

УДК 523. 681

Б.В.Тертычная, В.П.Семененко, Л.Г.Самойлович, Г.М.Колесов
Киев, ИГМР НАН Украины; Москва, ГЕОХИ РАН

ПРИЗНАКИ УДАРНОГО МЕТАМОРФИЗМА В ОСКОЛОЧНЫХ ОБРАЗЦАХ ГРУБОСТРУКТУРНОГО ОКТАЭДРИТА КААЛИ (1А)

Изучению минерального состава и строения грубоструктурного октаэдрита Каали посвящены работы В.П.Семененко с соавторами [5], И.А.Юдина [7, 8], А.А.Янвеля [9], условиям падения и морфологическим особенностям образцов – А.О.Аалоз [1], А.О.Аалоз и Р.Т.Тийрмаа [2], В.И.Коваля [3].

Известно, что кратерообразующий метеорит Каали принадлежит к давним находкам. Обнаружено 8 кратеров диаметром 12-40 м и один – диаметром 110 м. Установленный радиоуглеродным и палинологическим методами возраст кратеров оценивается в 3,5 тыс. лет [4]. Спецификой собранных образцов являются:

- 1) небольшие размеры и масса 0,5-2,0 г, часто 0,11 мг; так называемая “главная масса” – 28,2 г [2];
- 2) высокая степень окисленности (25-30%) для образцов, обнаруженных внутри кратера, и 10-20% – вне его [3];
- 3) осколочный характер образцов;
- 4) наличие образцов с различной степенью проявления признаков ударного метаморфизма [5].

Однако, несмотря на значительное изменение первичной морфологии образцов, их внутреннее строение и состав каких-либо существенных изменений в земных условиях не претерпели, что дает возможность получить сведения о характере ударно-метаморфического изменения вещества метеорита Каали при ударе о Землю.

В статье детально исследовано 16 осколочных образцов небольших размеров (от 2×8 до 5×11 мм) и массой, колеблющейся в пределах 0,77-2,36 г. Общая площадь исследованных шлифов составляет 3,24 см². Среднее сечение полезной площади образцов 2-5 мм, остальная часть подверглась окислению в земных условиях.

Бинокляр БСМ-10 применяли с целью исследования скульптуры поверхности образцов, наличия трещин и включений аксессуарных минералов. Отобраны монофракции оливина, троилита, когенита, графита, подтвержденные впоследствии рентгеноструктурными данными. После просмотра под бинокляром образцы были распилены перпендикулярно их удлинению или изгибу. Шлифовку осуществляли в двух взаимоперпендикулярных направлениях. С помощью рудного микроскопа МИН-9, используя метод травления никелистого железа (10%-й раствор в спирте, 5-10 сек.), диагностировали отдельные его фазы и аксессуарные минералы. Проводили также глубокое травление образцов в течение 3 часов для электронномикрос-копических исследований. Элементный состав отдельных фаз никелистого железа, шрейберзита и рабдита определен на приборе MAP-1. В

качестве эталонов использовали металлы высокой чистоты (99,9%), а при анализе на *S*, *Si* и *P* – естественные или искусственные бинарные соединения FeS_2 , SiO_2 и GaP соответственно. Точность измерения $\pm 1,5$ отн.%. Рентгеноструктурный анализ исследованных минералов осуществляли методом порошка, применяемым при анализе малых количеств вещества, на $FeK_{\alpha+\beta}$ -излучении в камере РКД-57,3 мм, которая калибрована по $NaCl$ или Si . Исследования глубоко протравленных образцов при помощи электронного микроскопа РЗМ-200 (Киевский национальный университет) позволили получить важную информацию о фазовых взаимоотношениях металла и ударно-метаморфических структурах. Образцы исследовали без напыления. Нейтронноактивационные исследования проведены в лаборатории НА-анализа ГЕОХИ РАН.

Форма образцов в основном плоская, со сглаженными краями. Встречаются образцы, в которых развиты структуры хрупких (трещины) и пластических (изгиб образцов, структуры скольжения) деформаций. Некоторые образцы имеют четко видимую пластинчатость – структурный элемент деформаций скольжения (рис. 1).



Рис. 1. Пластинчатое строение осколочного образца метеорита Каали (под биноклем)

Изучение внутреннего строения и вещественного состава позволило выявить некоторые закономерности в перераспределении элементов в минералах из образцов, подвергшихся различной степени ударно-метаморфического воздействия, установить его относительную величину и температуру ударного нагрева.

