

Д-644

2211/2-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

14/VI-76



P13 - 9543

Г.И.Доливо-Добровольская, В.Д.Коломенский,
Н.Н.Гаврилова, В.П.Перелыгин, С.Г.Стеценко

ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ
В КРИСТАЛЛАХ ОЛИВИНА ИЗ ПАЛЛАСИТОВ

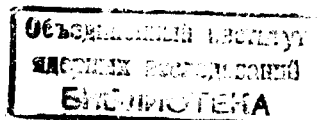
1976

P13 - 9543

Г.И.Доливо-Добровольская, В.Д.Коломенский,
Н.Н.Гаврилова, В.П.Перельгин, С.Г.Стеценко

**ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ
В КРИСТАЛЛАХ ОЛИВИНА ИЗ ПАЛЛАСИТОВ**

Направлено на IV симпозиум по космохимии "Влияние
космического окружения на Землю" (Киев, 1976)



S u m m a r y

Olivine crystals from pallasites are excellent detectors for VVH cosmic ray nuclei. As is known in our previous papers^{/8,9/}, large transparent olivine crystals from pallasites provide a possibility of a search for millimeter-long tracks due to superheavy cosmic ray nuclei with $Z=110-114$ ^{/12/}. But many of these crystals contain a large number of very long capillar inclusions, which, after etching^{/6/}, are sometimes similar to the tracks of VVH nuclei. Olivine crystals from the meteorites Admire, Ahumada, Albin, Bragin, Brenhem, Eagle Station, Finnmarken, Krasnojarsk, Lipovsky, Marjalahti, Patwar, Pavlodar, Springwater and Til Mountain have been chosen for investigation. These crystals were scanned before etching in order to examine capillar and other inclusions (Figs. 1-4). The measurement of capillar inclusions orientation have been performed using an immersion oil method^{/15/}. It has been established that the capillar system is oriented only along the main crystallographic directions (table 3, fig. 5). The tracks and dislocation after etching are shown in Fig. 6. The angular distribution of tracks due to VH and VVH nuclei in olivine crystals from Marjalahti (Fig. 7) indicates that our method is good for distinguishing tracks and capillar inclusions.

Как было показано ранее в работах М.Моретта и др.^{/1/}, Р.Флейшера и др.^{/2/}, Л.Л.Кашкарова и др.^{/3/}, прозрачные однородные кристаллы оливина из метеоритов способны регистрировать и сохранять в течение десятков и сотен миллионов лет прямолинейные дефекты структуры, создаваемые при торможении тяжелых ядер первичного космического излучения. Однако проведение исследований оливинов из метеоритов было затруднительным из-за отсутствия травителя, способного выявлять протяженные следы тяжелых космических ядер в этих кристаллах^{/3/}. Поэтому до последнего времени для исследований треков галактических космических лучей использовались в основном кристаллы пироксенов - диопсида, гиперстена, пижонита и др., а также полевых шпатов лунного и метеоритного происхождения^{/4, 5/}.

В 1971 году Кришнасвами и др. радикально усовершенствовали методику выявления треков в кристаллах оливина^{/6/}, что обеспечило возможность проведения детальных исследований оливинов лунного и метеоритного происхождения.

Дальнейшие исследования свойств кристаллов оливина показали, что этот минерал является одним из самых низкочувствительных детекторов заряженных частиц. Согласно данным П.В.Прайса и др.^{/7/}, а также Г.Н.Флерова и др.^{/8/}, порог регистрации оливина находится в области $Z = 22$ /ионы титана/. Следы ядер с $Z > 22$ имеют форму узкого конуса с углом раствора менее одного градуса^{/4/}, обладают высокой стабильностью по отношению к отжигу. Кристаллы оливина из метеоритов практически

не содержат фона следов от спонтанного деления урана $/\leq 10^2 \text{ тр/см}^2/^{9/}$. Интересным направлением исследования минералов из метеоритов и лунных образцов, которое обобщено в работе Г.Н.Флерова^{10/}, является поиск относительно стабильных ядер в области $Z = /110-114/$ в составе галактических космических лучей. Предыдущие исследования показали, что наиболее подходящим объектом таких поисков являются кристаллы оливинов из палласитов^{9/}. Однако при проведении этих исследований экспериментаторы столкнулись с необходимостью дискриминации следов тяжелых космических ядер от фигур травления различных дефектов кристаллической структуры оливинов^{9, 11/}. Успешное решение этой проблемы имеет важное значение в связи с поиском редких следов гипотетических сверхтяжелых ядер /один трек на $100-1000 \text{ мм}^3$ оливина/.

