

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ, МИНЕРАЛОГИИ И РУДООБРАЗОВАНИЯ

На правах рукописи

В О Н Д А Р Ь Юлия Вадимовна

УДК 523.681

ТЕРМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ПАЛЛАСИТОВ  
ПО ДАННЫМ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ  
И ТРЕКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Специальность 04.00.02 - геохимия

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Киев - 1994

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Институте геохимии, минералогии и рудообразования  
НАН Украины.

Научные руководители: - академик НАН Украины Э.В.Соботович  
-доктор геолого-минералогических наук  
В.П. Семененко

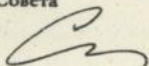
Официальные оппоненты: -доктор геолого-минералогических наук  
Мицкевич Б.Ф.  
- доктор геолого-минералогических наук  
Войткевич Г.В.

Ведущая организация - Институт геохимии и аналитической химии  
им.В.И.Вернадского РАН

Защита состоится 24 ноября 1994г. в 10.00 час. на заседании  
специализированного Совета Д 016.17.01 при Институте геохимии  
минералогии и рудообразования НАН Украины ( 252680, Киев, 142,  
пр.Палладина, 34)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМР НАН Украины  
Автореферат разослан " \_ " \_ " 1994г.

Ученый секретарь специализированного Совета  
доктор геолого-минералогических наук



В.П.Семененко

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00777148 (Y)

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальность темы. Исследование метеоритов является одним из наиболее эффективных методов познания как ранних этапов эволюции Солнечной системы, так и процесса эволюции метеоритного вещества в космосе. Среди большого числа метеоритов палласиты занимают особое положение, являясь связующим звеном между железными и каменными метеоритами. Структура, состав, скорости охлаждения металлической фазы родительских тел палласитов свидетельствуют об их генетической связи с железными метеоритами, тогда как наличие силикатной составляющей позволяет предположить их родство с каменными метеоритами.

Геохимические особенности палласитов, их первичная структура, отражающая физико-химические условия образования родительских тел, достаточно исследованы. В то же время отмечается недостаток хронологических данных и сведений о вторичных структурах, позволяющих реконструировать термическую и шоковую историю палласитов в космосе, то есть судить о фрагментации родительских тел и генетических взаимоотношениях между ними.

Целью работы является выяснение термической и шоковой истории родительских тел палласитов в космосе, используя данные геохимических, структурно-минералогических и трековых исследований.

Задачи исследования: 1. Обобщить данные по особенностям химического состава основных минералов палласитов. 2. Изучить признаки ударного метаморфизма в палласитах Брагин, Красноярск, Липовский Хутор, Марьялахти, Омолон, Albin, Brenham, Eagle Station и сопоставить их с известными экспериментальными оценками ударных давлений и температур нагрева. Основываясь на результатах минералого-геохимического анализа, дать качественную характеристику термической истории исследованных палласитов. 3. Оценить вклад всех возможных источников в общую плотность древних треков в фосфатах и рассчитать трековый возраст исследованных палласитов. Согласовать результаты трекового анализа с результатами минералого-геохимических исследований.

Фактический материал и методы исследований. Материалом для исследований послужили образцы палласитов, предоставленные Научно-Природоведческим музеем и КМЕТ НАН Украины (Красноярск, Брагин, Омолон), КМЕТ РАН (Липовский Хутор, Albin, Brenham), Лабораторией ядерных реакций ОИЯИ (Брагин, Марьялахти, Eagle Station). Структурно-минералогические, рентгеноструктурные исследования проведены в ИГМР НАН Украины; микроаналитические исследования - в Техническом центре НАН Украины, трековый анализ - в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ

(Г.Дубна) и ИГМР НАН Украины.

Научная новизна: 1. Детально изучены структурно-минералогические особенности 8 палласитов. 2. Оценена степень ударно-метаморфического преобразования, а также получена качественная характеристика термической истории палласитов в космосе. 3. Определен трековый возраст палласитов Брагин, Красноярск, Марьялахти, Омолон и Vreham.

Практическое значение: 1. Полученные результаты дополняют существующие сведения об эволюции вещества палласитов в космосе и могут быть использованы при чтении курса лекций по космохимии, метеоритике и планетологии. 2. Особенности термической истории исследованных палласитов могут служить критерием при установлении генетических взаимоотношений между отдельными представителями этого класса. 3. Оригинальные исследования по режиму травления фосфатов и выделению вклада всех возможных источников в общую плотность древних треков могут быть рекомендованы при работе с внеземным веществом.

Защищаемые положения: 1. По степени ударнометаморфического преобразования вещества исследованные палласиты умеренно метаморфизованы. Максимальные величины ударного давления соответствуют  $(250 - 450) \times 10^2$  МПа. 2. Возраст последнего интенсивного ударного/термического события палласитов Марьялахти -  $4.3 \pm 0.1$  млрд. лет; Брагин - 4.2-4.3 млрд. лет; Омолон -  $4.3 \pm 0.3$  млрд. лет; Vreham и Красноярск -  $4.2^{+0.4}_{-0.2}$  млрд. лет.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всесоюзных конференциях по метеоритике и космохимии (XIX, 1984г., г.Черноголовка Московской обл.; XXI, 1991г., г. Миасс); на Всесоюзных симпозиумах по проблемам космохимии и метеоритики (VIII, 1985г., п.Ясиня Закарпатской обл.; IX, 1988г., п.Ворзель Киевской обл.); на Всесоюзных школах-семинарах по твердотельным трековым детекторам и автордиографии (г.Одесса, 1989, 1991); на Рабочем совещании "Твердотельные трековые детекторы ядер и их применение" (г.Дубна, 1992); на заседании отдела ядерной геохимии и космохимии ИГФМ АН Украины (октябрь 1991г.) и заседании группы отделов ИГФМ АН Украины (июнь 1992г.); а также на семинаре сектора внеземного вещества и метеоритики ГЕОХИ РАН (февраль 1994). По теме диссертации опубликовано 11 научных статей и тезисов.

Автор признателен академику НАН Украины Соботовичу Э.В., доктору геол.-мин. наук Семененко В.П. за постоянное внимание и руководство, советы и замечания при обсуждении результатов. Автор выражает глубокую благодарность Перельгину В.П. (ЛЯР ОИЯИ) за активную помощь при проведении трековых исследований; своим коллегам Тertyчной Б.В. за

ценные замечания; Степченко С.Б., Иванову А.И., Гурненко И.В. за помощь при проведении рентгеноспектральных и электронномикроскопических исследований.

Построение работы: Работа объемом 118 страниц машинописного текста состоит из 4 глав, введения и заключения, содержит 57 таблиц, 58 рисунков, список литературы насчитывает 113 источников.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПАЛЛАСИТАХ

Палласиты, или оливиновые железо-каменные метеориты, состоят из монокристаллов или поликристаллических агрегатов оливина в матрице никелистого железа. Как второстепенные и акцессорные минералы в них присутствуют хромит, троилит, шрейберзит, фосфаты и низкокальциевый пироксен. В современной классификации палласитов (Явель 1956, 1958; Scott, 1977) на основании особенностей химического состава оливина и микросостава никелистого железа выделяют две группы палласитов: главную, в которую попадает большинство палласитов, и группу Eagle Station, включающую 3 метеорита: Eagle Station, Cold Bay, Itzawisis. Семь палласитов отнесены к аномальным: Phillips County, Rawlinna, Springwater и Zaisho занимают промежуточное положение по железистости оливина между главной группой и группой Eagle Station, а Павлодар, Brenham, Glorieta Mountain одинаковы в этом отношении с палласитами главной группы, но отличаются по составу металла.

