

На правах рукописи



БАРДУХИНОВ ЛЕОНИД ДАНИИЛОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ АЛМАЗОВ И СОСТАВ ВКЛЮЧЕНИЙ В НИХ
КАК ПОИСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ НА ПРИМЕРЕ НАКЫНСКОГО И
АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность 25.00.11 – геология поиски и разведка твердых полезных ископаемых,
минерагения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Улан-Удэ

2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологический институт Сибирского Отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН), г. Улан-Удэ и в Научно-исследовательском геологическом предприятии АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный

Научный руководитель:

Кислов Евгений Владимирович кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии и рудообразующих процессов Геологического института Сибирского Отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН)

Официальные оппоненты:

Зедгенизов Дмитрий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), ведущий научный сотрудник, г. Новосибирск

Хачатрян Галина Карленовна, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ)), ведущий научный сотрудник, г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского Отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), г. Якутск.

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 года в __.00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.002.01 при ГИН СО РАН, в конференц-зале, по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой ба. Тел. 8(3012)433955.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГИН СО РАН и на сайте института: <http://geo.stbur.ru/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат геолого-минералогических наук

Г.Н. Бурмакина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При обнаружении кимберлитов продуктивность алмазных месторождений определяется содержанием и качеством алмазов в породе [Афанасьев и др., 2010]. Для оценки степени возможной алмазоносности кимберлитов по их минеральному составу до проведения трудоемкого опробования или уменьшения его объема, а также при поисках кимберлитов важны минералы-спутники, количества которых на несколько порядков больше, чем алмазов. Широкое внедрение, начиная с 1970-х годов, инструментальных (спектральных) методов исследования и набор банков данных по минеральному составу кимберлитов кардинально расширили информацию о петрологии верхней мантии. Особое внимание уделялось включениям в алмазах, так как каждый кристалл алмаза, содержащий включения других минералов, является своеобразным пробоотборником, заключающим в себе материал из своего ближайшего окружения и в течение длительного времени сохраняющим его в неизменном виде. На основе этих данных и результатов экспериментальных исследований выяснилось, что кимберлит – глубинная порода, служащая транспортером мантийного вещества, включая алмазы, к поверхности (Соболев, 1974; Meyer, 1987). При этом, лишь минералы, кристаллизующиеся совместно с алмазом и соответствующие по составу включениям в нем, являются истинными спутниками алмаза. Другие глубинные минералы не имеют с алмазом генетической связи и могут выступать лишь характерными минералами кимберлитов. Включения в алмазах – уникальный источник информации о составе алмазообразующих сред. Исследования алмазов последних лет позволили значительно продвинуться в вопросе о происхождении алмаза, что позволяет использовать эту информацию при проведении геологоразведочных работ на алмазы. При этом типоморфные признаки алмазов зачастую трудно соотносить с таковыми из известных кимберлитовых тел, опираясь лишь на внешнюю морфологию кристалла. Так, в Далдыно-Алакитском районе довольно редко промышленные россыпи алмазов. Россыпи ближнего сноса представлены лишь ручьями Пироповый и Мелкоильменитовый. В целом, единичные находки алмазов в бассейнах рек Алакит-Мархинского кимберлитового поля не позволяют с должной степенью вероятности соотносить их с коренными телами района. Детальное исследование алмазов и включений в них из кимберлитовых трубок промышленных полей – Накынского и Алакит-Мархинского, на современном аналитическом оборудовании может способствовать решению проблемы коренного источника алмазов россыпей Накынского а Алакит-Мархинского кимберлитовых полей.

Цель исследования. Целью настоящей работы является изучение специфики алмазов и включений в них из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции и выяснение особенностей взаимосвязи алмаз – включение для использования в прогнозно-поисковых работах.

Задачи исследований:

1. Отбор алмазов для дальнейшего изучения из геологических коллекций, проведение визуального описания морфологии, выбор алмазов с минеральными включениями.
2. Исследование и сравнительный анализ оптико-спектроскопических свойств алмазов и включений в них из кимберлитовых тел Накынского и Алакит-Мархинского полей на представительных коллекциях с применением методов ИК, КР-спектроскопии.

3. Выявление взаимосвязи между внутренним строением алмаза по данным ИК спектроскопии и заключенным в нем включением по данным КР-спектроскопии.

4. Разработка методики определения химического состава включений в алмазах, без пришлифовки кристаллов.

5. Определение закономерностей распределения свойств алмазов из месторождений Накынского и Алакит-Мархинского для паспортизации месторождений.

Фактический материал, методы и объем проводимых исследований.

Работа выполнена в НИГП АК «АЛРОСА» и частично в лаборатории геохимии и рудообразующих процессов Геологического института СО РАН. Минералогические и инструментальные исследования коллекций алмазов из месторождений Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей проводились автором в лаборатории комплексного изучения алмазов Научно-исследовательского геологического предприятия АК «АЛРОСА» (ПАО).

Объектом исследований явились представительные выборки алмазов из кимберлитовых трубок Накынского поля (Нюрбинская, Ботубинская) и Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Юбилейная, Комсомольская, Айхал, 30 лет Айхалу, Бобкова, Восток, Заря, Чукукская, Молодость, Радиоволновая, Радиогеодезическая, Сытыканская, Соболева, Озерная, Краснопресненская, Одинцова). Наряду с исследованием физических характеристик алмазов большое внимание уделялось изучению алмазов с минеральными включениями. В основу диссертационной работы положено исследование автором в период с 2007 по 2018 гг. более 15000 алмазов из кимберлитовых тел Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей.

Для детального изучения включений в алмазах было отобрано более 1000 кристаллов и выполнено их исследование методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Более 15000 алмазов исследовано методом ИК-спектроскопии.

Описание внешней морфологии кристаллов алмаза произведено сотрудниками лаборатории комплексного изучения алмазов Т.В. Кедровой, А.Н. Липашовой.

Съемка спектров комбинационного рассеяния включений в алмазах выполнена на Рамановском микроскопе InVia (фирма Renishaw, Великобритания). Все спектры были сняты при комнатной температуре. Источник возбуждения – твердотельный лазер Рамановского микроскопа, λ – 532 нм, мощность - 100 мВт. Использовалась отражательная голографическая дифракционная решетка 1800 лин/мм, измеряемый спектральный диапазон при возбуждающем излучении 532 нм составлял $0 \div 1800 \text{ см}^{-1}$. Объектив 50× (Leica). Приёмником излучения служила Пельтье-охлаждаемая CCD-матрица 1024×256, размер пикселя 26 мкм

ИК-спектроскопические исследования алмазов проводились на ИК-Фурье спектрометре VERTEX 70 (Bruker) в комплексе с ИК-микроскопом Nupregion 2000. Диапазон измерений: 400–5500 см^{-1} . Была выполнена съемка интегральных (со всего объёма кристалла) спектров.

В процессе проведения исследований и при подготовке диссертационной работы использовались материалы из базы данных НИГП по алмазам.

Научная новизна.

1. Инструментально подтвержденные данные по идентифицированным включениям в алмазах из ряда кимберлитовых тел Накынского и Алакит-Мархинского полей позволили установить, что набор структурных дефектов и включений в алмазах специфичны

для каждого поля и что для кимберлитовых трубок Накынского поля характерна повышенная доля алмазов с включениями эклогитовой ассоциации.

2. Создана электронная база данных по идентифицированным включениям в алмазах из ряда (более 20) кимберлитовых тел Накынского и Алакит-Мархинского полей.

3. На основании детального исследования включений коэсита в алмазах установлено, что октаэдрические кристаллы формировались в мантии при более высоком давлении, чем ромбододекаэдрические.

4. Разработана методика идентификации парагенетической принадлежности алмазов по включениям гранатов в них, что позволяет реконструировать состав среды алмазообразования в различных сегментах мантии характеризуемых кимберлитовых полей или отдельных трубок. Установлено, что алмазы с включениями гранатов эклогитового парагенезиса характеризуются высокими концентрациями общего азота и средней его агрегацией, тогда как алмазы с включениями гранатов верлитового, дунит-гарцбургитового и лерцолитового парагенезисов отличаются низкой концентрацией азота и широкой вариацией степени его агрегации, что свойственно алмазам перидотитового генезиса.

Практическая значимость.

1. Проведенные исследования расширили представления о взаимосвязи алмаз-включение и различий во внутреннем строении алмазов Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей, что используется при проведении поисковых работ на алмазы в данном регионе.

2. Предложенная методика по идентификации принадлежности единичных находок алмазов с включениями из россыпей с алмазами из известных коренных месторождений используется для установления принадлежности россыпных объектов в процессе проведения поисковых работ.

3. Полученные результаты и сделанные выводы вносят существенный вклад в понимание закономерностей роста алмазов в условиях литосферной мантии под различными сегментами Якутской алмазоносной провинции и могут быть востребованы исследователями, специализирующимися на проблемах алмазообразования, а также геологическими организациями, занимающимися поисками алмазов.

Основные защищаемые положения:

1. Разработаны научные основы определения состава включений гранатов в алмазах без их разрушения, базирующиеся на корреляции химического состава и положения колебательных пиков в спектрах КР «гранатов-узников», что позволяет идентифицировать парагенетическую принадлежность «алмаза-хозяина», соответственно, осуществлять реконструкцию среды алмазообразования в различных сегментах мантии, а также устанавливать первоисточник россыпных месторождений.