Согласно оценкам, выполненным на основе расчетов Каца и Кобетича^{12/}, такие ядра должны создавать в оливинах следы длиннее 1,2 мм.

Различные авторы неоднократно отмечали, что наиболее распространенным типом дефектов структуры оливинов являются трубчатые каналы или капилляры.

Обзор ранних работ по дефектам структуры оливинов приведен в монографии Л.Н.Чирвинского^{13/}. Эти включения были впервые обнаружены в оливинах из метеорита Палласово Железо, затем в палласитах Брагин, Ямышева, Бренхэм^{13/}.

В 1943 году В.И.Вернадский сообщил об обнаружении капилляров в оливинах из всех палласитов метеоритной коллекции АН СССР^{14/}. Сечения капилляров напоминали чечевицу, а их разрезы давали замкнутую кривую линию; капилляры образовывали одну систему параллельных каналов, реже - две таких системы^{13, 14/}. Были обнаружены также темные включения овальной формы^{14/}, характеризовавшиеся как "рудные включения" или "вещество черного или темно-серого цвета"^{13/}. В литературе нет детальных сведений о происхождении и структуре дефектов в оливинах из палласитов. Остается открытым вопрос об ориентации капилляров и о составе вещества, входящего в них.

Задачей настоящей работы является более детальное

исследование дефектов кристаллической структуры различного происхождения в оливинах из палласитов и их сравнение с фигурами травления следов тяжелых заряженных частиц. Были отобраны кристаллы оливина из палласитов Брагин, Липовский Хутор, Марьялахти, Палласово Железо, Ямышева, Альбин, Ахумада, Бренхэм, Игл Стэйшн, Спрингуотер, Тил Монтен, Финмаркен, Эдмайр, а также оливины из мезосидерита Патвар. Кристаллы монтировались в эпоксидную смолу, полировались и просматривались под микроскопом при увеличении от 100X до 2000X. Выбирались кристаллы, содержащие включения в виде систем капилляров, овальные или ограненные включения, трещины, заполненные минералами металлической части палласита. При необходимости кристаллы монтировались заново для более детального наблюдения дефектов структуры. Наиболее характерные дефекты структуры представлены на *рис. 1-3*.

На *рис. 1а* представлены системы капилляров в оливине из метеорита Марьялахти. Видны две системы - темные тонкие капилляры и более широкие включения с четкой огранкой. Капилляры, принадлежащие подобным системам, не пересекаются в объеме кристалла. На *рис. 1б* приведена микрофотография канала, частично заполненного непрозрачным веществом; видно, что торцы капилляра имеют отчетливую геометрическую огранку.

Две системы взаимно пересекающихся капилляров в кристалле оливина из метеорита Ямышева представлены на *рис. 2а*. Видно, что профиль некоторых капилляров переменный. На *рис. 2б* четко различаются три системы пересекающихся капилляров, а также тонкие $< 1 \text{ мкм}$ плоские включения неправильной формы /метеорит Марьялахти/.

В оливинах из палласитов Брагин, Липовский Хутор, Марьялахти и Игл Стэйшн наблюдались скопления овальных /иногда ограненных/ включений. Большинство таких включений непрозрачны, некоторые окрашены в бурый цвет. Расположены они произвольным или упорядоченным образом.

На *рис. 3* представлены фотографии овальных включений в оливинах из метеоритов Липовский Хутор /*рис. 3а*/ и Игл Стэйшн /*рис. 3б*/.

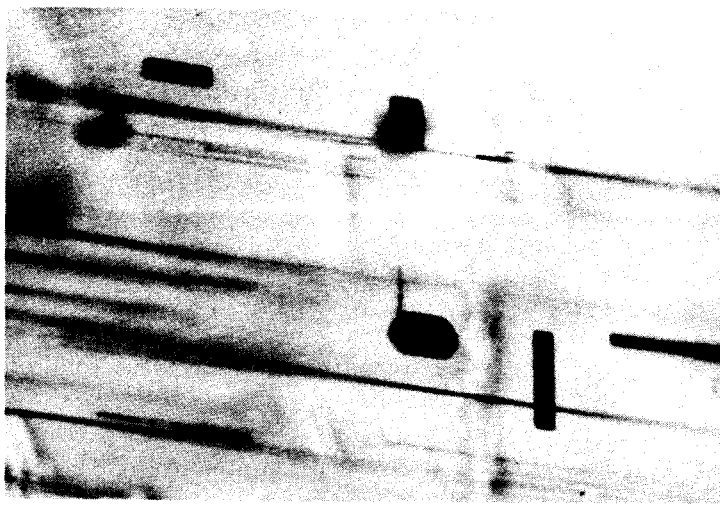


Рис. 1. Включения в кристалле оливина из метеорита Марьялахти /а/. Капилляр в кристалле оливина, частично заполненный непрозрачным веществом /б/.