Литературные данные по строению палласитов, химическому составу минералов, в частности, микросоставу никелистого железа, а также данные по скоростям охлаждения свидетельствуют об образовании палласитов в высоковосстановительных высокотемпературных равновесных условиях, что согласуется с гипотезой образования их магматическим путем на границе ядро-мантия двух (или более) дифференцированных родительских тел.

В работе рассмотрены минералого-геохимические критерии ударных событий, позволяющие дать качественную характеристику термической истории палласитов в космосе, а также основы и специфика трекового метода, позволяющего установить возраст последнего интенсивного ударного / термического события.

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования послужили образцы 8 палласитов, пять из которых (Брагин, Красноярск, Липовский Хутор, Марьялахти, Albin) - представители главной группы, один (Eagle Station) - представитель группы

Eagle Station, аномальный палласит Brenham и новый, еще не классифицированный, палласит Омолон.

Минеральный состав, структурные особенности палласитов были исследованы с помощью оптической и электронной микроскопии (Неофот, МИН - 9, РЭМ-100У). Химический состав оливина (54 точки), хромита (25 точек), пироксеиа (4 точки), фосфатов (16 точек), а также минералов металлической матрицы (около 100 точек) был определен на приборе JSXA-733 "Supergrob". Диагностика магнетита и вивианита была осуществлена с помощью рентгеноструктурного метода.

Кристаллы фосфатов были использованы для вычисления трекового возраста благодаря относительно высокому содержанию в них урана. В отличие от земных минералов, исследованные фосфаты накапливали треки от нескольких источников (треки 1. VH ядер (very heavy,  $20 < Z < 28$ ) галактических космических лучей (ГКЛ); 2. индуцированного деления ядер тяжелых элементов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) космическими частицами; 3. спонтанного деления  $^{238}\text{U}$ ; 4. спонтанного деления  $^{244}\text{Pu}$ ). Для корректного расчета необходимо было выделить вклад каждого из них.

Вклад в общую плотность древних треков первого источника оценивался как путем подсчета плотности треков в соседних с фосфатами кристаллах оливина (палласиты Брагин, Красноярск и Brenham), так и методом дифференциального отжига (палласиты Марьялахти, Омолон). Вклад второго источника был оценен по кривой зависимости полной скорости вынужденного деления космическими частицами от глубины /Damm et al., 1978/. Максимальный вклад третьего источника рассчитывался после вычисления концентрации урана в фосфатах, а избыток треков, оставшийся после вычета из общей плотности древних треков вклада всех перечисленных выше источников, отнесен к трекам спонтанного деления  $^{244}\text{Pu}$ .

Ниже приведены принципиальная схема трекового анализа (рис.1), таблица режимов травления и формула для вычисления трекового возраста (табл.1, формула 1).

### ГЛАВА 3. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАННЫХ ПАЛЛАСИТОВ

Проведенные минералогические исследования 8 палласитов позволили установить наличие в них оливина, камасита, тэнита, плессита, троилита, хромита и фосфидов. Аксессуарный низкокальциевый пироксен был обнаружен только в палласите Eagle Station, а фосфаты - в метеоритах Eagle Station,

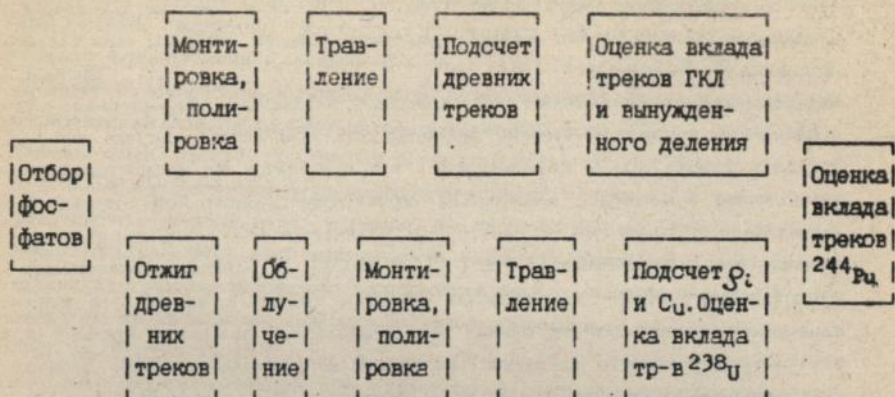


Рис.1. Принципиальная схема трекового анализа

Таблица 1. Травящие составы для минералов

Минерал	Травитель	Температура, °C	Время	Источник
Витлокит	HNO <sub>3</sub> , 5M	20	20 сек	Эксперимент
Стенфиддит	HNO <sub>3</sub> , 2%	20	30 сек	Эксперимент
Фаррингтонит	HNO <sub>3</sub> , 2%	20	15-20 сек	Эксперимент
Оливин	1мл H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : 1г щавел.кислоты: 40г ЭДТК:100 мл H <sub>2</sub> O:4.5г NaOH pH = 8.0	100	6 ч 12 час	Krishnaswami et al., 1971

Формула для расчета трекового возраста палласитов /Carver, Anders, 1976/

$$\Delta T = 1.198 \cdot 10^8 \cdot \ln \left[ \frac{5371}{\rho_{\text{Тр}} / \rho_{\text{Тр}_0}} \times \left( \frac{^{244}\text{Pu}}{^{238}\text{U}} \right)_0 \right] \quad (1)$$

где

Ттр. - интервал времени с момента сохранения треков в кристалле до настоящего времени (трековый возраст); T<sub>0</sub> - время образования родительских тел метеоритов, равное 4.6x10<sup>9</sup> лет; ΔT- T<sub>0</sub>-Ттр. - интервал времени охлаждения кристаллов.

(<sup>244</sup>Pu/<sup>238</sup>U)<sub>0</sub> - величина соотношения изотопов в момент времени T<sub>0</sub>.

Брагин, Красноярск, Марьялахти, Омолон и Brenham. Впервые для класса палласитов в никелистом железе палласита Омолон найдены кристаллы гексонита  $(Fe,Ni,Co)_{23}C_6$ .

Оливин является главной составляющей исследованных палласитов. Характерная его особенность - высокая степень однородности химического состава как в пределах зерна, так и по минералу в палласите. Из второстепенных компонентов в заметных количествах присутствует только  $MnO$ . Оливин 5 исследованных палласитов главной группы отличается небольшими вариациями фаялитового компонента (11.30-12.52 мол.%) и близкими значениями концентрации  $MnO$  в пределах группы (0.18-0.29 мас.%). По этим параметрам к нему близок оливин из аномального палласита Brenham и неклассифицированного палласита Омолон. Оливин палласита Eagle Station отличается как значением фаялитового компонента (в среднем 20.42 мол.%), так и содержанием  $MnO$  (0.12-0.16 мас.%). Спецификой химического состава оливина из палласитов является низкое содержание  $CaO$  (менее 0.05 мас.%). Отмеченные выше закономерности не противоречат данным предыдущих исследований.

