

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И ФИЗИКИ МИНЕРАЛОВ

На правах рукописи

Т Е Р Т Ы Ч Н А Я Богдана Васильевна

УДК 523.661

СТРУКТУРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ
В ПРОЦЕССАХ УДАРНОГО МЕТАМОРФИЗМА

Специальность 04.00.20 – минералогия,
кристаллография

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

— Киев — 1992

Работа выполнена в Институте геохимии и физики минералов

АН Украины.

Научные руководители: - член-корреспондент АН Украины Э.В.Собо-
тович

- доктор геолого-минералогических наук
В.П. Семененко

Специальные оппоненты: - доктор геолого-минералогических наук
Вальтер А.А.

- доктор геолого-минералогических наук
Вдовякин Г.П.

Выдающая организация - Львовский госуниверситет им. Ив.Франко,
геологический факультет, кафедра минера-
логии

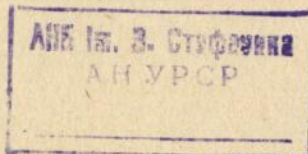
Защита состоится " 24 " декабря 1992г. в 10.00 час. на за-
седании специализированного Совета Д 016.17.01 при Институте ге-
охимии и физики минералов АН Украины (252680, Киев, 142, пр.
Палладина, 34)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГФМ АН Ук-
раины

Автореферат разослан *13 ноября* 1992г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
доктор геолого-минералогических наук

С
В.П.Семененко



ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современные исследования в области метеоритики, космохимии и планетологии свидетельствуют о существенной роли ударного метаморфизма в формировании и преобразовании космического вещества. Как указывают А.К.Лаврухина и З.К.Мильникова /1984, с.64/, "ударные эффекты" интересны тем, что они сохранили "следы космических событий в течение длительного времени - от момента конденсации первичных пылинок ... до падения метеоритных тел на Землю". Структуры ударного метаморфизма, включающие структуры деформации и нагрева, являются вторичными. В отличие от первичных структур, которые отражают физико-химические условия образования родительских тел в космическом пространстве, вторичные структуры содержат обширную информацию о космической и земной эволюции метеоритного вещества. Изучение признаков ударного метаморфизма в железных метеоритах позволяет получить сведения о характере структурно-минералогических и химических изменений метеоритного вещества как на ранних этапах развития малых дифференцированных тел Солнечной системы, так и на современном этапе в результате его дробления и падения на Землю.

Цель работы: 1. Изучить роль ударного метаморфизма в преобразовании первичной структуры и минерального состава железных метеоритов. 2. Установить структурно-минералогические критерии ударного метаморфизма в космосе и на Земле.

Задачи исследования: 1. Изучить признаки ударного метаморфизма в индивидуальных и осколочных образцах железных метеоритов, образованные при соударении родительских тел в космосе и при падении на Землю. 2. Исследовать характер изменения состава и строения минералов в осколочных образцах железных метеоритов в зависимости от величины ударного метаморфизма. 3. Определить типы деформационных структур в никелистом железе индивидуальных и осколочных образцов. 4. Установить природу падений железных метеоритов Тубил, Чебанкол и Чинге.

Фактический материал и методы исследований: Материалом для исследований послужили образцы метеорита Чинге, собранные автором в полевой период 1986г., а также образцы метеоритов Каали (коллекция Эстонии и КМЕТ АН Украины), Сихотэ-Алинь (коллекция Комитета по метеоритам АН России и КМЕТ АН Украины), Тубил и Чебанкол (коллекция КМЕТ АН Украины). Минералогические исследования проведены в Институте геохимии и физики минералов АН Укра-

ини (лаборатория космической минералогии, рентгеноспектрального микроанализа, рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии), на химическом факультете Киевского Госуниверситета (лаборатория электронномикроскопических исследований), ГЕОХИ АН России и в Национальном музее Естествознания Франции (отдел метеоритики).

Научная новизна: 1. Установлены структурно-минералогические различия ударнометаморфических преобразований железных метеоритов в космосе и на Земле. 2. Выделены и изучены типы пластической деформации в никелистом железе, а также впервые установлена специфика их проявления в индивидуальных и осколочных образцах. 3. Впервые детально исследованы особенности перераспределения элементов между минералами железных метеоритов, обусловленные ударнометаморфическим воздействием. 4. Установлена природа падений железных метеоритов Тубил, Чебанкол и Чинге.

Практическое значение: Полученные результаты можно использовать при реконструкции ранних этапов развития Земли, для установления природы падений метеоритов-находок, корректной химической классификации железных метеоритов, при поисках астроблем и связанных с ними полезных ископаемых, а также при чтении курса лекций по метеоритике и космохимии в ВУЗах страны.