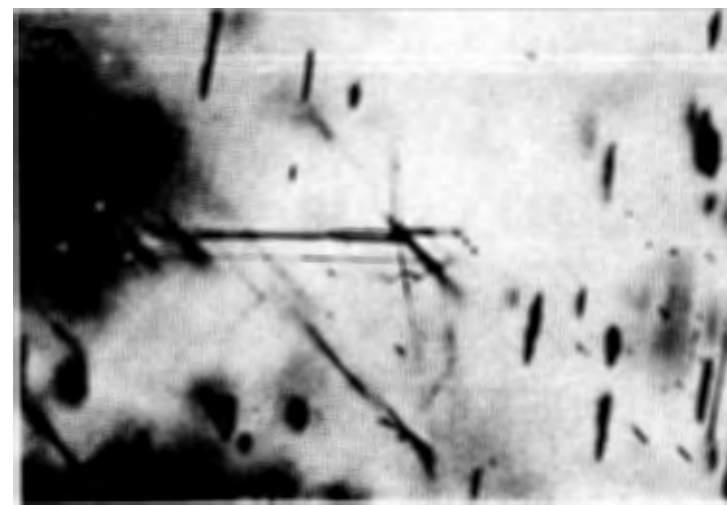
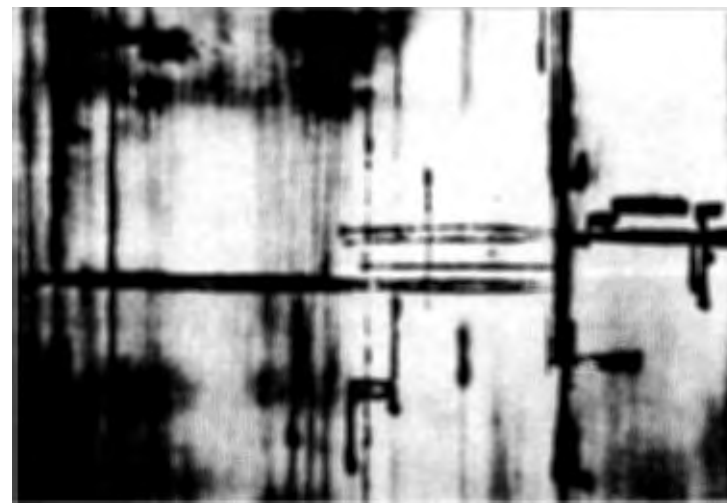


Рис. 2. Системы капиллярных включений в кристалле оливина из метеорита Ямышева /а/. Три системы пересекающихся капилляров в кристалле оливина из метеорита Марьялахти /б/.