Рентгеноспектральные исследования никелистого железа палласитов показали, что кроме основных элементов -  $Fe,Ni,Co$  - в его состав входят углерод и фосфор. Камасит большинства исследованных палласитов (кроме Eagle Station) имеет поликристаллическую структуру. Содержание никеля в пределах монокристаллов варьирует слабо, и только в камасите палласита Красноярск отмечен значительный градиент никеля от центра к периферии монокристалла (7.1-4.9 мас.%). По концентрации никеля камасит палласита Eagle Station не отличается от остальных исследованных палласитов (6.4-7.2 мас.%), однако содержание кобальта в нем значительно выше. Если величина соотношения  $Co/Ni$  в камасите 4-х палласитов главной группы (Брагин, Марьялахти, Липовский Хутор, Albin), а также Brenham и Омолон составляет 0.06-0.09 и немного выше в камасите палласита Красноярск - 0.09 - 0.12, то в камасите палласита Eagle Station она достигает 0.15.

Локальные повышения содержаний фосфора, коррелирующие с присутствием реликтов зерен фосфидов, отмечены в камасите палласитов Красноярск, Омолон, Albin, Brenham.

Тэнит во всех 8 палласитах имеет зональное строение и М-образный профиль распределения никеля. В палласите Марьялахти было обнаружено необычные по строению участки тэнита, имеющие 7 зон.

Как камасит, так и тэнит во всех исследованных палласитах содержит углерод, однако форма его нахождения не выяснена. (Хотя погрешность

определения углерода рентгеноспектральным методом велика, однако в контрольных измерениях на Fe-стандарте только в 3-4-х случаях из 10 его концентрация превышала нулевую отметку и достигала 0.3 мас.%. Постоянное превышение концентрации углерода в никелистом железе всех палласитов этой величины косвенно указывает на присутствие углерода). Только в палласите Омолон были обнаружены редкие зерна гексонита -  $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_{23} \text{C}_6$ . В этом же палласите отмечены 2 разновидности камасита - "светлая" и "темная" - с различным содержанием углерода (до 0,6 мас.% и более 1 мас.%, соответственно), что дает возможность сделать предположение о выносе углерода из углеродсодержащих минералов (например, гексонита) в результате ударного метаморфизма, аналогично выносу фосфора из фосфидов в камасит /Тертычная, 1992/.

Хромит был найден во всех палласитах, за исключением Красноярск и Bingham. Составы хромитов гомогенны от зерна к зерну в пределах палласита, а от палласита к палласиту наблюдаются вариации (мас.%: FeO-21.2-25.5; MgO-4.8-7.2; MnO - 0.3-0.8;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -60.2-68.8;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 1.1-9.0;  $\text{V}_2\text{O}_5$ - 0.4-0.6;  $\text{TiO}_2$ - 0.1-0.2). Температуры кристаллизации парагенезиса оливин-хромит, вычисленные по формуле Е.Джексона /Jackson, 1969/, лежат в интервале 1058-1300° С, характерном для большинства палласитов и железных метеоритов /Bunch, Keil, 1971; Bunch et al., 1970/. В палласите Марьялахти хромит встречается в кристаллах оливина в виде ксеноморфных включений, температура кристаллизации которых значительно ниже приведенных выше оценок (882° С), что указывает на их вторичную природу.

Фосфаты в исследованных палласитах встречаются крайне редко. Составы стенифилдита (палласиты Eagle Station, Брагин, Омолон), витлокита (палласит Марьялахти), фаррингтонита (палласит Красноярск) близки к составам одноименных минералов из других палласитов /Buseck, Holdsworth, 1977/. В работе показано, что отмеченные в палласите Красноярск фосфаты сложного состава (вивианит), образуются в результате окисления первичных фосфатов (фаррингтонита), а не фосфидов, как предполагали ранее /Buseck, Holdsworth, 1977/.

Акцессорный низкокальциевый пироксен был найден только в палласите Eagle Station. Химический состав его характеризуется более высокими содержаниями FeO (12.61-13.67 мас.%), CaO (0.26-0.57 мас.%) и более низкими MnO (0.12-0.19 мас.%) относительно состава одноименного минерала из палласитов главной группы /Buseck, 1977/.

Из сульфидных минералов в исследованных палласитах были найдены троилит и пенталандит. Кроме Fe, S в состав троилита входят в виде

микропримесей Ni (0.1-1.2 мас.%) и Cr (0.06-0.14 мас.%), повышенные содержания которых, наряду с поликристаллической структурой, являются индикаторами ударно-метаморфических процессов. В палласите Eagle Station троилит частично или полностью замещен пентландитом, для которого характерны высокие концентрации Ni (16.65-17.61 мас.%) и Co (3.67-3.76 мас.%). В палласите Красноярск пентландит зафиксирован в сульфидной жилке в кристалле оливина и на периферии оливина в округлом зерне, окруженном высоконикелистой каймой (Ni-53.08 мас.%). Для него также характерны высокие концентрации никеля (38.87-40.92 мас.%) и кобальта (7.38-0.93 мас.%). Высокая степень окисленности вышеупомянутых палласитов и морфологические особенности пентландита позволяют предположить его вторичную природу.

Фосфиды отмечены во всех исследованных палласитах и представлены идиоморфными зернами массивного шрейберзита (отсутствует в палласитах Красноярск и Eagle Station), гипидиоморфными и ксеноморфными зернами пограничнозернистого шрейберзита и микрорабдита. Химический состав обычен /Clarke, Goldstein, 1978/.

Во всех исследованных нами палласитах были выявлены признаки ударного метаморфизма в виде структур ударной деформации и нагрева.

Структуры ударной деформации проявляются в виде трещиноватости и/или брекчирования зерен оливина, хромита, шрейберзита, хрупких разрушений участков тэнита, поликристаллического строения троилита, а также в виде волнистого и мозаичного или только мозаичного погасания оливина,  $\alpha_2$ -фазы и неймановых линий (от 1 до 3 генераций) в камасите (табл.2). Волнистое и мозаичное погасание оливина (большинство палласитов) или мозаичное (палласит Красноярск) ограничивают величину максимального ударного давления интервалами (250 - 300)  $\times 10^2$  МПа - в первом случае и (250-450)  $\times 10^2$  МПа - во втором /Carter et al., 1968/.

Более широкий спектр структур нагрева: поликристаллическое строение камасита; вторичная грануляция камасита; микрографическая и мартенситовидная структуры плессита; структуры плавления тэнита, троилита и фосфидов.

Камасит во всех исследованных палласитах, за исключением Eagle Station, имеет поликристаллическое строение. Анализ морфологии монокристаллов дал возможность не только оценить температуру нагрева, но и выделить последовательность ударных событий. Согласно исследованиям Дж.Вуда /1967/, а также современным сведениям по металловедению /Хонникомб, 1972; Гуляев, 1980/, поликристаллическая структура камасита

Таблица 2.

