

ОТЗЫВ

Официального оппонента доктора геолого-минералогических наук Силантьева Сергея Александровича на диссертацию Сапегинной Анны Валерьевны на тему «Термодинамические условия образования коровых ксенолитов из кимберлитовых трубок Удачная и Зарница Сибирского кратона», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3. петрология, вулканология.

Диссертационная работа А.В.Сапегинной посвящена оценке термодинамического режима образования метаморфического субстрата коровых ксенолитов из кимберлитовых трубок Удачная и Зарница Сибирского кратона (Якутия, Россия). Существующие представления о P-T условиях образования коровых ксенолитов из рассмотренных в диссертационной работе кимберлитовых трубок базируются на определениях, полученных с использованием традиционных в метаморфической петрологии минеральных термобарометров. Сведения об окислительно-восстановительных условиях, которые сопутствовали метаморфизму нижнекорового субстрата или крайне скудны, или отсутствуют вовсе. Предметом изучения диссертантки служили семь образцов гранулитов из ниже-среднекоровых ксенолитов кимберлитовых трубок Удачная и Зарница (Далдын-Алакитское кимберлитовое поле, Якутия). А.В.Сапегина, в отличие от работ предшественников, привлекла к своему исследованию метод моделирования фазовых равновесий с использованием программного комплекса Perple_X, что позволило ей получить новые оценки P-T- f_{O_2} параметры образования ксенолитов гранулитов из изученных кимберлитовых трубок. Полученные ею данные позволяют более уверенно судить о специфике флюидного режима и окислительно-восстановительных условий в основании коры в докембрии. Диссертанткой было установлено, что метаморфизм, ответственный за образование субстрата ксенолитов, протекал в условиях дефицита флюида, имевшего водно-солевой состав. В ксенолите высокомагнезиальных гранулитов из кимберлитовой трубки Зарница впервые обнаружены два типа симплектитов, образованных при взаимодействии материала ксенолитов с транспортирующим их к поверхности кимберлитовым расплавом. Результаты сравнительного анализа значений отношения $Fe^{3+}/\sum Fe$ в клинопироксенах из коровых ксенолитов, измеренных с помощью мёссбауэровской спектроскопии и полученных при пересчёте микрозондовых анализов на кристаллохимические формулы, позволили диссертантке прийти к выводу, что кристаллохимические пересчёты микрозондовых анализов клинопироксенов из неэклогитовых пород обеспечивают корректную оценку содержания Fe^{3+} в них.

Полученные диссертанткой в ходе проведенного ею исследования результаты вносят ощутимый вклад в разработку новых подходов к изучению нижнекоровых ксенолитов,

выносимых к поверхности кимберлитовыми расплавами, и способствуют развитию существующих представлений об условиях образования метаморфических комплексов Сибирского кратона и его геодинамических аналогов.

По теме диссертации А.В. Сапегинной были опубликованы 3 статьи в рецензируемых зарубежных и российских научных журналах и 16 тезисов докладов. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Текст диссертации размещён на 125 страницах, включает 60 рисунков, 7 таблиц и список литературы, состоящий из 204 источников. Дополнительные материалы представлены в пяти приложениях.

В **Главе 1** рассмотрены существующие представления о составе, возрасте и условиях образования коровых ксенолитов в кимберлитах. Дается полноценный обзор гранулитовых ксенолитов, распространенных в архейских и палеопротерозойских кратонах различных регионов. Обсуждаются современные модели образования континентальной коры, использующие различные геодинамические сценарии. В главе представлен также синтез петрологических, геохронологических и геохимических данных о гранулитовых ксенолитах, выносимых к поверхности кимберлитовыми трубками Удачная и Зарница.

Глава 2 посвящена описанию методов исследования. Диссертантка использовала практически весь арсенал современных методов изучения пород и минералов, практикуемый в метаморфической петрологии. К этим методам относятся электронно-зондовый микроанализ, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (LA-ICP MS), мёссбауэровская и КР-спектроскопия. Для определения P-T условий метаморфизма использовались традиционные геотермобарометры: гранат-клинопироксеновый геотермометр, гранат-ортопироксеновый геотермобарометр, и гранат-плагиоклаз-клинопироксен (ортопироксен)-кварцевый геобарометр. Для определения T и fO_2 был применён окситермометр, имплементированный в Excel программу PLMAT (Lepage, 2003). Моделирование фазовых равновесий осуществлялось с помощью программного комплекса Perple_X (Connolly, 2005), основанном на псевдолинейной минимизации энергии Гиббса для расчёта характерных минеральных парагенезисов при заданном валовом составе системы и учете физико-химических параметров флюидного режима. В рамках использования комплекса Perple_X были рассчитаны эффективные составы ксенолитов для каждого образца из изученной коллекции. Рассчитанные эффективные составы гранулитов были использованы для построения P-T и T- fO_2 фазовых диаграмм для ксенолитов.