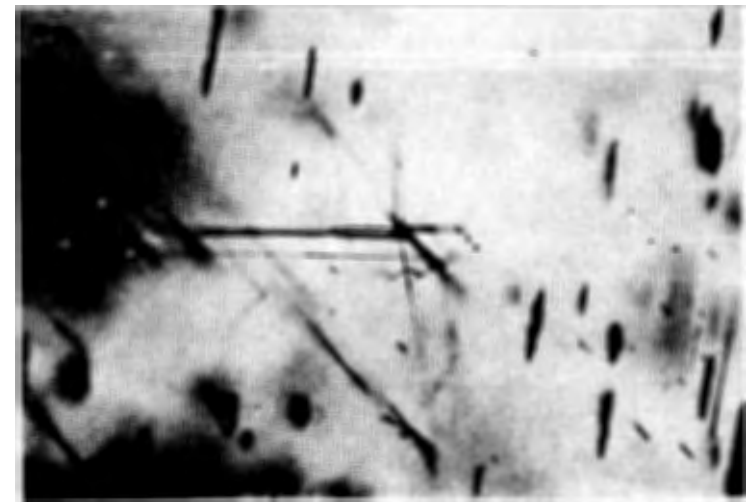
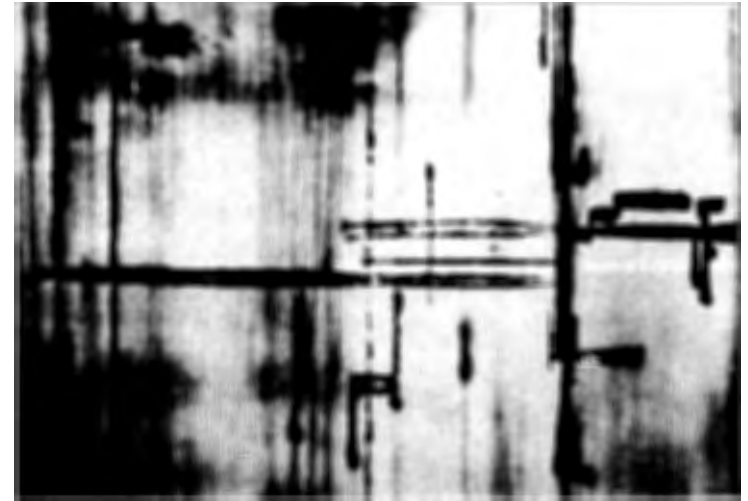
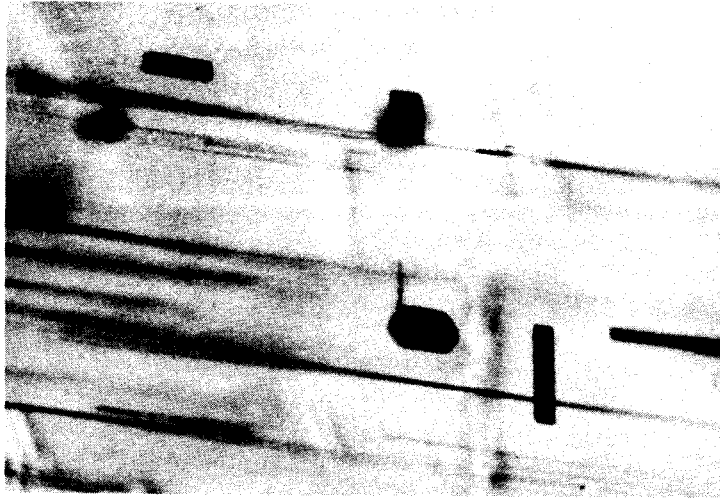


Рис. 1. Включения в кристалле оливина из метеорита Марьялахти /а/. Капилляр в кристалле оливина, частично заполненный непрозрачным веществом /б/.

Рис. 2. Системы капиллярных включений в кристалле оливина из метеорита Ямышева /а/. Три системы пересекающихся капилляров в кристалле оливина из метеорита Марьялахти /б/.

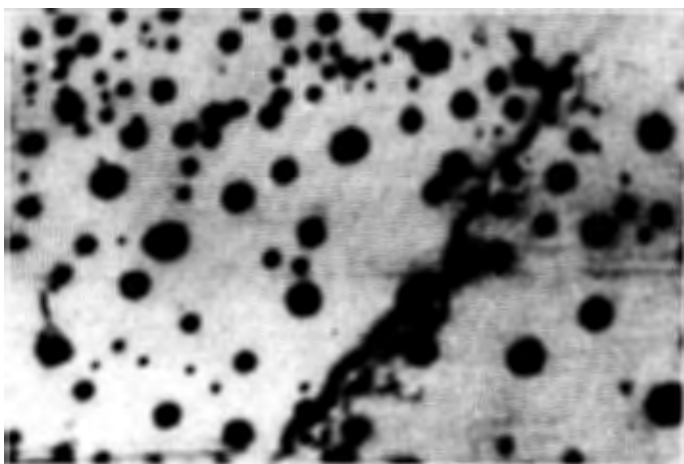
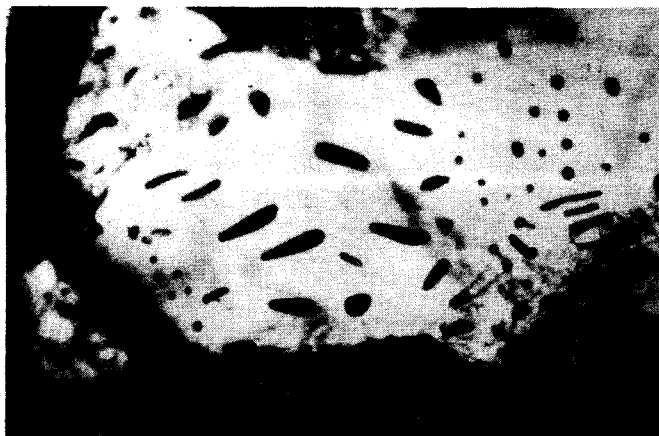


Рис. 3. Овальные включения в кристаллы оливина, метеорит Липовский Хутор /а/, Игл Стейшн /б/.