## Признаки ударного метаморфизма в исследованных палласитах

Палласит	Структуры ударной деформации							Максимальная величина ударного давления, $10^2$ МПа
	Хрупкие				Пластические			
	оливин	хромит	шрейберзит	танит	оливин	камасит		
					погасание	$\alpha_2$ -фаза	неймановы линии	
Eagle Station	т., (б.)*	т., (б.)	-	-	волнистое и мозаичное	-	-	250 - 300
Брагин	т., (б.)	т., (б.)	т., (б.)	б.	" "	-	(1)**	" "
Красноярск	т.	не обн.	т.	-	мозаичное	-	(1)	250 - 450
Липовский Хутор	т., (б.)	т., (б.)	т.	-	волнистое и мозаичное	-	(2)	250 - 300
Марьялакти	т.	т.	т.	б.	" "	-	(1)	" "
Омолон	т.	т.	т.	-	" "	-	(1)	" "
Albin	(т., б.)	(т., б.)	(т., б.)	-	" "	(+)	(1)	" "
Brenham	т.	не обн.	т.	-	" "	-	3	" "

Примечание. \* - т., б. - трещиноватость и брекчирование зерен; \*\* - цифра указывает количество генераций. Скобки означают неравномерное проявление признака; прочерк - признак отсутствует; + - признак присутствует; не обн. - минерал в исследуемых образцах не найден.

образуется при нагреве предварительно деформированных монокристаллов до 400-450°С. Отмеченные в большинстве палласитов две генерации поликристаллического камасита - камасит с полигональной формой монокристаллов и округлые, неправильные зерна в пределах этих монокристаллов (зерна вторичной грануляции) - свидетельствуют как минимум о двух ударных/термических событиях, различающихся по скоростям охлаждения: медленной в первом случае и более высокой - во втором. Вторичная грануляция камасита могла быть вызвана и другими причинами, например, возникнуть в результате структурной реакции, известной как прерывистый распад твердого раствора /Гороховский, Заславская, 1986/. Однако, закономерности этой реакции не характерны для камасита исследованных палласитов. По-видимому, наиболее логичным объяснением наблюдаемых структур камасита является неоднократность ударных/термических событий.

Следует отметить, что в палласите Омолон поликристаллическая структура камасита проявляется неравномерно, что связано, по-видимому, с особенностями воздействия ударной волны. Реликты монокристаллов камасита в палласите Красноярск и полное их отсутствие в камасите палласита Eagle Station указывают на более высокие температуры ударного нагрева и более высокие скорости постударного охлаждения.

Микрографическая и мартенситовидная структуры плесситовых полей качественно подтверждают приведенные выше оценки температур нагрева - 400-450° С. Для палласитов Красноярск и Eagle Station, в связи с частичной регрессией зоны облачного тэнита в первом случае или полным ее отсутствием во втором, температуры нагрева выше (зона облачного тэнита исчезает при температурах выше 500° С). Дополнительными критериями ударного нагрева являются структуры частичного плавления участков зонального тэнита, отмеченные в палласитах Брагин, Марьялахти и Brenham, а также ксеноморфные зерна фосфидов, образующие структуры типа эвтектики с металлом.

Структуры плавления троилита (округлые включения и жилки в оливинах) эвтектика с никелистым железом - свидетельствуют об ударном нагреве локальных участков до 1000° С. Дендритовая структура зерен троилита из палласита Eagle Station указывает на чрезвычайно высокую скорость постударного охлаждения -  $10^3-10^4$ °К/Scott, 1982/

В таблице 3 суммированы признаки ударно-метаморфических преобразований в исследованных палласитах и выделены стадии их термической истории в космосе.

Таблица 3.

Структуры ударного нагрева и ударно-метаморфическая история палласитов

Палласит	Структуры ударного нагрева						Количество ударных событий	Характеристика ударных событий
	Камасит	Зональный тэнит		Троилит	Фосфиды			
		облачный тэнит	структура плесита**		структуры плавления	структуры плавления***		
Eagle Station	-	-	мк.	-	о.т., ж.т., (м.т.)	-	1	Ударное событие сопровождалось нагревом основной массы метеорита выше 500 <sup>0</sup> С, а в локальных участках до 1000 <sup>0</sup> С с последующим быстрым их охлаждением до температуры нагрева основной массы метеорита. Постударная скорость охлаждения родительского тела была высокой.
Красноярск	(3)	(+)	мк., мр.	-	о.т., ж.т.	(+)	2	Первичная скорость охлаждения родительского тела быстрая, о чем свидетельствуют отсутствие зерен массивного шрейберзита. 1. Ударное событие сопровождалось нагревом основной массы метеорита до 450-500 <sup>0</sup> С, а в локальных участках до 1000 <sup>0</sup> С. Постударная скорость охлаждения высокая. 2. Низкотемпературное ударное событие, (80<P<130)х10 <sup>2</sup> МПа.
Брагин	1,2	+	мк., мр.	+	о.т., ж.т.	-	3	1. Ударный нагрев до 400-450 <sup>0</sup> С, постударная скорость охлаждения медленная; 2. Повторный нагрев до 400-450 <sup>0</sup> С. В локальных участках температура нагрева достигала 1000 <sup>0</sup> С. Постударная скорость охлаждения более быстрая, чем после первого ударного события. 3. Низкотемпературное ударное событие, (80<P<130)х10 <sup>2</sup> МПа.

Продолжение табл. 3

Марьялахти	1,2	+	мк., мр.	+	о.т., ж.т.	-	3	- " -
Омолон	(1)	+	мк., мр.	-	о.т., ж.т.	(+)	3	- " -
Липовский Хутор	1,2	+	мк., мр.	-	о.т., ж.т.	-	4	- " - ++
Albin	(1,2)	+	мк., мр.	-	о.т., ж.т. м.т.	(+)	4	- " - ++
Brenham	1,2	+	мк., мр.; мв.	+	о.т., ж.т.	(+)	5	- " - ++

Примечание \* - 1 - монокристаллы характеризуются четкими границами и полигональными сечениями; 2 - внутри монокристаллов более мелкие зерна вторичной грануляции, которые характеризуются неровными границами и неправильной формой сечений; 3 - поликристаллический камасит с неправильной формой и извилистыми контурами сечений монокристаллов. Отмечается градиент никеля в пределах монокристалла.  
 \*\* - мк., мр., мв. - микрографическая, мартенситовидная и микровидманштетеновая структуры плессита.  
 \*\*\* - о.т. - округлые включения троилита в оливине; ж.т. - жилки в поликристаллических агрегатах оливина; м.т. - эвтектика металл- троилит.  
 + - признак присутствует; прочерк - признак отсутствует; скобки означают неравномерное проявление признака.  
 ++ - термические истории палласитов Липовский Хутор, Albin и Brenham имеют те же параметры и последовательность ударных событий, что и палласиты Брагин, Марьялахти и Омолон, отличаюсь только количеством низкотемпературных ударных событий.

Кристаллы фосфатов в достаточном для трекового анализа количестве были выделены из силикатной фракции палласитов Брагин, Красноярск, Марьялахти, Омолон и Vgenham. Результаты расчетов вклада каждого возможного источника в общую плотность древних треков, а также трековых возрастов этих палласитов представлены в таблице 4.

