



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002,  
факс: +7 (343) 375-97-78; тел.: +7 (343) 374-38-84  
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)  
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru  
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

19 ОКТ 2017

№ 05-19/1-151

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке

В.В. Кружаев

«24» 2017 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Тепляковой Светланы Николаевны «Петрология и геохимия железных метеоритов группы ПЕ с силикатными включениями на примере метеорита Эльга», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поиска полезных ископаемых.

Диссертационная работа С. Н. Тепляковой, выполнена на пересечении нескольких разделов наук о Земле и посвящена актуальной проблеме геохимии – проблеме состава и происхождения железных метеоритов, которая связана не только с вопросами эволюции малых тел Солнечной системы – астероидов, но и затрагивает проблемы происхождения планет Земной группы, а также прикладные аспекты сравнительной планетологии, в том числе исследования астероидов с использованием космических аппаратов. Актуальность темы не вызывает сомнения в связи с растущими в мировой науке тенденциями, направленными на развитие областей знания, связанных с изучением Солнечной системы, в том числе Луны, Марса и астероидов как в фундаментальном, так и в научно-прикладном аспектах, а в перспективе – направленных на освоение человечеством космического пространства. В перспективных планах государственных космических агентств России и зарубежных стран на ближайшее десятилетие одно из первых мест занимают исследовательские полеты автоматических

космических аппаратов к астероидам, в том числе богатым металлом астероидам М-типа, для решения задач космохимии, отработки мер по противодействию метеоритной опасности и выработки практических подходов к освоению минеральных ресурсов астероидов. С этой точки зрения вопросы, освещенные в работе С. Н. Тепляковой, также весьма актуальны. Железные метеориты занимают важное место в системе знаний о строении планет Земной группы, недра которых недоступны для непосредственного изучения. Исследование железных метеоритов с силикатными включениями, предпринятое С. Н. Тепляковой, объединяет проблемы эволюции химического состава металлических ядер дифференцированных астероидов с проблемами фракционирования силикатного вещества, слагающего внешние оболочки таких тел. Такой подход позволяет представить множество процессов, которые происходили на ранних этапах развития Солнечной системы, и могли иметь место, в том числе, и в истории прото-Земли, других планет земной группы и, вероятно, землеподобных экзопланет. В этом, по моему мнению, также проявляется ценность работы С. Н. Тепляковой с точки зрения фундаментальной науки.

Представленная к защите диссертационная работа оформлена в виде одного тома, и состоит из введения, шести глав и заключения. Диссертация содержит 150 страниц и включает 48 иллюстраций и 15 таблиц. Список использованной литературы содержит 212 ссылок, большинство из которых иностранные.

Работа подчинена своеобразной внутренней логике, согласно которой материал, в целом, излагается в соответствии с последовательностью сформулированных задач, и каждая из четырех глав, посвященных определенным аспектам работы, завершается выводом, содержащим соответствующее защищаемое положение. Однако, в выводах к главам, возможно, стоило бы четко выделить формулировки защищаемых положений.

Апробация результатов исследований, положенных в основу работы, по-видимому успешно прошла на серии международных и всероссийских конференций. По результатам работы С. Н. Тепляковой с соавторами опубликовано 5 статей в отечественных и зарубежных журналах. Однако, ни в диссертации ни в тексте автореферата не указано, сколько из статей опубликовано в журналах, входящих в перечень ВАК; впрочем, по прочтении становится понятно, что качество и количество

публикаций соответствуют требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией к кандидатским диссертациям.

Во **введении** обоснован выбор темы работы и ее актуальность, сформулирована цель работы, дана характеристика фактического материала, перечислены задачи исследований, раскрыта научная новизна, показана возможная практическая значимость и отражен личный вклад автора. Здесь же приводятся формулировки основных защищаемых положений работы.