Капиллярные включения - наиболее широко распространенный тип дефектов в оливинах из всех исследованных нами образцов метеоритов. Предварительный анализ показывает, что капиллярные включения образуют системы с определенной ориентацией. Подробные исследования ориентации капиллярных включений производились иммерсионным методом ^{/15/}. Известно, что кристаллы оливина обладают спайностью по плоскостям [010] и [001] ^{/16/}. Следует ожидать, что в иммерсионных препаратах будут наблюдаться фрагменты кристаллов, соответствующие или близкие этим сечениям.

На рис. 4 представлена фотография зерна оливина в поляризованном свете; отчетливо видны две системы каналов под углом 94°02.

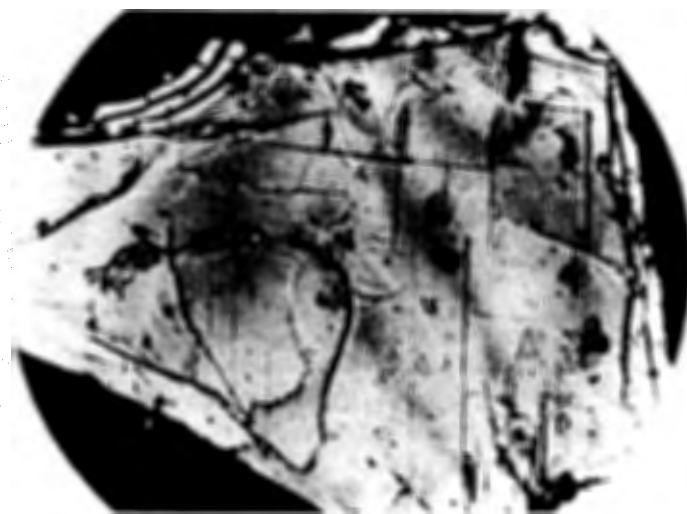


Рис. 4. Кристалл оливина в поляризованном свете, видны две системы капилляров.

Кристаллы, ориентированные в иммерсионном препарате по [010] и [001], обладают прямым погасанием ^{/15, 16/}, наступающим тогда, когда направления [001], [100] и [010] совмещаются с направлениями световых колебаний, пропускаемых поляризатором и анализатором /рис. 5а, б/.

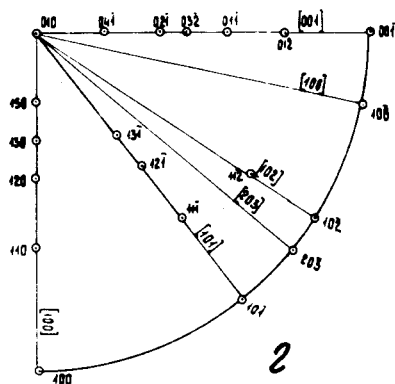
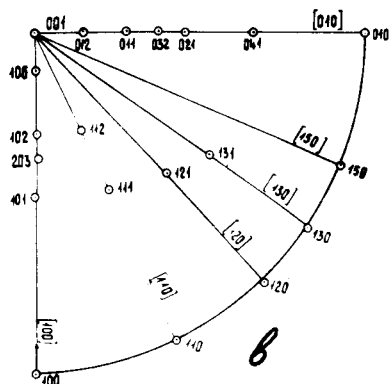
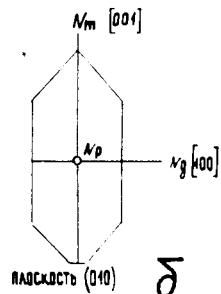
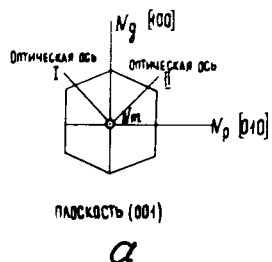


Рис. 5. Проекция кристаллографических направлений в кристалле оливина: прямоугольные /а, б/, стереографические /в, г/.

Большой показатель преломления N_g соответствует направлению $[100]$, средний $N_m - [001]$, а меньший $N_p - [010]$. Для определения положения этих направлений в исследуемых зернах применялся метод компенсации интерференционной окраски с помощью кварцевого клина^{/15/}. Сущность метода состоит в том, что при наложении кварцевого клина над исследуемым кристаллом возможно либо сложение разностей хода, приобретаемых светом в обоих кристаллах /оливин и кварц/, либо их вычитание. Первый случай приводит к повышению интерференционной окраски, а второй - к ее понижению.

Таким способом определялось положение большего и меньшего из показателей преломления в исследован-

ных зернах, т.е. N_g и N_p в случае ориентировки зерна по $[001]$ и N_g и N_m - в случае ориентировки зерна по $[010]$. Оба случая ориентировки различались с помощью метода коноскопии^{/15/}.