В **Главе 3** приводится петрографическое описание изученных ксенолитов. Гранулиты сложены парагенезисом $Crx + Grt + Pl \pm Opx \pm Amp \pm Scp$. В единственном образце, из

отобранных в трубке Удачная был обнаружен скаполит. К аксессуарным фазам относятся ильменит с ламелями титаномагнетита, апатит и сульфиды Fe-Cu-Ni. Показано, что вторичные изменения, наблюдаемые во всех изученных ксенолитах связаны с их взаимодействием с кимберлитовым расплавом и проявлены в виде прожилков, выполненных флогопитом, карбонатом и серпентином. Гранулиты из ксенолита трубки Зарница представлены породами с гнейсовидной текстурой, сложенными гранатом, клинопироксеном и плагиоклазом. В подчинённых количествах присутствуют скаполит, кулькеит и тальк. Кварц наблюдается только в виде включений в гранате. В гранулитах трубки Зарница диссертантка обнаружила симплектиты двух типов – клинопироксен-кианитовые (Срх-Ку) и ортопироксен-плагиоклазовые (Орх-Pl). Вторичные изменения в гранулитах трубки Зарница, как и в случае гранулитов трубки Удачная, связаны с взаимодействием с кимберлитовым расплавом, при этом, калиевый полевой шпат замещает плагиоклаз по границам и жилам внутри зёрен, а также частично замещает кианит из Срх-Ку симплектитов и плагиоклаз из Орх-Pl симплектитов. Ко вторичным фазам относятся также выполняющие жилы и зоны перекристаллизации флогопит, хлорит и кальцит.

В Главе 4 приведены данные о составе породообразующих минералов, слагающих изученные гранулиты. Показано, что клинопироксен в этих породах характеризуется зональностью, проявленной в увеличении магнезиальности и уменьшении содержания глинозема в обрастающих его каймах. Приведены данные о содержании Fe³⁺ в клинопироксенах, которые были получены с помощью мёссбауэровской спектроскопии. Установлено, что клинопироксены в большинстве образцов характеризуются зональностью по содержанию редких элементов: каймы обеднены HREE и LILE. Гранаты во всех образцах соответствуют пироп-альмандин-гроссуляровому твёрдому раствору и содержат 23-38 мол.% (трубка Удачная) или 38-53 мол.% (трубка Зарница) пироба. Плагиоклаз обнаруживает широкие вариации состава (от 28 до 42 мол. % анортитовой молекулы) и демонстрирует обогащение LREE. Установлено, что глиноземистость ортопироксена сильно зависит от его пространственных соотношений с гранатом: на контакте с гранатом содержание Al₂O₃ снижается, а его максимальные содержания установлены в ортопироксене в безгранатовых участках породы. Кальциевый амфибол во всех изученных образцах представлен паргаситом, содержание хлора в котором достигает 1,6 мас.%. Присутствие скаполита, отвечающего по составу мейониту, было установлено в образце из трубки Удачная. Кианит, участвующий в строении кианит-клинопироксеновых симплектитов, был обнаружен в гранулитах трубки Зарница, а его присутствие в породе подтверждено методом КР-спектроскопии.

Глава 5 посвящена основной проблеме, рассматриваемой в диссертационной работе А.В.Сапегинной: оценке термодинамического режима метаморфизма ксенолитов трубки Удачная и Зарница. Определение P-T- f_{O_2} условий метаморфизма ксенолитов из трубки Удачная проводилось методами моделирования фазовых равновесий и классической геотермобарометрии. Моделирование фазовых равновесий выполнялось в многокомпонентной системе с помощью обновленной версии программного комплекса *Perple_X* (Connolly, 2005). Для расчёта фазовых диаграмм диссертантка применила оригинальный метод, основанный на использовании эффективного состава ксенолитов вместо валового их состава. Этот подход, по мнению А.В.Сапегинной, позволил устранить при расчетах влияние эффекта реакционного взаимодействия кимберлитового расплава с ксенолитами, вызывающего локальное изменение их состава. Таким образом, допуская негативное влияние на результаты расчета фазовых диаграмм состава магматических ядер клинопироксена, эти данные были исключены из расчетов для всех изученных образцов. Полученная оценка термодинамических условий формирования гранулитов трубки Удачна составила: T = 600 - 660°C, P = 0,8 – 1.0 ГПа. В случае ксенолита из трубки Зарница фазовые P-T диаграммы были построены для эффективного состава гранулита, рассчитанного для участка шлифа, слабо затронутого вторичными преобразованиями и с учётом присутствия симплектитов, замещающих первичные минералы ксенолита. Для гранулитов трубки Зарница были получены более высокие, чем в случае трубки Удачная, оценки температуры и давления, которые составили T = 700 - 750°C, P = 1,2 – 1.3 ГПа. Согласно полученным диссертанткой данным, образование ортопироксен-плагиоклазовых симплектитов, развитых по гранату, происходило при 900°C и 0.6 ГПа. Клинопироксен-кианитовые симплектиты, по мнению диссертантки, образуются в неизохимических условиях, поэтому при расчетах реакций минералообразования использовались реальные составы граната, плагиоклаза и клинопироксена. Расчетные данные свидетельствуют, что эти симплектиты были образованы при 750°C и 1.3 ГПа. Диссертантка указывает, что полученные ею значения P-T параметры соответствуют условиям амфиболитовой, а не гранулитовой фации метаморфизма, согласно существующей фациальной систематике метаморфических пород. Однако, она обосновано считает, что сохранность гранулитового парагенезиса (Cpx-Grt-Pl) в изученных ею ксенолитах определяется малыми количествами или отсутствием флюидной фазы в процессе метаморфической эволюции корового субстрата.