Защищаемые положения: 1. Железные метеориты, испытавшие метаморфизм в результате удара о Землю, характеризуются большей неоднородностью структурно-минералогических и химических изменений вещества, чем при соударении родительских тел в космосе. 2. При отсутствии первичных морфологических характеристик образцов главным структурным критерием, отличающим ударный метаморфизм в космосе и на Земле, является тип пластической деформации в камасите - структуры двойникования (Н - линии) и структуры скольжения, соответственно. 3. Изменения морфологии и состава зерен шрейберзита, рабдита, пластин тэнита являются результатом диффузии Ni и P в камасит при ударном нагреве и не связаны с процессами плавления минералов. 4. Падения метеоритов Тубил, Чебанкол, Чинге являются кратерообразующими.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всесоюзных конференциях по метеоритике и космохимии (XVIII, 1981г., XIX, 1984г. - Черноголовка Московской обл.; XX, 1987г. - Таллинн; XXI, 1991г. - Миасс), на Всесоюзных симпозиумах по проблемам космохимии и метеоритики (VII, 1983г. - Миргород, Полтавской обл.; VIII, 1985г. - Ясиня Закарпатской обл.; IX,

1988г. - Ворзель Киевской обл.), а также на заседании отдела ядерной геохимии и космохимии ИГФМ АН Украины (октябрь 1991г.) и заседании группы отделов ИГФМ АН Украины (июнь 1992г.). По теме диссертации опубликована 1 монография, 9 научных статей.

Предлагаемая работа проводилась с 1986 по 1991 год в отделе ядерной геохимии и космохимии ИГФМ АН Украины под руководством чл.-корр. АН Украины Э.В. Собоновича и доктора геол.-минерал. наук В.П. Семененко.

Автор искренне признателен чл.-корр. АН Украины Э.В. Собоновичу, доктору геол.-минерал. наук В.П. Семененко за постоянные консультации и критические замечания, аналитикам ИГФМ АН Украины Самойловичу Л.Г., Егоровой Л.Н., Гурненко И.В., Иванову Е.Н., сотрудникам Киевского Госуниверситета Козлову И.С., Клейменову А.В., сотрудникам ГЕОХИ АН России Колесову Г.М., Ляль А.Ю. за помощь в проведении исследований, сотруднику отдела первичной обработки Кушниру С.В., коллегам из лаборатории космической минералогии Бондарь Ю.В., Гирич А.Л. за помощь в оформлении работы.

Построение работы: Работа объемом 157 стр. машинописного текста состоит из 4 глав, введения и заключения, содержит 27 таблиц, 45 рисунков, список литературы насчитывает 129 источников.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УДАРНОМ МЕТАМОРФИЗМЕ И ЕГО ПРОЯВЛЕНИИ В МЕТЕОРИТАХ

Признаки ударного метаморфизма и, связанные с ними, физические, минералогические и химические изменения вещества детально изучены учеными на метеоритном и земном материале. В этой главе приведены количественные оценки величин ударного воздействия по некоторым минералам для различных классов метеоритов, полученные благодаря экспериментальным исследованиям / Carter et al., 1968; Scott, Wasson, 1975; Dodd, Jarosewich, 1979 /.

По литературным данным сделан анализ признаков ударного метаморфизма в никелистом железе. Никелистое железо содержит хрупкие и пластические структуры деформаций, характер проявления которых тесно связан с особенностями состава и строения кристаллической решетки камаситовой и тэнитовой фаз, а также с физико-химическими условиями, при которых происходили ударные воздействия. Среди признаков ударного метаморфизма в никелистом же-

лезе на макро- и микроуровнях выделяют: N-линии, поликристаллическое строение камасита, микрографическое строение плессита, наличие ϵ -фазы, рост вторичного камасита, структуры плавления (металл-троилитовая эвтектика, шариковые и жилковатые структуры металла).

Фосфиды - наиболее распространенные акцессорные минералы железных метеоритов. Морфология зерен фосфидов, их состав позволяют получить важную информацию о термальном преобразовании вещества, вызванного ударным воздействием.

Приведен краткий обзор литературных данных по условиям падения или находки, морфологическим особенностям образцов метеоритов Сихотэ-Алинь, Тубил, Каали, Чебанкол и Чинге, их минеральному и химическому составам, строению. Исходя из имеющихся фактических данных по выбранным нами объектам исследований, невыясненными остались вопросы о: 1) характере изменения состава и строения железных метеоритов при ударном метаморфизме в космосе и при падении на Землю в зависимости от величины ударного воздействия; 2) роли ударного метаморфизма в перераспределении химических элементов между слагающими метеориты минералами; 3) типах деформационных структур в никелистом железе метеоритов, месте и времени их образования; 4) природе падения метеоритов Тубил, Чебанкол, Чинге. Изучение образцов кратерообразующих метеоритов, каждый из которых подвергся ударному воздействию различной величины, является одним из возможных путей решения этих задач.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований послужили образцы 5 железных метеоритов, 2 из которых кратерообразующие (Каали, Сихотэ-Алинь), а 3 представлены находками неизвестной природы падения (Табл.1).

Минеральный и микроэлементный составы, строение метеоритов изучены при помощи оптической и электронной микроскопии (БСМ-10, МИН-9, РЭМ-100У, РЭМ-200, JSM-35С), нейтронноактивационного анализа, рентгеноспектрального (МАР-1, Самебах-36) и рентгеноструктурного анализов. Широкое применение электронномикроскопических методов исследований позволило детально изучить фазовые взаимоотношения металла, его неоднородность, структуры хрупких и пластических деформаций, скульптуру поверхности силикатных зерен.