Общая плотность древних треков. Общая плотность древних треков в витлокитах из палласита Марьялахти варьировала от  $3.8 \times 10^6$  до  $1.40 \times 10^6$  см<sup>-2</sup>. Отмечается незначительная регрессия длин древних треков (в пределах 20%) относительно длин треков индуцированного деления (рис.2).

Древние треки в витлокитах из палласита Vgenham также отожжены (рис.3). Среднее значение общей плотности -  $(3.75 \pm 0.62) \times 10^5$  см<sup>-2</sup>.

Треки в кристаллах стенфиддита (палласиты Брагин и Омолон) представляют собой фигуры травления ромбической формы, в отличие от конусообразных треков в кристаллах витлокита, фаррингтонита и оливина. Общая плотность древних треков стенфиддитах из палласита Омолон варьирует от  $3.1 \times 10^6$  до  $4.7 \times 10^6$  см<sup>-2</sup>. Во многих кристаллах стенфиддита (и оливина) обнаружены высокие плотности трекообразных дислокаций ( $10^6 - 10^7$  см<sup>-2</sup>), затруднявших проведение трекового анализа этого палласита.

Древние треки в стенфиддитах из палласита Брагин представлены двумя генерациями. Треки первой генерации, плотность которых в отдельных участках достигала  $(5-7) \times 10^6$  см<sup>-2</sup>, - мелкие (<5мкм), округлой формы, неравномерно распределены по площади сечения зерен. Треки второй генерации - более крупные (10 - 12 мкм, близки к длинам треков индуцированного деления), ромбической формы, распределены равномерно. Их плотность -  $(1.05 \pm 0.05) \times 10^6$  см<sup>-2</sup>. По всей вероятности, мелкие треки появились в результате интенсивного отжига. Для последующих вычислений были использованы только неотожженные треки.

Древние треки в кристаллах фаррингтонита из палласита Красноярск также представлены двумя генерациями: треки первой генерации деформированы (конусы слегка изогнуты) и неравномерно распределены по площади просмотра. Их плотность не превышала  $px \times 10^4$  см<sup>-2</sup>. Треки второй генерации линейны, величина средней плотности -  $(1.72 \pm 0.08) \times 10^5$  см<sup>-2</sup>. Спектр их длин размыт и смещен относительно спектра длин треков от <sup>252</sup>Cf в коротковолновую область, что указывает на вероятный отжиг (Рис.4)

Треки VH ядер ГКА. Вклад этого источника в общую плотность древних треков в витлокитах из палласита Марьялахти и стенфиддитах из палласита Омолон был определен методом дифференциального отжига. Треки VH ядер ГКА в витлокитах исчезали в результате отжига при 320° С в

Таблица 4.

## Результаты трековых исследований палласитов

	Концентрация	Плотность треков, $10^6 \text{ см}^{-2}$							Трековый возраст, млрд. лет	
		Общая	VN	После отжига	Индукцированное	$^{236}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{244}\text{Pu}$	$(\text{Pu}/\text{U})_0$	$(\text{Pu}/\text{U})_0$
Палласит	$\text{U}, 10^{-9} \text{ г/г}$		ядер ГКЛ	ядер ГКЛ	деления		(за 4.6 млрд. лет)			
Марьялахти	51 $\pm$ 8	3.8-1.4		1.39 $\pm$ 0.04	<0.03	1.39 $\pm$ 0.04	0.11 $\pm$ 0.02	1.28 $\pm$ 0.04	4.4 $\pm$ 0.1	4.3 $\pm$ 0.1
Брагин	97 $\pm$ 13	1.05 $\pm$ 0.05	<0.01		не опр.	1.05 $\pm$ 0.05	0.22 $\pm$ 0.03	0.83 $\pm$ 0.06	4.3 $\pm$ 0.3	4.2 $\pm$ 0.4 -0.2
Красноярск	22 $\pm$ 5	0.17 $\pm$ 0.01	<0.01		<0.001	0.17 $\pm$ 0.01	0.05 $\pm$ 0.01	0.12 $\pm$ 0.01	4.3 $\pm$ 0.3	4.2 $\pm$ 0.4 -0.2
Омолон	67 $\pm$ 10	4.7-3.1		1.28 $\pm$ 0.07	<0.005	1.28 $\pm$ 0.07	0.10 $\pm$ 0.01	1.18 $\pm$ 0.07	4.4 $\pm$ 0.4 -0.2	4.3 $\pm$ 0.3
Brenham	39 $\pm$ 10	0.37 $\pm$ 0.06	<0.01		не опр.	0.37 $\pm$ 0.06	0.08 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.07	4.3 $\pm$ 0.3	4.2 $\pm$ 0.4 -0.2

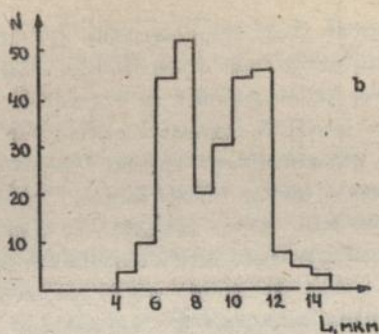
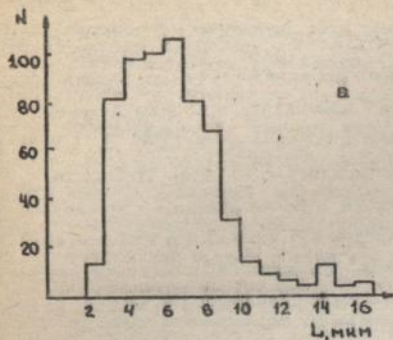


Рис.2. Спектры длин древних треков (а) и треков индуцированного деления  $^{235}\text{U}$  (б) в витлокитах из палласита Марьялахти

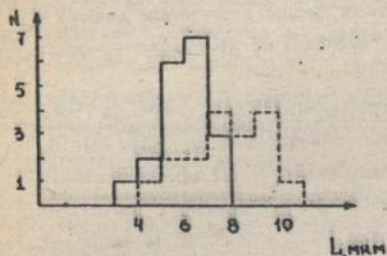


Рис.3. Спектры длин треков древних (сплошная линия) и индуцированного деления  $^{235}\text{U}$  (пунктирная) в витлокитах из палласита Breñhan

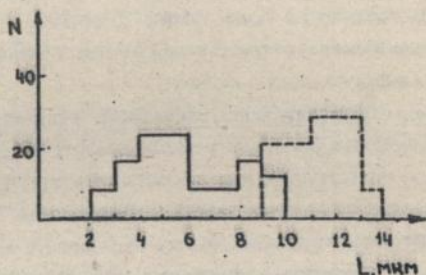


Рис.4. Спектры длин древних треков (сплошная линия) и треков от  $^{252}\text{Cf}$  (пунктирная) в фаррингтонитах из палласита Красноярск

