



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. В.И. ВЕРНАДСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ГЕОХИ РАН)

Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, дом 19
Для телеграмм: Москва, В-334, ГЕОХИ РАН. Телефон: +7 (499) 137 14 84
Телефакс: +7 (495) 938 20 54. Эл. почта: director@geokhi.ru



УТВЕРЖДАЮ

Директор ГЕОХИ РАН,
Чл.-корр. РАН Ю. А. Костицын

«12» октября 2017 г.

ВЫПИСКА

Из протокола расширенного заседания лаборатории метеоритики диссертационного совета Д 002.109.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) от «12» октября 2017 г., посвященного представлению доклада С. Н. Тепляковой по материалам диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Список присутствующих на заседании:

1. Абдрахимов А. М., н.с., к.г.-м.н., ГЕОХИ РАН
2. Бадюков Д. Д., в.н.с., к.г.-м.н., зав. лаб., ГЕОХИ РАН
3. Бычков А. Ю., д.г.-м.н., проф., МГУ
4. Гусева Е. Н., н.с., ГЕОХИ РАН
5. Демидова С. И., с.н.с., к.г.-м.н., ГЕОХИ РАН
6. Забалуева Е. В., н.с., ГЕОХИ РАН
7. Иванова М. А., к.г.-м.н., ГЕОХИ РАН
8. Корочанцев А. В., к.г.-м.н., н.с., ГЕОХИ РАН
9. Лоренц К. А., к.г.-м.н., с.н.с., ГЕОХИ РАН
10. Мигдисова Н. А., к.г.-м.н., с.н.с., ГЕОХИ РАН

11. Назарова Д. П., м.н.с., ГЕОХИ РАН
12. Николаев Г. С., н.с., ГЕОХИ РАН
13. Рязанцев К. М., м.н.с., ГЕОХИ РАН
14. Садиленко Д. А., м.н.с., ГЕОХИ РАН
15. Скрипник А. Я., м.н.с., ГЕОХИ РАН
16. Теплякова С. Н., м.н.с., ГЕОХИ РАН
17. Хисина Н. Р., в.н.с., д.г.-м.н., ГЕОХИ РАН
18. Яковлев О. И., к.г.-м.н., с.н.с., ГЕОХИ РАН

ПОВЕСТКА ЗАСЕДАНИЯ:

Обсуждение диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук Тепляковой Светланы Николаевны на тему «Петрология и геохимия железных метеоритов группы ПЕ с силикатными включениями на примере метеорита Эльга» по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Научный руководитель: Лоренц Кирилл Александрович, к.г.-м.н., с.н.с., ГЕОХИ РАН.

Рецензенты представленной диссертации (экспертная комиссия диссертационного совета Д 002.109.02):

1. Бычков А. Ю., д.г.-м.н., проф., МГУ, председатель комиссии;
2. Базилевский А. Т., д.г.-м.н., проф., г.н.с., ГЕОХИ РАН;
3. Луканин О. А., д.г.-м.н., в.н.с., зам. дир. ГЕОХИ РАН;

СЛУШАЛИ:

научный доклад С. Н. Тепляковой «Петрология и геохимия железных метеоритов группы ПЕ с силикатными включениями на примере метеорита Эльга» (по материалам кандидатской диссертации). С. Н. Теплякова, младший научный сотрудник Лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН, представила основные результаты и актуальность своей кандидатской диссертации; определила цель и задачи исследования. Цель работы состояла в определении источника вещества и условий образования силикатных включений в метеоритах группы ПЕ на примере метеорита Эльга и установления наиболее вероятного механизма образования железных метеоритов группы ПЕ.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- 1) Анализ минерального состава и структуры металла метеоритов группы ПЕ и

силикатных включений в метеорите Эльга;

2) Установление валового химического состава и распределения редких элементов в металле метеоритов группы ПЕ и силикатных включениях метеорита Эльга;

3) Оценка скорости остывания железных метеоритов группы ПЕ на этапе кристаллизации и их термальной истории на посткристаллизационной стадии;

4) Моделирование кристаллизации железных метеоритов группы ПЕ и силикатных включений из Н-хондритовых расплавов.

