

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Яковлева Игоря Викторовича

«Особенности состава и строения литосферной мантии под Верхнемунским кимберлитовым полем
по данным изучения перidotитовых ксенолитов и минералов спутников алмаза»,
представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по
специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков
полезных ископаемых.

Диссертационная работа И.В. Яковлева посвящена одной из наиболее острых проблем современной петрологии – проблеме состава, строения и эволюции субконтинентальной (субкратонной) литосферной мантии в связи с процессами образования алмазоносных ассоциаций и формирования кимберлитовых магм. Несмотря на вековую историю исследований, в этой проблеме все еще остается немало нерешенных и дискуссионных вопросов. Прежде всего проблемы, связанные с исследованиями литосферной мантией под кратонами, обусловлены высокой степенью структурной, литологической и геохимической неоднородности этих участков верхней мантии. И поэтому каждое исследование, посвященное восстановлению характеристик литосферной мантии под конкретными блоками древней континентальной коры, вносит неоценимый вклад в понимание глобальной эволюции континентальной литосферы. Этим определяется актуальность исследований, представленных в диссертации И.В. Яковлева. Главной целью работы И.В. Яковлева является выявление геохимической и минералогической неоднородности литосферной мантии, реконструкция палеогеотермы и оценка мощности литосферной мантии под Верхнемунским кимберлитовым полем, одним из перспективных кимберлитовых полей Якутской кимберлитовой провинции, расположенной в пределах Сибирского кратона. Для достижения этих научных целей И.В. Яковлевым поставлены следующие задачи:

- 1) исследовать химический состав минералов из перidotитовых ксенолитов и их фрагментов из концентрата тяжелой фракции кимберлитовых трубок Верхнемунского кимберлитового поля;
- 2) сравнить составы минералов спутников алмаза из разных кимберлитовых трубок;
- 3) оценить влияние метасоматических процессов на литосферную мантию под указанным кимберлитовым полем;
- 4) оценить условия формирования различных ассоциаций в контексте региональной геотермы.

Все эти задачи выполнены автором в достаточно полном объеме. Работа И.В. Яковлева основана на минералогических, геохимических и термобарометрических исследованиях образцов из представительной коллекции перidotитовых ксенолитов и шлиховых проб из кимберлитовых трубок Комсомольская-Магнитная и Деймос, а также других более мелких кимберлитовых тел Верхнемунского кимберлитового поля Якутской кимберлитовой провинции. В ходе работы автором изучено более 200 ксенолитов из двух трубок, выделено и исследовано различными методами более 7000 зерен монофракций граната, оливина, ильменита, пироксенов, хромшпинелидов из различных кимберлитовых тел. Автором лично выполнена пробоподготовка образцов и шлиховых проб, проведены аналитические исследования с использованием микрозондового анализа и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, выполнена обработка всех полученных данных и проведена их интерпретация на основе методов мономинеральной клинопироксеновой и гранатовой геотермобарометрии. Таким образом представительность и комплексность полученных в работе данных и результатов не вызывает сомнения.

Главными научными достижениями диссертационной работы И.В. Яковлева, часть из которых составляет защищаемые положения, являются следующие результаты и выводы.

1. Установлено, что литосферная мантия под Верхнемунским кимберлитовым полем на момент кимберлитового магматизма была сложена преимущественно деплетированными высокомагнезиальными дунитами и гарцбургитами и была в значительной мере гетерогенна по составу.

2. Мощность литосферы на этот период составляла порядка 220 км, а тепловой поток имел значение $\sim 35 \text{ мВт}/\text{м}^2$.

3. В разрезе литосферной мантии выделяется уровень 180-190 км, выше которого метасоматические преобразования пород были вызваны воздействием карбонатитовых расплавов/флюидов, а ниже – силикатных расплавов, а область распространения алмазоносных ассоциаций («алмазное окно») располагалась в интервале глубин 125-190 км.

Эти результаты хорошо соответствуют существующим петрологическим моделям субкратонной литосферной мантии и во многом дополняют их. Они представляют интерес для исследователей в областях минералогии, геохимии и петрологии магматических пород, экспериментальной петрологии и геохимии, региональной и исторической геологии. Несмотря на то, что исследования и выводы в работе несут фундаментальный характер, ее результаты могут иметь практическое приложение при прогнозировании, поиске и оценке промышленного потенциала коренных и россыпных месторождений алмаза.

Диссертация И.В. Яковлева объемом 203 страницы состоит из 175 страниц основного текста, который включает введение, 7 глав и заключение. Диссертация содержит 93 рисунка и 10 таблиц. Приложение (28 страниц) содержит таблицы с составами минералов. Список литературы включает 112 наименования. В тексте диссертации приводится анализ литературных данных и обоснование задач исследований. В работе характеризуются использованные аналитические методы и подходы. Фотографии, диаграммы и таблицы наглядно иллюстрируют полученные результаты, а список литературы отражает эрудицию автора.

