

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Бардухинова Леонида Даниловича
«Особенности алмазов и состав включений в них как поисковые признаки на
примере Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических
наук по специальности: 25.00.11- Геология поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения**

Изучение природных алмазов не теряет своей актуальности в связи с проблемой определения состава и термодинамических условий в глубинных зонах разных регионов мира. Представленная на защиту работа является продолжением именно таких исследований. Целью работы было изучение типоморфизма алмазов и включений в них из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей и выявление взаимосвязи алмаз-включение для использования в прогнозно-поисковых работах. В рамках работы были изучены структурно-химические особенности включений в алмазах из трубок двух кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции, а также охарактеризованы особенности их морфологии, внутреннего строения и дефектно-примесного состава. В рамках работы ставились следующие задачи:

- 1) Характеристика алмазов из разных месторождений двух кимберлитовых полей, описание их морфологии и отбор кристаллов с минеральными включениями.
- 2) Изучение структурно-химических особенностей алмазов и включений в них методами колебательной спектроскопии. Определение согласно полученным данным взаимосвязи между внутренним строением алмаза и заключенным в нем включением.
- 3) Сравнительный анализ полученных данных по дефектно-примесному составу и распространенности минеральных включений в алмазах из разных месторождений Якутской алмазоносной провинции.
- 4) Разработка экспрессной и неразрушающей методики определения состава включений в алмазах по данным спектроскопии КР.

Полученные результаты позволили соискателю выявить определенные закономерности и сделать ряд интересных выводов:

- 1) Определены специфические особенности структурных дефектов и включений в алмазах из кимберлитовых тел Накынского и Алакит-Мархинского полей. Для кимберлитов Накынского поля зафиксирована повышенная доля алмазов с включениями эклогитового парагенезиса.

2) По данным спектроскопии КР минеральных включений в алмазах из разных месторождений были охарактеризованы их состав и остаточное давление, что позволило выявить особенности состава материнских субстратов и реконструировать условия образования алмазов в соответствующих данным регионам мантийных доменов.

3) Получены новые данные, свидетельствующие о систематическом различии дефектно-примесного состава алмазов разных парагенезисов. Показано, что алмазы с включениями гранатов эклогитового парагенезиса, как правило, характеризуются высокими концентрациями общего азота и средней степенью его агрегации, тогда как алмазы с включениями гранатов перидотитового парагенезиса отличаются более низкими концентрациями азота и широкими вариациями степени его агрегации.

Все эти результаты, несомненно, представляют важное практическое значение, т.к. могут быть востребованы при поисках новых алмазных месторождений.

Диссертация Л.Д. Бардухинова состоит из Введения, 4-х глав и Заключения, а также включает список литературы (125 наименования), 63 иллюстрации и 7 таблиц.

Во Введении кратко обозначены актуальность и научная новизна проведенных исследований, их цель, задачи и практическое значение, обоснован выбор объектов исследования и аналитических методов, а также сформулированы основные защищаемые положения. Стоит, однако, отметить, что защищаемые положения представлены только во введении и больше по тексту диссертации нигде не повторяются, что в конечном итоге затрудняет понимание их обоснования. Это недоразумение, тем не менее, соискателем исправлено в автореферате диссертации. Следовало бы также сразу уточнить изучение каких включений проводилось: по тексту диссертации в дальнейшем становится ясно, что речь идет о минеральных включениях, которые представляют реликты материнских алмазоносных пород, но не отражают алмазообразующую среду (т.е. то вещество (расплав или флюид), из которого кристаллизуется алмаз). Тем более досадно, что эта неопределенность зафиксирована во втором защищаемом положении.

В главе 1 приводятся региональная позиция кимберлитов Накынского и Алакит-Мархинского полей и близлежащих россыпей, а также обзор литературных данных о структурных особенностях природных алмазов, минеральных включениях в них, и о современных представлениях о процессах алмазообразования. В первом разделе этой части работы описана в основном географическая привязка исследованных объектов, и практически полностью отсутствует описание их структурно-геологического расположения. Рисунок 1.1 также лишен этой информации (за исключением контура Анабарского щита). Эта информация, несомненно, была бы в дальнейшем необходима для рассмотрения глубинного строения региона и обсуждения генетической природы

выявленных вариаций, как по свойствам алмазов, так и по распространённости минеральных включений в них.

Во втором разделе первой главы охарактеризованы структурные особенности природных алмазов, которые в основном касаются основных дефектно-примесных центров, связанных с азотом и водородом. Полагаю, что именно в этой части работы уместно было бы уточнить о том, с чем связан тот или иной упомянутый дефект. Это важно для описания кинетических процессов агрегации азотных дефектов, которые соискатель рассматривает как геотермометр. Использование агрегации азотных дефектов в качестве геотермометра, однако, представляется крайне затруднительным из-за практически полного отсутствия привязки алмазов по времени их образования, что позволяет использовать имеющиеся данные только для качественной оценки времени или последовательности их образования. Следовало бы также принять во внимание и отразить в данном разделе, что энергия активации перехода А- в В-центры существенно различается для алмазов октаэдрического и кубического габитусов (Zedgenizov et al., *Geochemical Journal*, 2017). Хотелось бы также уточнить, каким образом изотопный состав углерода алмазов отражает Р-Т условия их формирования (стр. 19)?

