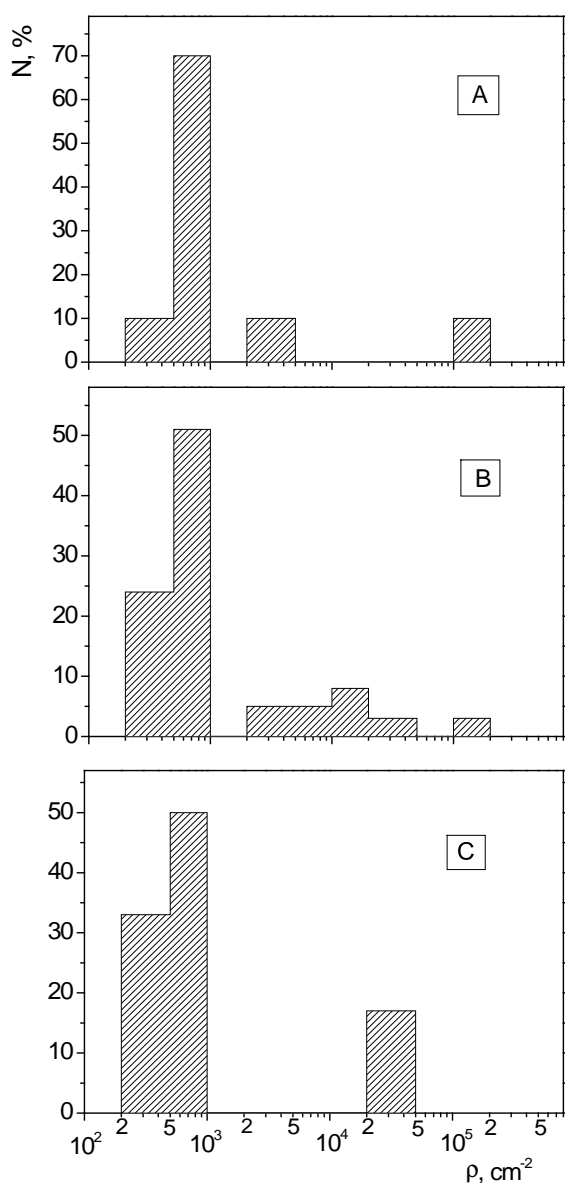


Рис. 1. Распределение плотности треков в кристаллах оливина палласита Brenham. А, В и С — группы кристаллов, средний размер которых составляет ≥ 200 , 100–200 и ≤ 100 мкм, соответственно

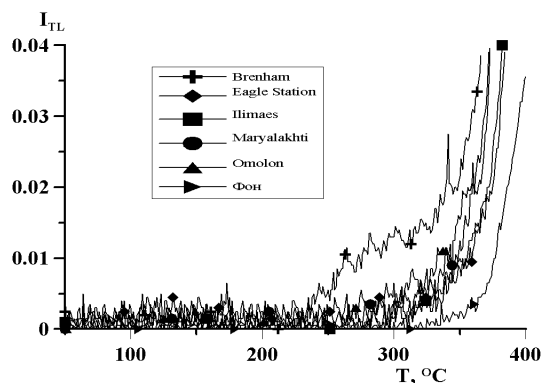


Рис. 2. Кривые свечения, наведенные рентгеновским излучением в образцах палласитов, где T , °С — температура нагрева образца, I_{TL} — интенсивность свечения ТЛ.

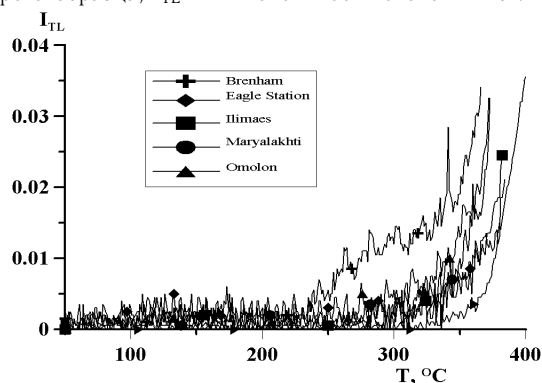


Рис. 3. Кривые свечения, наведенные рентгеновским излучением, приведенные на рис. 2, после вычитания фонового излучения нагревательной пластины установки

