

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Игоря Викторовича Яковлева

«Особенности состава и строения литосферной мантии под Верхнемунским кимберлитовым полем по данным изучения перидотитовых ксенолитов и минералов спутников алмаза», представленной на соискание ученой степени кандидата геологоминералогических наук по специальности 1.6.4 – «Минералогия. Кристаллография.

Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»

Диссертационная работа И.В.Яковлева посвящена важной проблеме алмазной геологии – реконструкции состава, строения и термального состояния литосферной мантии в области транспорта кимберлитовых расплавов и захвата ими алмаз-содержащего мантийного материала.

Вопросы состава и строения литосферной мантии и ее эволюции остаются остро дискутируемой проблемой, без расшифровки которой не может быть понята геологическая история Земли. Кимберлитовые расплавы являются поставщиками наиболее глубинного мантийного материала и изучение мантийных ксенолитов и ксенокристов из кимберлитов в первую очередь определяет прогресс в познании минералогии и геохимии субконтинентальной литосферной мантии. Направленность на решение фундаментальных вопросов состава и строения мантии Земли определяет научную актуальность работы И.В.Яковлева.

Критическое исчерпание фонда открытых коренных месторождений алмаза, преодоление которого требует пересмотра и совершенствования существующих методов и подходов в их поисках, в том числе необходимость учитывать особенности генезиса и транспортировки алмазов в литосферной мантии, определяет практическую актуальность работы диссертанта.

Решение отмеченных выше проблем состава и строения литосферной мантии на примере Верхнемунского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции стало целью работы И.В.Яковлева. Среди задач исследования Верхнемунского поля автор обозначил: изучение химического состава минералов-спутников алмаза (МСА) как из ксенолитов, так и из тяжелого концентратка кимберлитов, последующее сравнение составов МСА из разных кимберлитовых тел, реконструкцию мантийных метасоматических процессов, мощности и термического состояния (палеогеотермы) литосферной мантии под этим полем на момент внедрения кимберлитов. Эти задачи представляются адекватными поставленной цели, планировавшимся материалам и методам исследования.

В соответствии с поставленной целью, диссидентом проведен комплекс минералого-геохимических исследований, включавших большой объем собственно минералогических работ по пробоподготовке, а также изучение химического состава оливина, граната,

клинопироксена методом микрорентгеноспектального с волновой дисперсией анализа, причем для оливина использовалась специальная прецизионная методика, а также для определения геохимии гранатов применен метод индуктивно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа и лазерным отбором проб. Для термобарометрических расчетов использованы хорошо апробированные минеральные геотермометры и геобарометры и программное обеспечение для построения палеогеотермы. В то же время для Ni-in-garnet термометра автор использует версию Griffin 1995, и не рассматривает актуальные версии этого геотермометра Sudholz et al. (2020) и Nimis et al. (2024).

Таким образом, диссертантом получен большой объем аналитических данных современными методами в авторитетных лабораториях. Эти данные в целом грамотно интерпретированы и использованы для решения поставленных задач что, в конечном счете, определяет достоверность полученных И.В. Яковлевым результатов.

Диссертация объемом 176 стр., состоит из 7 глав, которым предшествует введение, содержащее стандартную информацию о целях и задачах, значимости, и защищаемых положениях.

Глава 1 «Состояние проблемы изучения состава, строения и эволюции литосферной мантии (по литературным данным)» представляет собой вводную часть работы. Она содержит краткую историческую справку о появлении понятия «литосферная мантия», его современной трактовке, а также приложение к алмазной геологии. Также рассмотрены проблемы мантийного метасоматоза, составы мантийных порообразующих минералов.

В целом данная глава является компактным содержательным обзором проблемы литосферной мантии и процессов в ней, в главе акцентированы основные вопросы и подходы, рассматриваемые в диссертационной работе.

В качестве небольших замечаний отметим, что автор не отразил изменение режима теплопереноса от кондуктивного к конвективному при переходе от литосферы к подстилающей верхней мантии. Краткое рассмотрение механизмов формирования литосферной мантии могло бы обогатить главу. Обзоры по составам минералов могли бы быть более полными, среди рассматриваемых работ отсутствуют последние публикации, датируемые 2020-2023 годами.

В Главе 2 «Геологическая характеристика Верхнемунского кимберлитового поля» дан краткий обзор геологического изучения этого поля, описано его положение в Якутской алмазоносной провинции, геологическое строение, позиция кимберлитовых трубок и других тел, особенности состава кимберлитов и ксеногенного мантийного материала в кимберлитах.

В целом эта глава дает достаточную геологическую характеристику Верхнемунского поля в целом, геология отдельных трубок рассмотрена в главе 4. (почему-то пропущена глава 3).