Работу открывает **глава 1** - литературный обзор, который весьма полно освещает историю изучения железных метеоритов, современное состояние исследований в этой области, принципы сложившихся к настоящему времени структурных и химических классификаций железных метеоритов, их минеральный и химический состав, закономерности процессов субсолидусных превращений железо-никелевых фаз и формирующиеся при этом характеристические структуры метеоритов. Отдельно рассмотрены результаты и проблематика исследований силикатных включений в железных метеоритах, в том числе в метеоритах группы ПЕ. В этой главе автором, по-видимому, упущена общая характеристика особенностей изотопного состава тяжелых элементов в железных метеоритах, о которых, в отношении метеоритов ПЕ, сообщается в главе 3 (стр. 44).

**Вторая глава** посвящена методам исследования и содержит описание оборудования и особенностей методик измерений, использованных автором.

**Третья глава** составлена на основе выполненных автором измерений концентраций редких сидерофильных элементов в метеоритах ПЕ, в основном методом ЛА-ИСП-МС, сравнения результатов анализа с результатами измерений предшествующих исследователей, использовавших другие методы, и генетической интерпретации данных. Показано что состав метеоритов ПЕ наиболее близок к составу металлической фракции расплава, который может быть получен при плавлении Н-хондритового источника, обоснованы принципы моделирования кристаллизации такого расплава и приведены его результаты, которые находятся в соответствии с составами метеоритов ПЕ, чем подтверждают гипотезу об их магматическом происхождении в результате фракционной кристаллизации.

**Глава 4** посвящена результатам минераграфических исследований структуры металла метеоритов группы ПЕ, на основе которых определены физико-химические условия их образования и метаморфизма. Структуры металла классифицированы на три генетические группы, первичную (магматическую), вторичную (результат постмагматических субсолидусных превращений) и ударно-метаморфическую, формирование каждой из которых достаточно детально раскрывается как серия процессов происходящих в изучаемой системе при изменениях температуры, также дается оценка скорости этих изменений.

**В главе 5** представлены результаты минералого-петрографического и геохимического исследования силикатных включений метеорита Эльга. Освещена последовательность кристаллизации минералов в силикатных включениях и отмечены соответствующие этой последовательности изменения химического состава фаз, в том числе концентраций в них редких литофильных элементов.

На ряде примеров убедительно доказывается тезис о сингенетичности силикатных включений в метеорите Эльга как однотипных зональных объектов, и рассчитывается средний валовый химический состав вещества силикатных включений. Полученный таким образом состав использован в качестве исходного для моделирования ряда возможных процессов кристаллизации, в результате чего продемонстрировано, что очень похожий состав образуется после 75% равновесной кристаллизации Н-хондритового расплава. Также показано как из модельного расплава при его равновесной кристаллизации образуются фазы, по составу соответствующие минералам силикатных включений и делается вывод о том, что кристаллизация силикатных включений завершилась закалкой при температуре порядка 1100°C.

**В главе 6** представлен сценарий образования метеоритов группы ПЕ, который в целом представляется непротиворечивым и в основном учитывающим все (или большинство) наблюдаемые особенности метеоритов ПЕ с силикатными включениями.

**Заключение** содержит основные выводы работы С. Н. Тепляковой.

Представленная к защите работа выполнена на основе большого объема наблюдательных и аналитических данных, полученных в результате исследования образцов внеземного вещества (железных метеоритов) комплексом современных методов физико-химического исследования твердых тел. Исследования выполнены на высоком

научном уровне, соответствующем современному уровню исследований в этой области науки.

В работе дается исчерпывающее обобщение результатов исследования железных метеоритов, в том числе метеоритов химической группы ПЕ, полученных за последние более чем 200 лет. С этими работами исследования, выполненные непосредственно автором, образуют органичный комплекс. Автор работы метко, как нам кажется, выделяет ряд ключевых моментов в структуре и химическом составе железных метеоритов группы ПЕ, которые стали своего рода ключами к раскрытию генезиса этих объектов и детальному воспроизведению их химической и термической истории. Автор совершенно справедливо обратил внимание на то, что мелкокристаллическая структура некоторых метеоритов группы ПЕ, отнесенная авторами предшествующих работ на счет процессов, происходивших на поверхности родительских тел метеоритов, не определяет происхождение металла в этих процессах. Используя современные методы моделирования геохимических процессов автор показал, что металл метеоритов ПЕ имеет глубинное происхождение и сформировался при длительной кристаллизации металлического расплава, сегрегированного из полностью расплавленного вещества хондритов Н-группы. Поликристаллическая же структура метеоритов ПЕ является результатом повторного плавления химически фракционированного металла в ударном процессе на поверхности родительского тела. Неожиданным является наблюдение автором взаимосвязи структуры и химического состава шрейберзита, образующегося в последовательности процессов, определивших облик метеоритов ПЕ – кристаллизации из расплава, субсолидусного охлаждения, ударно-инициированной рекристаллизации и локального плавления вещества. В этих процессах шрейберзит может использоваться как температурный индикатор.

