На правах рукописи

СЕРЕБРЯННИКОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ

ХРОМШПИНЕЛИДЫ В АЛМАЗАХ И КИМБЕРЛИТАХ КАК ИНДИКАТОРЫ АЛМАЗОНОСНЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 1.6.4. - «МИНЕРАЛОГИЯ, КРИСТАЛЛОГРАФИЯ. ГЕОХИМИЯ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ»

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

КАНДИДАТА ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСИБИРСК – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Научный руководитель:

Логвинова Алла Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, лаборатория Литосферной мантии и алмазных месторождений ИГМ СО РАН

Официальные оппоненты:

Гаранин Виктор Константинович, доктор геолого-минералогических наук, академик РАЕН, Минералогический музей имени А. Е. Ферсмана РАН

Васильев Евгений Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

Защита состоится «16» декабря 2025 года в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.02, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3).

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Гаськовой О.Л. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; +7 (383) 373-05-61; e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН: https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/serebryannikov/dis-Serebryannikov.pdf

Автореферат разослан «14» ноября 2025 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета

доктор геолого-минералогических наук О.Л. Гаськова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований

Хромшпинелиды являются важными индикаторными минералами на обнаружение алмаза в аллювиальных отложениях. Однако одновременно с ними, как правило, присутствуют аналогичные минералы из магматических пород другого генезиса. В этом случае необходимо четко определить типоморфные особенности хромшпинелидов, генетически связанных именно с алмазом. Для решения этой задачи первостепенная роль принадлежит исследованию хромшпинелидов в алмазах, а также минеральных включений в самих хромшпинелидах. Исходя из факта, что хромшпинелиды встречаются в виде множественных включений в одном алмазе-матрице (Bulanova, 1995; Соболев и др., 1998) необходимо также выяснение однородности состава включений хромшпинелидов, зафиксированных по ростовым зонам алмаза. Ранее было опубликовано много работ (Мацюк и др., 1989), касающихся состава главных элементов в хромшпинелидах, включенных в алмазе. В хромшпинелидах это, в первую очередь, высокая хромистость (Cr/Cr+Al> 80%), пониженное содержание титана ($TiO_2 \leq 0,7$ мас. %), сравнительно узкий интервал железистости и незначительная роль окисного железа Fe^{3+}. (Соболев и др., 1975; Meyer, 1987). В работе Н.В. Соболева (1974) определена четкая корреляция между содержащимися в кимберлитовых телах хромшпинелидами указанного состава с их алмазоносностью. Однако систематических исследований по изучению состава элементов-примесей в хромшпинелидах, захваченных алмазом в процессе роста, до сих пор не проводилось. В данной работе проведены исследования содержания микроэлементов (редких и редкоземельных элементов) в хромшпинелидах из алмазов разных кимберлитовых трубок Якутской (в дальнейшем ЯАП) и Архангельской (в дальнейшем ААП) алмазоносных провинций, россыпей северо-востока Сибирской платформы, а также алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях (курунгский тип). Хромшпинелиды являются распространенными минералами-спутниками алмаза. Однако в аллювиальных отложениях с ними находятся хромшпинелиды, не имеющие генетической связи с алмазом и это составляет проблему при поисках алмазных месторождений. В данной работе доказано, что по содержанию микропримесных элементов в хромшпинелидах можно четко выявить различия хромитов, находящихся в одной алмазоносной россыпи и имеющих типичные для алмазного парагенезиса составы, но генетически относящихся к разным типам пород. Это позволит внести уточнения в уже известные минералогические критерии поисков алмазов.