В качестве замечания к Главам 2 и 4 отметим отсутствие единого подхода к номенклатуре кимберлитовых пород, использование устаревшей (например, «порфировый кимберлит» или экзотической (например, «атакситовый кимберлит») терминологии. Кроме того, не учтены работы 2020-2021 гг. (см. Общие замечания).

Глава 5 «Материалы, пробоподготовка и методы исследования» содержит характеристику использованных методов, подходов и материалов исследования. Впечатляет большой объем аналитических исследований, выполненных автором, например, было исследовано более 200 перидотитовых ксенолитов, выполнены несколько тысяч микрозондовых анализов минералов и несколько сотен анализов гранатов LA-ICP-MS методом. Автор дает подробное описание пробоподготовки и методики аналитических исследований, что существенно повышает достоверность и надежность полученных результатов. Было бы правильно привести в Приложении таблицы с измерением стандартов для LA-ICP-MS. Автор подробно описывает подходы к термобарометрическим исследованиям, что также можно приветствовать. Следовало бы указать ошибки геотермометров и геобарометров.

К данной главе есть замечания общего характера, см. в заключительной части отзыва.

В главе 6 «Результаты исследований» приведены результаты изучения минералов из ксенолитов и из шлиховых и протолочных проб кимберлитов трубок и кимберлитовых тел Верхнемунского поля. Это наиболее обширная глава в диссертации. Для всех кимберлитовых тел представление результатов построено единообразно, минералы рассматриваются в одном и том же порядке, используются одни и те же классификации и диаграммы. Такое хорошее структурирование весьма удобно для работы с большим объемом данных. В главе рассмотрены оливины, гранаты, клинопироксены, хромшпинели из ксенолитов, а также эти же минералы и Mg-ильмениты из концентратов кимберлитов трубок Комсомольская-Магнитная и Деймос. Те же минералы были изучены из концентратов большинства кимберлитовых тел Верхнемунского поля. Для оливинов были выделены две группы составов: из фертильных и из деплетированных перидотитов. Для гранатов рассмотрено их положение в классификациях по Соболев, 1974, Schulze 2003; Ramsay 1993; Grutter 2004, Coleman et al 1965. По геохимии (распределению РЗЭ) гранаты разделены на три группы, соответствующие гранатам из лерцолитов и из дунитов-гарцбургитов, причем последние разделены на две подгруппы, - с сильно синусоидальными спектрами РЗЭ, отвечающие сильно деплетированым гарцбургитам и с более обогащенными спектрами, имеющими

тренд к лерцолитовому типу. Клинопироксены отнесены к мегакристовым, перидотитовым, эклогитовым.

Несомненно, что представленные в этой главе результаты обширных по охвату минералов и кимберлитовых тел, и при этом детальных, выполненных современными методами минералого-геохимических исследований вносят значительный вклад в изучение не только кимберлитов Верхнемунского поля, но и в целом важны для алмазной геологии Якутской провинции. Эти данные являются достоверной базой для обоснования защищаемых положений.

Отметим, что качество рисунков можно было улучшить, сделав шрифты и значки более крупными, то же касается и редактирования текста, в котором есть повторы и несоответствия (например, при выделении групп/типов гранатов), это облегчило бы долю читателя. Обращает на себя внимание появление клинопироксенов с высокими содержаниями Na и Al (трубка Деймос), но этот факт не нашел в дальнейшем объяснения.

Глава 7 «Обсуждение результатов» наиболее важная в работе, в ней обосновываются защищаемые положения. В первой части главы полученные минералого-геохимические результаты для оливинов из ксенолитов трубки Комсомольская-Магнитная сопоставляются с литературными данными по оливинам из кимберлитов и ксенолитов Якутской и Архангельской провинций. Автор приходит к выводу о происхождении оливинов из зернистых и деформированных перидотитов, а также о принадлежности части зернистых перидотитов к сильно деплетированным разностям содержащим оливин с $Fo > 93$ мол%. Расшифровка геохимии гранатов позволила автору выделить группу гранатов с сильно синусоидальными спектрами РЗЭ, происходящими из сильно деплетированных дунитов-гарцбургитов. Совместный анализ геохимии оливинов и гранатов обосновывает первое защищаемое положение о присутствии блока высокодеплетированных перидотитов в литосферной мантии под Верхнемунским полем.

Во второй части Главы 7 автор проводит расчет Р-Т условий минеральных равновесий для клинопироксенов и гранатов и реконструкцию палеогеотермы для Верхнемунского поля, глубины основания деплетированной литосферы на момент внедрения кимберлитов. Он также определил типы и интенсивность проявления мантийного метасоматоза под Верхнемунским полем. Таким образом, здесь обосновано второе защищаемое положение.