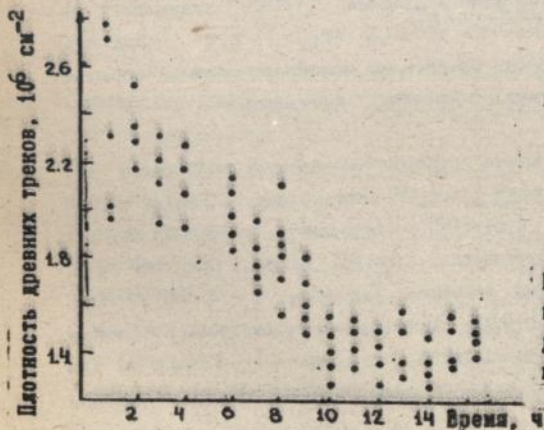


Рис.5. Результаты изотермического отжига ( $320^\circ\text{C}$ ) древних треков в витлокитах из палласита Марьялахти

течение 10 часов (варьировавшие от кристалла к кристаллу плотности древних треков после отжига во всех исследованных кристаллах были близки к величине  $(1.39 \pm 0.04) \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ , которая не изменялась при последующем отжиге (рис.5). В результате отжига 4-х зерен стенфилдитов ( $350^\circ \text{C}$ , 4 ч) длины некоторой части древних треков уменьшились ( $< 3 \text{ мкм}$ ). Небольшие вариации (между кристаллами) плотностей неотожженных треков  $(1.28 \pm 0.07) \times 10^6 \text{ см}^{-2}$  - указывают на отжиг треков VH ядер ГКА. В палласитах Брагин, Красноярск, Brenham плотности треков VH ядер ГКА, рассчитанные по соседним с фосфатами кристаллам оливина, были пренебрежимо малы и не учитывались в последующих вычислениях.

Треки индуцированного деления тяжелых ядер космическими частицами.  
Вклад этого источника, рассчитанный для палласитов Марьялахти (Ткосм.=180 млн.лет), Красноярск (Ткосм.=22 млн.лет) и Омолон (Ткосм.=78 млн. лет), не превышал 1 % от общей плотности древних треков. Отсутствие данных о космических возрастах палласитов Брагин и Brenham не позволило провести для них подобную оценку.

Концентрация урана, треки спонтанного деления ядер  $^{238}\text{U}$  и  $^{244}\text{Pu}$ .  
Концентрация урана в исследованных фосфатах варьировала от  $(98 \pm 13) \times 10^{-9}$  г/г (стенфилдиты палласита Брагин) до  $(22 \pm 5) \times 10^{-9}$  г/г (фаррингтониты палласита Красноярск). Полученные значения позволили вычислить максимальный вклад треков спонтанного деления ядер  $^{238}\text{U}$  за 4.6 млрд.лет, доля которого в фосфатах всех исследованных палласитов была невысока. Избыток треков, составлявший 70-90% от суммарной плотности треков спонтанного деления, отнесен к трекам  $^{244}\text{Pu}$ .

Трековый возраст. При отсутствии во всех исследованных палласитах большого количества треков спонтанного деления  $^{244}\text{Pu}$  указывает на ранний возраст ударных/ термических событий ( $T_{\text{tr}} > 4.0$  млрд.лет). Значения трекового возраста рассчитывались по модифицированной формуле (1) при двух наиболее вероятных значениях соотношения  $(^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U})_0 = 0.006$  и  $0.016$ .

Наиболее достоверные данные трекового анализа, полученные для палласитов Марьялахти (исследовано более 150 витлокитов) и Брагин (около 30 стенфилдитов), позволили провести сопоставление экспериментальных значений  $\Sigma T_{\text{tr}}$  с результатами теоретических расчетов таковых (Fleischer et al., 1967, формула 2) при различных значениях  $T_{\text{tr}}$  и  $(^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U})_0$ . Оказалось, что при  $(^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U})_0 = 0.016$  теоретически рассчитанные величины полностью совпадают с экспериментальными при  $T_{\text{tr}} = 4.3 \pm 0.1$  млрд.лет для палласита Марьялахти и  $4.2-4.3$  млрд.лет - для палласита Брагин. Значения

трековых возрастов палласитов (при  $(^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U})_0 = 0.016$ ) Красноярск и Brenham -  $4.2 \pm 0.4$  млрд. лет, Омолон -  $4.3 \pm 0.3$  млрд. лет. Значения трековых возрастов палласитов Марьялахти и Красноярск совпадают с их возрастными газодержаниями - 4.3 млрд. лет /Megue, 1968/.

Следует отметить, что полная или частичная сохранность древних треков указывает на мягкие условия существования родительских тел палласитов в космосе. Так, совпадение степени отжига длин древних треков в витлокитах и длин треков ВН ядер ГКЛ в оливинах из палласита Марьялахти /Перельгин, Кашкарова, 1979/, свидетельствует, что температура его нагрева на этапе космической экспозиции не превышала  $200^\circ\text{C}$ , а отсутствие регрессии длин древних треков 2-ой генерации в стенфилдитах из палласита Брагин - что средняя температура его родительского тела за период 4.3 млрд. лет не превышала  $7^\circ\text{C}$ .

Таким образом, в результате проведенных минералого-геохимических и трековых исследований палласитов были установлены: 1. минеральный состав и химические особенности минералов, присутствующих в исследованных палласитах; 2. признаки ударного метаморфизма - структуры ударной деформации и структуры нагрева, что позволило провести реконструкцию термической истории палласитов в космосе, то есть выделить последовательность ударных событий и, основываясь на известных экспериментальных оценках величин ударного давления и температур нагрева, оценить интенсивность ударного воздействия и сопровождающего его нагрева на каждой выделенной стадии; 3. трековый возраст для палласитов Брагин, Красноярск, Марьялахти, Омолон и Brenham.

#### ГЛАВА 4. ТЕРМИЧЕСКАЯ И УДАРНО-МЕТАМОРФИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ПАЛЛАСИТОВ

Все изученные метеориты содержат признаки ударно-метаморфических преобразований, которые однако не затушевывали первичные особенности их состава и строения.

Обобщая минералого-геохимические исследования, можно подчеркнуть следующее: равновесный состав минералов, высокие температуры кристаллизации парагенезиса оливин-хромит, присутствие зерен массивного шрейберзита свидетельствуют о чрезвычайно медленном охлаждении палласитов. Эти же закономерности характерны и для палласита Eagle Station. Однако химические особенности оливина и пироксена, указывающие на более окислительную обстановку их кристаллизации относительно таковой одноименных минералов палласитов главной группы, а также уникальный

состав никелистого железа /Scott, 1977, собственные исследования/, предполагают образование палласитов двух геохимических групп сходным путем, но в различных телах.

Сохранение первичных особенностей состава и строения исследованных палласитов указывает на умеренные параметры ударных воздействий. Суммируя признаки ударного метаморфизма, наиболее информативными из которых являются признаки деформаций в оливине, поликристаллическая структура троилита, наличие  $\alpha_2$ -камасита, максимальные величины ударных воздействий всех исследованных палласитов попадают в интервал  $(250-450) \times 10^2$  МПа. По интенсивности ударных воздействий и степени ударно-метаморфического преобразования вещества все исследованные палласиты относятся к умеренно метаморфизованным метеоритам.