Цель исследования

Выявление закономерностей распределения и содержания химических элементов в составе хромшпинелидов из алмазов кимберлитовых трубок из различных алмазоносных районов Сибирского и Восточно-Европейского кратонов, а также хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

1) Выполнение особого типа пробоподготовки кристаллов хромшпинелидов и алмазов с включениями хромшпинелидов для дальнейшего изучения химического состава хромшпинелидов и физических свойств алмазов;

2) Изучение химического состава хромшпинелидов из алмазов кимберлитов, хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях и хромшпинелидов из ксенолитов кимберлитов методами сканирующей микроскопии, микрозондового анализа и лазерной абляции;

3) Изучение дефектно-примесного состава алмазов с множественными включениями хромшпинелидов методом инфракрасной спектроскопии;

4) Выявление ростовых зон алмаза-матрицы с множественными включениями хромшпинелидов и закономерностей распределения химических элементов по ростовым зонам в последних;

5) Анализ полученных данных химического состава хромшпинелидов из алмазов; выявление закономерностей в распределении химических элементов на уровне отдельных кимберлитовых трубок, алмазоносных районов, провинций, кратонов;

6) Формулировка новых геохимических критериев идентификации хромшпинелидов-включений в алмазах и хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях.

Объекты исследования:

1) Кристаллы алмаза, содержащие минеральные включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок ЯАП (Мало-Ботуобинский алмазоносный район: тр. Мир, Интернациональная, 23 партсъезда КПСС; Далдыно-Алакитский алмазоносный район: тр. Удачная, Комсомольская, Айхал, Сытыканская, Юбилейная) и ААП (Золотицкое поле Ломоносовское месторождение: тр. Ломоносовская, Карпинского-1, Пионерская), а также из аллювиальных отложений северо-востока Сибирского кратона.

2) Кристаллы хромшпинелидов из мантийных ксенолитов Якутской алмазоносной провинции.

3) Кристаллы хромшпинелидов из алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции.

Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора

Работа базируется на результатах исследований, проведенных лично автором в период с 2020 по 2024 гг., включая отбор и обработку образцов, подготовку их для исследований, проведение аналитических работ, систематизацию полученных результатов и их интерпретацию. Образцы с включениями хромшпинелидов были отобраны из представительных коллекций алмазов технического качества из 8 трубок

ЯАП, 3 трубок ААП. Так же для сравнения с включениями хромшпинелидов алмазного парагенезиса были отобраны хромшпинелиды с включениями оливин, пироп, Cr-диопсид из концентрата кимберлитов 4 кимберлитовых трубок ЯАП, хромшпинелиды из ксенолитов трубки Удачная (ЯАП) и хромшпинелиды алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях.

Всего изучено: 569 хромшпинелидов по главным элементам и 276 – по примесным (из них включений в алмазе 425 и 226 соответственно).

Автором работы был осуществлен полный цикл пробоподготовки и освоены все методики, применяемые для комплексного исследования алмазов, содержащих включения. Были использованы следующие аналитические методы исследования – сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), катодолюминесцентный анализ (КЛ), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), спектроскопия комбинационного рассеяния (КР), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS). Все анализы были получены лично автором (за исключением редких элементов) с использованием комплекса аналитических методов и приборной базы Аналитического Центра ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Научная новизна

Впервые проведены систематические исследования содержания примесных элементов в хромшпинелидах, захваченных алмазом в процессе роста, из разных кимберлитовых трубок Якутской, Архангельской алмазоносных провинций, россыпей северо-востока Сибирской платформы, а также хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях.

На основе сопоставления полученных данных содержания микропримесных элементов в хромшпинелидах, включенных в алмазе, впервые выявлены значимые отличия высокохромистых хромшпинелидов, по химическому составу аналогичных кимберлитовым, но генетически не связанны с этим типом пород (курунгский тип).