2. Особенности морфологии кристаллов и специфика физических свойств алмазов и включений в них из трубок Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей свидетельствуют о различии алмазообразующей среды (мантийного субстрата) под этими полями. Установленная повышенная встречаемость включений коэсита и других минералов эклогитового парагенезиса в алмазах северных полей ЯАП свидетельствует о возрастании роли эклогитового субстрата как алмазообразующей среды с юга на север провинции. Эти закономерности следует учитывать при прогнозировании и проведении поисковых работ на алмазы.

3. В большинстве низкопродуктивных кимберлитов Алакит-Мархинского поля установлена повышенная доля алмазов эклогитового парагенезиса, (без учета содержания сульфидных включений) «безазотных» кристаллов и пониженное содержание алмазов со степенью агрегации азота ~25 и 45%.

Публикации и апробация работы.

Автор имеет 19 опубликованных научных работ по теме диссертации, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций, и 12 работ в материалах и тезисах конференций. Помимо этого, диссертант является соавтором пяти научно-тематических производственных отчетов по объектам «Лабораторно-аналитический -5», 2012 г.; «Лабораторно-аналитический -6», 2015 г.; «Алмазный-5», 2010 г.; «Алмазный-6», 2013 г.; «Алмазный-7», 2016 г.

Материалы диссертации и отдельные защищаемые положения докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Минералогический семинар с международным участием – «Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества: проблемы структурирования, упорядочения и эволюции структуры» (г. Сыктывкар, 2012 г.), XXIV Всероссийская молодежная конференция – «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2011 г.), IX международная конференция – «Новые идеи в науках о земле» (РГГРУ, г. Москва, 2009 г.), The 8th International Siberian Conference – «Early Career GeoScientists» (Novosibirsk, 2016), XII international conference – «GEORAMAN – 2016» (Novosibirsk 2016), XVII Всероссийская конференция – «Термобарогеохимия» (г. Улан-Удэ, 2016 г.), Международная научно-практическая конференция Наука и инновационные разработки – северу, (г. Мирный, 2014 г.), Юбилейный съезд Российского минералогического общества – «200 лет РМО» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), V полевой научно-практический семинар – «Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов АК «АЛРОСА»: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии» (п. Айхал, 2015 г.), V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (г. Мирный, 2018 г.), V Всероссийская научно-практическая конференция «Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии» (г. Улан-Удэ, 2018 г.), IX Всероссийская научно-практическая конференция «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (г. Якутск, 2019 г.).

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения и четырех глав, изложенных на 143 страницах, проиллюстрирована 63 рисунками, 7 таблицами. Список литературы содержит 125 наименований.

Введение содержит обобщенные сведения о работе, определены актуальность, цели и задачи работы, научная новизна, степень проработанности и личный вклад автора, приведен фактический материал и указаны современные методы недеструктивного исследования алмазов и включений в них, а также сформулированы защищаемые положения. Первая глава является изложением литературного материала, отражающего основные современные знания о включениях в алмазах, структурных особенностях алмазов, и их взаимосвязь с P-T условиями их формирования, приведена краткая геологическая характеристика района исследования. Во второй главе описаны экспериментальные методы исследования, использованные в данной работе, показан экономический эффект. В третьей главе изложены результаты исследований алмазов. В четвертой главе проведена сравнительная характеристика основных месторождений алмазов рассматриваемых районов на основе

литературных данных и результатов исследования включений в алмазах. В заключении изложены основные результаты работы.

Благодарности.

Работа выполнена в лаборатории геохимии и рудообразующих процессов ГИН СО РАН под руководством к.г.-м.н. Е.В. Кислова и в лаборатории комплексного изучения алмазов НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) под руководством д.г.-м.н. З.В. Speziуса. Автор выражает особую благодарность за помощь, внимание, поддержку и терпение научным руководителям работы д.г.-м.н. З.В. Speziусу и к.г.-м.н. Е.В. Кислову. Неоценимый вклад в проведении исследований внесли сотрудники лаборатории комплексного изучения алмазов: к.г.-м.н. И.Н. Богуш, к.ф.-м.н. С.В. Софронеев, Т.В. Кедрова, А.Н. Липашова, О.В. Горина, И.В. Глушкова, О.В. Данилова, Н.В. Кондратьева. Полноценная поддержка оказывалась руководством, сотрудниками и бывшими работниками НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО): О.Е. Ковальчуком, к.г.-м.н. А.В. Герасимчуком, Б.С. Помазанским, д.г.-м.н. А.В. Толстовым, к.г.-м.н. А.С. Ивановым, Р.В. Монхоровым, а также сотрудниками ГИН СО РАН: к.г.-м.н. Е.В. Васильевой, д.г.-м.н. А.А. Цыганковым, д.г.-м.н. А.М. Плюсниным, С.А. Зангеевой.

Всем вышеперечисленным коллегам, а также всем тем, кто так или иначе способствовал проведению исследований, автор выражает глубокую благодарность.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение: **Разработаны научные основы определения состава включений гранатов в алмазах без их разрушения, базирующиеся на корреляции химического состава и положения колебательных пиков в спектрах КР «гранатов-узников», что позволяет идентифицировать парагенетическую принадлежность «алмаза-хозяина», соответственно, осуществлять реконструкцию среды алмазообразования в различных сегментах мантии, а также устанавливать первоисточник россыпных месторождений.**

Определение химического состава включений гранатов обычно проводят с помощью электронного микроскопа, при этом изучаемое включение выводится на поверхность алмаза путем его пришлифовки. Применение рамановской (КР) спектроскопии позволяет упростить пробоподготовку и исключить разрушение минерала-хозяина. Однако, определение химического состава гранатов этим методом ограничено некоторыми параметрами, связанными со структурой минерала, что потребовало разработки и применения дополнительных методических приемов.

Возможность использования КР спектроскопии для диагностики гранатов основана на зависимости между энергией растяжений и кручений связи Si–O и химическим составом гранатов (Migsheng et al., 1994). Л.М. Лялиной (2000) показано, что наиболее интенсивными полосами КР спектра пироба являются полосы около 900 и 370 см⁻¹, альмандин – 927 и 365 см⁻¹ и грессуляра – 880 и 374 см⁻¹.

Был изучен состав 57 зерен граната из кимберлитов с помощью рентгеновского микроанализатора Superprobe JXA-8800R (фирма Jeol, Япония). Для тех же зерен были получены КР спектры. Для оценки содержаний CaO и Cr₂O₃ в гранатах на основе данных КР спектроскопии были построены калибровочные зависимости R₃–CaO и R₂–Cr₂O₃ (рис. 2). Калибровочные уравнения имеют вид: Cr₂O₃=K₂*R₂+B₂ и CaO=K₃*R₃+B₃, в зависимости от состава гранатов, значение коэффициентов K₂, K₃, B₂ и B₃ варьируется.

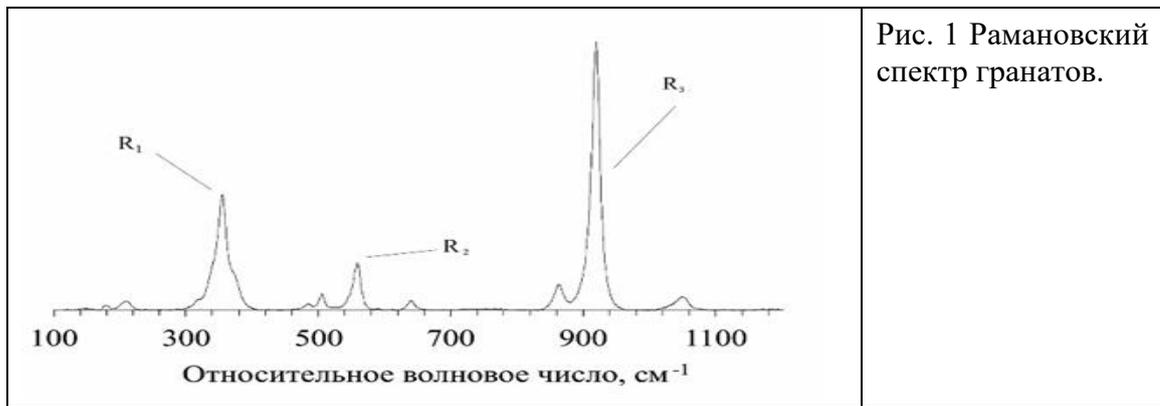


Рис. 1 Рамановский спектр гранатов.

Проанализированные гранаты относятся к нескольким парагенетическим ассоциациям. К лерцолитовой ассоциации относится 21 % изученных зерен. Около 30% гранатов принадлежит к алмазонасным ассоциациям. Среди них резко преобладают гранаты гарцбургитового парагенезиса, встречаются гранаты эклогитового, реже – верлитового парагенезисов.