Детальное исследование химического состава ряда метеоритов ПЕ, сфокусированное на анализе распределения редких сидерофильных элементов показывает, что метеориты ПЕ представляют собой промежуточные продукты единого процесса фракционной кристаллизации металлического расплава из одного источника, который, вероятно был близок по составу к металлической выплавке из полностью расплавленного Н-хондритового вещества. Таким образом, высказанное ранее предположение о генетической связи метеоритов ПЕ с обыкновенными хондритами Н-

группы, сделанное на основе анализа изотопов меди и молибдена в металле и кислорода в силикатных включениях, нашло в работе С. Н. Тепляковой еще одно подтверждение, что открывает путь к обоснованным физико-химическим реконструкциям процессов фракционирования примитивного вещества в недрах дифференцированных астероидов.

Такое же значение имеет выполненное автором компьютерное моделирование процесса кристаллизации силикатных включений – оказывается, химический состав включений соответствует составу расплава при примерно 75%-й равновесной кристаллизации силикатного расплава Н-хондрита. К этому результату автор приходит в результате тщательного подсчета модальных минеральных составов силикатных включений разных структурных типов силикатных включений и *in situ* химического анализа слагающих их главных и второстепенных минералов, что позволило реконструировать валовый химический состав вещества силикатных включений. При этом автор сумел отойти от устоявшихся взглядов на силикатные включения как антигенетичные, разнородные по происхождению объекты и предметно показать на примере метеорита Эльга, что на самом деле, в пределах одного метеорита силикатные включения являются сингенетичными объектами зонального строения. Поразительно, что такой, казалось бы, непростой, многоступенчатый подход к выявлению среднего валового химического состава силикатных включений привел в результате к выводу о явной генетической связи силикатных включений метеоритов ПЕ и силикатной составляющей Н-хондрита, полученному автором также путем исследования геохимии сидерофильных элементов в металле метеоритов ПЕ и находящемуся в соответствии с предшествующими изотопными исследованиями этих метеоритов.

Таким образом, определяемая четырьмя независимыми методами связь ПЕ и Н-хондритов может считаться вполне установленной, что имеет несомненно важное значение для исследований в области образования и эволюции твердого вещества в Солнечной системе с одной стороны, и, по-видимому, осталось не в полной мере осознанным самим автором работы. Дело в том, что особенностью метеоритов, как одного из основных источников информации о составе и строении малых тел и планет Солнечной системы, является непредставительность. За минувшие с момента ее зарождения 4.567 млрд лет многие родительские тела примитивного и дифференцированного состава были бесследно уничтожены в процессах формирования

крупных планет или были выброшены из системы под влиянием формирующихся планет-гигантов. Поэтому очень часто, а практически никогда, не имеется данных о том, какое примитивное (хондритовое) вещество было предшественником того или иного типа дифференцированных метеоритов или вещества, которым сложены планеты земной группы. В случае, рассмотренном в работе С. Н. Тепляковой такая связь видна, и методология ее реконструкции, вероятно, может быть использована как при детальном исследовании других железных метеоритов с силикатными включениями, так и в модельных построениях магматической эволюции малых тел, имевших различный исходный примитивный состав.