Во Введении автор освещает актуальность работы, ее цель и задачи, кратко характеризует фактический материал, новизну и практическую значимость работы, а также приводит сведения об предмете и объектах исследования, апробации работы и ее структуре, о публикациях по теме диссертации. Во Введении автор формулирует 3 защищаемых положения. К ним у меня возникли **следующие замечания**. В первом защищаемом положении автор особо указывает на «зернистые гранатовые лерцолиты», но не указывает структурный тип «гранат- и хромитсодержащих дунитов и гарцбургитов». На мой взгляд, было важно указать принадлежат ли эти породы к деформированным или зернистым (недеформированным) типам перidotитов, поскольку эти характеристики отражают состояние литосферной мантии. Утверждение автора во втором защищаемом положении о том, что оцененная мощность литосферы под Верхнемунским кимберлитовым полем ~ 220 км. составляла именно на момент кимберлитового магматизма (365 млн. лет), на мой взгляд, не обоснована. Оценка мощности литосферы основана на термобарометрических данных, полученных из мономинеральных геотермобарометров, приложенных к составам незональных зерен клинопироксена и граната, которые формировались задолго до кимберлитового магматизма. Коррелировать оцененные Р-Т условия и возраст кимберлитового магматизма, на мой взгляд, нельзя.

В Главе 1 автор кратко рассматривает проблемы и задачи, связанные с изучением литосферной мантии, характеризует ведущее значение исследований ксенолитов в кимберлитах в решении этих задач как главного достоверного источника информации о составе мантии. Отдельный раздел этой Главы посвящен роли метасоматических процессов в литосферной мантии.

К главе 1 у меня возникло **несколько замечаний**. Упоминая в разделе 1.1 термин «литосфера» в контексте, который был предложен еще Дж. Бареллом в 1914 году, автор не рассматривает современные представления о литосферной мантии. Я бы порекомендовал автору обзор И.М. Артемьевой (Artemieva, 2009, Lithos, 109, 23-46), из которого становится понятно, что литосферная мантия выделяется не столько реологическими свойствами, сколько кондуктивным характером передачи тепла в отличие от конвективного в более глубинных зонах мантии. Автору такой подход был бы полезен, поскольку одной из задач исследования является реконструкция палеогеотермы под Верхнемунским кимберлитовым полем, которая как раз и отражает кондуктивный перенос тепла.

Еще одно замечание к главе 1 касается классификации типов метасоматоза в мантии. В этом замечании я основываюсь на терминологии, предложенной С. О’Рэйли и У. Гриффином (O'Reilly, Griffin, 2013). На мой взгляд автор неправильно понимает термин «скрытый мантийный метасоматоз». Действительно, при таком типе метасоматоза «модальный состав породы может оставаться неизменным, ... а происходит обогащение несовместимыми элементами первичных минералов и пород» (стр. 16). Однако при таком процессе не происходит «превращение гарцбургита в лерцолит...». Если это имеет место, т.е. образуются новые фазы, но мало отличимые от типичных минералов перидотитов (гранат, пироксены), то такой тип метасоматоза называется «обманчивый» (stealthy) (см. O'Reilly, Griffin, 2013).

При описании характеристик «карбонатитового» и «силикатного» типов метасоматоза (стр. 17), а также далее при описании особенностей составов минералов (раздел 1.4) автору следовало бы кратко описать особенности поведения РЗЭ в минералах, индикаторных для указанных типов метасоматоза, дать ссылки на работы (возможно, также экспериментальные), в которых объясняются причины различий и т.д. На этом основаны выводы далее на стр. 147 о воздействии различных метасоматических агентов, и без предварительного экскурса в геохимические особенности этих процессов их нельзя считать полностью обоснованными.

В тексте диссертации присутствует термин «флогопитовый метасоматоз» (стр. 149, 150, 162), который мне совершенно не понятен. Если термины «карбонатитовый» или «силикатный» метасоматоз отражают агенты процесса (карбонатитовые или силикатные расплавы), то в термине «флогопитовый метасоматоз» фигурирует продукт процесса – флогопит, который может формироваться в породах верхней мантии при взаимодействии пород как с расплавами различного состава, так и флюидами различного состава. Каков же агент «флогопитового метасоматоза»? Этот термин не имеет под собой никакой генетической основы.

В Главе 2 автор рассматривает особенности геологического строения Верхнемунского кимберлитового поля. В диссертации почему-то пропущена глава 3, и в главе 4, которая следует сразу за главой 2, рассмотрены геологические характеристики кимберлитовых трубок, материалы из которых использовались в работе. На мой взгляд, эта глава вполне могла бы быть объединена с предыдущей главой 2.