Практическая значимость работы

Хромшпинелиды и пиропы определённого состава, являются важными индикаторными минералами на обнаружение алмаза в аллювиальных отложениях. Однако при проведении поисково-разведочных работ в шлиховой пробе может находиться несколько популяций хромшпинелидов различного состава и поэтому, важно выделить химические характеристики минералов, типоморфных для алмаз-содержащих пород или пород, соответствующих P-T полю стабильности алмаза. Наряду с морфологией кристаллов и количественными характеристиками, важным поисковым критерием является химический состав (по главным элементам) хромшпинелидов алмазного парагенезиса. Но в аллювиальных отложениях одновременно с ними встречаются хромшпинелиды, аналогичные по составу кимберлитовым, но генетически не связанные с этим типом пород, как например, «курунгский» тип (Афанасьев и др., 2000). Это может приводить к ошибочному

направлению поисковых работ. В данной работе рассматривается новый подход к решению этой проблемы. Изучение вариаций состава примесных элементов в таких хромшпинелидах позволяет уточнить и дополнить уже известный минералогический поисковый критерий на алмаз.

Основные защищаемые положения

1) Хромшпинелиды из алмазов кимберлитов имеют идентичные содержания примесных элементов в пределах одной алмазоносной провинции, за исключением тр. Комсомольская (Mn, V, Ga) и Сытыканская (Sc) Якутской алмазоносной провинции. На уровне различных алмазоносных районов одной алмазоносной провинции значимые различия состава отсутствуют. Хромшпинелиды из алмазов Якутской и Архангельской алмазоносных провинций различаются по содержанию Ca, V, Zn, Mn, Co и Ta.

2) Хромшпинелиды-включения в алмазах Якутской алмазоносной провинции, в основном приурочены к одной ростовой зоне алмаза-матрицы и имеют схожий химический состав. В случае расположения хромшпинелидов в разных зонах роста алмаза-матрицы их состав значимо различается по содержанию Cr и Al.

3) Хромшпинелиды-включения в алмазах кимберлитов Якутской и Архангельской алмазоносных провинций (мантийные) и хромшпинелиды алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях (коровые) значимо различаются по содержанию микропримесных элементов (V, Zn, Ni, Co, Nb, Ta), которые могут использоваться в качестве петрогенетического индикатора, в частности, для кимберлитовых пород.

Апробация работы.

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 4 статьи в российских журналах, рекомендованных ВАК. Основные положения работы прошли апробацию в ходе очного участия в 12 российских и международных конференциях: IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле (г. Новосибирск, 2018); МНСК -2019 и 2020 (НГУ, г. Новосибирск); Ежегодная Международная научная конференция Американского Геологического союза (GSA-2019; г. Феникс, США); XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2021); XXVII Всероссийская научная конференция “Уральская минералогическая школа - 2021” (г. Екатеринбург); III Молодежная научно-образовательная конференция «РУДНАЯ ШКОЛА ЦНИГРИ» (г. Москва, 2022); X Международная Сибирская конференция молодых учёных по наукам о Земле (г. Новосибирск, 2022); XXIX ежегодная Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов, научных сотрудников и преподавателей ВУЗов геологического профиля «Уральская минералогическая школа – 2023» (г. Екатеринбург, 2023); XX Всероссийская Ферсмановская научная сессия ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты, 2023); XXX Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа – 2024» (г. Екатеринбург, 2024); Международная научная конференция посвящённая 90-летию

академика Н.В. Соболева «Процессы минералообразования при высоких давлениях, происхождение алмаза и мантийных магм» (г. Новосибирск, 2025).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения общим объемом 115 страниц. В ней приводится 30 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 126 наименований.

Благодарности

Благодарности. Работа выполнена в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева в лаборатории «Литосферной мантии и алмазных месторождений» (№ 451) под руководством к.г.- м.н. А.М. Логвиновой, которой автор выражает глубокую признательность. За плодотворное сотрудничество и содействие в проведении аналитических работ диссертант благодарен А.А. Каримову (ИГХ СО РАН), Ле Чжану и профессору Юганг Шу (Институт геохимии КАН, Гуанчжоу, Китай).