Таблица 1

Общие сведения об исследуемых метеоритах

N п/п	Название метеорита	Падение, находка	Химическая группа	/ Graham, 1978 /				Количество исследованных образцов	
				Ni, %	Ba, 10 ⁻⁴ %	Be, 10 ⁻⁴ %	Ir, 10 ⁻⁴ %	Индивидуальных	Осколочных
1.	Сихотэ-Алинь	П., 1947г.	IIB (Ogg)	5,87	51,8	161	0,029	16	10
2.	Тубил	Н., 1891г.	IIIA (Om)	7,59	19,8	38,1	5	1	2
3.	Каали	Н., 1937г.	IA (Om-Ogg)	8,32 6,45	-	-	-	-	16
4.	Чибансол	Н., 1938г.	Аном. (Og)	8,80	21,8	52,5	0,11	-	4
5.	Чинге	Н., 1912г.	IYB (D)	16,38	0,181	0,082	3,6	4	4

Принятие сокращения: Ogg - весьма грубоструктурный октаэдрит ;

Om - среднеструктурный октаэдрит ;

D - атаксит

ГЛАВА 3. СТРУКТУРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ И ОСКОЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ

Для выяснения роли ударного метаморфизма в преобразовании метеоритного вещества в космосе и при ударе о Землю наиболее информативными являются образцы кратерообразующих железных метеоритов, представленные двумя типами образцов - индивидуальными и осколочными. Индивидуальные образцы содержат важную информацию о доземной истории эволюции и существования родительских тел метеоритов, в то время как осколочные содержат признаки изменения метеоритного вещества вследствие удара о Землю.

3.1. Очень грубоструктурный октаэдрит Сихотэ - Алинэ (IIB). Исследованные образцы метеорита Сихотэ-Алинэ представлены индивидуальными и осколочными типами и служат эталоном для выработки критериев признаков ударного метаморфизма в космосе и на Земле. Наличие огромного фактического материала позволило подобрать для изучения образцы с различной степенью ударнометаморфического воздействия и проанализировать на их примере результаты этого воздействия.

Метеорит сложен камаситом, незначительным количеством тэнита, другие минералы представлены фосфидами (шрейберзит, рабдит, микрорабдит) и сульфидами (троилит, добреелит), редко встречаются когенит, силикаты.

3.1.1. Структурно-минералогическая характеристика индивидуальных образцов. Они имеют балочную, подковообразную, неправильную, реже плоскую форму с обязательным наличием коры плавления и отчетливой регмаглиптовой поверхности. На примере индивидуальных образцов установлена однородность строения и состава слагающих их минералов как в пределах одного образца, так и в различных образцах независимо от их размеров. Камасит поликристаллический, монокристаллы имеют близкие к правильным границы, отмечено несколько систем N-линий, содержит 6,3-6,6 мас.% Ni. Шрейберзит представлен крупными зёрнами с четкими границами, поверхность чистая, незначительно трещиновата, содержит 29,8-30,4 мас.% Ni и 15,1-15,6 мас.% P. Идиоморфные зёрна рабдита часто ориентированы в двух взаимоперпендикулярных направлениях, их морфологические особенности и постоянный состав свидетельствуют о равновесных условиях кристаллизации в металле.

3.1.2. Структурно-минералогические особенности осколочных образ-

цов. Для них характерна неправильная, изогнутая, уплощенная, улиткообразная форма с утонченными зазубренными и загнутыми краями, часть образцов искорежена, разбита сквозными трещинами вдоль балок камасита, приуроченными к участкам распространения крупных шрейберзитовых зерен. Как показали наши исследования, осколочные образцы характеризуются большей неоднородностью структуры и состава слагающих их минералов не только в различных, но и в пределах одного образца. Монокристаллы в поликристаллическом камасите, в отличие от индивидуальных образцов, вытянуты в соответствии с удлинением образцов, а их границы имеют зазубренные края. N - линии значительно деформированы или заметны лишь их реликты. Содержания Ni в камасите колеблются от 4,2 до 6,6 мас.% в пределах одного образца. Главная особенность металла осколочных образцов - наличие системы параллельных линий скольжения, которые в некоторых образцах обнаруживают признаки дополнительной деформации - они изогнуты и смяты. Шрейберзит в виде крупных и более мелких зерен распространен неравномерно. Зерна разбиты различно ориентированными трещинами, брекчированы, изогнуты, иногда прерывистые со смещением. Состав шрейберзита меняется от зерна к зерну: содержание Ni варьирует от 26,4 до 37,8 мас.%, а P - от 16,0 до 13,4 мас.%. Форма зерен разбита изменяется от идиоморфных до гипидиоморфных и ксеноморфных в пределах одного образца. В соответствии с изменением морфологии отмечается изменение элементного состава рабдитовых зерен и вмещающего камасита: происходит вынос Ni и P из центральных участков зерен рабдита и обогащение ими периферии и граничащего камасита.

Сопоставляя полученные результаты по структурно-минералогическим особенностям индивидуальных и осколочных образцов метеорита Сихотэ-Алинь, можно утверждать, что: 1) метеоритное вещество подверглось ударному метаморфизму в космосе и при ударе о Землю; 2) индивидуальные образцы характеризуются однородным строением и составом, тогда как в осколочных образцах отмечается неоднородное строение и состав слагающих минералов даже в пределах одного образца, связанное с более интенсивным проявлением ударного метаморфизма; 3) в космической истории родительского тела имели место многократные соударения с другими космическими телами, что подтверждается развитием N-линий двух генераций. Величина ударного давления не превышала 130×10^2 Мпа; 4) линии скольжения обнаружены лишь в осколочных образцах.