В клинопироксенах из трёх ксенолитов трубки Удачная с помощью мёссбауэровской спектроскопии были измерены отношения $Fe^{3+}/\sum Fe$. Результаты сравнения полученных таким образом данных с расчётными отношениями $Fe^{3+}/\sum Fe$, полученными при пересчете микронзондовых анализов клинопироксенов на кристаллохимические формулы, показало,

что пересчёты микронзондовых анализов состава клинопироксена из мафических гранулитов с высокой точностью воспроизводят содержания Fe^{3+} в них. Это позволяет использовать этот метод оценки содержания Fe^{3+} при определении окислительно-восстановительных условий образования метаморфических пород.

Обсуждение результатов и их интерпретация представлены в **Главе 6**. Предпринятое в работе моделирование фазовых равновесий показало корреляцию содержания амфибола в полях фазовых диаграмм и количества воды в эффективном составе. Поскольку количество амфибола в изученных гранулитах крайне мало, диссертантка пришла к выводу о дефиците водного флюида при уравнивании всех минералов гранулитового парагенезиса в условиях амфиболитовой фации метаморфизма. Амфибол в изученных гранулитах характеризуется высоким содержанием Cl, что может говорить об образовании этой фазы в присутствии водно-солевого флюида. С другой стороны, о том же свидетельствует состав скаполита (SO_3 и CO_2) из гранулитов трубки Удачная. Таким образом, участвующий в метаморфических реакциях флюид находился в дефиците и представлял собой полиионный солевой раствор с низким содержанием H_2O .

Образование гранулитового субстрата Сибирского кратона, по мнению диссертантки, происходило в рамках оригинального тектоно-магматического сценария, основанного на механизме конвергенция двух блоков континентальной коры при повышенных мантийных температурах. Этот механизм обеспечивает образование долгоживущей мощной орогенной структуры вблизи границы Мохо. Геодинамический режим, способствующий реализации рассматриваемого в работе тектоно-магматического сценария, определяется подъемом горячих астеносферных мантийных расплавов. При этом, создаются условия, благоприятствующие андерплейтингу базальтового материала, который формирует нижнекоровый субстрат. В процессе остывания в условиях средней/нижней коры базальты были преобразованы в условиях амфиболитовой фации и дефицита флюида в породы, сложенные гранулитовым парагенезисом. Фрагменты этих пород были захвачены кимберлитовыми магмами в девонское время и перемещены к земной поверхности. Во время транспорта к поверхности материал ксенолитов испытал частичную перекристаллизацию, которая привела к образованию симплектитов. Диссертантке удалось реконструировать, сопутствующий транспорту гранулитов декомпрессионный тренд (на порядок 0.6 ГПа, около 18 км), проявленный в минеральных равновесиях и установленных в гранулитах кимберлитовой трубки Зарница. Диссертантка пришла к выводу о том, что ксенолиты находились в коре более, чем 1.4 млрд лет, однако не несут следов P-T условий континентальной геотермы из-за кинетической блокировки минеральных реакций при температурах ниже 600-650°C.