В Главе 5 рассматриваются методы пробподготовки, аналитические и термобарометрические методики, использованные в работе. Эта глава написана довольно кратко, но в целом у меня нет замечаний к ней. Насколько понятно из диссертации, главный подход в работе состоял в анализе состава большого числа отдельных зерен минералов перидотитовых ксенолитов и шлиховых монофракций с последующим применением для них мономинеральных термометров и барометров. Если для шлиховых монофракций иного подхода невозможно предложить, то для пород ксенолитов этот подход, на мой взгляд, является недостаточным без выявления взаимоотношений минералов в породах. В работе вообще отсутствуют петрографические описания пород. Я считаю этот факт значительным упущением данной работы.

В такой работе петрографические характеристики, включающие BSE фотографии, наиболее представительных пород, необходимы. Тогда были бы понятны различия между, например, «низкокальциевыми» и «высококальциевыми» гарцбургитами или между «высококальциевыми» гарцбургитами и лерцолитами.

При описании использованной методики изучения ксенолитов (еще раз повторю, что к исследованиям шлиховых монофракций у меня претензий нет) на стр. 37 не приводится такая статистическая характеристика как количество зерен для отдельного ксенолита, которое автор считает представительным для характеристики породы в целом. Лишь на стр. 43 автор упоминает, что «отбиралось в среднем не менее пяти зерен оливина» (и, я полагаю, других минералов). Насколько это количество зерен репрезентативно, если не охарактеризованы их расположение и взаимоотношения в породе?

При описании термобарометрических методик (стр. 41-43) автор достаточно подробно характеризует мономинеральный клинопироксеновый термобарометр (Nimis, Taylor, 2000) с указанием необходимых композиционных и статистических условий для корректного его использования. Почему же автор не приводит критерии корректного отбора составов граната для использования гранатового геотермобарометра (Griffin, 1995)? Автор указывает лишь содержание Y (стр. 43), померить которое не всегда представляется возможным. Вероятно, есть другие критерии, основанные на главных компонентах граната. Автор упоминает (стр. 147), что этот термобарометр «корректно работает только для гранатов, относящихся к низкокальциевым гарцбургитам (находящимся в равновесии с хромитом)». По-видимому, одним из критериев должно быть содержание Ca в гранате. И конечно же возникает вопрос, почему автор не применяет другие («классические») методы термобарометрии для пород ксенолитов для сравнения и подтверждения расчетов по мономинеральным термобарометрам? Это очевидно связано с тем, что в работе нет как таковых петрологических исследований пород, определений составов существующих минералов (а не отдельных зерен), реакционных взаимоотношений, характеристик зональности минералов.

В Главе 6 приведены результаты изучения состава минералов, выделенных из перidotитовых ксенолитов и монофракций. Глава представляет собой монотонное приведение химических характеристик минералов, их вариаций, сравнений. На мой взгляд текст этой главы мог бы быть значительно сокращен, если данные были бы сгруппированы в таблицы, а в тексте приводились лишь сопоставления, сравнения, какие-то особые характеристики составов.

В Главе 7 обсуждаются и обобщаются результаты проведенного исследования. В этой главе много повторений из главы 6. В разделе 7.3 при интерпретации спектров РЭС гранатов из ксенолитов трубы Комсомольская-Магнитная автор по-видимому перепутал выделенные им группы гранатов на рис. 84: первая группа гранатов с «фертильными» спектрами на этом рисунке представлена как вторая. Интерпретируя спектры РЭС для гранатов, автор делает вывод (стр. 141) о том, что «синусоидальные» спектры «являются результатом воздействия на породы карбонатитового метасоматоза», но при этом «такие спектры РЭС характерны для низкокальциевых гарцбургит-дунитовых гранатов», т.е. для пород, составы которых отражают их значительную деплетированность. Я не могу себе представить, что карбонатитовые расплавы (основу которых обычно составляют $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, CaCO_3) не оказывали никакого минералогического эффекта на гарцбургиты, в частности образование клинопироксена и/или повышение кальциевости граната. Иначе говоря, подобные спектры должны бы быть характерны для обогащенных Ca гарцбургитов и лерцолитов, если эти лерцолиты не являются примитивными. Как автор может объяснить это несоответствие?

На рис. 85, который, согласно тексту на стр. 144, призван продемонстрировать «некоторые закономерности» при сопоставлении составов оливина и граната из ксенолитов трубы Комсомольская-Магнитная, заявленная «закономерность» не ясна: на рисунке показаны совпадающие группы точек 2 и 3 оливинов из ксенолитов, содержащих «лерцолитовые» и «гарцбургитовые» гранаты, соответственно, тогда как для первой группы точек вообще не указано, с гранатами какого типа эти оливины ассоциируют. В чем же закономерность и корреляция, «лишь отчасти соответствующая накопленным знаниям о составах оливинов и гранатов» (стр. 144)?