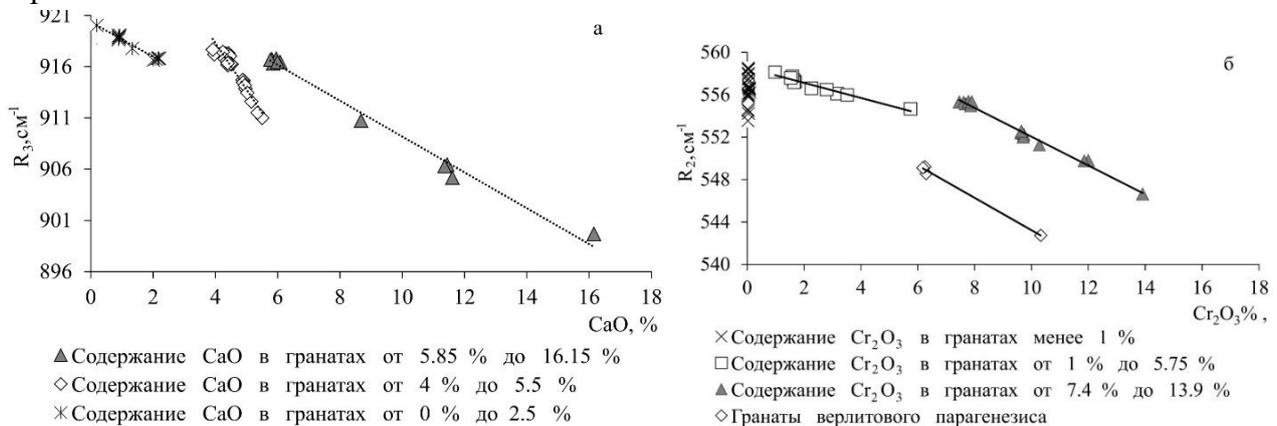


Рис. 2. Калибровочные зависимости волновых чисел пиков рамановских спектров от состава граната: R3 – CaO (а), R2 – Cr₂O₃ (б).

Примечание: на рис. 2а содержание CaO в гранате изменяется (мас. %) от 5,85 до 16,6 (1), от 4,0 до 5,5 (2), от 0 до 2,5 (3); на рис. 2б содержание Cr₂O₃ в гранате (%) менее 1 (1), изменяется от 1,0 до 5,75 (2), от 7,4 до 13,9 (3), гранаты верлитового парагенезиса (4).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что волновые числа пиков изменяются в широких диапазонах, составляющих: для R₁ 353.6–368.8 см⁻¹, для R₂ от 542.7–559.1 см⁻¹, для R₃ 899.7–922.1 см⁻¹. Установлены корреляционные зависимости положения полосы около 920 см⁻¹ (R₃) от содержания CaO (рис. 2, а) и комбинационной моды 555 см⁻¹ (R₂) от содержания Cr₂O₃ % (рис. 2, б). Следует подчеркнуть, что эти зависимости оказываются отличными для разных интервалов содержаний компонентов. На диаграмме R₂–Cr₂O₃ выделено 4 вида подобных зависимостей для концентраций Cr₂O₃, соответствующих границам на диаграмме CaO–Cr₂O₃ (Соболев и др., 1969; Sobolev et al., 1973). Подобная картина прослеживается и на диаграмме R₃–CaO.

Известно, что в гранатах хром является примесным элементом, изоморфно замещающим алюминий (Мацюк и др., 2001). Поскольку ионы Cr³⁺ располагаются в октаэдрических позициях структуры гранатов (Y), положение линий R₂ в КР спектре граната будет зависеть прежде всего от геометрических особенностей координационных октаэдров. Так как, изученные гранаты относятся, в основном, к двум изоморфным рядам: пироп–кноррингит–уваровит и пироп–гроссуляр–уваровит, решающее влияние на размеры Y

позиций оказывает изоморфизм Mg–Ca и Al–Cr. Предположительно, рост содержаний Ca и Cr приводит к увеличению размеров координационных октаэдров, что приводит к смещению полос КР спектров.

Таким образом, одним из возможных применений выполненного исследования является определение химического и компонентного состава включений граната в алмазах без их разрушения на основе данных КР спектроскопии. Заметим, что к числу факторов, влияющих на получаемые оценки содержаний Ca и Cr относится давление. Включения гранатов в алмазах могут испытывать давление от 1 до 2 ГПа (Nasdala et al., 2005). Максимальное давление, вызывающее смещение КР полосы гранатов, составляет более 2 ГПа (Gillet et al., 1992). Полученные данные не учитывают наличие остаточного давления в алмазах.

Включения гранатов в алмазах. Для идентификации парагенетической принадлежности включений гранатов в алмазах, использована оригинальная методика, описанная выше.

Во многих работах, посвященных гранатам кимберлитов, вопросы генезиса гранатов тесно увязываются с происхождением алмазов (Соболев, 1964; Соболев и др., 1969; Meyer, 1968, Туркин, Соболев, 2009, и др.). В последние годы эти вопросы рассматриваются с учетом результатов экспериментального моделирования процессов природного алмазообразования, в том числе и в системах с участием гранатов (Дорошев и др., 1997; Butvina et al., 1999).

Минеральный состав проанализированных включений гранатов в основном соответствует ряду пироп–альмандин (рис. 3). Для включений гранатов из трубки Юбилейная наблюдается преобладание пиропового компонента (более 0.75), что характерно и для включений гранатов из трубки Удачная. Несколько обособленно на диаграмме располагаются точки составов включений граната из трубки Комсомольская-Магнитная, для них типично преобладание альмандинового компонента (более 0.4). Повышенным содержаниемgrossулярового минала (более 0.3) отличаются включения граната из трубки Заполярная.

Наряду с вариациями химического состава включений гранатов, изученные алмазы отличаются по дефектно-примесному составу (рис. 4). Например, в алмазах с включениями гранатов гарцбургитового, лерцолитового и верлитового парагенезисов содержание общего азота достигает 500 ppm при широких вариациях его агрегации, что соответствует перидотитовому генезису алмазов. В алмазах с включениями гранатов эклогитового парагенезиса из трубки Комсомольская-Магнитная содержание общего азота составляет до 600–800 ppm, при средней его агрегации (30–50%). На высокобарическое происхождение подобных включений указывает их ассоциация с коэситом (Бардухинов и др., 2016). Для алмазов перидотитового парагенезиса из кимберлитов трубок Юбилейная, Комсомольская, Удачная наблюдается тренд в изменении общего содержания азота и его агрегации (рис. 4).

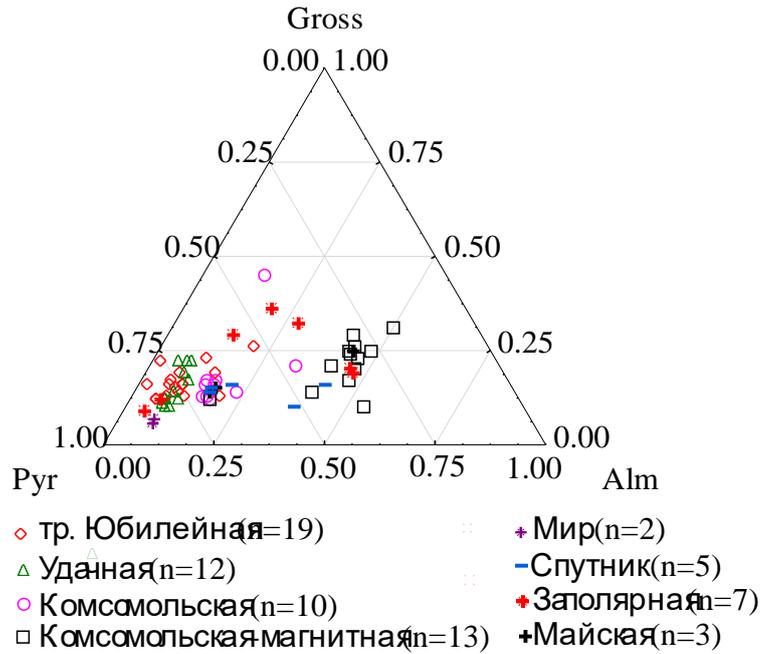


Рис. 3. Соотношение мишалов во включениях гранатов в алмазах из кимберлитовых трубок Якутии (по данным КР-спектроскопии).

Этот тренд может быть описан с помощью параметра K_t , входящего в уравнение агрегации А-центров и являющегося показателем условий роста алмаза (Evans et al., 1982). Выборка алмазов из одного коренного месторождения с установленным перидотитовым генезисом, на диаграмме содержания общего азота (N_{tot}) и его агрегации ($B1/(A+B1)$) имеет распределения, соответствующие одной или нескольким генерациям алмазов, каждая из которых может быть описана постоянным параметром K_t . Соответственно, можно утверждать, что формирование алмазов определенной парагенетической принадлежности из конкретного коренного месторождения происходило в единых температурно-временных условиях.

Таким образом, полученные результаты дают возможность сопоставлять оптико-спектроскопические данные единичных находок алмазов с включениями гранатов с уже имеющимися сведениями по изученным коллекциям из известных кимберлитовых тел.