Актуальность темы исследования:

Разнообразие химических групп железных метеоритов указывает на множественность их родительских тел. Принято считать, что железные метеориты – это фрагменты ядер астероидов, испытавших плавление и магматическую дифференциацию. При этом генетические связи железных метеоритов и метеоритов других типов не всегда ясны. Часть вещества, фракционированного в недрах малых тел на ранних стадиях их эволюции, была полностью преобразована поздними процессами или необратимо утрачена в ходе аккреции в более крупные тела и потому не представлена метеоритами.

Железные метеориты химической группы ПЕ чрезвычайно интересны для исследования металл-силикатного фракционирования вещества на ранних этапах развития Солнечной системы, а также в процессах, сопровождавших эволюцию астероидов, поскольку некоторые из них содержат силикатные включения примитивного хондритового или фракционированного состава. Исследования железных метеоритов становятся все более актуальными в связи с усовершенствованием точности и локальности методов химического и изотопного состава вещества, и развитием методов геохронологического датирования.

Особенности строения и состава астероидов, поверхность которых характеризуется большим содержанием металла (астероиды М-типа), не известны. Исключение составляют единичные радарные и телескопические спектральные наблюдения, позволяющие предполагать наличие на поверхности некоторых астероидов М-типа слоя металлических частиц с примесью силикатов, по плотности близкого к лунному реголиту. Часть силикатных компонентов могла поступать на поверхность М-астероидов в результате высокоскоростных ударных событий. При этом могло происходить образование вещества, аналогичного по строению железным метеоритам с силикатными включениями. Таким образом, получение новых данных о свойствах железных метеоритов, которые могут свидетельствовать о процессах преобразования вещества на поверхности их родительских тел, чрезвычайно актуально для интерпретации результатов наблюдений поверхности

астероидов М-типа, как при помощи наземных инструментов, так и с использованием космических аппаратов.

Исследования железных метеоритов становятся все более актуальны в связи с запланированным на 2025 год полетом космического аппарата к самому крупному астероиду М-типа в главном поясе – астероиду 16 Psyche (Психея). В российских перспективных проектах космических исследований также поставлена задача посещения крупных астероидов главного пояса, в том числе и М-типа, знания о возможных особенностях строения поверхности которых необходимы для планирования состава полезной нагрузки и разработки программ научных экспериментов.

Список заданных вопросов:

К.г.-м.н. Бадюков Д. Д.: почему стекло в силикатных включениях не подверглось раскристаллизации, если остывание металла с образованием видманштеттеновой структуры происходило со скоростью порядка 100° в миллион лет?

Теплякова С. Н. В силикатных включениях стекло на самом деле раскристаллизовано с образованием веерообразных агрегатов, вероятно плагиоклаза и фазы SiO_2 , но есть также участки нераскристаллизованного стекла в центральных частях включений. Они могли сохраниться за счет того, что стекла в силикатных включениях имеют высокое содержание кремнекислоты – 65 – 70% SiO_2 , что препятствует раскристаллизации.

К.г.-м.н. Бадюков Д. Д.: в стекольной промышленности сначала закалывают стекло, чтобы оно не закристаллизовалось, а потом выдерживают его при высоких температурах для снятия напряжений...

Теплякова С. Н.: аналогичный процесс происходил и в метеорите Эльга, силикатные включения были закалены на стадии смешения с металлом, а затем длительное время находились в условиях относительно высоких температур.

К.г.-м.н. Иванова М. А.: Чем вы можете объяснить аномальное распределение тугоплавких сидерофильных элементов в металле метеорита Майлз, и какую позицию занимает этот метеорит в представленной вами модели частично дифференцированного астероида?