В третьем разделе первой главы соискателем рассмотрены современные представления о процессах природного алмазообразования. Стоит отметить, что раздел представлен крайне скупо и в полной мере не отражает те самые заявленные современные представления. Так, последняя ссылка в данном разделе датируется 2002 годом, что очевидно показывает, что соискатель недостаточно полно отразил этот вопрос. В данном разделе справедливо сформулировано, что включения в природных алмазах отражают два главных типа парагенезиса: перидотитовый и эклогитовый (этот факт в дальнейшем упомянут еще 3 раза, что было совсем не обязательно). Минеральные включения соответствуют широкому спектру пород, которые по утверждению соискателя широко варьируют по количественному соотношению их основных породообразующих минералов – граната и клинопироксена для эклогитов, граната и оливина для перидотитов. С последним вряд ли можно согласиться, т.к. породообразующими минералами перидотитов также являются орто- и клинопироксены и именно их присутствие в этих породах отражают вариации их состава и используются для дальнейшей классификации. Следовало бы также упомянуть о хромитах, которые также являются одними из наиболее распространенных минеральных включений в природных алмазах.

Раздел 1.4 посвящен рассмотрению включений в алмазах как показателей среды их формирования. В данном случае речь опять о минеральных включениях, которые, повторюсь, представляют реликты материнских алмазоносных пород, но не отражают

алмазообразующую среду (т.е. то вещество (расплав или флюид), из которого кристаллизуется алмаз). Значительная часть раздела посвящена описанию включений графита, которые встречаются в природных алмазах исключительно редко, и в представленной диссертации в дальнейшем никак не рассматриваются. При этом никак не упомянуты существующие обширные данные по другим минеральным включениям. Например, в разделе приводится только описание исследованных образцов с коэситом. Кроме этого, на основании этого неожиданно делается вывод, который совпадает с защищаемым положением, что ставит под сомнение его оригинальность.

Глава 2, посвященная методам исследования, начинается с минералогического описания особенностей исследованных образцов. Это исследование включало морфологическую характеристику и описание их физиографических признаков. Термин «*физиографические признаки*», однако, здесь, как мне кажется, не уместен, т.к. физиография это то же самое что и физическая география. Минералогическое описание огромной коллекции алмазов проведено по системе, принятой в НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), которая подразумевает численную кодировку символов морфологического описания кристаллов и агрегатов (Таблица 2.1). Очевидно, что стоило уделить больше внимания для пояснения использованной системы или хотя бы предоставить ссылку на нее, в случае если она опубликована.

В разделе 2.2 представлена методика исследования алмазов методом ИК-Фурье спектроскопии. Раздел начинается с описания прибора, на котором проводились исследования, и повтора про структуру основных азотных центров в алмазах, но уже с другим набором ссылок. При этом, последний абзац фиксирующий ранее установленные примеси в природных алмазах вообще лишен ссылок!

В разделах 2.3 и 2.4 представлена методика изучения минеральных включений в алмазах по данным спектроскопии КР и приведена оценка экономического эффекта ее внедрения. Детальное описание использованной методики в данном случае дает исчерпывающее представление о том, какие исследования были проведены. Дополнительно, соискателем на использованной аппаратуре фиксировались спектры фотолюминесценции (раздел 2.5). Впрочем, эти данные обсуждаются в работе крайне опосредованно и не используются при формулировке основных выводов работы.

Глава 3 диссертация называется «Особенности внутреннего строения алмазов по данным ИК спектроскопии». К большому сожалению, я не обнаружил никаких упоминаний о внутреннем строении алмазов по контексту этой главы. Глава представляет характеристику дефектно-примесного состава алмазов из разных месторождений по данным анализа интегральных (в целом по кристаллу) ИК-спектров. При этом, очевидно,

что функция плотности Kt в этом случае отражает только очень усредненную картину, и не позволяет уловить ключевые детали для характеристики хронологии формирования алмазов в каждом конкретном месторождении. Так, например, в работе (Bulanova et al., Chemical Geology, 2014) в одном алмазе было зафиксировано 2 генерации алмаза, которые различаются по времени формирования (а соответственно и по Kt) на 1 млрд. лет. Очевидно, что усредненные значения по интегральному спектру для такого кристалла будут лишены важной информации.