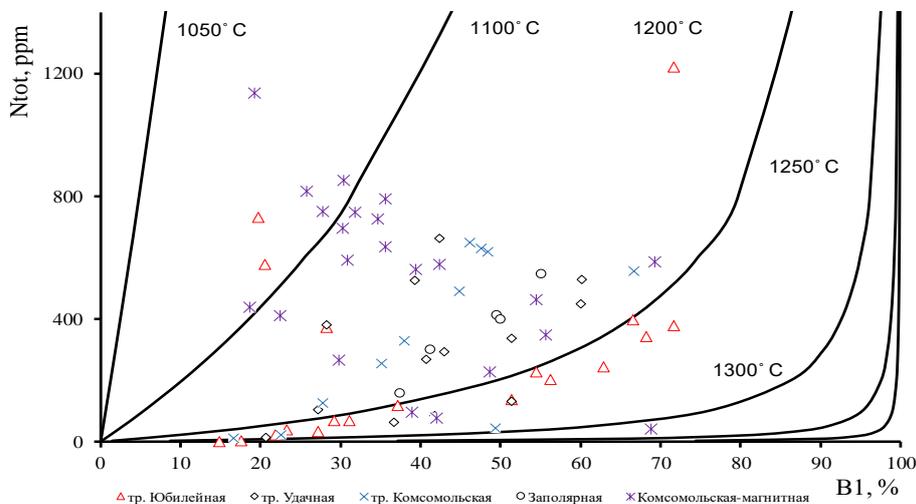


Рис. 4. Зависимость между содержанием азота (N_{tot}) и степенью его агрегации ($B1\%$) в алмазах с включениями гранатов.

Результаты проведенного изучения алмазов с включениями гранатов хорошо согласуются с выводами, сделанными ранее на основании комплексного исследования алмазных пластин из ксенолитов трубки Нюрбинская (Специус и др., 2015). В цитируемой работе показано, что алмазы эклогитового и перидотитового парагенезисов различаются между собой по физическим характеристикам, внутреннему строению и другим особенностям: первые соответствуют области повышенных концентраций азота, в то время как вторые представляют собой мало- и средне-азотистые кристаллы, процентное содержание азота в В-форме в которых выше, чем в кристаллах эклогитового парагенезиса. Следовательно, в некоторых случаях, при условии отсутствия сингенетического включения в алмазах, возможно, по содержанию азота и его агрегации в алмазах, предполагать перидотитовый или эклогитовый минеральный парагенезис алмаза.

Включения оливина в алмазах.

Одним из наиболее распространённых силикатных включений в алмазах является оливин. Известно, что большинство включений оливина в литосферных алмазах, как правило, характеризуются пониженным содержанием фаялитового минала и, соответственно, повышенной магнезиальностью (Sobolev et al., 2008). В работе (Sobolev et al., 2009) отмечается, что для подавляющего большинства изученных оливинов-включений в алмазах магнезиальность $[100 \text{ Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})]$ % определена между 91 и 94%. Исследования оливинов из ксенолитов и, в первую очередь, из кимберлитов позволили выделить два типа: оливины I генерации (макрокристаллы) и оливины II генерации (в основном менее 0.5 мм).

Рамановский спектр оливина имеет характерный набор из двух интенсивных линий около 825 см^{-1} (K1) и 855 см^{-1} (K2), которым соответствуют колебания кристаллической решетки связи Si-O (ассиметричное растяжение и симметричное валентное колебание соответственно). Положение полосы около 825 см^{-1} (K1) в спектре включения оливина в алмазе, рассчитанное остаточное давление (Yasuzuka et al., 2009) и содержание азота (Zaitsev, 2001) в алмазе приведены в таблице.

Рамановский спектр оливина зависит от химического состава (Mouriand et al., 2008); соответствующее рамановское исследование на синтетических минералах группы оливина (форстерит, фаялит, кнебелит и тефроит) позволило вывести формулу для расчета магнезиальности. Известны уравнения (Yasuzuka et al., 2009) для одновременного расчета магнезиальности оливинов и остаточного давления в алмазах, при этом авторы апробировали их при расчете на реальном включении оливина в алмазе из тр. Интернациональная, получение значения магнезиальности и давления $91,6\% \pm 0,6$ и $0,32 \pm 0,05$ ГПа соответственно.

Одновременный рост алмаза и его сингенетического включения происходит в некоторой постоянной среде, но после подъема алмаза на поверхность возникает разница в параметрах объемного расширения, по причине декомпрессии и охлаждения, между включением и минералом-хозяином, что приводит к увеличению давления на включении со стороны алмаза. Так называемое «остаточное давление» можно определить по сдвигам линий в рамановских спектрах, зафиксированных для включения внутри алмаза. Наиболее интенсивные полосы валентных колебаний SiO₄-групп в спектре оливина наблюдались в виде дублета с максимумами около 825 и 857 см^{-1} , которые имеют скорость сдвига по давлению $2,81 \pm 0,09$ и $2,69 \pm 0,12 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$ для фаялитового минала ($\text{Mg}\#=0$); $3,51$ и $3,26 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$ для форстерита ($\text{Mg}\#=100$) (Yasuzuka et al., 2009).

В кимберлитовых трубках Якутии наиболее широко распространены включения оливина с магнезиальностью 91-94%. Исходя из этого для соответствующих расчетов

остаточного давления в кристаллах алмазах, в работе использована скорость сдвига $3,46 \text{ см}^1/\text{ГПа}$, при среднем значении магнезиальности, равном 93%. Следует отметить, что расчёты остаточного давления при магнезиальности 91 и 94% не имеют значимых различий. Для определения остаточного давления в алмазах использовано положение полосы К1 и ее сдвиг относительно полосы, зарегистрированной для оливина с магнезиальностью 93% и при нулевом давлении – $823,4 \text{ см}^{-1}$ (Yasuzuka et al., 2009).

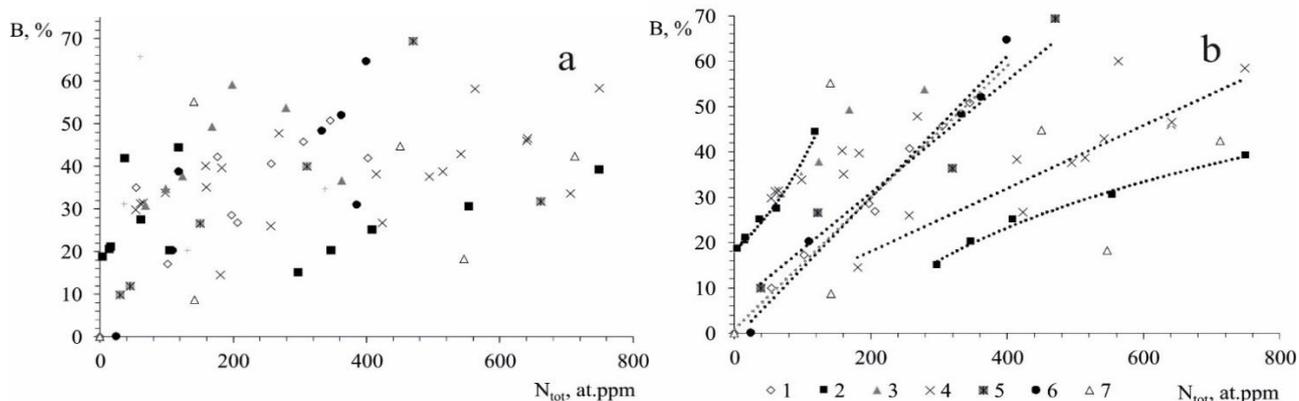


Рис. 5. Суммарная концентрация азота и его агрегация в алмазах с включениями оливина из кимберлитовых трубок 1- Комсомольская-Магнитная, 2- Ботуобинская, 3- Юбилейная, 4- Заполярная, 5- Комсомольская, 6- Айхал и 7- Мир: а - все изученные алмазы с включениями оливина, б - алмазы только с сингенетическими включениями оливина.

Анализ рамановских спектров включений оливина в алмазах показал, что эти полосы имели максимальные сдвиги по частоте для включения в образце из тр. Юбилейная: $827,8$; $858,1 \text{ см}^{-1}$. Расчетное значение остаточного давления составило $1,27 \text{ ГПа}$. В результате установленное остаточное давление во включениях может быть использовано для оценки давления в момент кристаллизации алмаза, используя геобарометр (Israeli et al., 1999).

Для алмазов с включениями оливинов из ряда трубок были получены спектры ИК-поглощения. По данным ИК-спектроскопии, алмазы с включениями оливинов имеют широкие вариации как по содержанию общего азота, так и по его агрегации (Рис. 5а). Содержание общего азота в алмазах варьирует от 0 до 800 at. ppm , причем у большей части кристаллов с включениями оливинов отмечены пониженные (менее 400 at. ppm) концентрации структурного азота. Агрегация азота у исследуемых кристаллов имеет значения, в основном, более 20 % и менее 60 %. Алмазы из трубки Ботуобинская с включениями оливина имеют два тренда по содержанию общего азота от 0 до 100 at.ppm и от 300 до 1200 at.ppm (Рис. 5 б), такое же двойное распределение имеют также кристаллы из трубки Заполярная, что может указывать на существование нескольких генераций алмазов (Vulanova, 1995).