Установив положение главных направлений $[100]$, $[010]$ и $[001]$ в кристалле, можно определить углы, которые составляют капилляры с этими направлениями.

В табл. 1 и 2 приведены значения углов различных направлений, лежащие в плоскостях $[010]$ и $[001]$, а на рис. 5в, г - стереографические проекции этих направлений. Примеры ориентировки капилляров в оливинах приведены в табл. 3. Сопоставление замеров с рассчитанными углами показывает, что наблюдаемые капилляры соответствуют главным кристаллографическим направлениям $[001]$, $[100]$, $[010]$, $[110]$, реже $[120]$, $[130]$, $[230]$, $[160]$. Все эти направления являются осями зон, которым принадлежат установленные для оливинов из палласитов формы кристаллов^{/17/}.

Определение ориентировки капилляров в кристаллах, заключенных в эпоксидную смолу, не может быть сделано иммерсионным методом точно, так как значительная толщина препарата не позволяет фиксировать положение погасания.

В таких препаратах определялись углы между системами капилляров, предположительно относимыми к $[001]$, $[100]$ или $[010]$, и одиночными капиллярами.

Полученные значения приведены в табл. 3. В препаратах, позволяющих просматривать кристаллы в глубину, кроме перечисленных направлений, отмечались системы косо расположенных капилляров как в плоскости $[010]$, так и $[001]$. Удлинение таких капилляров совпадает с $[110]$, их направление соответствует $[111]$ /рис. 2а/.

Таким образом, капиллярные включения в кристаллах оливинов из палласитов ориентированы вдоль главных кристаллографических направлений. Эти направления могут быть однозначно идентифицированы по ориентации преобладающих капиллярных систем.

Некоторые виды дефектов структуры выявлялись при избирательном химическом травлении. Полированные кри-

Таблица 1

Углы между основными направлениями, лежащими в плоскости [010] кристаллов оливина

Символ направления	Угол с 001	Угол с 100	Угол с направлением того же символа
001	00°00	90°00	
106	11°51	78°09	23°42
102	32°11	57°49	64°22
203	40°00	50°00	80°00
101	51°32	38°28	76°56
100	90°00	00°00	

Таблица 2

Углы между основными направлениями, лежащими в плоскости [001] кристаллов оливина

Символ направления	Угол с 010	Угол с 100	Угол с направлением того же символа
010	0°00	90°00	
150	23°14	66°46	46°28
130	35°35	54°25	71°10
120	47°01	42°59	85°58 (94°02)
110	65°01	24°59	50°02
100	90°00	00°00	

Таблица 3

Сопоставление измеренных и рассчитанных углов, определяющих ориентировку капилляров*

Измеренный угол	Рассчитанный угол	Плоскость наблюдения	Ориентировка каналов	Примечание
0°	00°00	(010)	001	Марьялахти № 405
25°	24°59	(001)	110	—"
32°	32°11	(010)	102	—"
94°00	94°02	(001)	120	—"
11°	11°51	(010)	106	—"
40°	40°00	(010)	203	—"
90°	90°00	(010)	100	—"
25°	24°59	(001)	110	Брагин
23°	23°14	(001)	150	—"
0°	00°00	(010)	001	Ямшера
40°	40°00	(010)	203	—"
0°	00°00	(010)	001	Брагин
94°	94°02	(001)	120	Брагин
0°	00°00	(010)	001	Палласово Железо
94°	94°02	(001)	120	—"
50°	50°02	(001)	110	Ямшера
71°	71°10	(001)	130	—"

*В таблицу вошли не все проделанные замеры углов, а лишь примеры наиболее часто встречающихся ориентировок.

сталлы оливина подвергались обработке в травителе, предложенном Кришнасвами и др. /6/. Травление производилось в герметически замкнутом объеме при температуре 120° С в течение 10-20 час. Системы капилляров, не пересекающиеся друг с другом, обычно растворяются, при этом они приобретают форму слабо сужающихся каналов; на них выявляются характерные короткие треки /длиной 3-15 мк/ от космических ядер группы железа /рис. 6а/. В образцах из метеоритов Ямышева, Игл Стейшн, где пересекающиеся капилляры имеют ширину до 4-5 мкм, видно, что они заполнены веществом светлорусой окраски, которое не растворяется в травителе. Известно, что данный травитель не выявляет следы тяжелых частиц в пироксенах и полевых шпатах /6/. Нами установлено, что этот травитель не действует на силикатные стекла. Можно заключить, что такого рода капилляры заполнены твердым веществом аморфной или кристаллической структуры, отличным по химическому составу от оливина.