Под микроскопом в образцах метеорита Каали наблюдались крупные зерна шрейберзита; травление ниталом дало возможность обнаружить камасит, тэнит, их тонкое прорастание – плессит, а также зерна рабдита и микрорабдита. Рентгеноструктурным методом установлены когениит, Fe_2C - и FeC -соединения, графит, троилит и оливин, слагающие полиминеральные включения (рис. 2), характерные для представителей химических групп *IAB* железных метеоритов. При детальном просмотре под биноклем установлено, что троилит, графит, когениит, Fe_2C - и FeC -соединения, а также оливин представляют собой тесное прорастание минералов, которые трудно поддаются разделению.

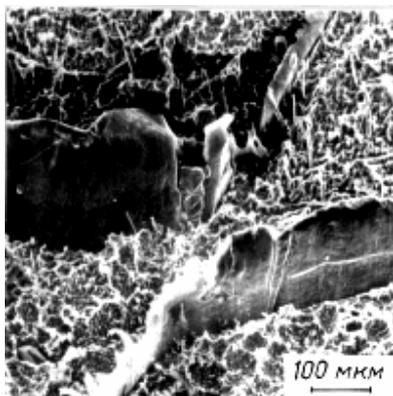


Рис. 2. Полимнеральное (троилит-графит-когенит-оливин) включение в осколочном образце метеорита Каали (под бинокляром)

По признакам ударного метаморфизма исследованные образцы разделены на три группы: слабо-, средне- и сильноизмененные.

Камасит – основной минерал метеорита Каали – в большинстве образцов разбит трещинами, идущими обычно от края образца по плоскостям скольжения и заполненными гидроксидами железа. На макро- и микроуровнях отмечается изгиб пластин камасита различной интенсивности. Камасит – поликристаллический минерал, границы и форма монокристаллов его имеют разные характеристики, обусловленные различной степенью ударно-метаморфического воздействия. Так, в слабоизмененных образцах крупные, близкие к изометричным монокристаллы имеют обычно четкие прямые границы. В среднеизмененных образцах поликристаллический камасит характеризуется различной величиной монокристаллов. В некоторых из них отмечено две генерации: крупные, более четкие содержат мелкие слабовыраженные монокристаллы, что свидетельствует о двукратном нагреве родительского тела. Во всех среднеизмененных образцах форма монокристаллов неправильная – они удлинены в соответствии с вытянутостью образцов и имеют извилистые границы. В сильноизмененных образцах поликристаллизация камасита сохранилась лишь в отдельных участках. Форма монокристаллов в них более искажена, чем в среднеизмененных образцах. Так, реликтовые участки поликристаллического камасита имеют различные размеры монокристаллов, сильно вытянутых и с зазубренными границами.

По наличию поликристаллического камасита, размерам, форме отдельных монокристаллов и конфигурации их границ можно судить о температуре ударного нагрева, которому подвергся метеорит Каали, и о скорости охлаждения образца. Перекристаллизация металла, проявившаяся в поликристалличности камасита, позволяет говорить о температуре ударного нагрева, не превышающей 400°C [11].

В различных по степени измененности образцах в камасите присутствуют в разной мере выраженные признаки пластической деформации – структуры скольжения, которые имеют вид отдельных или системы прерывистых параллельных линий с расположенными в них мелкими зернами рабдита. Кристаллизуясь по определенным кристаллографическим плоскостям камасита, они создают ослабленные зоны, способствующие прохождению ударных волн и развитию структур скольжения. В камасите из слабоизмененных образцов структуры скольжения отсутствуют или слабо проявлены на периферии, в среднеизмененных

образцах они представлены нечеткими системами прерывистых параллельных линий, направление которых соответствует удлинению образца, а в сильноизмененных образцах – это когерентные системы, интенсивность проявления которых значительно выше.

Рентгеноспектральный анализ состава камасита из образцов, подвергнутых различному ударному воздействию, указывает на прямую зависимость содержания *Ni* в камасите от степени ударно-метаморфического изменения осколочных образцов метеорита Каали (табл. 1). Камасит из слабоизмененных образцов содержит 4,3-4,9 мас.% *Ni*, из среднеизмененных – 6,1-7,8 мас.% *Ni*, из сильноизмененных – от 5,8 в отдельных точках до 13,6-16,1 мас.% *Ni*. Повышение содержания *Ni* в камасите по мере увеличения степени ударно-метаморфического воздействия свидетельствует о перераспределении в нем главных компонентов вследствие распада кристаллов рабдита [5]. Распад фосфидов и отсутствие повышенных количеств фосфора в камасите, вероятнее всего, связано с их выносом из-за земного выветривания.