Несмотря на хороший тренд точек, описанный как геотерма с тепловым потоком 34.6 мВт/м², рис. 89 вызывает множество вопросов. Во-первых, почему для построения геотермы использовались Р-Т определения лишь только по клинопиросеновому термобарометру (Nimis, Taylor, 2000), но не использовались Р-Т данные, определенные из состава граната. На стр. 147 автор указывает, что «Cr-in-Gar» геотермобарометр «корректно работает только для гранатов, относящихся к низкокальциевым гарцбургитам (находящимся в равновесии с хромитом)». На рис. 89 действительно некоторые точки для гранатов из «низкокальциевых гарцбургитов» попадают на построенную геотерму, но все же подавляющая часть точек расположена выше нее и даже выше «доверительного интервала» (не ясно, как этот интервал оценивался), определяя более пологую (с большим тепловым потоком) геотерму. Особенно это хорошо видно для тр. Комсомольская-Магнитная. Точки для гранатов из кальциевых гарцбургитов и лерцолитов вообще лежат сильно в стороне от геотермы. Если эти гранаты не подходят для определений Р-Т условий (как утверждает автор на стр. 147), то зачем их надо было наносить на рис. 89, затрудняя его восприятие. Что означает фраза на стр. 147: «...для остальных гранатов figurative точки Р-Т условий проецировались на геотерму, рассчитанную по клинопироксенам, по значениям полученных температур для получения оценок Р». Например, если «проецировать» точки для лерцолитовых гранатов из ксенолитов тр. Деймос, находящиеся в интервале температур 1400-1500°C, то они должны лежать ниже очерченной нижней границы литосферы, и им должны соответствовать какие-то данные по клинопироксену. Это так или данные точки автор не принимал во внимание?

В Заключении И.В. Яковлев очень кратко суммирует главные выводы работы.

Помимо замечаний по фактическому материалу, его интерпретации и выводам, отмечу следующие замечания по построению и структуре диссертации. На мой взгляд, автор выбрал неподходящую для диссертации систему числовых ссылок в тексте, которая весьма неудобна для читателя. Более того, автор в некоторых местах диссертации переходит на обычную текстовую систему ссылок. Обращу также внимание на некорректные ссылки на рисунки. Ссылаясь на иллюстрации, объединяющие несколько рисунков (а, б, в и т.д.), автор часто ссылается на всю иллюстрацию, а не на конкретные рисунки. Примерами, могут служить ссылки на рис. 1 (стр. 10), рис. 8 (стр. 35), многие рисунки в главе 6 и др. В отдельных местах указаны неверные ссылки на рисунки (напр. ссылка на рис. 6 на стр. 44). К сожалению, это указывает на небрежность в оформлении работы.

Отмеченные в отзыве замечания по фактическому материалу свидетельствуют о неоднозначности в интерпретации полученных данных. Они не влияют на общую высокую оценку работы. Результаты исследований опубликованы в 3 статьях в международных рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых системами РИНЦ, Web of Science и Scopus, представлялись в докладах на всероссийских и международных конференциях различного уровня. Материалы диссертации И.В. Яковлева представляют интерес для использования в учебных курсах петрологии, геохимии, минералогии, региональной и исторической геологии.

Диссертация И.В. Яковлева является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научно-методическом уровне, в основу которого положены разноплановые аналитические данные для большого объема фактического материала. Автореферат диссертации отражает содержание и основную логику всей работы. Результаты работы соответствуют пунктам 1 (Минералогия земной коры и глубинных геосфер Земли, ее поверхности и дна водоемов), 3 (Генетическая минералогия, исследование парагенезисов минералов и эволюции минералогенеза в природных и техногенных системах), 4 (Минералогия месторождений металлического и неметаллического сырья; минералогическое картирование и минералогические методы, используемые для прогноза, поисков, разведки и оценки месторождений полезных ископаемых) паспорта специальности 1.6.4. Таким образом, диссертация «Особенности состава и строения литосферной мантии под Верхнемунским кимберлитовым полем по данным изучения перидотитовых ксенолитов и минералов спутников алмаза» соответствует требованиям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а её автор Яковлев Игорь Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Директор ИЭМ РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН



Олег Еннадьевич Сафонов

Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН (ИЭМ РАН),
Московская область, 142432 г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 4; адрес электронной
почты oleg@iem.ac.ru, телефон: +7-496-524-44-25.

Я, Сафонов Олег Геннадьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

26 августа 2024 г.

Подпись Сафонова О.Г. заверяю