Однако заметим, что в работе Dymshits et al., 2020, в которой диссертант является соавтором, была оценена палеогеотерма по клинопироксенам для трубки Комсомольская-Магнитная. В этой работе очень подробно описаны проблемы с выбором параметров, прежде всего теплогенерации в коре, для построения палеогеотермы, и подходы авторов к решению этих проблем. Однако в диссертации эта часть исследований опущена полностью и какие

параметры использовал диссертант, осталось неизвестно. Надо было по крайней мере дать ссылку на эту работу, чтобы подтвердить тщательность расчетов.

В третьей части Главы 7 автором был проведен сравнительный анализ составов МСА кимберлитовых тел Верхнемунского поля. Он показал значительные вариации составов оливинов, гранатов, хромшпинелей, в пределах не только всего поля, но и каждой линейной цепочки кимберлитовых трубок. Эту особенность мантийных минералов автор интерпретировал как отражение гетерогенности мантии под Верхнемунским полем, что и высказал в форме третьего защищаемого положения.

Заключение весьма лаконично суммирует основные выводы работы.

Резюмируя обзор диссертационной работы, отметим, что автору удалось получить большой объем новых данных и новые результаты для одного из наиболее интересных в научном плане кимберлитовых полей Якутской провинции, особенно отметим расшифровку палеогеотермы и гетерогенного вещественного состава литосферной мантии. Несомненно, что обширный геохимический материал по минералам из трубок Верхнемунского поля будет востребован исследователями кимберлитов и минералогии мантии.

Несмотря на достаточно высокий общий уровень диссертационной работы И.В.Яковлева, к ней имеются общие замечания. Часть из них имеет методологический характер, касается методов и подходов, характера презентации результатов. Недостатки, перечисленные ниже, влияют на качество работы и снижают положительное впечатление от нее.

1. Отсутствует петрографическая характеристика изученных перидотитовых ксенолитов. Несмотря на то, что в тексте работы указано, что проводилось петрографическое изучение шлифов ксенолитов, в работе нет петрографических описаний, нет фото шлифов и изображений минералов в обратно-рассеянных электронах (BSE). Это не дает возможности проверить некоторые выводы автора, например, об отсутствии зональности в оливинах и других минералах. Извлечение минералов из пород и изучение их в шашках без предварительной петрографической характеристики вывело минералы из петрографического контекста, информация об их петрографической позиции была утеряна. Такой подход не соответствует современному уровню исследований.
2. Классификация перидотитовых ксенолитов на зернистые и деформированные основывается на составах минералов и никак не сопоставлена со структурой пород, которые содержат эти минералы. Не показано, есть ли в ксенолитах, которые отнесены к деформированным перидотитам, соответствующие

структурные признаки - порфирокласти, необласти и др. , см. Harte, 1977. Это снижает достоверность выделения деформированных перидотитов.

3. Статистическая обработка большого объема данных практически отсутствует (вряд ли за таковую можно считать расчет медианного среднего). Это также не способствует повышению надежности выводов автора.
4. Недостаточно проведено сравнение полученных данных с данными предшественников, учитывая изученность мантийного ксеногенного материала из кимберлитов Верхнемунского поля. Например, нет сравнения с данными по составам минералов (оливины, гранаты, клинопироксены, ильмениты, шпинели) из работы Yakovlev et al., 2021 и даже ссылка на эту работу отсутствует; то же можно сказать и о работе Ashchepkov et al., 2020.
5. Не все выводы автора, обсуждаемые в тексте работы, можно проверить по материалам, приведенным в работе. Содержания некоторых элементов в гранатах обсуждаются в тексте работы, но отсутствуют в Таблице Б в Приложении, например, Sc. Это не позволяет проверить некоторые построения автора, например, сильно деплетированные гранаты должны иметь высокие содержания Sc (Chassé et al., 2018)
6. В списке литературы наиболее поздние работы относятся к 2018 году; таким образом, автор не учитывает большой объем современных исследований в области кимберлитов, мантийной минералогии и геохимии.

Сделанные замечания хотя и снижают общее впечатление о представленной работе, но не являются критическими для положительной оценки. Ее основные положения опубликованы в 4 статьях в научных журналах, в том числе индексируемых в международных базах WOS и Scopus, и рекомендованных ВАК Минобразования РФ, а также докладывались на международных и всероссийских конференциях.

К работе также имеются замечания дискуссионного и рекомендательного характера. Отметим только несколько интересных для обсуждения, по моему мнению.