Теплякова С. Н. Металл метеорита Майлз аномален тем, что обеднен Re, Os, Ir, что является признаком остаточной жидкости, но в то-же время, обеднен и несовместимыми элементами по сравнению с хондритовым металлическим расплавом, что является свойством твердой фазы. В ряде работ метеорит Майлз часто не

рассматривают вместе с другими метеоритами группы ПЕ как раз из-за его аномального состава, отчасти поэтому и не наблюдается магматический тренд у метеоритов этой группы. Метеорит Майлз, вероятнее всего, является твердой фазой, кристаллизовавшейся на стадии 70% фракционной кристаллизации, а обеднение тугоплавкими сидерофильными элементами это, возможно, результат рэлеевского истощения, когда за счет повышения содержания серы в остаточной жидкости коэффициенты распределения сидерофильных элементов между твердой фазой и жидкостью начинают меняться нелинейно. Кроме того, если бы Майлз кристаллизовался из остаточной жидкости, обогащенной серой, то он содержал бы порядка 5 % сульфида что не наблюдается. Позиция метеорита Майлз в модели – это центральная часть металлического ядра частично дифференцированного астероида.

К.г.-м.н. Яковлев О. И.: Поясните, что вы понимаете под фракционной кристаллизацией металлического расплава? Что там, собственно, фракционирует?

Теплякова С. Н.: Под этим понимается процесс кристаллизации металлического расплава, который образуется при сегрегации металлической жидкости из полностью расплавленного вещества Н-хондрита, причем все сидерофильные элементы перераспределяются в металл. В результате в центральной части астероида образуется жидкое металлическое ядро, которое начинает кристаллизоваться от внешней границы ядра к центру за счет потери тепла и, соответственно, понижения температуры, в начале образуются кристаллы наиболее обогащенные тугоплавкими сидерофильными элементами, на последних стадиях – сильно обедненные тугоплавкими сидерофильными элементами, состав которых становится близок к составу исходной жидкости, как например метеорит Эльга, образовавшийся на стадии 60% кристаллизации..

Д.г.-м.н. Бычков А. Ю.: Есть еще хороший термин для этого процесса в экспериментальных работах – направленная кристаллизация, когда внешняя поверхность охлаждается и кристаллы растут от поверхности к центру.

Теплякова С. Н.: Да, такой процесс и подразумевался.

К.г.-м.н. Яковлев О. И.: Каков, по вашему мнению, должен быть размер Н-хондритового родительского тела?

Теплякова С. Н.: Порядка пятисот километров в диаметре.

К.г.-м.н. Яковлев О. И.: За счет чего в таком относительно небольшом теле могла произойти магматическая дифференциация при отсутствии гравитационного сжатия?

Теплякова С. Н. Вероятно за счет тепла, выделившегося при распаде радиоактивного изотопа ^{26}Al .

К.г.-м.н. Бадюков Д. Д.: У вас происходит десятикратное обогащение РЗЭ, это за счет кристаллизации? То есть, РЗЭ уходят в остаточную жидкость?

Теплякова С. Н. Да, поскольку состав силикатных включений соответствует либо составу остаточного расплава при 70-75% кристаллизации либо расплаву, образующемуся при 25% частичном плавлении. Однако включения богаче щелочными металлами по сравнению с модельной жидкостью, и РЗЭ тоже, что можно объяснить, например, тем, что в источнике расплава было повышенное содержание фосфата.

К.г.-м.н. Лоренц К. А.: или фосфат в источнике был сильно обогащен РЗЭ, что возможно поскольку в хондритах концентрации РЗЭ в фосфатах варьируют в очень широких пределах, до 300хСІ например.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р. Сопоставляли ли вы состав мерриллита в силикатных включениях метеорита Эльга с составами других фосфатов, например, в лунных и марсианских породах?

Теплякова С. Н. Да, такое сопоставление было выполнено, мерриллит в Эльге отличается по распределению редкоземельных элементов от фосфатов в других метеоритах поскольку демонстрирует положительные европиевую и итербиевую аномалии. Обычно-же фосфаты кристаллизуются на заключительных этапах кристаллизации магмы и обеднены европием за счет его распределения в плагиоклаз. Вероятно, в силикатных включениях фосфат является основным носителем редкоземельных элементов – европия и итербия, выполняет роль плагиоклаза, и мы пришли к выводу что мерриллит кристаллизовался из расплава первым, в виде высокотемпературного альфа-мерриллита.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р.: О чем может свидетельствовать высокое содержание фосфора в силикатных включениях, ведь там много крупных выделений фосфата?