3.2. Среднеструктурный октаэдрит Тубил (IIIA). В работах отече-

ственных и зарубежных исследователей существуют споры о том, что под находкой метеорита Тубил объединены образцы двух падений - Тубил и Тайга, а также, что основная масса метеорита Тубил подверглась искусственному нагреву до температуры 1000°C .

Минеральный состав представлен никелистым железом (камасит, тэнит, плессит), фосфидами (шрейберзит, рабдит), сульфидами (троилит, добреелит), карлсбергитом, графитом.

3.2.1. Минералогия индивидуальных образцов. Наличие на поверхности выпиленного куска образца 3 коры плавления позволяет отнести его к индивидуальным, а внутреннее строение и состав свидетельствует о том, что именно этот образец был подвергнут искусственному нагреву. Необходимо отметить, что в этом образце структуры деформации отсутствуют, в то время как признаки интенсивного нагрева проявляются, в первую очередь, в ажурных и ветвистых границах тэнитовых пластинок и шрейберзитовых зерен, неоднородности в содержаниях P и Ni в камасите. Большинство зерен фосфидов и пластинок тэнита представляют собой ксеноморфные реликты, отнести которые к рабдиту или тэниту без исследования состава невозможно. Лишь значительный разброс содержаний P от 13,38 до 1,04 мас.% и Ni от 22,74 до 6,5 мас.% указывает на наличие в этих участках фосфидных зерен. Распад тэнитовых пластинок и шрейберзита позволяет говорить о температуре искусственного нагрева 800°C , а, возможно, и выше.

3.2.2. Минералогия осколочных образцов. Характер изменения поликристаллического камасита аналогичен описанному в осколочных образцах метеорита Сихотэ-Алинь. Результаты рентгеноспектрального анализа наименее измененных участков камасита из осколочных образцов указывает на его неоднородный состав по Ni и обеднение Ni и P прилегающих к крупным зернам шрейберзита зон камасита, свидетельствующих о непосредственном росте шрейберзита за счет диффузионного перераспределения между фосфидами и камаситом. Эти точки ложатся в нижней части графика с содержаниями Ni от 3,4 до 4,45 мас.% и служат показателем первичности структурно-минералогических характеристик, сформировавшихся при диффузионном росте фосфидов во время охлаждения родительского тела метеорита (Рис.1). В более измененных участках, которые удалены от шрейберзитовых зерен, содержания Ni в камасите выше (5,3-6,1 мас.%) и точки расположены в средней части графика. Детальное изучение состава реликтовых зерен фосфидов и граничащего камасита свидетельствует об обогащении его Ni и P в результате распа-

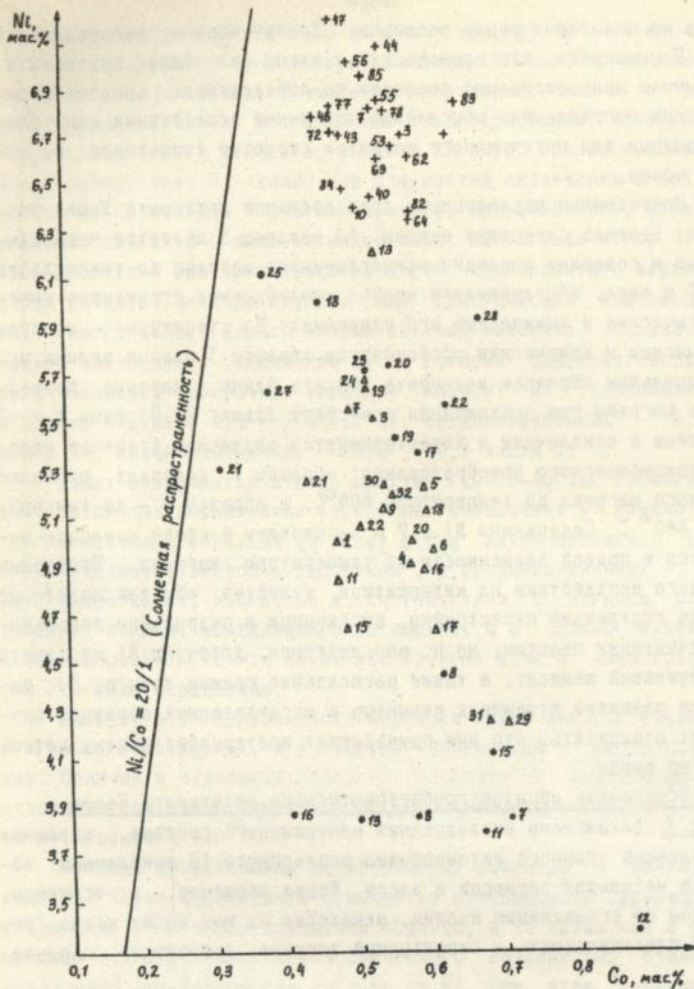


Рис. I. Содержания Ni и Co в камасите
из метеорита Тубил (мас.%)

Условные обозначения: + - сильноизмененный образец 3
• - среднеизмененный образец 2
Δ - слабоизмененный образец I

да, а не плавления зерен фосфидов. Неравномерное распределение Ni и P указывает, что равновесные условия не были достигнуты. Первичная кристаллизация фосфидов по определенным кристаллографическим направлениям обусловила появление ослабленных зон, благоприятных для интенсивного развития структур скольжения в момент удара.