И это далеко не все интересные особенности работы, на которых хотелось бы остановиться. Помимо научных достижений нельзя не отметить скрупулезный подход С. Н. Тепляковой к документации исследований. Работа содержит таблицу, в которой все объекты исследования упомянутые в работе, поставлены в соответствие с инвентарными номерами образцов в коллекции метеоритов Российской академии наук, что обеспечивает доступность материала для последующих исследователей.

К представленной работе имеются следующие **замечания и вопросы**:

1. В первом защищаемом положении указывается, что металл метеорита Эльга соответствует 60% стадии фракционной кристаллизации, при этом в заключении указано, что силикатные включения образовались при 75% равновесной кристаллизации или в результате 25% частичного плавления Н-хондритового источника. Поясните, пожалуйста, как соотносятся приведенные значения?
2. Во втором защищаемом положении приводятся оценки температур и скоростей охлаждения на разных этапах термальной истории изученных метеоритов, при этом в тексте диссертации не приводится оценок погрешности расчетов приведенных значений.
3. Как соотносятся термическая история вещества метеорита Эльга, полученная из анализа структуры металлической фазы и по данным силикатных включений?
4. В недавних работах по силикатным включениям в метеорите Эльга (Litasov, Podgornykh, 2017; Шарыгин. 2017а, б) указывается на присутствие

высокнатровых фосфатов (чохраньскиит, панетит, маричит, брианит и др.), а также энigmatита, рутила и Na-Fe-оксиамфибола. Помимо этого описана силикат-петрофосфатная жидкостная несмесимость для некоторых силикатных включений. Как эти данные соотносятся с результатами, полученными автором? В частности, с выделенными типами силикатных включений для метеорита Эльга?

5. Какие из процессов образования ударно-метаморфизованных структур могут быть связаны со взрывными работами на прииске «Разведчик», в результате которых метеорит был обнаружен?
6. Представленный текст содержит незначительное количество опечаток, стилистических неточностей и расстановок знаков препинания, которые носят исключительно редакционный характер. Так, например, на наш взгляд правильнее использовать термин "термическая история" вместо "термальная история". Опечатки в автореферате: тезисы (стр. 24); ксеноморфный шрейберзит кристаллизовалась (стр. 13); может продолжает (стр. 11) и др.

## **Заключение**

Можно заключить, что диссертационная работа Светланы Николаевны Тепляковой представляет собой стройное завершенное научное исследование, основанное на большом объеме фактического материала и содержащее несомненно интересные результаты. Исследовательские задачи, поставленные автором при выполнении работы, осуществлены успешно с привлечением наиболее современных методов исследования и анализа данных. Цель работы – установление происхождения метеоритов химической группы ШЕ - можно считать достигнутой. Публикации автора свидетельствуют о его большом личном вкладе в проведение исследований в рамках сформулированной научной проблемы.

Приведенные выше замечания несколько не умаляют научное значение работы, которая характеризует Светлану Николаевну как зрелого высококвалифицированного исследователя. Диссертационная работа С. Н. Тепляковой «Петрология и геохимия железных метеоритов группы ШЕ с силикатными включениями на примере метеорита

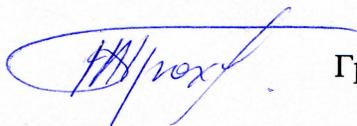
Эльга» в отношении основного текста, содержания автореферата, актуальности, новизны и практической значимости соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 - геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Отзыв обсужден на научном семинаре лаборатории EXTRA TERRA CONSORTIUM и одобрен на заседании кафедры Физических методов и приборов контроля качества Физико-технологического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол № 3 от 12 октября 2017 г.

Отзыв составлен кандидатом технических наук, профессором кафедры физических методов и приборов контроля качества В.И. Гроховским, тел.:+7 (922)222-58-48, E-mail: v.i.grokhovsky@urfu.ru

Зав. лабораторией

EXTRA TERRA CONSORTIUM



Гроховский Виктор Иосифович

Зав кафедрой физических методов

и приборов контроля качества,

д.ф.-м.н., профессор

Тел.:+7 (343)375-93-74

E-mail: i.a.weinstein@urfu.ru



Вайнштейн Илья Александрович