

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Тепляковой Светланы Николаевны

“Петрология и геохимия железных метеоритов группы IIЕ с силикатными включениями на примере метеорита Эльга”

представленной на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа Светланы Николаевны Тепляковой общим объёмом 150 страниц, включая 48 иллюстраций и 15 таблиц, состоит из Введения, 6-ти глав (обзор литературы, методы исследования и 4 главы с результатами исследований), Заключения и списка цитируемой литературы из 212 наименований. Работа написана в хорошем стиле, с единичными ошибками (опечатками).

Во введении автором обоснована актуальность выбранной темы диссертации, приведён обзор литературы, посвящённой железным метеоритам химической группы IIЕ, и аргументируется важность изучения этой группы в контексте исследования фракционирования вещества на ранних этапах развития Солнечной системы, а также в процессах, сопровождавших эволюцию астероидов. Далее автор излагает цель работы – определить источник вещества и условия образования силикатных включений в метеоритах группы IIЕ на примере метеорита Эльга и установить наиболее вероятный механизм образования железных метеоритов группы IIЕ. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Анализ минерального состава и структуры металла метеоритов группы IIЕ и силикатных включений в метеорите Эльга.
2. Установление валового химического состава и распределения редких элементов в металле метеоритов группы IIЕ и силикатных включениях метеорита Эльга.
3. Оценка скорости остывания железных метеоритов группы IIЕ на этапе кристаллизации и их термальной истории на посткристаллизационной стадии.
4. Моделирование кристаллизации железных метеоритов группы IIЕ и силикатных включений из Н-хондритовых расплавов.

Автор детально излагает фактический материал, на котором выполнена работа: 8 аншлифов метеорита Эльга и 7 аншлифов других метеоритов группы IIЕ, общей площадью более 30 см²; а также 22 прозрачно-полированных шлифа силикатных включений

метеорита Эльга, пять из которых были изготовлены автором работы. В изученном материале из метеорита Эльга автором обнаружены и впервые исследованы 35 новых силикатных включений. Хотелось бы отметить, что метеориты группы IIЕ весьма редки и представлены всего лишь 22 наименованиями. Поэтому изученный материал является представительным как для данной группы (5 метеоритов), так и по общей площади изученной поверхности.

Новизна работы заключается в первую очередь в том, что автором впервые получены актуальные данные о концентрациях 24 редких сидерофильных элементов в металле железных метеоритов группы IIЕ. Впервые показано, что составы металла метеоритов группы IIЕ соответствуют продуктам последовательной кристаллизации металла, сегрегированного из полностью расплавленного Н-хондритового источника. Описаны три генерации шрейберзита, форма выделения и состав которых могут служить индикаторами условий образования вмещающего металла метеоритов группы IIЕ. На основе структуры и состава минералов в металле метеорита Эльга выполнена оценка скорости охлаждения и определены ключевые события в термальной истории метеорита. Впервые показано, что метеорит Эльга, в отличие от всех известных железных метеоритов, содержит участки локального плавления не только на границах выделений шрейберзита и троилита в металле, но и внутри силикатных включений. На этих участках обнаружен ранее не встречавшийся минеральный парагенезис сидерит–шрейберзит, который по ряду признаков не может быть однозначно интерпретирован как результат земного выветривания метеорита. На примере метеорита Эльга автором впервые показано, что фракционированные силикатные включения в метеоритах группы IIЕ представляют собой химически однотипные зональные объекты, видимое разнообразие структур которых обусловлено случайностью положения включений относительно плоскости шлифа.

На основе данных о структуре и составе 15 силикатных включений впервые определен валовой состав вещества силикатных включений метеорита Эльга. Впервые продемонстрировано, что по многим параметрам средневзвешенный валовой химический состав силикатных включений наиболее близок к составу остаточного расплава при 75% равновесной кристаллизации или к составу расплава при 25% частичном плавлении Н-хондритового источника. Предложен непротиворечивый сценарий образования группы метеоритов IIЕ на едином родительском теле.

Хотя работа имеет выраженную **фундаментальную** направленность, автор не без оснований полагает, что сделанный ей вывод об универсальности состава зональных включений представляет **практическую ценность** для изучения других метеоритов с силикатными включениями и упрощения подхода к интерпретации их структур и составов. Сценарий образования силикатных включений в метеоритах группы IIЕ путем ударно-расплавного смешения, дифференцированного металлического и преобразованного в разной степени Н-хондритового вещества, дает основу для интерпретации результатов изучения расплавных металл-силикатных агрегатов в метеоритах других типов. Представленный в работе сценарий также применим для интерпретации дистанционных данных, которые будут получены при изучении астероидов при помощи космических аппаратов.

Основные результаты, изложенные в работе, были представлены в виде устных и стендовых докладов на международных и всероссийских конференциях. По теме диссертации опубликованы 5 статей в журналах, входящих в Перечень РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

В **литературном обзоре** автор в краткой, но содержательной форме рассматривает текущие научные взгляды на состав, классификацию и происхождение железных метеоритов. Отметим, что обзор хорошо иллюстрирован рисунками, а данные систематизированы в сводных таблицах, что делает главу приятной в чтении, и, полагаю, интересной для широкого круга читателей. Хотелось бы отметить, что библиография охватывает широкий спектр работ, начиная с 1950-х годов по настоящее время, что говорит о хорошей глубине литературного поиска соискателя.