Таблица 1

Элементный состав камасита из образцов метеорита Каали, подвергшихся различной степени ударного воздействия, мас. %

Элемент	Слабоизмененные				Среднеизмененные					
	Образец 16			По Семенову и др., 1982	Образец 2			По Семенову и др., 1982		
	1	2	3		1	2	3	1	2	
<i>Fe</i>	92,6	94,9	95,1	92,7	92,8	91,9	91,6	91,6	92,4	
<i>Ni</i>	6,7	4,9	4,3	6,5	6,1	7,3	7,8	6,4	6,1	
<i>Co</i>	0,6	0,3	0,5	0,8	0,7	0,6	0,3	0,5	0,4	
<i>Cr</i>	0	0	0	сл.	сл.	0	сл.	0	0	
<i>Cu</i>	0	0	0	0,1	0,1	0	0	-	-	
<i>P</i>	0	сл.	0	0	сл.	0	0,1	0	0	
<i>Si</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	
Сумма	99,9	100,1	99,9	100,1	99,7	99,8	99,8	99,0	98,9	

Элемент	Сильноизмененные		
	Образец 5		
	1	2	3
<i>Fe</i>	83,5	85,7	92,9
<i>Ni</i>	16,1	13,6	5,8
<i>Co</i>	0,2	0,5	0,9
<i>Cr</i>	0	0	сл.
<i>Cu</i>	0	сл.	0,1
<i>P</i>	сл.	сл.	0
<i>Si</i>	0	0	0
Сумма	99,8	99,8	99,7

Неоднородность распределения *Ni* в осколочных образцах метеорита Каали в зависимости от степени их ударно-метаморфического преобразования свидетель-

стует о том, что корректное определение химической группы метеорита по *Ni* возможно только в наименее измененных образцах, которые характеризуются его низкими содержаниями. Классификация метеорита Каали [9] была проведена по образцам, содержащим 6,45 и 8,32 мас.% *Ni*, что соответствует среднеизмененным образцам. С целью проверки химической группы метеорита и выяснения роли ударного метаморфизма в перераспределении микроэлементов между минералами железных метеоритов было проведено НА-исследование образцов, которые претерпели различную степень ударно-метаморфического преобразования при ударе о Землю. Результаты исследования показали стабильность микроэлементного состава измененных в различной степени образцов и подтвердили принадлежность метеорита Каали к химической группе *IA* (табл. 2).

Таблица 2

Содержания *Ni*, *Co* и микроэлементов в образцах метеорита Каали различной степени измененности (*Ni*, *Co* – мас. %, остальные – мкм/г)

Элемент	Слабоизмененный образец 16	Сильноизмененный образец 5
<i>Ni</i>	9,9	8,1
<i>Co</i>	0,43	0,44
<i>Ga</i>	78,0	71,0
<i>Au</i>	1,6	1,55
<i>As</i>	19,1	17,6
<i>Cu</i>	205,0	340,0
<i>Ir</i>	2,5	2,7
<i>Os</i>	2,4	2,4
<i>W</i>	1,2	1,1
<i>Pt</i>	9,1	8,9
<i>Ag</i>	15,7	55,1
<i>Na</i>	38,0	22,0

Примечание. Точность измерения *Ni*, *Co*, *As*, *Ir*, *Os*, *W* $\pm 5-10\%$, для остальных элементов $\pm 20\%$.

Тэнит встречается в виде единичных пластин размером (10-20-40)×(1000-2000) мкм, вытянутых параллельно структурам скольжения в камасите. Такое ограниченное распространение, скорее всего, объясняется небольшой площадью исследованных образцов; возможно, раскол упавших на Землю фрагментов произошел по фазовым границам минералов. В слабоизмененных образцах тэнитовые полосы имеют форму выклинивающихся дуг, расположенных когерентно. В некоторых среднеизмененных образцах тэнит образует прерывистые, изогнутые в соответствии с изгибом образца узенькие полосы, изменяющиеся по ширине (рис. 3).