Данные по кристаллам с включениями оливина, имеющими признаки сингенетического роста, были выделены из общей базы по коллекции исследуемых алмазов (рис. 5 б), при этом для кристаллов с сингенетическими включениями получены зависимости соотношений концентрации и процентного содержания азота В-форме в алмазах. Вычисленные уравнения зависимости $N_{\text{tot}} - B\%$ для кристаллов с сингенетическими включениями оливина позволят в дальнейшем, после наработки достаточного количества определений, использовать их как один из признаков, идентифицирующий единичные находки алмазов с включением оливина на предмет принадлежности их к известному коренному источнику.

Таким образом, в соответствии с результатами проведенной работы, можно утверждать о возможности присутствия как сингенетических, так и протогенетических включений

оливина в алмазах из кимберлитов Якутии, что может быть диагностировано комплексом методов рамановской и ИК спектроскопии алмазов. Различные значения остаточного давления в алмазах с включениями оливина в каждом конкретном месторождении также указывают на различные условия формирования; в большинстве случаев, установлено, что повышенное остаточное давление наблюдается в алмазах с высоким содержанием примеси азота. В качестве критерия сингенетического роста можно рассматривать эпитаксиальное соотношение между включением и вмещающим его алмазом.

Алмазы с включениями оливинов имеют широкие значения концентрации азота 0 - 800 at.ppm и его агрегации 0-70 %, при этом обнаруживаются характерные зависимости в соотношении $N_{tot} - V\%$ для каждого конкретного месторождения. Предлагается, что последнее обстоятельство может быть использовано при проведении прогнозно-поисковых работ на алмазы.

Известно, что оптико-спектроскопические характеристики алмазов из коренных тел разных кимберлитовых полей отличаются между собой (Хачатрян, 2010). Выполненные исследования показали, что совместное использование методов Рамановской и ИК спектроскопии может с успехом использоваться для идентификации единичных находок алмазов в россыпях и соотнесения их с известными алмазоносными объектами, что, несомненно, можно и нужно применять при ведении поисковых работ на алмазы.

Второе защищаемое положение: **Особенности морфологии кристаллов и специфика физических свойств алмазов и включений в них из трубок Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей свидетельствуют о различии алмазообразующей среды (мантийного субстрата) под этими полями. Установленная повышенная встречаемость включений коэзита и других минералов эклогитового парагенезиса в алмазах северных полей ЯАП свидетельствует о возрастании роли эклогитового субстрата как алмазообразующей среды с юга на север провинции. Эти закономерности следует учитывать при прогнозировании и проведении поисковых работ на алмазы.**

Кристалломорфологические особенности (габитус и разновидность) алмазов из тел Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей представлены на рисунке 6.

По данным исследования морфологии алмаза из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского полей, выявлены резкие различия по набору кристалломорфологических форм алмаза между рассматриваемыми полями.

В ранних работах (Зинчук и др., 2003) представлена исчерпывающая информация по типоморфизму алмазов Сибирской платформы, в тоже время наши результаты значительно расширяли информацию новыми данными по включениям, морфологии и набору структурных дефектов.

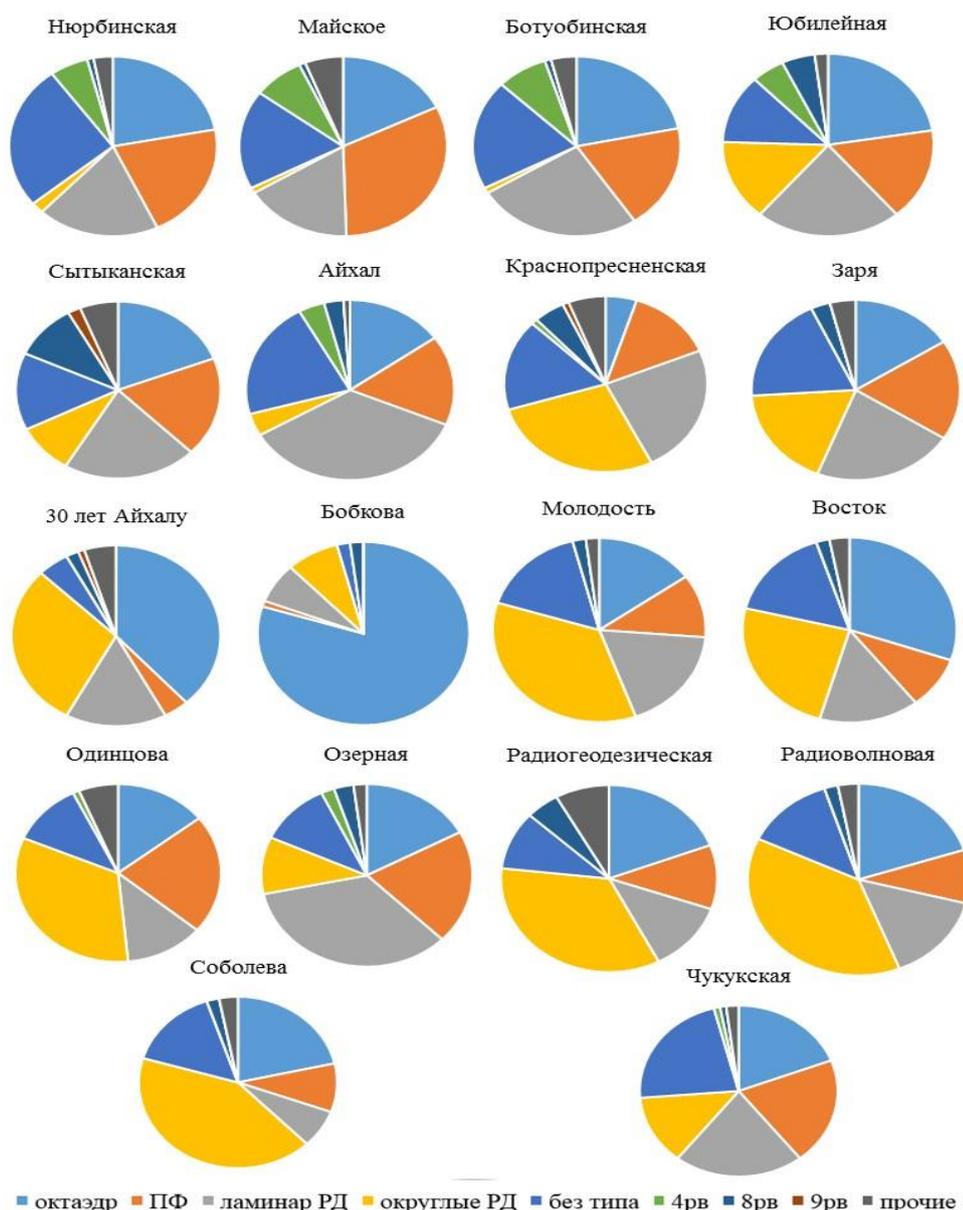


Рис. 6. Разновидности и габитус алмазов (%) в кимберлитовых телах Накынского и Алакит-Мархинского полей.

Огромное количество работ посвящено изучению коэсита в Кокчетавском метаморфическом комплексе. В работе (Соболев, 2006) описаны поликристаллические агрегаты кварца, представляющие собой псевдоморфозы по, предположительно, коэситу. В Барчинском участке обнаружены коэситовые включения в цирконе из эклогитов (Корсаков и др., 1998).

В восьми алмазах из кимберлитовых трубок Заполярная, Майская, Комсомольская-магнитная, россыпных месторождений Куойка, Большая Куонамка, Далдын и Сянгюде нами были идентифицированы коэситовые включения, представляющие собой бесцветные кристаллы различных форм и размеров от 20 мкм до 80 мкм. По кристалломорфологии алмазы с включениями коэсита представлены кристаллами I разновидности по Ю.Л. Орлову (Орлов, 1965) размерностью около 2 мм. Алмаз из трубки Заполярная представляет собой октаэдр с полицентрическими гранями. Кристаллы переходной формы отмечены в трубке Майская и россыпи Большая Куонамка. Ламинарные ромбододекаэдры встречены в трубке

Комсомольская-Магнитная и россыпи Куойка. Важно заметить, что в алмазах вокруг включений не были зафиксированы трещины или следы пластических деформаций, что может говорить о сохранении напряжения внутри алмаза. Для установления величины замороженного давления в алмазе были использованы спектры КР алмаза и коэситового включения в нем.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света широко используется для идентификации включений и дает информацию о природе включений и минеральной фазе (Israeli et. al., 1998). Типичные минеральные спутники алмаза, такие как, как оливин и гранат, демонстрируют сдвиги в спектрах КР, указывая на их сжатое состояние (Yasuzuka et al., 2009). Подчеркнем, что некоторые первые КР-исследования твердых включений были проведены на паре алмаз-коэсит, однако не было данных о заключенном во включении давлении (Boyer et. al., 1985). Первое систематическое исследование спектров КР включений коэсита в алмазе провели Н.В. Соболев и соавторы (Sobolev et al., 2000). Они продемонстрировали закономерное увеличение сдвига пиков изученных спектров коэсита и соответствующее ему остаточное давление в алмазах из Венесуэлы ($3.62 (\pm 0.18)$ ГПа), позволяющее оценить давление в момент формирования алмаза $5.5 (\pm 0.5)$ ГПа.