Несмотря на близость степени ударно-метаморфического преобразования вещества палласитов, по особенностям их термической истории можно выделить три группы: 1. В первую попадают 4 палласита главной группы (Брагин, Липовский Хутор, Мар-Ялахти, Albin), аномальный палласит Vrengat и палласит Омолон, термические истории которых близки как по P,T-параметрам ударных воздействий, так и схеме последовательности ударных событий (табл.3). В космической истории палласитов этой группы было выделено два интенсивных ударных события, сопровождавшиеся повышением температуры основной массы родительского тела до  $400-450^\circ \text{C}$  (в локальных участках до  $1000^\circ \text{C}$ ), и одно или несколько низкотемпературных. Схема их последовательности такова: ударное событие - медленная скорость постударного охлаждения; ударное событие - более высокая скорость постударного охлаждения; низкотемпературное, низкоинтенсивное ударное событие (события). Максимальная величина ударного давления не превышает  $(250-300) \times 10^2$  МПа. 2. Палласит Красноярск (представитель главной группы) имеет иную термическую историю. Для него характерно более высокая (относительно палласитов первой группы) скорость первичного охлаждения родительского тела в интервале  $800 - 650^\circ \text{C}$ , а в его космической истории отмечается только одно интенсивное ударное событие, параметры которого относительно высоки: температура нагрева основной массы палласита поднималась выше  $500^\circ \text{C}$ , а максимальная интенсивность ударного воздействия достигала  $(250-450) \times 10^2$  МПа. 3. Палласит Eagle Station попадает в отдельную группу. В его космической истории также выделено одно интенсивное ударное событие  $((250-300) \times 10^2$  МПа), сопровождавшееся нагревом основной массы метеорита до  $500-800^\circ \text{C}$  (в локальных участках до  $1000-1200^\circ \text{C}$  с последующим чрезвычайно быстрым охлаждением до

температуры нагрева основной массы метеорита). Скорость охлаждения основной массы палласита, согласно отсутствию поликристаллического строения в камасите, была более высокой, чем палласитов рассмотренных выше групп.

Данные трековых исследований и литературные сведения по хронологии подтверждают правомерность такого вывода. Время последнего интенсивного ударного события палласитов первой группы: Марьялахти-  $4.3 \pm 0.1$  млрд. лет; Брагин-  $4.3-4.2$  млрд. лет; Омолси-  $4.3 \pm 0.3$  млрд. лет; Brenham -  $4.2^{+0.4}_{-0.2}$  млрд. лет. В пределах ошибки метода значения трековых возрастов этих метеоритов попадают в один интервал. Этот факт, согласующийся с выводами о близости их ударно-метаморфической истории, указывает на возможное существование единого родительского тела для этой группы палласитов.

Качественное отличие термической истории палласита Красноярск подтверждается данными трекового анализа. В фосфатах только этого палласита обнаружены деформированные треки, что согласуется с выводом о более интенсивном ударном событии, которое произошло  $4.2^{+0.4}_{-0.2}$  млрд. лет назад. Принимая во внимание минералого-геохимические особенности палласита (повышенные концентрации кобальта в никелистом железе, присутствие зерен фаррингтонита), характерные и для аномальных палласитов Rawlinna, Springwater, Phillips County и Zaisho, можно предположить генетическую связь между ними, то есть происхождение из единого родительского тела. Однако этот вывод требует дальнейших исследований.

Согласно литературным данным, последнее интенсивное ударное событие в истории палласита Eagle Station произошло значительно позже - 0.86 млрд. лет назад /Niemeyer 1983/. К сожалению, отсутствие как хронологических данных, так и сведений о структурно-минералогических особенностях двух других представителей этой группы не позволяет достаточно уверенно судить о степени схожести их термических историй, то есть ответить на вопрос, было ли термическое событие для палласитов группы Eagle Station общим и существовало ли для них единое родительское тело.

В рамках вывода о существовании единого родительского тела, например, для палласитов первой ударно-метаморфической группы, не укладываются литературные данные по космическим возрастам (20-220 млн. лет), а также отмеченные в каждом исследованном палласите специфические особенности низкотемпературных и низкоинтенсивных событий (неймановы линии, брекчирование минералов никелистого железа, различная степень отжига древних треков), происходивших в постударный период

истории. Для их объяснения, основываясь на результатах минералого-геохимических и трековых исследований, можно предложить следующую схему эволюции родительского тела этой группы палласитов:

1. Родительское тело было защищено мощной силикатной оболочкой, гасившей ударные воздействия. Представленные исследования палласита Марьялахти показали, что такие воздействия происходили еще на стадии формирования родительского тела. 2. Первое интенсивное, зафиксированное металлической матрицей всех палласитов этой группы, ударное событие произошло 4.6:4.3 млрд.лет назад. Оно сопровождалось нагревом палласитового слоя до 400-450° С и медленной, благодаря существованию силикатной оболочки, скоростью постударного охлаждения. 3. Последнее интенсивное ударное событие, сопровождавшееся частичной потерей силикатного слоя и, возможно, дроблением родительского тела, произошло 4.2-4.3 млрд.лет назад. Скорость постударного охлаждения была более быстрой, чем после предыдущего ударного события, что могло быть обусловлено как частичной потерей защитного слоя, так и более высокой скоростью охлаждения осколков. 4. Дальнейшая космическая эволюция осколков была индивидуальна.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные минералого-геохимические и трековые исследования палласитов Брагин, Красноярск, Липовский Хутор, Марьялахти, Омолон, Albin, Brenham и Eagle Station позволяют сделать следующие выводы:

1. По степени ударно-метаморфического преобразования вещества все исследованные палласиты умеренно метаморфизованы. Максимальные величины ударного давления соответствуют  $(250 - 450) \times 10^2$  МПа.

Во всех палласитах были выявлены структуры ударного метаморфизма, которые, однако, не затушевывали первичные особенности их состава и строения. На основании таких индикаторов ударного воздействия, как погасание оливина, поликристаллическая структура троилита, наличие  $\alpha_2$ -камасита установлено, что максимальные величины ударного давления, которые испытали исследованные палласиты в космосе, попадают в интервал  $(250-450) \times 10^2$  МПа. Сохранность первичных особенностей состава и строения исследованных палласитов, а также невысокие параметры ударных воздействий позволяют отнести их к умеренно метаморфизованным метеоритам.

Реконструкция термической истории, проведенная на основании установленных признаков ударного метаморфизма, позволила разделить исследованные палласиты на три группы, что предполагает существование для

каждой из них своего родительского тела.

2. Возраст последнего интенсивного ударного/термического события (трековый возраст) палласита Марьялахти -  $4.4 \pm 0.1$  млрд. лет; Брагин - 4.2-4.3 млрд. лет; Омолон -  $4.3 \pm 0.3$  млрд.лет; Brenham и Красноярск -  $4.2 \pm 0.4$  млрд.лет.

Присутствие в фосфатах всех исследованных палласитов большого количества треков спонтанного деления  $^{244}\text{Pu}$  указывает на ранний возраст ударных/термических событий ( $T_{\text{тр}} > 4.0$  млрд.лет). Согласно проведенным исследованиям, трековый возраст палласита Марьялахти  $4.4 \pm 0.1$  млрд. лет; Брагин - 4.2-4.3 млрд. лет; Омолон- $4.3 \pm 0.3$  млрд. лет; Brenham и Красноярск -  $4.2 \pm 0.4$  млрд.лет.