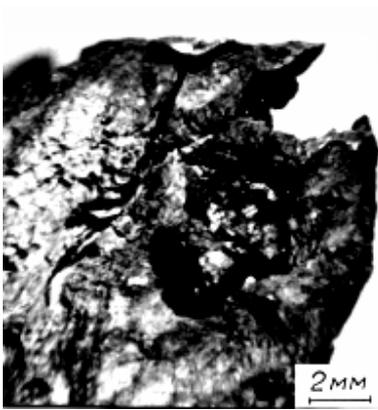


Рис. 3. Пластинка тэнита с зазубренными краями в камасите (метеорит Каали; глубокое травление 10%-ным ниталом, под электронным микроскопом)

В одном из сильноизмененных образцов реликты пластинок тэнита с зазубренными краями обнаружены среди гидроксидов железа.

Плессит в слабоизмененных образцах имеет микровидманштеттенное и игольчатое строение, а в наиболее измененных – микрографическое. Наличие плессита с микрографическим строением свидетельствует о том, что температура ударного нагрева не превышала 450°C.

Фосфиды представлены шрейберзитом, рабдитом и микрорабдитом.

Шрейберзит в виде крупных зерен размером 600×30 мкм, 200×80 мкм и менее приурочен к границам монокристаллов камасита и имеет неправильные угловатые формы. В соответствии с увеличением степени ударно-метаморфического воздействия на метеоритное вещество в зернах шрейберзита отмечены структуры хрупких и пластических деформаций (рис. 4).



Рис. 4. Зерно шрейберзита в камасите, разбитое трещинами (метеорит Каали; глубокое травление 10%-ным ниталом, под электронным микроскопом)

Зерна шрейберзита трещиноваты, брекчированы, смещены по плоскостям скольжения в камасите, изогнуты (рис. 5).

Состав зерен шрейберзита в основном стабильный по содержанию фосфора независимо от степени изменения образца, в то время как с увеличением степени ударно-метаморфического воздействия отмечается понижение концентрации *Ni* и увеличение неоднородности состава по *Ni*. При этом вариации *Ni* наблюдаются не

только между зернами, но и в пределах зерна – от центра к периферии (табл. 3). Анализ содержаний *Ni* в различных по степени изменения образцах показывает, что с увеличением ударно-метаморфического воздействия происходит значительный вынос *Ni* из шрейберзитовых зерен в камасит. Сохранность последних свидетельствует о том, что температура ударного нагрева не достигла 850°C ни в одном из изученных осколочных образцов.

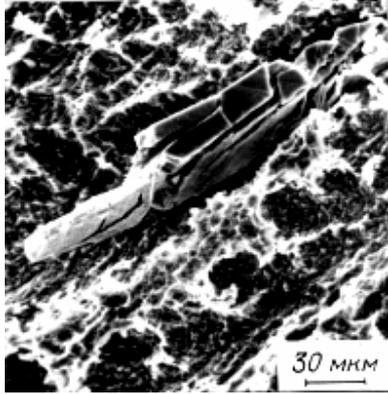


Рис. 5. Интенсивный изгиб зерен шрейберзита (метеорит Каали; протравлено 10%-ным нитаном, в отраженном свете, без анализатора)

Таблица 3

Элементный состав шрейберзита из метеорита Каали, мас.%

Элемент	Слабоизмененные				Среднеизмененные				
	Образец 16				Образец 1				
	Зерно1	Зерно2	Зерно3		Зерно1		Зерно2		
	центр	центр	центр	край	край	центр	край	центр	край
<i>Fe</i>	40,4	38,6	38,6	38,6	46,8	47,2	46,4	51,5	50,8
<i>Ni</i>	43,6	44,9	45,1	44,5	37,8	37,4	38,1	32,7	33,2
<i>Co</i>	0,8	0,9	1,1	1,0	0	сл.	0	0,3	0,2
<i>P</i>	15,2	15,2	15,4	15,4	15,0	15,0	15,0	15,1	15,1
<i>S</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма	100,0	99,6	100,2	99,5	99,6	99,6	99,5	99,6	99,3

Элемент	Среднеизмененные			Сильноизмененные	
	(Семенов и др., 1982)			Образец 17	
	Зерно 1	Зерно 2	Зерно 3	Зерно1	
				центр	край
<i>Fe</i>	46,3	46,2	45,2	54,5	56,0
<i>Ni</i>	39,2	40,3	38,7	30,4	28,3
<i>Co</i>	0	0	0,13	0	0
<i>P</i>	15,1	15,0	15,0	15,1	15,1
<i>S</i>	0	сл.	сл.	0	0
Сумма	100,6	101,5	99,2	100,0	99,4

Рабдит, в основном, образует идиоморфные, нитевидные и гипидиоморфные зерна, реже отмечены ксеноморфные реликты фосфидов. С увеличением степени ударно-метаморфического изменения образцов отмечается распад кристаллов раб-

дита и соответствующее изменение их морфологии: от идиоморфных до ксеноморфных зерен, аналогично описанным нами в метеорите Сихотэ-Алинь [6]. Идиоморфные зерна рабдита в виде мелких квадратных и прямоугольных сечений размером 20×20 и 20×10 мкм характерны для образцов, подвергшихся слабому ударному метаморфизму, и приурочены к системе секущих образцов трещин. Отмечается брекчированность по спайности (рис. 6).