Таким образом, капилляры в кристаллах оливина можно разделить на две группы I и II рода.

Капилляры I рода образуют две или более взаимно не пересекающиеся системы. Они подвергаются травлению так же, как треки заряженных частиц и дислокации.

Капилляры II рода образуют пересекающиеся системы преимущественно в трех взаимно перпендикулярных направлениях; они часто имеют переменный профиль, правильную огранку в сечении и заполнены твердым веществом, препятствующим проникновению травителя в объем кристалла. При избирательном химическом травлении могут быть выявлены дислокации /в том случае, если они выходят на поверхность/; они могут быть исследованы также с помощью электронного микроскопа и методом рентгеновской топографии /18/. На рис. 6б приведена фотография фигур травления дислокаций из метеорита Альбин. Фигуры травления дислокаций имеют характерную искривленную форму, иногда они образуют замкнутые петли. Плотность дислокаций меняется в широких пределах, обычно от 10^2 до 10^4 на $см^2$, в метеорите Альбин она достигает 10^6 на $см^2$.

Как видно из рис. 6а, при травлении протяженные



Рис. 6. Дефекты кристаллической структуры оливина, выявляемые при избирательном химическом травлении: треки космических ядер /а/, дислокации /б/.

следы тяжелых космических ядер выявляются в виде слабо сужающихся каналов. Длина таких треков иногда превышает 900 мкм^8 . Следует отметить, что треки тяжелых космических ядер наблюдаются на глубинах не свыше 25 см от доатмосферной поверхности палласитов. Треки ядер группы железа и более тяжелых ядер наблюдались в образцах метеоритов Брагин, Липовский Хутор, Марьялахти, Ямышева и Игл Стейшн. Плотность следов ядер группы железа в этих метеоритах достигает $10^5 - 10^7$ на см^2 , а ядер с $Z \geq 36$ до $10^2 - 3 \cdot 10^4$ на см^2 . Треки тяжелых космических ядер ориентированы в широком интервале пространственных углов, определяемом энергетическим и зарядовым спектром ядер и глубиной расположения кристаллов от доатмосферной поверхности метеорита.

На рис. 7 представлены графики угловых распределений следов ядер группы железа и ядер с $Z \geq 36$ в кристалле оливина из метеорита Марьялахти, расположенного на глубине $4,5 \pm 0,6 \text{ см}$ от доатмосферной поверхности^{/11/}.

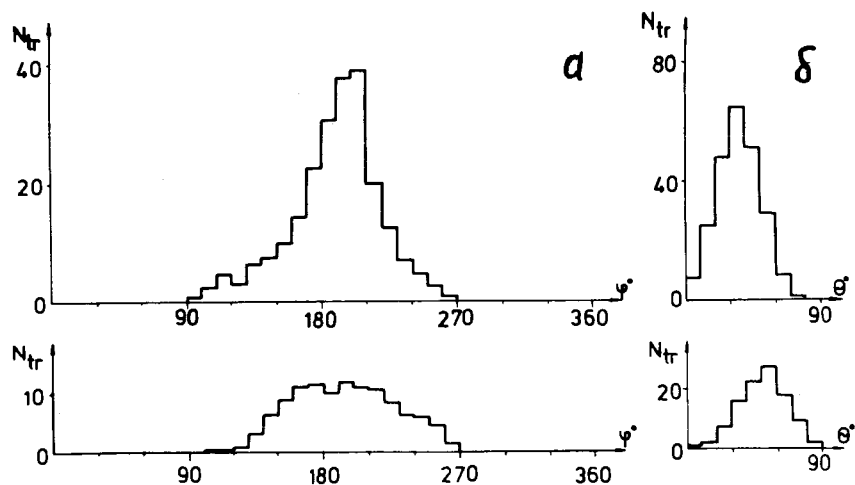


Рис. 7. Угловые распределения космических ядер /группы железа вверху, $Z \geq 36$ внизу/ в кристалле оливина из метеорита Марьялахти. Распределение треков по азимуту /а/, по углам погружения /б/.

Как следует из этих кривых, угловые распределения ядер группы железа и более тяжелых ядер согласуются в пределах ошибок измерения. Видно, что в угловом распределении тяжелых ядер нет пиков, соответствующих главным кристаллографическим направлениям /направлениям капилляров/.