Проведенные исследования трех образцов метеорита Тубил позволяют сделать следующие выводы: 1) образец 3 является индивидуальным и содержит признаки искусственного нагрева до температуры 800°C и выше, обусловившего крайне неоднородные структурно-минералогические и химические его изменения. По структурно - минералогическим и химическим особенностям образец 3 близок мелким индивидуальным образцам метеорита Сихотэ-Алинь, которые подверглись нагреву при прохождении атмосферы Земли; 2) образцы 1 и 2 отнесены к осколочным и характеризуются различной степенью ударно-метаморфического преобразования; образец 1 содержит признаки ударного нагрева до температуры 600°C, а образец 2 - до температуры 800°C. Содержания Ni и P в окружающем фосфиды камасите находятся в прямой зависимости от температуры нагрева. Повышение ударного воздействия на метеоритное вещество обуславливает не только внутреннюю перестройку, выраженную в разрушении зональности тэнитовых пластин, но и, впоследствии, диффузию Ni из тэнита в окружающий камасит, а также расползание границ тэнита; 3) характер развития вторичных структур в исследованных образцах позволяет утверждать, что они принадлежат кратерообразующему метеоритному дождю.

3.3. Осколочные образцы грубоструктурного октаэдрита Каали

(I A). Детальному исследованию минерального состава, строения и признаков ударного метаморфизма подвергнуто 16 осколочных образцов небольших размеров и массы. Форма образцов, в основном, плоская со сглаженными краями, некоторые из них имеют четко видимую пластинчатость - структурный элемент деформаций скольжения.

Под микроскопом в образцах метеорита Каали наблюдались крупные зерна шрейберзита размерами 400x100 мкм и меньше. Травление ниталом позволило обнаружить камасит, тэнит, их тонкое прорастание - плессит, а также зерна рабдита и микрорабдита. Рентгеноструктурным методом установлены: когениит, Fe₂C - и FeC-соединения, графит, троилит и оливин, слагающие полиминеральные включения.

Среди изученных образцов выделено три группы в зависимости от степени ударного воздействия: слабоизмененные, среднеизмененные и сильноизмененные. Разделение проводилось, как и в других исследуемых объектах, по следующим характеристикам: наличие поликристаллического камасита, форма и характер границ монокристаллов; присутствие N - линий или плоскостей скольжения и интенсивность их проявления (фрагментарность, прерывистость, изгиб); строение плессита (микрооктаэдритовое, микрографическое); степень дробления или брекчирования зерен шрейберзита; морфология зерен рабдита, наличие хрупких или пластических деформаций в них. Рентгеноспектральный анализ состава камасита указывает на прямую зависимость содержаний Ni от степени ударнометаморфического изменения осколочных образцов. Камасит из слабоизмененных образцов содержит 4,3-4,9 мас. % Ni , среднеизмененных - 6,1-6,3 мас. % Ni , сильноизмененных - 13,6 - 16,1 мас. % Ni).

Тэнит встречается в виде пластин (10-20-40) \times (1000-2000) μm , вытянутых параллельно структурам скольжения в камасите. В слабоизмененных образцах он имеет форму выклинивающихся дуг с микровидманштеттеновой сердцевинкой, в среднеизмененных - образует прерывистые, изогнутые в соответствии с изгибом образца узенькие полосы, изменяющиеся по ширине, а в сильно измененных образцах реликты тэнита имеют зазубренные края и микрографическое строение сердцевинки.

Плессит в слабоизмененных образцах имеет микрооктаэдритовое и игольчатое строение, а в наиболее измененных - микрографическое. Наличие в отдельных участках плессита с микрографическим строением свидетельствует о том, что температура ударного нагрева не превышала 450° С.

Фосфиды представлены шрейберзитом, рабдитом и микрорабдитом. Для зерен шрейберзита отмечается стабильность содержаний P независимо от степени изменения образца, в то время как с увеличением степени ударнометаморфического воздействия отмечается увеличение неоднородности состава по Ni . При этом вариации Ni наблюдаются не только между зёрнами, но и в пределах зерна от центра к периферии. Сохранность шрейберзитовых зерен свидетельствует о том, что температура ударного нагрева не достигала 850° С ни в одном из изученных образцов. В соответствии с увеличением степени ударнометаморфического воздействия отмечается распад кристаллов рабдита с изменением их морфологии: от идиоморфных до гипидиоморфных и ксеноморфных. Микрорабдит присутствует во всех

образцах в ограниченных количествах и распространен неравномерно от образца к образцу.

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

Троилит и оливин также входят в состав полиминеральных включений и образуют тесное прорастание с углеродсодержащими минералами. Волнистое погасание в оливине свидетельствует об ударнометаморфическом воздействии в пределах $(150-200) \times 10^2$ Мпа.