В **Заключении** диссертантка представляет синтез главных выводов, полученных ею и в тезисной форме реконструирует главные процессы и их агенты, контролировавшие образование гранулитовых ксенолитов из кимберлитовых трубок Удачная и Зарница

Содержание диссертации хорошо изложено и сопровождается многочисленными и наглядными иллюстрациями. Замечания оппонента к содержанию диссертации не касаются главных выводов, сформулированных диссертанткой, и заключаются в следующем:

1. Употребляемый диссертанткой применительно к изученным ею гранулитам термин «гранофельс» практически не используется в отечественной практике и мало употребляем даже в англоязычной литературе. Использование этого термина представляется неоправданным также и потому, что, согласно Оксфордскому геологическому словарю (Oxford Geological Dictionary, 2020), гранофельс - это порода с гранобластовой структурой, состоящая из одинаковых по размеру зерен кварца и полевого шпата и подчиненных пироксена и граната. Однако, как указывает диссертантка в главе 3, изученные ею ксенолиты содержат менее 1 об. % кварца или не содержат его совсем.
2. В целях устранения возникших сложностей в воспроизведении равновесных составов граната, клинопироксена и плагиоклаза диссертантка при оценке эффективного состава породы не учитывала состав магматических ядер клинопироксена, составляющих около 85 – 90 об.% кристалла. Этот подход сильно повлиял на уровень содержаний SiO_2 , Al_2O_3 , MgO и CaO в эффективном составе и привел к P-T оценкам метаморфизма, отличающихся от ранее полученных с использованием классических геотермобарометров и опубликованных в большом количестве работ. Возможно, диссертантке следовало более детально и аргументировано обосновать примененный ею метод оценки эффективного состава породы.
3. Как следует из содержания глав 4 и 5, вторичные изменения во всех изученных в настоящей работе ксенолитах связаны с взаимодействием гранулитов с кимберлитовым расплавом. К продуктам этого взаимодействия относятся, по мнению диссертантки, такие фазы, как серпентин, карбонат, кулькеит и хлорит. В ксенолите трубки Зарница в процессе перекристаллизации гранулитов образуются вторичные секущие жилы, сложенные калиевым полевым шпатом и флогопитом. В скоплениях кристаллов плагиоклаза наблюдаются зоны вторичной перекристаллизации, состоящие из калиевого полевого шпата, а также хлорита и редких зёрен кальцита. Возникает вопрос об условиях образования перечисленных минералов, поскольку поле стабильности серпентина, кулькеита и хлорита не соответствует температуре магматического взаимодействия ксенолитов с расплавом, которая, если судить по данным, приведенным в главе 5, составляла не менее 750°C . Следует заметить, что в работе (Kopylova et al., 2024) приводятся данные,

свидетельствующие о том, серпентин-содержащая ассоциация минералов в кимберлитах образуется при температуре ниже 600° С в неизохимических условиях. Таким образом, образование серпентина, кулькеита и хлорита в изученных гранулитах, возможно, происходило на более поздней, относительно магматического взаимодействия, стадии эволюции гранулитового субстрата.

4. Как указывается в главе 6 количество амфибола в изученных гранулитах крайне мало, что может свидетельствовать о дефиците водного флюида при уравнивании всех минералов в условиях амфиболитовой фации метаморфизма. Диссертантка предполагает, что малое количество флюида может быть обусловлено исходно низким содержанием H₂O в базальтовых магмах, отделявшихся от сухой субконтинентальной мантии и дальнейшей метаморфической эволюцией габброидов без значительного привноса флюидных компонентов извне. Из этого предположения следует спорный вывод о том, что в метаморфизме амфиболитовой фации участвует флюид магматического происхождения, относящийся к магматическому этапу эволюции протолита.
5. Оппонент не разделяет мнения диссертантки и автора цитируемой ею работы, что рассолы, участвовавшие в метаморфизме изученных ею пород, могли выделяться при кристаллизации базальтовых расплавов, а затем сохраняться и участвовать в процессе последующей кристаллизации и перекристаллизации минералов в процессе субизобарического остывания протолита.

Приведенные в отзыве замечания не умаляют значимости выводов, полученных в диссертационной работе А.В. Сапегинной, представляющей законченное исследование, способствующее развитию существующих представлений об условиях образования нижнекоровых метаморфических комплексов Сибирского кратона. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.3. петрология, вулканология, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, и оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель, Сапегина Анна Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.3. петрология, вулканология.

Официальный оппонент,

Главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией геохимии магматических и метаморфических пород 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).

Доктор геолого-минералогических наук

Силантьев Сергей Александрович

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).

Почтовый адрес: 119991, Москва, ул.Косыгина, 19

Официальный сайт в сети Интернет: <http://www.geokhi.ru>

e-mail: silantsev@geokhi.ru

Телефон: +7 495 939 7027

Докторская диссертация «Метаморфизм

океанической коры» была защищена

по специальности 04.00.10 - геология океанов и морей

15 ноября 2024г.

Александр Силантьев