Неоценимый вклад в работу внёс к.г.-м.н. Д.С. Михайленко, которому автор выражает искреннюю благодарность. За плодотворные дискуссии и ценные замечания автор признателен д.г.-м.н. В.П. Афанасьеву, д.г.-м.н. В.М. Сонину, д.г.-м.н. В.Н. Реутскому, д.г.-м.н. А.А. Томиленко, д.г.-м.н. А.В. Корсакову, д.г.-м.н. А.Г. Дорошкевич, к.г.-м.н. А.М. Агашеву, к.г.-м.н. Н.С. Тычкову, к.г.-м.н. Е.В. Агашевой, мнс Н.В. Губанову, вед. инженеру О.А. Козьменко. Автор сердечно благодарит весь коллектив лаборатории за всестороннюю помощь и поддержку.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (20-05-00293), а также базового проекта ИГМ СО РАН.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ.

Хромшпинелиды являются важными минералами-спутниками алмазов (МСА). Они встречаются как в кимберлитовых телах (в виде вкрапленников в основной массе кимберлита, а также в ксеногенном мантийном материале), так и в россыпных месторождениях алмаза. Все эти минералы также встречаются в виде включений в алмазе, при этом хромшпинелиды определенного состава установлены в качестве наиболее распространенных включений. Изучению типоморфизма хромшпинелидов, ассоциирующих с алмазом, посвящено большое количество публикаций, относящихся в основном к концу прошлого века (Meyer, Boyd, 1972; Соболев и др., 1975; Haggerty et al., 1979; Meyer et al., 1987 и др.). В результате тщательных исследований с применением микрозондового анализа были выявлены главные типоморфные особенности химизма хромшпинелидов так называемой «алмазной» ассоциации. Это в первую очередь, высокая хромистость (Cr/Cr+Al более 80 %) наряду с пониженным содержанием титана (TiO_2 менее 0,7 мас. %), сравнительно узкий интервал колебаний железистости, а также незначительная роль окисного железа. Такие типоморфные особенности хромшпинелидов стали широко использовать в качестве одного из

минералогических критериев при поисках алмазных месторождений. Однако одно наличие подобных хромшпинелидов еще не позволяет однозначно решить вопрос об алмазоносности кимберлитового тела или россыпи. Несмотря на то, что на сегодняшний день накоплен большой объем как экспериментальных (Klemme, 2004; Brey et al., 1999 и др.), так и природных данных по хромшпинелидам из кимберлитов отсутствует их систематизация и обобщение в виде удобного инструмента для использования при оценке возможной ассоциации шпинели с алмазом.

Типоморфизм состава хромшпинелидов алмазной ассоциации по элементам-примесям изучался весьма ограниченно. В конце прошлого века были установлены корреляционные взаимоотношения содержания NiO и ZnO в хромшпинелидах из алмазов различных месторождений Африки: хромшпинелиды склонны иметь положительную корреляцию между FeO и ZnO и отрицательную корреляцию FeO-NiO. Так же отмечалось пониженное содержание FeO, ZnO, Ga в хромшпинелидах из алмазов по сравнению с хромшпинелидами из концентрата тех же трубок (Griffin et al., 1989) Стоит отметить, что в работах где изучался состав хромшпинелидов из алмазов помимо содержаний Cr_2O_3, Al_2O_3, FeO, Fe_2O_3, MgO были также исследованы ZnO, NiO, MnO, TiO_2, SiO_2 и в некоторых случаях V_2O_3, P_2O_5, Na_2O, CaO, K_2O, но при этом авторами обсуждаются лишь содержания ZnO, NiO и TiO_2.

Данные по содержанию редких элементов в хромшпинелидах из алмазов до настоящего времени практически полностью отсутствовали. В работе (Taylor et al.,2003) приводятся в качестве фактуры содержания Sc, Co, Cu, Rb, Sr, Y, Zr и Nb по нескольким включениям хромшпинелидов в алмазах трубок Мир и Удачная ЯАП, но без их обсуждения. В работе (Griffin et al.,1993) измерялись концентрации Ga, Sr, Y и Zr, но, как и в предыдущем случае, без анализа полученных данных.

Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Подготовка материалов

Включения извлекались из алмаза двумя способами: 1) дроблением алмаза-матрицы в твердосплавной ступке; 2) шлифованием алмаза-матрицы на специальном оборудовании с использованием шлифовального круга, покрытого порошковым алмаз-железным напылением, до выведения включений, имеющих размеры от 10 до 200 мкм в единую полировку с алмазом-матрицей.

2.2. Методы исследования

2.2.1. Оптические методы

Фотографии кристаллов алмаза и хромшпинелидов в высоком разрешении были получены на оптическом микроскопе Zeiss Stemi 508 совмещённом с фотовидеокамерой Zeiss axiocam 105 color и объективом 60N-C213 0,5X в Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева (ИГМ СО РАН). Снимки пришлифованных кристаллов алмаза и хромшпинелидов, вмонтированных в шашки, в отражённом и

проходящем свете были сделаны на микроскопе Olympus BX51, совмещенном с фотовидеокамерой Olympus COLOR VIEW III в ИГМ СО РАН.

2.2.2. ИК-спектроскопия

Дефектно-примесный состав кристаллов алмаза с множественными включениями хромшпинелидов был исследован с помощью ИК-спектроскопии. Съёмка проводилась на ИК-Фурье спектрометре (FTIR) VERTEX 70 фирмы Bruker, оснащенным микроскопом HYPERION 2000. Параметры съёмки – апертура 50 мкм в диапазоне от 7500 до 750 $см^{-1}$ при разрешении 2 $см^{-1}$. Спектры для получения количественных результатов были обработаны в программе OPUS 8. Всего было получено 263 спектра и снято 50 кристаллов алмаза.

2.2.3. Сканирующая микроскопия

Для качественного определения всех возможных примесных элементов, входящих в состав хромшпинелидов-включений в алмазе была использована сканирующая микроскопия. Энерго-дисперсионные спектры получены с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU (Tescan Ltd), оснащенного системой микроанализа INCA Energy 450 XMax-80 (Oxford Instruments Ltd). Условия анализа с применением энерго-дисперсионного спектрометра (EDS-метод): ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток электронного пучка – 1.5 нА, время набора спектров – 20 с.

2.2.4. Рентгеноспектральный микроанализ

Съёмка проводилась с помощью микроанализаторов с электронным зондом Camebax-micro фирмы Cameca и JXA-8100 фирмы JEOL (Япония) с применением стандартной методики, при параметрах: сила тока равная 100 нА, ускоряющем напряжении 20 кВ и времени съёмки в точке равным 10 сек. Были изучены элементы микропримеси V, Ni, Zn, Mn, Si, Ti.

2.2.5. Катодолюминесценция

Для выявления различных ростовых зон в образцах алмаза с множественными включениями хромшпинелидов на специальном алмазном диске был пришлифован 41 кристалл алмаза с выведенными в единую полировку с алмазом-матрицей включениями хромшпинелидов. Съёмка проводилась в лаборатории эволюции палеоокеанов и мантийного магматизма Новосибирского государственного университета с помощью холодного катода CITL Mk5, установленного на поляризационном микроскопе Carl Zeiss Axio Scope.A1, при напряжении 15 кВ и силе тока 260 мА и в ИГМ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430 VP с энерго-дисперсионным рентгеновским спектрометром, EDS INCA Energy 350 (Oxford Instruments) при напряжении 20 кВ и силе тока 250 мА.

2.2.6. Рамановская спектроскопия

Предварительная диагностика включений внутри алмаза проводилась методом рамановской спектроскопии на спектрометре комбинационного рассеяния Horiba LabRam HR800 с полупроводниковым твердотельным лазером с длиной волны 514 нм, мощностью 50 мВт. Хромшпинелиды идентифицировались по двум характеристическим модам спектра комбинационного рассеяния: 690 $см^{-1}$ и 730 $см^{-1}$.