Теплякова С. Н.: В хондритах, например, кларк фосфора весьма невелик, в то время как действительно, метеориты ПЕ содержат много фосфидов и фосфатов, что может быть только результатом концентрирования фосфора в металлическую фазу при полном плавлении хондритового источника.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р.: Кажется, Ружичка интерпретировал фосфат в силикатных включениях как результат редокс-реакции, восстановления железа, окисления фосфора из шрейберзита...

Теплякова С. Н.: Мы рассматривали возможность такой реакции на границе силикатных включений и шрейберзитовых кайм, но при расчете валового состава оказалось, что содержание фосфора в силикатных включениях соответствует хондритовому, то есть из шрейберзита фосфор не поступал, и фосфат образовался из

расплава силикатных включений. Кроме того, состав включений настолько кислый, что при таком содержании SiO₂ фосфор с трудом диффундирует в силикатный расплав.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р.: Да, и состав шрейберзита при этом менялся бы, чего нет, так?

Теплякова С. Н.: Да.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р.: А вы исследовали составы шрейберзита на разных участках с разной морфологией?

Теплякова С. Н. Да, мы провели такое исследование, шрейберзит образует несколько генераций, различающихся по железистости, и мы связали это с температурой образования.

К.г.-м.н. Яковлев О. И.: А за счет чего составы включений такие кислые?

Теплякова С. Н. За счет небольшой степени частичного плавления, например.

К.г.-м.н. Яковлев О. И.: это потребовало-бы эффективного отделения образующейся жидкости.

К.г.-м.н. Бадюков Д. Д.: По-видимому, такой процесс имел место. У меня замечание к рисунку – у вас подпись к вертикальной оси - образец/С1 хондрит, «образец» нужно заменить на «элемент».

Теплякова С. Н. Согласна.

Н.с. Скрипник А. Я.: Насколько скорости остывания при образовании видманштеттеновой структуры в магматических железных метеоритах были ниже чем в метеоритах группы ПЕ?

Теплякова С. Н. Скорости охлаждения находятся в интервале 1-100° С в миллион лет в зависимости от группы метеоритов.

Н.с. Скрипник А. Я.: Каким образом сформировалась такая зональность в силикатных включениях – от контактов с металлом к центру?

Теплякова С. Н.: Кристаллизация началась на поверхности контакта включений с металлом и продолжалась за счет потери тепла через стенки включения в металл, обладающий высокой теплопроводностью. Поэтому рост кристаллов начался на стенках.

К.г.-м.н. Яковлев О. И.: Все эти метеориты, о которых вы говорили – они имеются в нашей коллекции и вы сами их изучали?

Теплякова С. Н.: Да.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р.: Замечания к рисункам: 1) на первом рисунке – на диаграмме Fe-Ni не подписана горизонтальная ось; 2) в отношении графика распределения сидерофильных элементов – там в легенде не хватает ссылок, это чьи данные?

Теплякова С. Н.: Данные по метеоритам без ссылок – это мои собственные результаты, которые я получила в результате лично выполненных измерений во время работы в университете Флориды, в США.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р. Надо обозначить тогда, что это полученные вами результаты. Далее – линии обозначающие модельный состав остаточной жидкости – их нужно сделать более заметными.

К.г.-м.н. Яковлев О. И.: на этом-же рисунке – одно условное обозначение отсутствует в легенде, это нужно дополнить.

Теплякова С. Н.: Это литературные данные по метеориту Майлз.