1. Вопрос о поведение хрома в процессах частичного плавления мантийных пород. Диссертант, в том числе в защищаемом положении 1, трактует низкие содержания хрома в гранатах как показатель их сильного геохимического истощения. Он также пишет (стр. 150), что низко-Cr, низко-Са и низко-Ti гранаты наиболее вероятно являются результатом частичного плавления примитивных мантийных гранатов. Во-первых, не ясно, что такое «примитивный мантийный гранат». Во-вторых, высокие степени плавления раннедокембрийской мантии при формировании коматиитов приводят к безгранатовому реститу. В третьих,

согласно большинству моделей, плавление при формировании депленированной литосферной мантии происходило в области шпинелевой фации глубинности, что и обеспечивало высоко-хромистый характер рестита. Поэтому утверждение о связи низких содержаний хрома в гранате с формированием депленированного субстрата требует пояснений.

2. Диссертант объясняет высокое содержание хрома в оливинах второй группы (депленированных) аналогией с включениями оливина в алмазах, которые отличаются высоким содержанием хрома, впрочем, как и все другие фазы из включений в алмазах (например, Stachel et al., 2022). Автор ссылается на давнюю 1972 года работу (Meyer, Boyd, 1972), в которой по аналогии с лунными породами предполагается вхождение в оливин Cr^{2+} в восстановительных условиях мантии. Несмотря на важность вопроса о $\text{Cr}^{2+}/\sum\text{Cr}$ как потенциального оксибарометра и для интерпретации изотопного состава хрома (Jollands et al., 2018, Berry et al., 2006, Bell et al., 2014 и др.) вопрос о вхождении Cr^{2+} в земные минералы остается дискуссионным, изучение включений феррипериклаза в нижнemanтийных алмазах показало, что доля Cr^{2+} не превышает 15% (Odake et al 2008). Как известно, вопрос об отличиях в составе минералов из кимберлитов и тех же минералов из включений в алмазах активно обсуждается и превалирующая точка зрения о малоглубинном масштабном плавлении шпинель-содержащего протолита встречает препятствия именно в появлении оливина с $\text{Fo} > 93$ (например, Walsh et al., 2023). Поэтому я считаю, что столь важный вопрос с тем замечательным фактическим материалом, который получил диссертант, требовал более подробного рассмотрения.
3. Замечание касается защищаемого положения 3. Автор проецирует полученные данные о составе минералов из ксенолитов и из кимберлитов на состав мантии под Верхнемунским полем по крайней мере в девоне на момент внедрения кимберлитов. Составы мантийных пород с определённой оценкой глубины их захвата распространяются по латерали и предполагается зональное вертикальное строение мантии. При этом сравнение полученных мантийных колонн под трубками Комсомольская-Магнитная и Деймос показывает их существенные различия (рис. 90), а в разделе 7.5 различия в составе гранатов и хромшпинелей из разных трубок обсуждаются, чтобы показать гетерогенность мантийного субстрата Верхнемунского поля. Однако автор не рассматривает вопрос природы этой гетерогенности – связана ли она с тем, что состав и строение мантии сильно варьирует в пределах первых сотен метров? Или эта гетерогенность связана с

неравномерным захватом ксеногенного материала с разных мантийных глубин? Кстати, этот вариант отмечен в работе Dymshits et al., 2020, в которой диссертант является соавтором. Или большая часть ксенолитов представляет собой материал метасоматизированных стенок транспортных каналов, а деплетированные дуниты – его осевую часть, по аналогии с жилами дунитов в охиолитах или оливинитовыми ядрами кольцевых щелочно-ультраосновных массивов? Кстати, такой вариант был предложен для Верхнемунского поля в работе Ashchepkov et al., 2020.

В целом, работа Игоря Викторовича Яковлева «Особенности состава и строения литосферной мантии под Верхнемунским кимберлитовым полем по данным изучения перидотитовых ксенолитов и минералов спутников алмаза» отвечает требованиям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует п. 9-14 раздела II Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 25.01.2024), как по широте, важности и научной значимости разработок, так и с точки зрения новизны и достоверности представленного материала. Автореферат отражает основные положения диссертации. Считаю, что Игорь Викторович Яковлев заслуживает искомой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – «Минералогия. Кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Анна Андреевна Носова

доктор геолого-минералогических наук, специальность 25.00.04 – «Петрология, вулканология», главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), лаборатория Петрографии.

Почтовый адрес: 119017, Москва, Старомонетный пер., 35

Электронная почта: nosova@igem.ru, ilsanora@mail.ru

Телефон: +79167052803

Я, Носова Анна Андреевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