По результатам исследования метеорита Каали можно сделать следующие выводы: 1) установлено три группы образцов, различающиеся по степени проявления признаков ударнометаморфических изменений, которым они подверглись при ударе о Землю: слабоизмененные, среднеизмененные, сильноизмененные; 2) слабоизмененные образцы претерпели ударный нагрев не выше температуры $400^\circ C$ (идиоморфные зерна рабдита), среднеизмененные - не выше температуры $450^\circ C$ (микрографический 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); 3) ударнометаморфическое воздействие не отразилось на микроэлементном составе, а лишь обусловило 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, а также превращение микрооктаэдритового плессита в микрографический); 4) для корректной классификации железных метеоритов по Ni следует использовать только неизмененные или слабоизмененные ударным метаморфизмом образцы. Классификация сильноизмененных образцов должна основываться на микроэлементном составе.

3.4. Осколочные образцы грубоструктурного октаэдрита Чебанкол (Апош., близок III E). Метеорит сложен: никелистым железом (камасит, тэнит, плессит), фосфидами (пограничнозернистый шрейберзит, рабдит).

Никелистое железо, как и в осколочных образцах других исследованных метеоритов, имеет различное строение и очень неодно-

родный состав в пределах одного образца. Камасит реликтовый поликристаллический, границы между монокристаллами прослеживаются благодаря вытянутым сильно раздробленным зернам шрейберзита и тонким пластинкам тэнита. Аналогично описанным осколочным образцам метеоритов Сихотэ-Алинь, Тубил и Каали вдоль зерен шрейберзита в камасите интенсивно развиты структуры скольжения. В участках, более удаленных от зерен шрейберзита, отмечаются несколько систем Н-линий, деформированных более поздними космическими событиями.

В отличие от тэнитовых пластин в метеорите Тубил, где более высокая степень ударного преобразования вещества привела к взаимодействию тэнита с камаситом, здесь преобразования коснулись только внутренних изменений в строении и составе. На примере составов трех зональных пластинок тэнита четко прослеживается неоднородный характер их изменения в пределах одного образца. Так, состав и строение зональной пластинки I с октаэдритовой сердцевинкой и четкими зонами тэнита, характеризующимися значительным повышением Ni к периферии, указывает, что образование этой пластинки не связано с проявлением ударного метаморфизма, а обусловлено медленным первичным охлаждением родительского тела. Тэнитовая пластинка 3 содержит все признаки ударнометаморфического преобразования. Она изогнута, характеризуется неровными границами, сердцевина плессита имеет микрографическое строение. Изучение состава фаз в микрографическом плессите показало, что камасит неоднороден и характеризуется вариациями Ni от 4,29 мас.% до 5,22 мас.%. Колебания Ni в тэнитовой фазе плессита более значительны, причем, Ni варьирует не только от индивида к индивиду (33,49-34,61 мас.%), но и в пределах одного индивида (10,29 мас.% в центре и 16,76 мас.% на периферии), образуя характерный M-профиль. Анализ рентгеноспектральных и электронномикроскопических исследований позволяет утверждать, что процесс ударнометаморфического изменения данного образца был крайне неравновесным, что обусловило неоднородность изменения и крайне неравновесный состав фаз в пределах тэнитовой пластинки. Отсутствие зоны плессита IV свидетельствует о том, что локальный участок образца подвергся нагреву выше температуры 500°С.

Проведенные исследования осколочных образцов метеорита Чебанкол позволяют сделать следующие выводы: 1) наличие интенсивно развитых структур скольжения указывает на ударный метаморфизм при столкновении с Землей; 2) реликтовые границы зерен шрейбер-

зита и тэнита свидетельствуют о существенной роли ударного метаморфизма и сопровождающего нагрева в преобразовании метеоритного вещества; 3) для никелистого железа характерна значительная неоднородность строения и состава как в пределах каждого образца, так и внутри фаз; 4) увеличение степени изменения образца сопровождается повышением концентрации Ni в камасите, что обусловлено распадом фосфидов; 5) содержания Co в образцах, которые изменены в различной степени, варьируют в одних и тех же пределах, что является подтверждением инертности этого компонента при ударном метаморфизме; 6) метеорит Чебанкол диагностируется нами как кратерообразующий, исходя из структурно-минералогических характеристик и особенностей развития структур ударного метаморфизма.

3.5. Индивидуальные и осколочные образцы атаксита Чинге (IVB).

Спецификой метеорита Чинге является принадлежность к химической группе IVB и отличные от октаэдритов состав и строение. Несмотря на это, образцы атаксита послужили хорошим объектом для установления природы падения и диагностики признаков ударного метаморфизма в них. По макроскопическим морфологическим характеристикам часть образцов предварительно была отнесена к индивидуальным (улощенная или балочная форма, сглаженные края), а вторая - к осколочным (сплюснутая форма, утонченные, острые края). Проведенные в дальнейшем исследования подтвердили такое их разделение.