Наиболее интенсивная КР-полоса коэсита при 521 см^{-1} имеет значительную скорость сдвига $2.9 (\pm 0.1) \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$. Эта полоса используется для измерения остаточного давления (Hemley, 1987). КР-спектры, полученные от 8 коэситовых включений в алмазах из кимберлитовых трубок Заполярная, Майская, Комсомольская-Магнитная, россыпей Куойка, Большая Куонамка, Далдын, Сюнгюде дали некоторый сдвиг полосы на 521 см^{-1} на величины $\Delta\nu=7,9; 6,1; 5,3; 7,8; 9; 7,5; 2,3; 9,1 \text{ см}^{-1}$ соответственно. С учетом компрессионной разности между алмазом и коэситом, можно говорить о достаточно высоком остаточном давлении, в частности для россыпных кристаллов из рр. Куойка, Большая Куонамка, Далдын, Сюнгюде ($2,7\pm 0,07; 3,1\pm 0,1; 2,4\pm 0,01; 3,1\pm 0,1$ ГПа соответственно). Для алмазов из коренных месторождений установлено следующее. Для октаэдрического кристалла трубки Заполярная характерно наибольшее остаточное давление ($2,7\pm 0,07$ ГПа). Для кристалла переходной формы из трубки Майская отмечено промежуточное значение данного параметра ($2,1\pm 0,07$ ГПа). При этом минимальный сдвиг в спектре КР был определен для коэсита в алмазе из трубки Комсомольская-Магнитная, расчетное значение замороженного давления для которого составило $1,8\pm 0,03$ ГПа. Таким образом, установлено, что кристаллизация изученных октаэдрических алмазов и кристаллов ромбододекаэдрического габитуса из коренных месторождений происходила в различных Р-Т условиях. Для алмазов из россыпных месторождений отмечено несколько большее остаточное давление, в сравнении с изученными алмазами из коренных тел. Следует отметить, что кристалл переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формы из россыпи Большая Куонамка имеет на порядок выше остаточное давление в сравнении с кристаллом ромбододекаэдрического габитуса из россыпи Куойка.

С момента начала использования КР микроскопа для идентификации включений в алмазах, диагностировано 8 включений коэсита в алмазах, причем 5 алмазов из россыпей Лено-Анабарской субпровинции. С учетом относительно редкой встречаемостью включений коэсита в алмазах, можно говорить о возрастании роли эклогитового субстрата как алмазообразующей среды в Лено-Анабарской субпровинции. Для поиска коренного источника таких алмазов необходимы новые методики и подходы, позволяющие должным образом выявить индикационные признаки неизвестного первоисточника.

На основании результатов нескольких работ по изотопии кислорода в коэситах, а также изотопии углерода и азота алмазов с включениями коэсита сделан вывод о субдукционной природе образования коэситсодержащих эклогитов (Соболев, 2006), поэтому можно однозначно утверждать, что коэситовые включения в алмазах могут являться индикационным критерием присутствия алмазов эклогитового парагенезиса.

Таким образом, коэситовые включения в алмазах не следует рассматривать как очень редкие, и они могут быть использованы как геобарометр для алмазов многих месторождений. В заключение можно отметить, что на основании сравнительного анализа результатов проведенного исследования остаточного давления в алмазах с включениями коэсита установлена зависимость кристалломорфологической формы кристалла от остаточного давления в нем. Установлено, что октаэдрические кристаллы формировались в мантии при более высоком давлении, чем алмазы ромбододекаэдрического габитуса.

В телах Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитового полей определены сингенетические включения перидотитовой (оливин, хромит, малиновый пироп, энстатит, хромдиопсид) и эклогитовой (оранжевый гранат, омфацит, коэсит) ассоциаций.

Среди эпигенетических включений в алмазах наиболее распространён графит. Распространённость твёрдых включений и их ассоциаций оценена главным образом визуально и в большинстве случаев подтверждена Рамановской спектроскопией. Установлено, что число алмазов с твёрдыми включениями составляет >50% от общего объёма кристаллов. Основная их масса – это эпигенетические включения графита. Ниже приведены содержания включений в алмазах различных трубок без учёта кристаллов с включениями графита и сульфидов. Несмотря на то, что определённая концентрация никеля (Ефимова и др., 1983) или изотопный состав Re-Os (Richardson et al., 2001) сульфидных включений является характерным признаком алмазов различного происхождения, на данный момент метод КР-спектроскопии не может однозначно указывать на эклогитовый или перидотитовый тип парагенезиса.

Установлено, что на долю сингенетических включений приходится не более 3% от общего количества кристаллов. Отмечено, что наибольшая частота встречаемости алмазов с включениями свойственна алмазам Алакит-Мархинского кимберлитового поля, в частности, образцам из трубок Чукукская и Озёрная (>2%), относительно высокая (>1%) – образцам из трубок Юбилейная (1,21%), Молодость (1,43%), Краснопресненская (1,51%), Комсомольская (1,95%), Заря (1,64%), Восток (1,36%), более низкая – алмазам из кимберлитов Накынского поля (<0,5%).

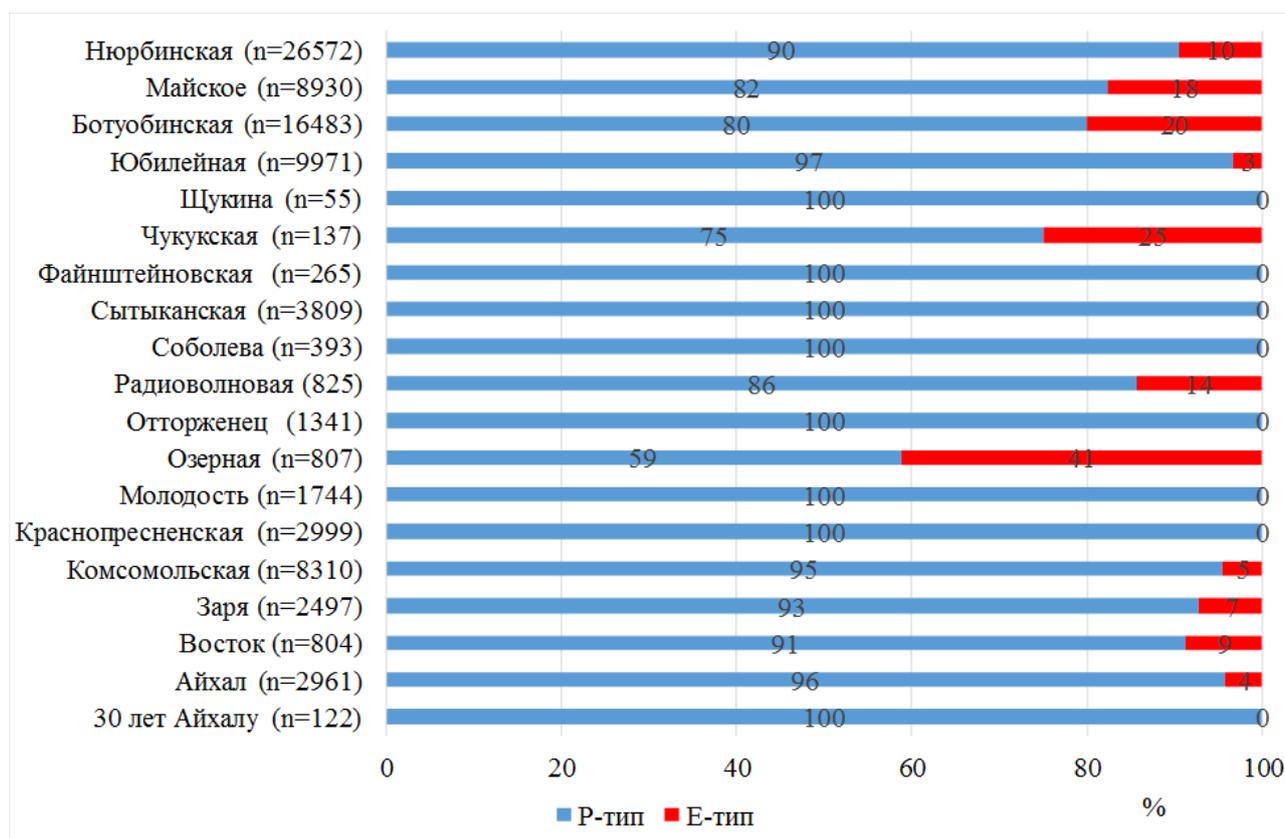


Рис. 7. Доля кристаллов ультраосновной (Р-тип) и эклогитовой (Е-тип) ассоциации включений в алмазах из кимберлитовых тел Накынского и Алакит-Мархинского полей.

Среди сингенетических включений наиболее распространены оливин и хромшпинелид, причём первый несколько преобладает. Изученные кимберлитовые трубки можно разделить на два типа в зависимости от содержания включений оливинов в алмазах: $>0,8\%$ (30 лет Айхалу, Заря, Краснопресненская, Озёрная, Чукукская, Восток, Комсомольская, Молодость) и $<0,8\%$ (Айхал, Радиоволновая, Сытыканская, Ботуобинская, Юбилейная, Нюрбинская). Наибольшая частота встречаемости включений оливина выявлена в трубке Чукукская (1,46%), наименьшая – в трубках Сытыканская (0,16%), Нюрбинская (0,13%) и Ботуобинская (0,04%). Больше всего включений хромита в алмазах в трубках Комсомольская (0,63%) и Радиоволновая (0,48%), в остальных – $<0,3\%$, преимущественно $<0,1\%$. Анализ твёрдых включений в алмазах позволил определить долю кристаллов с включениями ультраосновной и эклогитовой ассоциаций. Преобладают алмазы с включениями ультраосновной ассоциации (Р-тип), на долю эклогитовой (Е-тип) приходится $<50\%$. На фоне преобладания алмазов перидотитового генезиса можно выделить трубки с относительно повышенной долей алмазов с включениями эклогитовой ассоциации: Озёрная (41%), Чукукская (25%), Ботуобинская (20%), Радиоволновая (14%) (см. рис. 7), что, вероятно, свидетельствует о различии среды алмазообразования, термодинамических и геохимических условиях роста алмазов в литосфере под этими трубками.