2.2.7. Лазерная абляция с индуктивно связанной плазмой

Содержание редких элементов в составе хромшпинелидов было определено методом лазерной абляции (LA ICP MS) с помощью прибора ELEMENT XR (Thermo Fisher Scientific) ICP-SF-MS в сочетании с системой лазерной абляции RESOlution M-50 с длиной волны 193 нм (ArF) в Лаборатории изотопной геохимии Гуанчжоуского Института Геохимии Китайской Академии наук. В качестве газа-носителя использовался гелий. Аргон использовался в качестве добавочного газа и смешивался с газом-носителем через Т-образный соединитель перед входом в ICP. Каждый анализ состоял из замера фона (~20-30 секунд) и анализа собственно образца (50 секунд). Содержимое элементов было откалибровано по широко распространенным стандартам NIST 610 и NIST 612. Размер пятна анализа составлял 25-45 мкм. Обработка фоновых и аналитических сигналов, коррекция временного смещения и количественная калибровка выполнена с помощью программы Glitter-Gemoc.

Содержание элементов-примесей в 50 включениях хромшпинелидов также определялось на установке лазерной абляции Analyte Excite с ячейкой HelEx II, длина волны эксимерного ArF лазера составляет 193 нм, и квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7900 в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Для первичной калибровки использовалось стандартное силикатное стекло NIST-612, для контроля качества проведения анализа использовали стандарт базальтового стекла BIR-1G. Все образцы и стандарты анализировались при одинаковых условиях проведения измерений: измерение фона 30 с, анализ образца 60 с, диаметр лазерного пучка составлял 50-35 мкм (диаметр был обусловлен размером анализируемого зерна минерала), энергия 3.5 $Дж/см^2$, частота импульсов 10 Гц. Значения потока охлаждающего, плазмообразующего и добавочного газа аргона составлял 16.0, 1.0 и 1.0 л/мин, соответственно. В качестве несущего газа использовался гелий с чистотой 6.0 и скоростью потока 1.0 л/мин. Энергия плазмы составляла 1550 Вт.

Глава 3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ

Якутская алмазоносная провинция располагается на северо-востоке Сибирского кратона, (рисунок 1) на территории Анабарской и Непско-Ботуобинской антеклизы и Тунгусской и Вилюйской синеклизы и Сюгджерской седловины (Колганов и др., 2008). В ее пределах на кристаллическом докембрийском фундаменте лежат карбонатные породы кембрия и ордовика с подчиненным развитием отложений силура, девона, карбона и перми. Осадочные отложения триаса, юры и мела

распространены достаточно широко и представлены континентальными, морскими и вулканогенно-осадочными образованиями.

Рисунок 1. Схематическая карта Российской Федерации с обозначением районов расположения кимберлитовых трубок. I – Сибирский кратон: А-Далдыно-Алакитский алмазоносный район (тр. Удачная, Айхал, Сытыканская, Юбилейная, Комсомольская); В – Мало-Ботуобинский район (тр. Мир, Интернациональная). II – Восточно-Европейский кратон: тр. Ломоносовская, Карпинского-1, Пионерская. https://stav-geo.ru/_ld/122/36368196.jpg

Архангельская алмазоносная провинция располагается на севере Восточно-Европейского кратона. Структурно ААП состоит из двух этажей: архей-нижнепротерозойского кристаллического фундамента и рифей-палеозойского осадочного чехла. Возраст кимберлит-мелилитит-базальтового магматизма ААП определяют, как нижнедевонский-нижнекарбоновый (410-340 млн. лет). Золотицкое поле, включающее в себя 10 кимберлитовых трубок, в структурном плане располагается в пределах Товского выступа кристаллического фундамента. Трубки характеризуются линейно-цепочечным расположением, что обуславливается их приуроченностью к глубинному разлому субмеридианального направления. (Agasheva, 2021).