Подразделы 3.2.1-3.2.3 заканчивается одной и той же фразой «*Функция плотности вероятности распределения кристаллов из кимберлитовой трубки по логарифму Kt отражает температурно-временной разброс процессов роста для разных кристаллов.*». Но, если это относится к конкретным исследованным месторождениям, то хотелось бы видеть пояснения, какие же, все таки, особенности формирования алмазов в них были выявлены. В связи с этим, вместо термина «генерация» следовало бы использовать термин «популяция». Именно различия термальной эволюции популяций алмазов из разных месторождений и были показаны в представленной соискателем работе. Из полученных данных становятся очевидными систематические различия алмазов из месторождений, расположенных в разных структурных блоках литосферной мантии (террейнах), упоминание о которых могло бы помочь разобраться с этапами алмазообразования в пределах соответствующих регионов Сибирского кратона. К сожалению, эти результаты не нашли отражение в защищаемых положениях несмотря на огромный объем использованных данных.

Глава 4 посвящена изучению минералого-геохимических особенностей включений в алмазах. В первом разделе этой главы приведена статистическая оценка распространенности таких включений, которая, главным образом, определена при визуальном исследовании включений. Такой подход вряд ли приемлим, т.к., изучив тысячи алмазов с включениями, могу утверждать, что отличить визуально оливин, коэсит, энстатит, омфакит и даже иногда гранаты во включениях практически невозможно. Тем не менее, часть включений была также идентифицирована по данным спектроскопии КР. Только эти данные имеют достаточное научное обоснование и если статистика по КР определениям невелика (а она не приведена), то я бы не стал использовать эти данные для формулировки важных положений работы.

В разделе 4.2 приведены данные изучения включений коэсита в алмазах и рассмотрена перспектива их использования в качестве независимого геобарометра. В качестве замечания, следует отметить, что в разделе не уточняется как определялось положение наиболее интенсивного пика коэсита в спектрах КР ($>521\text{ см}^{-1}$). Это важно, т.к.

именно этот пик используется для оценки остаточного давления. На рисунке 4.8 приведена карта смещения пика КР алмаза вокруг включения коэсита, а не Рамановское картирование включения коэсита в алмазе. Вывод, что *«для алмазов из россыпных месторождений отмечено несколько большее остаточное давление, в сравнении с изученными из коренных тел»* требует подтверждения на более представительном материале. Приведенные данные для выборки $n=5$ вряд ли могут быть статистически значимы. Другие выводы, сделанные в данном разделе, тоже должны были бы быть подкреплены фактическим материалом.

В разделе 4.3. рассмотрены парагенезисы включений граната в алмазах. В результате проведенных исследований были выявлены определенные зависимости между химическим составом и положением колебательных пиков в спектрах КР включений гранатов в алмазах, что позволяет идентифицировать их парагенетическую принадлежность. Этот раздел представляет один из наиболее важных результатов работы, хотя и не лишен недостатков. Одним из таких недостатков является отсутствие таблиц с составами исследованных включений и положением колебательных пиков в спектрах КР. Количество данных и выявленный диапазон составов включений гранатов не позволили соискателю выявить общие корреляции состава и положения пиков КР. Между тем, такие корреляции отчетливо проявляются для включений гранатов в алмазах при увеличении количества данных по разным компонентам (CaO , MgO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 и др.), что было продемонстрировано в недавней работе (Kalugina, Zedgenizov, Minerals, 2020). Именно такие корреляции позволяют достаточно уверенно идентифицировать гранаты разного парагенезиса и оценивать их состав. Помимо указанной работы автор также упустил из рассмотрения и некоторые другие ключевые работы исследователей, работавших по этой тематике (например, Колесова и Bersani). Ссылка на работу (Туркин и др., 2009) на стр. 114 совсем не уместна, т.к. этот автор никогда не изучал включения в алмазах. Более уместна была бы, например, ссылка на детальный обзор по включениям в природных алмазах, который приведен в работе (Stachel, Harris, Ore Geology Reviews, 2008).

Рисунок 4.12 не показывает разделения данных по парагенезисам, поэтому остается только догадываться где какие. То же самое наблюдается и на рисунке 4.13. При этом соискатель утверждает, что только определенная часть изученных гранатов *«попали в потенциально алмазоносную область»*. При этом речь идет о включениях в алмазах, т.е. о минералах, ассоциированных с алмазообразованием. Соответственно, парагенезисы таких гранатов тоже являются потенциально алмазоносными.

В заключении можно констатировать, что диссертация Л.Д. Бардухинова в целом производит отличное впечатление. Отмеченные в отзыве недостатки свидетельствуют

лишь о чрезвычайной сложности решаемых задач и преследуют цель обратить внимание соискателя на некоторые возможные аспекты будущих исследований. Замечания никак не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация Л.Д. Бардухинова является важной научно-исследовательской работой, основанной на большом объеме аналитических данных. Уровень исследований и достоверность защищаемых положений и выводов, а также практическая значимость работы соответствуют требованиям Положения ВАК, а ее автор, Бардухинов Леонид Данилович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности «25.00.11-геология поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения».

директор Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН
профессор РАН, д.г.-м.н.



Д.А. Зедгенизов

Подпись Зедгенизова Д.А. заверяю
Зав. общим отделом