Описанная выше методика позволяет определять ориентацию единичных очень длинных треков частиц $/\geq 800 \text{ мкм}/$, которые можно отнести к области атомных номеров $Z \geq 92$, относительно кристаллографических направлений и с высокой степенью надежности исключить возможный вклад фона от фигур травления трубчатых каналов.

Так как вещество капилляров и плоских включений не подвергается травлению, такие включения иногда препятствуют проявлению протяженных следов тяжелых частиц. Необходимо провести дальнейшие исследования состава и свойств вещества, заполняющего эти дефекты с тем, чтобы иметь возможность полностью выявлять треки тяжелых космических ядер.

Кроме описанных выше дефектов структуры, в исследовавшихся нами образцах были обнаружены температурные или кристаллизационные трещины и поры^{/19/}, образованные в процессе роста кристаллов оливина, происшедшего $4,3 \cdot 10^9$ лет тому назад.

Эти нарушения структуры, наряду с системами капилляров, округлыми включениями и дислокациями можно отнести к первичнокристаллизационным дефектам.

Кроме того, в оливинах были обнаружены трещины различного происхождения, возникшие, по-видимому, при многократном дроблении первичного тела метеорита в космосе, при вхождении в атмосферу и соударении с поверхностью Земли, а также вторичные включения за счет оплавления поверхности метеорита и в результате окисления в земных условиях.

Таким образом, в результате этих исследований установлена ориентация систем капилляров относительно кристаллографических направлений и проведены относительные измерения угловых распределений треков тяжелых космических ядер.

Во-вторых, показано, что капилляры, заполненные

твердым веществом, и включения не подвергаются травлению и не приводят к появлению фоновых событий, имитирующих следы тяжелых заряженных частиц.

В-третьих, показано, что имеется возможность отличать следы тяжелых ядер от фигур травления капилляров.

В заключение авторы благодарят Г.Н.Флерова за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения. Авторы признательны Х.Б.Вику, Т.П.Жолудь, Л.Г.Кваша, Е.П.Кринову, Г.Курату, П.Пелласу, В.В.Татарскому за предоставленные образцы оливинов.

Литература

1. M. Maurette, P. Pellas, R.M. Walker. *Nature*, 204, 822 /1964/.
2. R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker, M. Maurette, G. Morgan. *J. Geophys. Res.*, 72, 355 /1967/.
3. Л.Л.Кашкаров, Л.И.Генаева, В.В.Мальшев, А.К.Лаврухина, *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 34, 2303 /1970/.
4. D. Lal. *Space Sci. Rev.*, 14, 3 /1972/.
5. P.B. Price, R.S. Rajan, E.K. Shirk. *Prog. of the Second Lunar Sci. Conf.*, v. 3, 2622. *The M.I.T. Press*, /1971/.
6. S. Krishnaswami, D. Lal, N. Prabhu, A.S. Tamhane. *Science*, 174, 287 /1972/.
7. P.B. Price, D. Lal, A.S. Tamhane, V.P. Perelygin. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 19, 377 /1973/.
8. Г.Н.Флеров, О.Отгонсурэн, В.П.Перельгин. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 39, 388 /1975/.
9. О.Отгонсурэн, В.П.Перельгин. *АЭ*, 37, 164 /1974/.
10. G.N. Flerov. *Internat. Conf. on Reactions between Complex Nuclei. Nashville, June 10-19 USA*, Ed. ORNL, v. 2, 324 /1974/.
11. В.П.Перельгин, Х.Б.Вик, О.Отгонсурэн. *Сообщение ОИЯИ. P13-8359*, Дубна, 1974.
12. E.J. Kobetich, R. Katz. *Phys. Rev.*, 170, 397 /1968/.
13. П.Н.Чирвинский. *Палласиты. М., Недра*, 1967.
14. В.И.Вернадский. *Бюллетень Центральной комиссии по метеоритам, кометам и астероидам Астрономического совета АН СССР, №31, стр. 1* /1943/.
15. В.Б.Татарский. *Кристаллооптика и иммерсионный метод. М., Недра*, 1965.

16. А.Н.Винчелл. *Оптическая минералогия. М., ИЛ* /1949/.
17. В.Д.Коломенский, Т.В.Пахомова, И.И.Шафрановский. *Метеоритика*, 33, 94 /1974/.
18. А.Д.Форжи. *Непосредственное наблюдение дислокаций в кристаллах. М., ИЛ* /1957/.
19. В.Н.Савельев, В.Д.Коломенский, И.А.Юдин. *Метеоритика*, 34, 77 /+975/.
20. J.H. Megrue, *J. of Geophys. Res.*, v. 73, No. 6, 2027, March 15, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 февраля 1976 года.