Проведённые инструментальные исследования по диагностике минеральных включений в алмазах для кимберлитовых трубок в большинстве случаев подтвердили соотношение эклогитовой и перидотитовой ассоциаций. Также подтвердилось заметное отличие алмазов Накынского кимберлитового поля, где на порядок выше содержание кристаллов с включениями основного состава (эклогитовый парагенезис) в сравнении с

такowymi из Алакит-Мархинского поля, за исключением трубок Озёрная, Радиоволновая и Чукукская, где эклогитовых ~41, 14 и 25% соответственно (Зинчук и др., 2003). По данным (Ефимова и др., 1977) и (Зинчук и др., 2003), доля сингенетических включений эклогитовой ассоциации составляет для алмазов из трубок Ботуобинская 20–30%, Нюрбинская до 20%, Айхал – не встречены, Сытыканская не более 0,3%, Юбилейная ~0,6%, Комсомольская 5%, что в целом указывает на сопоставимость этих данных с результатами нашей работы с применением метода КР-спектроскопии. Включения в алмазах трубки Ботуобинская детально изучены авторами работы (Митюхин и др., 2005). Ими установлено, что соотношение алмазов с включениями ультраосновного и основного парагенезисов составляет ~3:1, если судить по данным присутствия только силикатных включений. Эти данные не противоречат полученным нами результатам для трубки Ботуобинская, где доля алмазов эклогитовой ассоциации ~20%, соответственно, без учета распространенности сульфидных включений.

Третье защищаемое положение: В большинстве низкопродуктивных кимберлитов Алакит-Мархинского поля установлена повышенная доля алмазов эклогитового парагенезиса, (без учета содержания сульфидных включений) «безазотных» кристаллов и понижено содержание алмазов со степенью агрегации азота ~25 и 45%.

Для кимберлитовых тел Алакит-Мархинского поля характерны алмазы с пониженным (~100 at. ppm) содержанием структурной примеси азота $N_{tot}=NA+NB$, высока доля «безазотных» кристаллов (<25 at. ppm) (рис. 8 а, б). Алмазы каждой из трубок имеют достаточно близкие содержания азота, при этом следует отметить небольшую долю алмазов с повышенным содержанием (>800 at. ppm) из трубок Чукукская, Озёрная, что хорошо согласуется с большей долей включений эклогитовой ассоциации, определённой для них.

Алмазы трубок Нюрбинская и Ботуобинская Накынского поля резко отличаются по содержанию и степени агрегации азота от таковых Алакит-Мархинского поля (см. рис. 8). Для них характерны средние содержания примеси азота (400–800 at. ppm) и относительно низкая (20–30%) степень его агрегации $V=NB \cdot 100\% / (NA+NB)$.

На основании полученных статистических распределений алмазов по общему содержанию структурной примеси азота и степени его агрегации (см. рис. 8), доля «безазотных» алмазов в выборке составляет <13%, а для некоторых даже <10%, для убогоалмазоносных (30 лет Айхалу, Восток, Озёрная, Одинцова, Молодость, Радиоволновая, Соболева, Чукукская) – >13% (см. рис. 8). В выборках изученных алмазов в зависимости от степени агрегации азота устанавливаются также три группы алмазов (см. рис. 8 в, г): $V=25-45$, $V=55-75$, $V=85-100\%$. Отчётливо видно, что для трубок со средней и высокой алмазоносностью характерен один широкий максимум в распределении алмазов по степени агрегации азота (20–60%), в то время как для трубок с низкой алмазоносностью в распределении фиксируются три моды, что, может быть, обусловлено множественностью геохимических и РТ-условий образования, а также посткристаллизационным отжигом алмазов.

Отметим также, что суммарная доля алмазов со степенью агрегации азота ~25 и 45% для высоко- и среднеалмазоносных трубок превышает 35% от выборки, для низкоалмазоносных данный показатель <35%. Среди низкоалмазоносных трубок наиболее близкие значения, характерные для высокоалмазоносных трубок, имеют алмазы из следующих кимберлитовых тел: по доле «безазотных» кристаллов – Радиоволновая (13,9%), Молодость (13,7%); по суммарной доле алмазов со степенью агрегации азота 25 и 45% – Одинцова (32,3%), Озёрная (34,4%). «Безазотными» принято считать алмазы с концентрацией

$N < 20$ ppm (Moore, 2009). В наших исследованиях к типу Па по физической классификации алмаза (Орлов, 1984) отнесены кристаллы с концентрацией < 25 ppm. На сегодняшний день не существует корректной гипотезы образования «безазотных» (тип Па) алмазов. Остаются открытыми вопросы о механизме и условиях роста таких уникальных природных кристаллов. В работах по выращиванию искусственных кристаллов типа Па часто используют геттеры азота, например Ti (Strong et al., 1991). Считается, что такие химические элементы, как Ti, связывают азот в нитриды. Изучение взаимосвязи алмазности месторождений с количеством в кимберлитах TiO_2 показало, что при увеличении концентрации Ti содержание алмазов в месторождении уменьшается (Василенко и др., 2010).

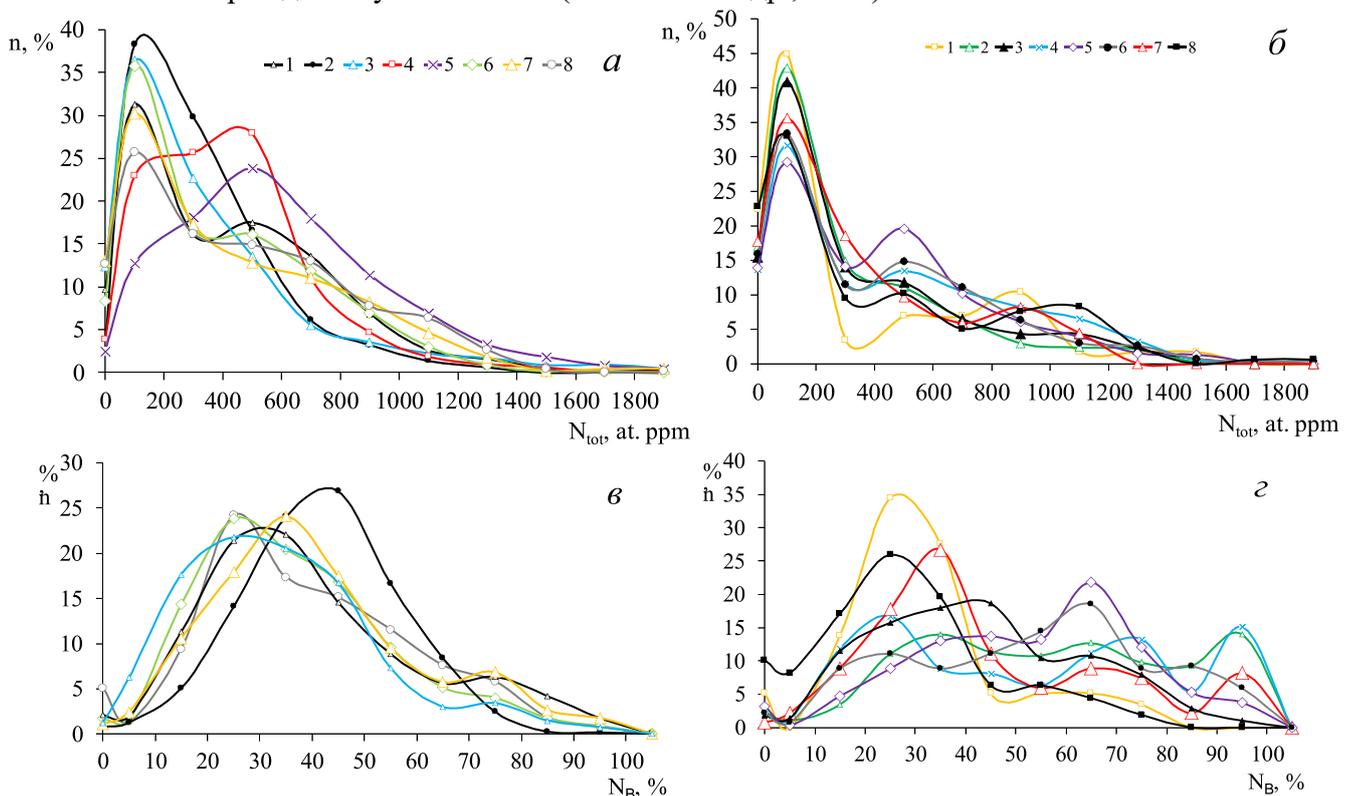


Рис. 8. Распределение алмазов из кимберлитов Накынского и Алаakit-Мархинского полей по содержанию структурной примеси азота (а-б) и степени агрегации азота (в-г) (в скобках – число изученных алмазов): 1- тр. Заря (n=1786), 2- тр. Краснопресненская (n=1269), 3- тр. Сытыканская (n=964), 4- тр. Ботуобинская (n=1436), 5- тр. Нюрбинская (n=2301), 6- тр. Айхал (n=802), 7- тр. Комсомольская (n=453), 8- тр. Юбилейная (n=1724), 9- тр. 30 лет Айхалу (n=58), 10- тр. Восток (n=378), 11- тр. Озерная (n=279), 12- тр. Молодость (n=430), 13- тр. Радиоволновая (n=531), 14- тр. Соболева (n=270), 15- тр. Чукукская (n=135), 16- тр. Одинцова (n=158).