Изученные образцы сложены полосчатым плесситом III, в котором расположены скопления камасит-тэнитовых линзочек, остаточный тэнит, троилит-добреелитовые срастания, единичные зерна фосфидов и самородной меди. Под оптическим микроскопом установлено два типа строения тонкого плессита: полосчатый (16,9 мас.% Ni) и пятнистый (18,5 мас.% Ni). Их строение отличается величиной и формой камаситовых ячеек, морфологией тэнитовых образований и количественным соотношением фаз. Согласно рентгеноструктурным исследованиям, содержание тэнита в пятнистом плессите выше, чем в полосчатом и достигает 50 об. %. Полосчатый плессит к тому же представлен двумя разностями по составу. Преобладающая разность содержит 15,5-17,0 мас.% Ni, а граничащая с пятнистым плесситом - 23,3 мас.% Ni. При изучении тончайшего строения плессита впервые для атакситов применено глубокое травление поверхности с целью дальнейшего РЭМ-исследования объемного взаимоотношения фаз никелистого железа.

Во всех изученных образцах присутствуют деформационные по-

лосы шириной от 50 до 300 мкм и, в соответствии с ориентацией полосчатости плессита - системы параллельных прерывистых тонких трещин. Кроме указанных деформационных структур в осколочных образцах установлены макро- и микротрещины по структурным элементам, изогнутость и трещиноватость камасит-тэнитовых линзочек, разрывы и смещения в них, изгибы тэнитовых и камаситовых полос в плессите. В индивидуальных образцах такие признаки удара отсутствуют.

Полученные данные позволяют выделить следующие этапы в космической и земной истории метеорита Чинге: 1) возникновение родительского тела метеорита вследствие агломерации металлических фрагментов, различающихся по составу и строению (полосчатый и, впервые установленный нами, пятнистый плесситы, образование которых связано с различными содержаниями Ni в первичном тэните); 2) зарождение (не выше температуры 1060°С) и равновесный рост добреелита с последующим образованием троилит-добреелитовых структур распада и возникновением вокруг них тэнитовых каемок с отдельными участками камасита и плессита IV; 3) зарождение и рост камасит-тэнитовых линз, соответствующих октаэдрической ориентации в первичном тэните; 4) превращение основной массы первичного тэнита в плессит III, появление в нем деформационных полос и систем параллельных трещин при ударном метаморфизме в космосе относительно небольшой величины; 5) дробление метеорита при вторжении в атмосферу Земли, удар о Землю и ударнометаморфическое преобразование вещества; 6) изменение морфологии образцов в результате их значительного перемещения и длительного пребывания в земных условиях.

ГЛАВА 4. РОЛЬ УДАРНОГО МЕТАМОРФИЗМА В СТРУКТУРНО - МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ

Проведено сопоставление признаков ударного метаморфизма в индивидуальных, а затем в осколочных образцах железных метеоритов и выделены главные отличительные черты.

Для индивидуальных характерно сходство строения и состава минералов как в пределах одного, так и различных образцов; сохранность первичных структурных, минералогических и химических характеристик, связанных с условиями охлаждения родительских тел метеоритов при их образовании; незначительное проявление признаков ударного метаморфизма и наличие структур, свидетельствующих

о медленном охлаждении родительских тел после соударения в космосе, что позволяет предположить наличие в родительских телах железных метеоритов внешней силикатной оболочки.

Для осколочных характерна значительная изменчивость строения и состава минералов не только в отдельных образцах, но и в пределах одного осколочного образца; почти полное исчезновение первичных структурных и химических особенностей, а также космических признаков ударного метаморфизма, что свидетельствует о более интенсивном ударнометаморфическом преобразовании осколочных образцов и является фактическим подтверждением теоретических данных / Stoffler et al., 1988 /; более высокая скорость постударного охлаждения по сравнению с индивидуальными образцами. Установлено, что главным отличительным признаком осколочных образцов является тип пластической деформации металла.

Сопоставляя данные по характеру развития пластических деформаций в железных метеоритах, земных металлах (сплавах) и в металле хондритов, можно констатировать, что: 1) преобладающим типом пластической деформации в земных металлах являются структуры скольжения, в то время как для металла индивидуальных образцов - структуры двойникования, что обусловлено соударением родительских тел в космосе при низких температурах, а для металла осколочных образцов - структуры скольжения; 2) характерными признаками структур скольжения являются пластинчатое строение поверхности образцов, а под микроскопом - наличие системы субпараллельных прерывистых линий на глубоко протравленных полированных поверхностях анилифов камасита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные рентгеноспектральные, рентгеноструктурные, микроскопические, электронномикроскопические и нейтронно-активационные исследования пяти железных метеоритов позволяют сделать следующие выводы:

I. Железные метеориты, испытавшие метаморфизм при ударе о Землю, характеризуются большей неоднородностью структурно-минералогических и химических изменений, чем подвергшиеся ударному метаморфизму в космосе.

Структурно-минералогические исследования минералов из индивидуальных и осколочных образцов метеоритов Сихотэ-Алинь и Тубил, а также из осколочных образцов метеоритов Каали и Чебан-

кол показали, что индивидуальные образцы характеризуются однородностью строения и состава слагающих их минералов как в пределах одного образца, так и в различных образцах независимо от их размеров, тогда как осколочные образцы характеризуются большей неоднородностью структуры и состава слагающих их минералов не только в различных, но и в пределах одного осколочного образца.