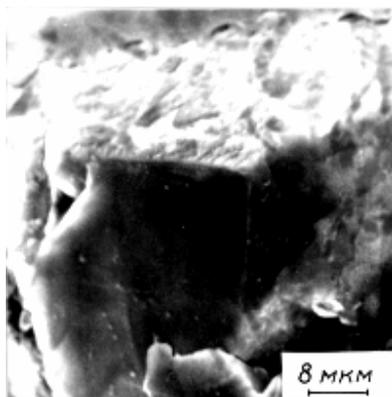


Рис. 6. Трещиноватые кристаллы рабдита в камасите (метеорит Каали; протравлено 10%-ным титаном, в отраженном свете, без анализатора)

Гипидиоморфные зерна рабдита преобладают в среднеизмененных образцах. Для них характерны извилистые контуры, часто отмечаются следы интенсивного брекчирования, частичного нагрева, пластических и хрупких деформаций. Ксеноморфные зерна фосфидов и структуры, напоминающие эвтектику, присущи сильноизмененным образцам, что свидетельствует о повышении температуры выше области существования рабдита (600°C). В незначительных количествах нитевидные формы рабдита размером 200×10 мкм обнаружены лишь в одном слабоизмененном образце. Сохранность отчетливых квадратных и прямоугольных сечений рабдита в наименее измененных образцах свидетельствует о том, что ударный нагрев не превышал температуры 400°C , а сохранившиеся единичные идиоморфные зерна – что после образования метеорит не подвергся ударному нагреву выше температуры 600°C . Незначительные размеры зерен рабдита не позволили определить их состав.

Микроабдит присутствует во всех образцах в ограниченных количествах и распространен неравномерно от образца к образцу. Это дает возможность утверждать, что основная масса метеорита Каали претерпела нагрев до температуры 400°C , а локальные участки прогрелись до температуры 800°C .

Углеродсодержащие минералы, диагностированные рентгеноструктурным методом, представлены когенимом, Ni_3C , Fe_2C - и FeC -соединениями, а также графитом. Они обнаружены только на поверхности самого крупного осколочного образца в полиминеральном шаровидном включении размером 3×5 мм. Отсутствие этих аксессуарных минералов в других осколочных образцах не позволило определить характер их изменения в зависимости от степени ударно-метаморфического воздействия.

Когенит черного цвета с жирным блеском, массивный, является одним из компонентов полиминеральных включений и, кроме того, заполняет протяженные трещинки шириной до 1-2 мм.

Fe_2C - и FeC -соединения представляют собой сажистое землистое вещество и установлены нами впервые.

Графит матовый темно-серый до черного, имеет тонкую пластинчатость, иногда образует корочку. В одном из образцов определено $\sigma C = (-9,42)\%$ (аналитик Е.Н.Иванов).

Троилит и оливин также входят в состав полиминеральных включений. Троилит массивный, с желтым оттенком, дает ровные сколы. Оливин медово-желтый до светло-коричневого, наблюдается в непосредственном контакте с углеродосодержащими минералами, имеет волнистое погасание, что свидетельствует об ударных нагрузках в пределах $(150-200) \times 10^2$ Мпа. Два обломка зерен оливина имеют параллельную штриховку и индукционные грани, хорошо видимые на электронном снимке (рис. 7). Их размеры составляют 200-250 мкм.

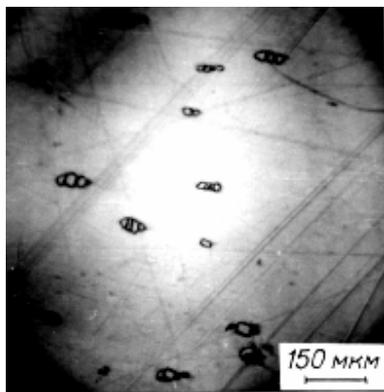


Рис. 7. Кристалл оливина из полиминерального включения в метеорите Каали (под микроскопом)

Оливин содержит (мас.%): $SiO_2 - 41,06$; $MgO - 53,50$; $FeO - 4,38$; $Cr_2O_3 - 0,04$; $MnO - 0,23$; Fa (среднее по 4 анализам) – 4,23 мол.%. Согласно литературным данным, оливин из силикатных включений железных метеоритов группы *IAB* содержит 1-8 мол.% фаялитового компонента [10].