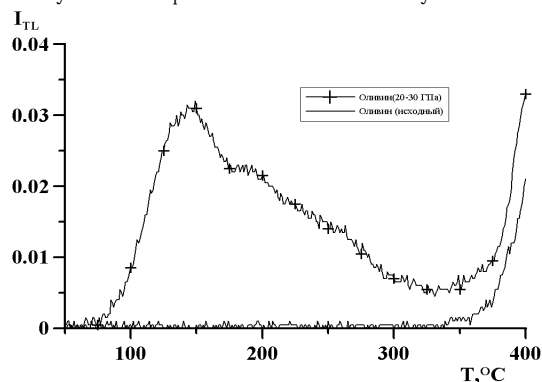


Рис. 4. Кривые свечения образцов оливина, претерпевшего ударную нагрузку ~ 20 –30 ГПа, и исходного образца до ударного воздействия

Измерения ТЛ проводились на установке описанной в работе [4]. Как естественная, так и искусственно наведенная при облучении рентгеновским излучением ТЛ, измерялись не менее чем в трех параллельно приготовленных для каждого образца палласита пробах оливина весом около 2 мг. Отмечена крайне низкая величина интенсивности свечения естественной ТЛ для всех изученных образцов, находящейся на уровне фонового излучения, обусловленного свечением пластины для нагрева исследуемых проб.

На рис. 2 показаны кривые свечения, наведенные рентгеновским излучением в исследованных образцах палласитов. Как видно из рис. 2, для всех исследованных палласитов наблюдается очень слабое свечение ТЛ, наведенных рентгеновским излучением. Эти же кривые свечения, после вычитания фонового излучения, обусловленного свечением нагревательной пластины, приведенные на рис. 3, дают более четкую картину о характере свечения ТЛ палласитов, наведенной рентгеновским излучением: (1) Интенсивность свечения наведенной ТЛ, превышающей фоновое излучение, наблюдается только при температуре нагрева образцов $> 220^{\circ}\text{C}$; (2) Образцы оливина из палласитов Eagle Station, Ilimaes, Marjalahti и Omolon имеют приблизительно одинаковое свечение ТЛ. Проведенные нами расчеты показали, что интенсивность ТЛ (площадь под пиком в области $220\text{--}350^{\circ}\text{C}$) изменяется для этих образцов в области 0,2 до 0,6; (3) Существенно более высокая интенсивность свечения ТЛ в этой же области температур, равная 1,4 получена для образца оливина из палласита Brenham.

Интенсивность свечения наведенной ТЛ, присутствующая только в высокотемпературной области ($> 220^{\circ}\text{C}$), а также очень низкий уровень естественной ТЛ, наведенной космическими лучами, подтверждают предположение о том, что оливин исследованных метеоритов не претерпел значительных ударно-тепловых нагрузок, которые могли привести к сколько-нибудь заметным микро-нарушениям кристаллической структуры оливина. Это предположение подтверждается проведенными нами исследованиями оливина, подвергнутому экспериментальной нагрузке в лабораторных условиях [5]. В этом эксперименте в качестве исходного материала для проведения измерений ТЛ использовался образец оливина, претерпевший ударную нагрузку сферически сходящимися волнами. Эксперимент по ударному нагружению был проведен в РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск), разработавшими методику ударного нагружения и аналогичен описанному в [6]. Для проведения эксперимента образец оливина в виде шара диаметром 48 мм был заварен в вакууме в сферически-герметичный чехол из стали, который после проведения ударной нагрузки сохранил прочность и герметичность. По предварительной теоретической оценке ударное воздействие на поверхности шара составляло ~ 20 ГПа, а к центру шара оно увеличивалось до $\sim 10^3$ ГПа и температуры — до $\sim 10^4$ К.