Трековый анализ подтверждает правомерность разделения исследованных палласитов на три группы. Предложена схема эволюции родительского тела палласитов первой из них: в интервале 4.6;4.3 млрд.лет - неоднократные ударные события, которые гасились мощной силикатной оболочкой; 4.2-4.3 млрд.лет назад -раскол родительского тела; дальнейшая индивидуальная эволюция осколков в космическом пространстве.

#### СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Семененко В.П., Бондарь Ю.В., Самойлович Л.Г. Структурно - минералогические особенности палласита Eagle Station //Метеоритика. 1990. Вып.49. С.70-74.
2. Соботович Э.В., Воробей Ю.В. Треки в метеоритах // Космическое вещество. Киев: Наук. думка. 1986. С.59-70.
3. Таран М.Н., Бондарь Ю.В., Мацюк С.С., Польшин Э.В. Спектроскопические исследования оливина и хромита из метеорита Марьялахти // Минерал.журн. 1989. Т.11, N5. С.80-87.4.
4. Таран М.Н., Мацюк С.С., Бондарь Ю.В. Оптические спектры и состав оливина и хромшпинелида из палласитов Марьялахти и Eagle Station // Геохимия. 1991. N4. С.587-596
5. Bondar J.V. Annealing Effect of Fossil Tracks in Whitlockite from the Marjalahti Pallasite // Сб. докл. Рабочего совещания "Твердотельные трековые детекторы ядер и их применения". Дубна. 1990. С.99 - 102.

Бондарь Ю.В. Термическая история палласитов по данным минералого-геохимических и трековых исследований.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 04.00.02 - геохимия. Институт геохимии, минералогии и рудообразования НАН Украины, г.Киев, 1994 г.

Проведенные минералого-геохимические и трековые исследования палласитов Брагин, Красноярск, Липовский Хутор, Марьялахти, Омолон, Albin, Brenham и Eagle Station позволяют сделать следующие выводы:

1. По степени ударно-метаморфического преобразования вещества все исследованные палласиты умеренно метаморфизованы. Максимальные величины ударного давления соответствуют  $(250-450) \times 10^2$  МПа.

2. Возраст последнего интенсивного ударного/термического события палласита Марьялахти -  $4.4 \pm 0.1$  млрд. лет, Брагин 4.2-4.3 млрд. лет, Омолон  $4.3 \pm 0.3$  млрд. лет; Brenham и Красноярск - 4.2 млрд. лет.

Bondar J.V. Thermal history of the pallasites based on results of mineralogical, geochemical and track investigations.

Dissertation for searching of academic degree of the Candidate of the geology-mineralogical sciences by speciality 04.00.02 - geochemistry. Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation NASU, Kiev, 1994.

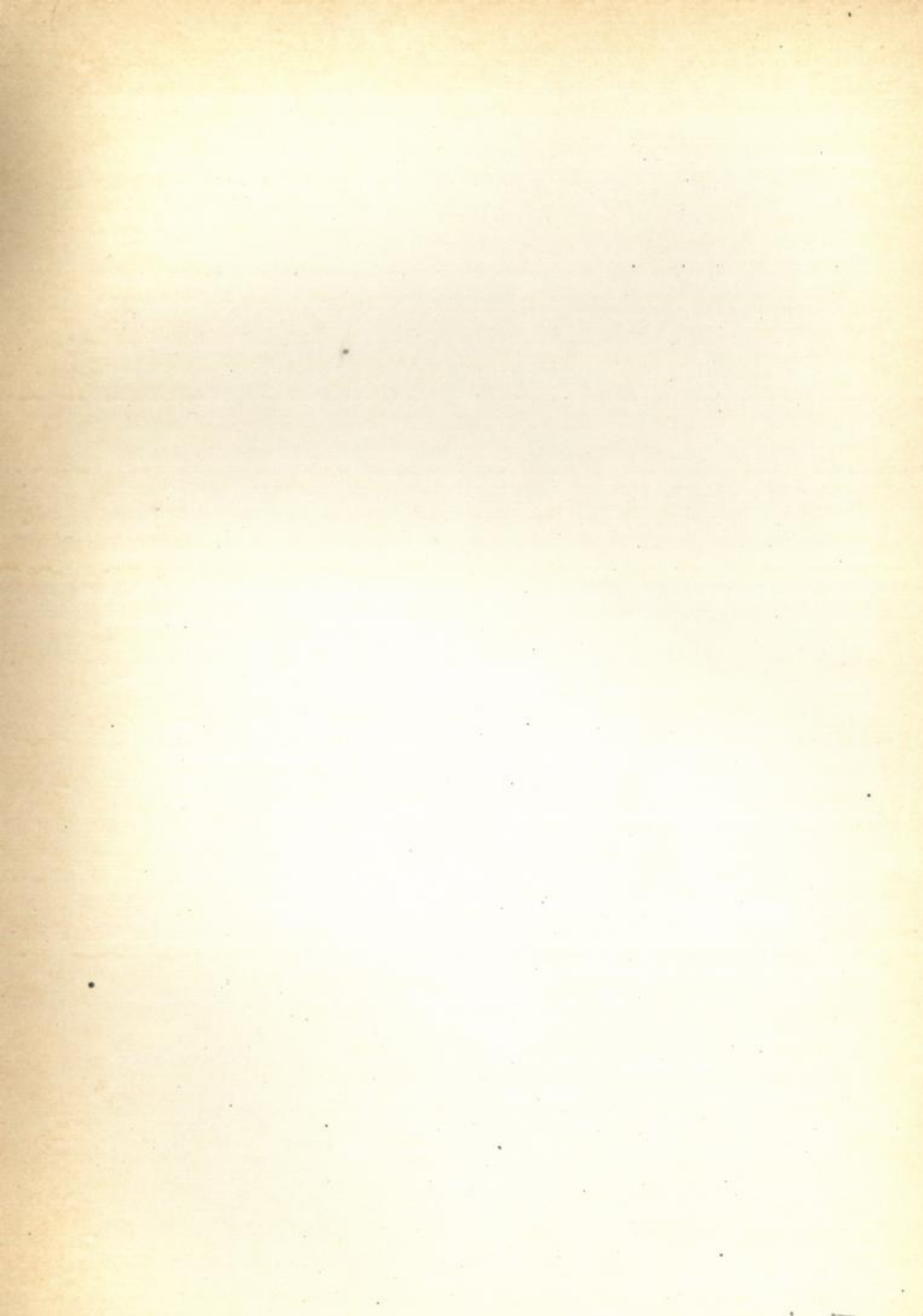
According to the carried out mineralogical, geochemical and track investigations of the Marjalahti, Brahin, Krasnojarsk, Lipovsky, Albin, Brenham and Omolon pallasites following conclusions are made:

1. The degree of shock-metamorphic alteration of all studied pallasites is moderate. The highest possible values of shock pressure correspond to  $(250-450) \times 10^2$  MPa.

2. The age of the last intensive shock/thermal event of the Marjalahti pallasite is  $(4.3 \pm 0.1) \times 10^9$  yr; Brahin -  $(4.2-4.3) \times 10^9$  yr; Omolon -  $(4.3 \pm 0.3) \times 10^9$  yr; Branham and Krasnojarsk -  $(4.2 \pm 0.3) \times 10^9$  yr.







AB 31.062

**AB 31.062**