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Среди исследованных образцов установлено три группы, различающиеся по степени проявления признаков ударно-метаморфических изменений, которые они испытали при ударе о Землю: слабоизмененные, среднеизмененные, сильноизмененные. Слабоизмененные образцы претерпели ударный нагрев не выше температуры $400^\circ C$ (идиоморфные зерна рабдита), среднеизмененные – не выше $450^\circ C$ (микрорафический плессит), сильноизмененные образцы претерпели ударное воздействие не менее 80×10^2 Мпа и сопровождающий нагрев до температуры $600^\circ C$ (ксеноморфные зерна рабдита и структуры, напоминающие эвтектику).

2. Степень ударно-метаморфического воздействия не повлияла на микроэлементный состав, а лишь обусловила перераспределение главных компонентов – *Ni* и *P* – между фосфидами и никелистым железом, а также структурные изменения (появление хрупких и пластических деформаций в шрейберзите и рабдите,

структур скольжения в камасите, изгиб тэнитовых пластинок, частичный распад зерен рабдита, превращение микрооктаэдритового плессита в микрографический).

3. Для корректной классификации железных метеоритов по *Ni* следует использовать только не измененные или слабо измененные ударным метаморфизмом образцы. Классификация сильноизмененных образцов должна основываться на микроэлементном составе.

4. Впервые в полиминеральных (троилит-графит-когенит-оливин) включениях рентгеноструктурным методом диагностированы Fe_2C - и FeC -соединения.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам КМЕТ Эстонии Ю.Кестлане и Р.Тийрмаа за предоставленные образцы, И.С.Козлову и А.В.Клейменову (Киевский национальный университет), Л.Н.Егоровой (ИГМР НАН Украины), Ю.А.Люль (ГЕОХИ РАН) за проведенные электронномикроскопические, рентгено-структурные и НА-исследования.

1. *Аалоз А.О.* Ударные метеоритные кратеры // Метеоритика. 1972. № 31.
2. *Аалоз А.О., Тийрмаа Р.Т.* Метеоритное вещество в мелких кратерах Каали и в их окрестностях // Метеоритика. 1982. № 41.
3. *Коваль В.И.* О массе и составе метеорита Каали //Астроном. вестн. 1974. **8**, № 3.
4. *Пиррус Э.А.* Метеоритные кратеры Эстонии // Природа. 1988. № 11.
5. *Семенов В.П., Самойлович Л.Г., Козлов И.С.* Признаки ударного метаморфизма в метеорите Каали // Метеоритика. 1982. № 41.
6. *Семенов В.П., Самойлович Л.Г., Тертычная Б.В.* Изменение зерен рабдита под влиянием повторного нагрева // Минерал. журн. 1982. **4**, № 3.
7. *Юдин И.А.* К минералогии метеорита Каали // Метеоритика. 1968. № 28.
8. *Юдин И.А.* Микроскопическое исследование вторичных минералов метеоритов // Метеоритика. 1970. № 30.
9. *Явнель А.А.* К вопросу о составе метеорита Каалиярв // Астроном. вестн. 1976. **10**, № 2.
10. *Bunch T.E., Keil K., Olsen E.* Mineralogy and petrology of silicate inclusions in iron meteorites // Contribs Mineral. Petrol. 1970. Vol. 25.
11. *Wood I.A.* Chondrites: Their metallic minerals, thermal histories and parent planets // Icarus. 1967. **6**, N 1.

B.V.Tertychnaya, V.P.Semenenko, L.G.Samojlovich, G.M.Kolesov

THE EVIDENCES OF SHOCK METAMORPHISM IN FRAGMENTS OF KAALIJARY COARSE OCTAHEDRITE (IA)

The results of complex researches of 16 fragments of Kaalijarv coarse octahedrite (IA) are given, that allowed to divide three groups of samples on the degree of shock: weakly alternated, middle alternated and heavily alternated. The evidences of shock metamorphism in every group on the elemental, mineral and structural levels are established.

Стаття надійшла до редколегії 28.06. 1993