В качестве примера, на рис. 4 приведены кривые свечения образца оливина, претерпевшего ударную нагрузку $\sim 20\text{--}30$ ГПа, и исходного образца, не подвергавшегося ударному воздействию. На приведенном рисунке наблюдается пик с температурой в области 150°C для образца, претерпевшего ударное воздействие. Исходя из этих данных оценка верхнего порогового значения ударной нагрузки, воздействию которого могло испытать вещество палласитов на протяжении всей их истории, дала величину, не превышающую 10 ГПа. При этом следует отметить, что все исследованные в этом эксперименте образцы оливинов показали свечение ТЛ в области температуры $100\text{--}300^{\circ}\text{C}$. Однако подобного свечения ТЛ не наблюдается в изученных нами образцах оливина, выделенного из вещества метеоритов других типов.

Таким образом, проведенные измерения ТЛ позволяют сделать вывод о том, что оливин исследованных образцов палласитов не претерпел значительной ударно-тепловой нагрузки. Это обстоятельство указывает на хорошую сохранность треков от ядер тяжелых элементов космических лучей.

4. ВЫВОДЫ

(1) Практически полное отсутствие естественной ТЛ, наведенной космическими лучами до момента падения метеорита, согласуются с предположением о том, что оливин изученных метеоритов не подвергался воздействию значительных ударных нагрузок, которые могли бы привести к заметным нарушениям кристаллической структуры оливина, что согласуется с хорошей сохранностью в кристаллах оливина из палласитов следов торможения — треков от ядер тяжелых элементов космических лучей.

(2) Исходя из результатов измерений искусственно наведенной ТЛ в образцах оливина, претерпевших ударную нагрузку $\sim 20\text{--}30$ ГПа, был получен главный вывод о том, что оливин из палласитов в течение всей истории их существования не подвергался ударному воздействию с нагрузкой, превышающей ~ 10 ГПа.

(3) Характер распределения плотности треков ядер группы железа СКЛ и ГКЛ, наблюдаемого в кристаллах оливина из палласита Brenham, может быть объяснен, исходя из предположения об облучении вещества этого метеорита на стадии, предшествующей формированию его родительского тела. При этом формирование треков, относящихся к ядрам группы железа СКЛ, могло сопровождаться имплантацией ионов солнечного ветра, что привело к накоплению заметного количества газов солнечного состава.

(4) Существенные различия в параметрах треков, наблюдаемых в индивидуальных зернах оливина из палласита Brenham, а также несомненное различие ТЛ-характеристик оливина, выделенного из пяти

изученных палласитов, указывает на разнообразие процессов, происходивших в истории формирования родительских тел этих метеоритов, а также на сохранность радиационных эффектов в течение всей последующей их истории.

Работа выполнена частично при поддержке гранта РФФИ №06-02-16835.

1. *Dodd P.T.* Метеориты. Петрология и геохимия. — М.: Мир, 1986. — 384 с.
2. *Buseck P.R.* Pallasite meteorites-mineralogy, petrology and geochemistry // *Geochem. Cosmochem. Acta.* — 1977. — **41**, №6. — P. 711–740.
3. *Mathew K.J., Begemann F.* // *JGR.* — 1997. — **102**. — P. 11015–11026.
4. *Iuliev A.I., Badyukov D.D., Kashkarov L.L.* Investigations of Thermoluminescence in Experimentally Shocked Samples: II. Quartz // *Geochemistry International.* — 1996. — **34**, № 10. — P. 912–919.
5. *Kashkarov L.L., Iuliev A.I., Kalinina G.V., Skripnik A.Ya.* Pallasite Brenham: radiation and shock characteristics, resulting from different compaction history? // 40th Vernadsky-Brown Microsymposium on comparative planetology. Moscow, 2004. CD-ROM, #40.
6. *Ивлиев А.И., Бадюков Д.Д., Куюнко Н.С., Козлов Е.А.* Исследования термолуминесценции в образцах, подвергнутых экспериментальной ударной нагрузке. III: Кальцит // *Геохимия.* — 2002. — № 8. — С. 820–833.

Поступила в редакцию 24.10.2011