II. При отсутствии первичных морфологических характеристик метеоритных образцов главным структурным критерием, отличающим ударный метаморфизм в космосе и на Земле, является тип пластической деформации в камасите.

В метеоритных коллекциях присутствуют образцы железных метеоритов, не сохранившие первичных морфологических характеристик, возникновение которых связано с природой падения метеорита на Землю. Как показали проведенные нами исследования, главным структурным критерием, разделяющим ударный метаморфизм в космосе и на Земле, является тип пластической деформации в металле - структуры двойникования (Н - линии) в индивидуальных и структуры скольжения в осколочных образцах. Чем выше степень ударнометаморфического преобразования вещества, тем интенсивнее развиты структуры скольжения. Главным признаком структур скольжения в камасите, отличающим их от Н - линий, являются: 1) пластинчатое строение внешней поверхности образца; 2) наличие системы субпараллельных линий на глубоко протравленных полированных поверхностях шлифов камасита.

III. Изменения морфологии и состава зерен шрейберзита, рабдита и пластин тэнита являются результатом диффузии Ni и P во вмещающий камасит при ударном нагреве и не связаны с плавлением минералов.

Изменение морфологии фосфидов от идиоморфной до гипидиоморфной и ксеноморфной отмечено нами в осколочных образцах метеоритов Каали, Сихотэ-Алинь, Тубил и Чебанкол и тесно связано со степенью изменения метеоритного вещества. На примере исследованных метеоритов однозначно установлено, что с увеличением степени ударного воздействия происходит вынос Ni и P из фосфидов и обогащение этими элементами вмещающего камасита. В пластинках тэнита при этом происходят структурные и химические изменения, а затем и морфологические изменения самих пластин, обусловленные диффузией Ni из пограничных зон тэнита в окружающий камасит. Образцы железных метеоритов, которые не подверглись ударному метаморфизму или претерпели незначительную степень ударнометаморфичес-

ких изменений, характеризуются однородным составом камасита с незначительным понижением концентрации никеля на границе с зернами шрейберзита и рабдита, что связано с диффузионными процессами роста фосфидов при остывании родительских тел метеоритов. Неоднородность состава камасита в ударнометаморфизованных образцах метеоритов обусловлена, в основном, распадом зерен шрейберзита, рабдита и пластин тзнита, сопровождаемым диффузией элементов в камасит в следующей последовательности: фосфор - никель - кобальт.

IV. Признаки ударного метаморфизма в железных метеоритах можно использовать в качестве критериев природы их падения на Землю.

Комплексные исследования метеоритов Тубил, Чебанкол и Чинге и установленная при этом неоднородность строения и состава сопровождающих их минералов, а также характер развития пластических деформаций в камасите позволяют отнести эти падения к кратерообразующим.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Семененко В.П., Козлов И.С., Тertyчная Б.В. Признаки ударного метаморфизма в железном метеорите Марьинка.- Метеоритика, 1986, вып.45, С.102-105.
2. Семененко В.П., Самойлович Л.Г., Тertyчная Б.В. Изменение зерен рабдита под влиянием повторного нагрева.- Минерал.журн., 1982, т.4, N 3, С.51-56.
3. Семененко В.П., Самойлович Л.Г., Тertyчная Б.В. Изменение зерен троилита при повторном нагреве хондритов.- В сб. " Космическое вещество ", К., 1986, с.94-99.
4. Семененко В.П., Самойлович Л.Г., Тertyчная Б.В. Структуры неоднородности в камасите как один из признаков ударного метаморфизма.- Тезисы 20 Всес.конф. по метеоритике и космохимии, 10-12 февраля 1987, Таллинн, С.89-91.
5. Семененко В.П., Самойлович Л.Г., Тertyчная Б.В., Клейменов А.В. Тонкое строение частиц никелистого железа в хондритах.- В сб. "Вещество и происхождение метеоритов", К., 1988, С.24 -31.
6. Семененко В.П., Соботович Э.В., Тertyчная Б.В. Метеориты Украины.- К., Наук.думка, 1987.- 171 С.
7. Семененко В.П., Тertyчная Б.В., Клейменов А.В. Скульпту-

ра поверхности частиц никелистого железа в хондритах.- Метеоритика, 1987, вып.46, С.73-80.

8. Семеновко В.П., Шаркин О.П., Тертичная Б.В., Чеботарев В.А. Состав и строение железного метеорита Марьинка. -Мин.журн., 1984, т.6, N2, С.83-87.

9. Тертичная Б.В., Семеновко В.П., Самойлович Л.Г. Структурно-минералогическая характеристика атаксита Чинге.- Мин. журн., 1992,14, N 3, С.62-70.

10. Semenenko U.P., Samoilovich L.G., Tertichnaya B.V. Two types of metal particles in the Bachmut (L6) chondritic meteorite. -Mineral.Mag.,1986, v.50, N 355/2, P.317 -322.

Б. Тертичная

Подписано в печать 5.II.92г формат 60x84/16
Бумага писчая. Усл. печ. л. I, O. Тираж 100 экз, Заказ №1697
Отпечатано ЦУОП ГНПП "Плодвинконсерв" г.Киев, Саксаганского, I

11600011

AB 26.331

AB 26.331