ВЫСТУПИЛИ:

Д.г.-м.н., проф. Бычков А. Ю., председатель экспертной комиссии: Я прочел эту работу с увлечением и почерпнул из нее много нового. Я не специалист в метеоритике и мне трудно оценить новизну работы, но та часть, которая касается физической химии, в этой работе мне очень понравилась. Здесь были применены практически все современные методы, которые обычно используются для земных горных пород – фазовые диаграммы, термометры, компьютерное моделирование процессов кристаллизации, и результат получился убедительным. Конечно, в работе остались некоторые вопросы, но они, на мой взгляд, выходят за рамки работы. Например, чтобы произошла ликвация фосфидной жидкости, в расплаве должно быть около трех процентов фосфора – и в работе показано что так оно и было. Но в чем причина такого глобального обогащения фосфором – это не совсем понятно, но – это предмет дальнейшей работы. Все необходимые публикации имеются, основные положения работы опубликованы. Я поддерживаю эту работу и считаю, что ее можно защищать на геохимическом совете.

Д.г.-м.н. Хисина Н. Р.: В работе есть, на мой взгляд, два абсолютно новых момента, которые нигде раньше не рассматривались – это магматическая природа металла метеоритов ПЕ, которые традиционно считаются немагматическими. Я считаю, что это существенный вклад в систему классификации железных метеоритов. Далее - новый подход - это применение компьютерного моделирования к процессам образования метеоритов. Убедительное подтверждение Н-хондритового источника это тоже новый результат.

К.г.-м.н. Лоренц К. А., научный руководитель: Работа была долгая и сложная, поскольку в ней было использовано много разных подходов, мне пришлось разобраться во многих вещах, и то что получилось в результате, мне понравилось своей логичностью. Действительно, два независимых метода исследования привели к одному результату –

продемонстрировали Н-хондритовую природу метеоритов ПЕ, подтвердив тем самым предположения, сделанные ранее на основе также независимых изотопных исследований. Это уникальная ситуация поскольку примитивные источники дифференцированных тел как правило неизвестны, многие тела аккретировали в планеты и не представлены метеоритами. А в этом случае мы наблюдаем замечательную картину, что примитивное эйч-хондритовое вещество действительно частично фракционировало и мы видим продукты этого фракционирования и можем использовать выработанную методологию для реконструкции процессов фракционирования других примитивных источников. До сих пор неизвестно из какого примитивного источника образовалась Земля, или астероид Веста, например. А в этой работе все очень красиво получается, я доволен работой, хотя она была очень долгой и трудной. Светлана Николаевна работала над диссертацией девять лет, и, думаю, сейчас мы наблюдаем закономерный хороший результат, который пришла пора защищать.

К.г.-м.н. Иванова М. А.: На конференциях я часто встречаюсь с профессором Муниром Хумаюном, с которым Светлана Николаевна работала во Флоридском университете, и он дает очень высокую оценку ее работе и хочет продолжать совместные исследования метеоритов.

К.г.-м.н. Бадюков Д. Д.: Работа блестящая, прекрасный доклад, все ясно изложено, материал богатейший, и я убежден, что Светлана Николаевна может успешно защитить эту работу.

ПОСТАНОВИЛИ:

Одобрить и рекомендовать работу С.Н. Тепляковой «Петрология и геохимия железных метеоритов группы ПЕ с силикатными включениями на примере метеорита Эльга» к защите в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 в диссертационном совете Д 002.109.02 при Институте геохимии и аналитической химии им В. И. Вернадского РАН.

Рекомендовать в качестве официальных оппонентов следующих специалистов:
Осадчего Евгения Григорьевича, доктора химических наук, профессора, заместителя директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт экспериментальной минералогии Российской академии наук (ИЭМ РАН), г. Черноголовка;
Бритвина Сергея Николаевича, доктора геолого-минералогических наук, доцента кафедры кристаллографии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), г. Санкт-Петербург.

Назначить в качестве ведущей организации Уральский Федеральный Университет им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург.

Председатель расширенного заседания,
к.г.-м.н., зав. лаб. Бадюков Д. Д.



Ученый секретарь
расширенного заседания,
к.г.-м.н., н.с. Абдрахимов А. М.