Таким образом, в результате выполненных оптико-спектроскопических исследований алмазов из трубок Алаakit-Мархинского и Накынского полей выявлена корреляция между содержанием в выборках «безазотных» алмазов, при увеличении доли которых содержание алмазов в трубке снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного изучения алмазов из кимберлитовых тел Накынского и Алаakit-Мархинского кимберлитовых полей установлено, что набор структурных дефектов и включений в алмазах специфичны для каждого поля:

– Алмазы трубок Нюрбинская и Ботуобинская (Накынское поле) резко отличаются по содержанию азота и его агрегации от таковых из трубок Алакит-Мархинского поля. Для них характерны средние содержания примеси азота от 400 до 800 at.ppm и относительно низкая агрегация азота (20-30%).

– Алмазы из трубок Алакит-Мархинского поля по характеру распределения LgKt подразделяются на одномодальные (Краснопресненская), бимодальные (Заря, Сытыканская) и имеющие три моды в распределении (Восток).

– Низкая частота встречаемости твердых включений установлена для алмазов из кимберлитов Накынского поля (менее 0,5%).

– В алмазах из кимберлитов Алакит-Мархинского поля относительно чаще встречаются включения оливина.

– Высокая доля алмазов с включениями ультраосновной ассоциации характерна для трубок Алакит-Мархинского поля.

Впервые проведенное детальное изучение дефектно-примесного состава алмазов и включений в них с использованием современной аппаратуры (ИК и КР спектрометры) позволило получить следующие результаты:

– Установлена положительная корреляция между химическим составом включений гранатов в алмазах и положением основных комбинационных мод в КР спектре, что позволяет достаточно надежно идентифицировать их парагенетическую принадлежность.

– Установлено, что алмазы с включениями гранатов эклогитового парагенезиса характеризуются высокими концентрациями общего азота и средней его агрегацией, тогда как алмазы с включениями гранатов верлитового, дунит-гарцбургитового и лерцолитового парагенезисов отличаются низкой концентрацией азота и широкой вариацией степени его агрегированности, что свойственно алмазам перидотитового генезиса.

– Впервые исследованы представительные коллекции алмазов из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского полей, в которых методом КР-спектроскопии идентифицированы включения оливина, граната, энстатита, рутила, графита и коэсита, что позволило обобщить и получить новую достоверную информацию о распространенности минеральных фаз в алмазах из конкретных коренных тел этих полей.

– На основании сравнительного анализа результатов исследования остаточного давления в алмазах с включениями коэсита установлена взаимосвязь кристалломорфологии алмазов и остаточного давления в них. Установлена широкая распространённость включений коэсита в алмазах из россыпей, в первую очередь северных полей ЯАП, что позволяет утверждать о возрастании роли эклогитового субстрата как алмазообразующей среды в северных полях провинции. Отмечено также, что октаэдрические кристаллы формировались в мантии при более высоком давлении, чем ромбододекаэдрические.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В журналах по списку ВАК Минобрнауки России:

1. **Бардухинов Л.Д.,** Специус З.В., Монхоров Р.В. Включения коэсита в алмазах Якутии // Доклады академии наук, 2016, том 470, №5, с. 558-561. / Bardukhinov L.D., Spetsius Z.V., Monkhorov R.V. Coesite inclusions in diamonds of Yakutia // Doklady Earth Sciences, 2016, Vol. 470, No2, pp. 1059-1062.

2. **Бардухинов Л.Д.,** Специус З.В., Кислов Е.В., Иванов А.С., Монхоров Р.В. Парагенезисы включений граната в алмазах из кимберлитов Якутии по данным Рамановской

и ИК-спектроскопии // Записки РМО, 2018, том 147, №2, с. 25-35. / Bardukhinov L.D., Spetsius Z.V., Kislov E.V., Ivanov A.S., Monkhorov R.V. Parageneses of Garnet Inclusions in Diamonds From Yakutia Kimberlites Based on Raman and Ir Spectroscopy Data // Geology of Ore Deposits. 2019. № 7. P. 606-612.

3. **Бардухинов Л.Д.**, Специус З.В., Монхоров Р.В. Сингенетические и протогенетические включения оливина в алмазах из кимберлитов Якутии по данным КР- и ИК-спектроскопии // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН, 2018, № 8 (284), с. 13-19.

4. **Бардухинов Л.Д.**, Специус З.В., Липашова А.Н. Структурные дефекты и минеральные включения в алмазах из кимберлитовых трубок Накынского и Алачит-мархинского полей по данным КР- и ИК-спектроскопии // Руды и Металлы, 2018, № 4, с. 76-86.

5. Коногорова Д.В., Ковальчук О.Е., **Бардухинов Л.Д.** Уникальный алмаз из трубки Нюрбинская (Накынное кимберлитовое поле, Западная Якутия, Россия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2020, Т. 25, № 2, с.45-55.

6. Кедрова Т.В., Богуш И.Н., Зинчук Н.Н., **Бардухинов Л.Д.**, Липашова А.Н. Алмазы Укугутской свиты россыпи Нюрбинская, Накынное кимберлитовое поле Сибирской платформы // Руды и металлы, 2020, № 2, с. 69-77.

7. Кедрова Т.В., Богуш И.Н., Зинчук Н.Н., **Бардухинов Л.Д.**, Липашова А.Н. Типоморфные свойства алмазов из дяхтарской толщи россыпи Нюрбинская (Сибирская платформа) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 2020, № 3. с. 45-54.

Публикации в других научных изданиях:

8. Л. Д. Бардухинов, Т. А. Антонова. Оптико-спектроскопические характеристики алмазов II и IV разновидности. / Вестник института геологии Коми НЦ УРО РАН»/ Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества: проблемы структурирования, упорядочения и эволюции структуры. - Сыктывкар, 2012. - с. 84-86.

9. Л. Д. Бардухинов, Т. А. Антонова. Характеристики алмазов из глубинных ксенолитов трубки Удачная / Строение литосферы и геодинамика: материалы XXIV Всерос. молодеж. конф. - Иркутск, 2011. - с. 64-65.

10. Л. Д. Бардухинов, И. Н. Богуш. Цветные алмазы из кимберлитовой трубки Мир / Материалы IX международной конференции «Новые идеи в науках о земле», РГГРУ, Москва, 2009.

11. Л.Д. Бардухинов, Р.В. Монхоров. Включения оливина в алмазах из кимберлитов Якутии / Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии / Издательство БНЦ СО РАН, Улан- Удэ, 2016, с. 24-27.

12. Л.Д. Бардухинов. Рамановская спектроскопия минералов группы граната /Наука и инновационные разработки – Северу, 2014. с. 118

13. Л.Д. Бардухинов, З.В. Специус, Р.В. Монхоров. Геобарометр по данным Рамановской спектроскопии включений в алмазах / Юбилейный съезд Российского минералогического общества «200 лет РМО», Санкт-Петербург, 2017, с. 370-372.

14. Л.Д. Бардухинов, З.В. Специус. Парагенезисы включений граната в алмазах из кимберлитов Якутии по данным Рамановской и ИК-спектроскопии / Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной

50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ- НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, 2018, с. 39-44.

15. Л.Д. Бардухинов, З.В. Специус. Анализ оптико-спектроскопических свойств алмазов из россыпных и коренных источников Средне-Мархинского района / Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии», Улан-Удэ, 2018, с. 48-50.

16. Л.Д. Бардухинов, З.В. Специус. Оптико-спектроскопические характеристики алмазов и включений в них из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-мархинского полей Якутской алмазоносной провинции / Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России», Якутск, 2019, с. 120-124.

17. Л.Д. Бардухинов, З.В. Специус. Перспективы наличия (обнаружения) крупных алмазов в кимберлитовых трубках Якутии // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России», Якутск, 2020, с. 323-327.

18. Ugar'eva S., Kedrova T., Bardukhinov L. Diamonds with mineral inclusions: X-ray tomography and Raman spectroscopy// The 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference (13-24 June 2016, Novosibirsk, Russia). IGM SB RAS, IPPG SB RAS, NSU: Novosibirsk. 2016. - P. 194-196.

19. Bardukhinov L., Spetsius Z. Raman spectroscopy of olivine inclusions in diamonds of Yakutia /Abstract volume XII international conference “GEORAMAN–2016” / 2016, с. 74.