В главе, посвящённой **методам исследований**, диссертант приводит большой список современных методов анализа, использованных в работе. Обосновывается, какие конкретно данные можно получить с помощью приводимых инструментальных методов и методик. Для получения достоверных данных использовались методы с различной локальностью, от 4 мм² (для статистически достоверных геохимических данных) до первых нанометров (анализ локальных взаимоотношений минералов в микровключениях). Стоит отметить трудоёмкость многих из приведённых экспериментальных подходов, в частности современных методов просвечивающей электронной микроскопии, таких как HAADF. В целом набор методов и подходов говорит

о широте научного кругозора автора и владении современными методами исследования вещества.

Главы 3-6 диссертации посвящены изложению и анализу результатов, полученных автором в ходе выполнения представляемой работы.

В Главе 3 приведены результаты исследования содержаний 24 сидерофильных элементов в металле метеоритов группы IIЕ. На основании представительных и статистически обоснованных аналитических данных делается вывод о том, что наиболее вероятным источником металла метеоритов группы IIЕ является металл Н хондритов, что согласуется с опубликованными в литературе изотопными индикаторами, указывающими на генетическую связь металла метеоритов IIЕ с Н-хондритами. Полученные результаты сопоставлены с результатами компьютерного моделирования кристаллизации железных метеоритов, выполненного диссертантом.

Глава 4 посвящена детальному изучению различных аспектов структуры и минерального состава *металла* метеоритов группы IIЕ, в первую очередь – метеорита Эльга. Полагаю, что результаты работ, представленные в данной главе, являются существенным вкладом в метеоритную науку, в частности – вкладом в наши знания о структурных и минералогических особенностях этой малочисленной и довольно экзотической группы метеоритов. Глава содержит богатый и хорошо структурированный фактический материал, результаты изучения которого позволяют автору сделать ряд важных выводов о механизмах формирования структур распада твердого раствора в металле метеорита Эльга. Анализ полученных данных позволил оценить скорость охлаждения металла метеорита Эльга. Особого упоминания заслуживает первое в своём роде исследование автором ударно-метаморфических структур в метеоритах группы IIЕ. Своеобразной «изюминкой» главы 4 является комплексное исследование совершенно необычной сидерит-фосфидной минерализации. Приводимые результаты говорят о высокой квалификации автора в области как геохимии, так и минералогии метеоритов.

В Главе 5 изложены результаты исследования минералогии и геохимии силикатных включений в железном метеорите Эльга. Силикатные включения являются неотъемлемой составляющей большинства метеоритов группы IIЕ. На основании обширных и разносторонних данных по петрографии, минеральному составу и распределению главных и редких элементов в 15 силикатных включениях железного метеорита Эльга автором показано, что они представляют собой химически однотипные

зональные объекты, разнообразие структур которых отражает последовательность кристаллизации силикатного расплава при понижении температуры вмещающего металла. Химический состав фаз, модальный и валовый средневзвешенный химический состав силикатных включений наиболее близок к составу остаточного расплава при 75% равновесной кристаллизации или к составу расплава при 25% частичном плавлении Н-хондритового источника.

В Главе 6, на основании ранее изложенных результатов исследований, автором проанализирован возможный сценарий образования метеоритов группы IIЕ. Он включает в себя 3 этапа: 1) аккреция родительского тела метеоритов группы IIЕ из Н-хондритового источника и его неполная внутренняя дифференциация с образованием металлического ядра и силикатной мантии с сохранением внешнего недифференцированного слоя; 2) катастрофическое ударное событие, в результате которого произошло частичное разрушение астероида с обнажением части ядра; 3) смешение вещества ядра с хондритовым веществом в результате ударного плавления металлической мишени; кристаллизация и постмагматические изменения структуры металла с силикатными включениями.

В Заключение в краткой форме суммированы основные результаты исследований, изложенных в представляемой диссертации.

Результаты всестороннего исследования метеоритов группы IIЕ (в первую очередь – метеорита Эльга), изложенные в диссертации, позволили автору сформулировать четыре обоснованных **защищаемых положения**:

1. Железные метеориты группы IIЕ являются продуктами последовательной фракционной кристаллизации металлического расплава, сегрегированного из полностью расплавленного вещества Н хондрита. Металл метеорита Эльга соответствует 60% стадии фракционной кристаллизации.
2. Термальная история изученных метеоритов группы IIЕ включает 3 этапа: 1) быстрая неравновесная кристаллизация металлического и силикатного расплавов при $T = 1511-1060^{\circ}\text{C}$ со скоростью $\sim 10-100^{\circ}\text{C}/\text{год}$; 2) медленное остывание со скоростью порядка $100^{\circ}\text{C}/\text{млн. лет}$ при $T=870-450^{\circ}\text{C}$; 3) ударно-индуцированный нагрев и локальное плавление при температуре $\leq 1500^{\circ}\text{C}$ с последующей кристаллизацией при $T=1250-1350^{\circ}\text{C}$ со скоростью охлаждения $\sim 7 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^6 \text{ }^{\circ}/\text{с}$.