Глава 4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХРОМШПИНЕЛИДОВ ИЗ АЛМАЗОВ, КСЕНОЛИТОВ И АЛМАЗОНОСНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ

4.1. Морфологическая характеристика алмазов и хромшпинелидов

4.1.1. Алмазы с включениями хромшпинелидов из кимберлитовых тел и ореолов рассеяния

Изученные кристаллы алмаза с включениями хромшпинелидов относятся к I разновидности по Орлову (Орлов, 1974), основная масса которых представлена монокристаллами. Всего из коллекции алмазов отобрано 236 кристаллов с множественными или единичными включениями хромшпинелидов из Якутской алмазоносной провинции, 18 из россыпей северо-востока Сибирской платформы и 32 из Архангельской алмазоносной провинции. Алмазы из изученных кимберлитовых трубок ЯАП преимущественно представлены кристаллами октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов, в редких случаях форма меняется до псевдоромбододэкаэдрических, когда образуются кривогранные поверхности. В большинстве случаев это хорошо ограненные плоскогранные, острорёберные октаэдры (рисунок 2 а, в, е, ж). На гранях октаэдра встречаются ямки травления треугольной формы. В ряде случаев ребра притупляются развитием сноповидной, занозистой или параллельной штриховками (рисунок 2 б, д, з, и, к, м).

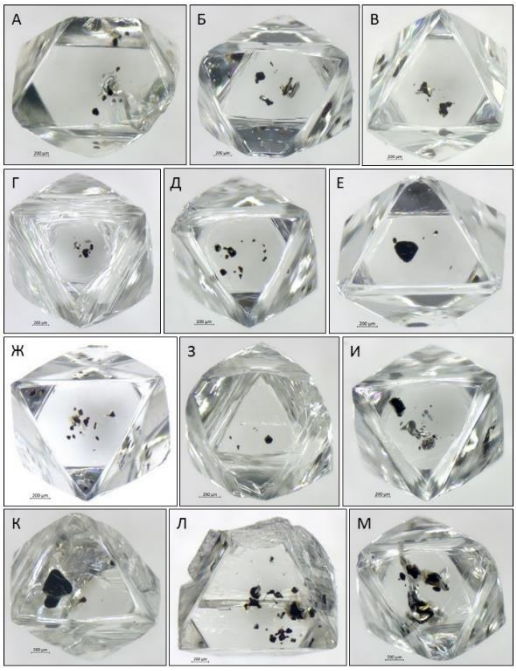

Рисунок 2. Кристаллы алмазов с множественными включениями хромшпинелидов: а, б, г, д, и, л, м – тр. Интернациональная, в, ж, з – тр. Мир, е – тр. Удачная.

По морфологии, изученные в данной работе алмазы из ААП полностью отражают морфологическую характеристику алмазов из Архангельского региона и их схожесть с аллювиальными алмазами северо-востока Сибирской платформы (Зинчук и др., 2001). Большинство из них представлены округлыми кристаллами I разновидности по классификации Ю.Л. Орлова (приложение 1, рисунок I в, г). Причем все они искажены – заметны уплощения и удлинения по тройным, четверным и двойным осям симметрии

индивидов. На поверхности кристаллов отмечены сноповидная и занозистая штриховки, блочность, каплевидные холмики, шагрень. Алмазы из аллювиальных россыпей в изученной коллекции имеют округлую форму и представлены бесцветными кривогранными додекаэдроидами с резорбированной поверхностью (приложение 1, рисунок I а, б).

4.1.2. Хромшпинелиды из кимберлитов

Понятие «кимберлитовые» хромшпинелиды подразумевает все зерна хромшпинелидов из разных типов мантийных ксенолитов. В данной работе проведены морфологические исследования хромшпинелидов из кимберлитовых трубок Мир и Интернациональная в связи с их поисковым значением на территории распространения разновозрастных осадочных коллекторов в пределах Мало-Ботуобинского алмазоносного района (участок Улахан-Курунг-Юрях). Для них характерны вициальные участки, притупляющие ребра и вершины октаэдров. Этот признак является типичным для мантийных хромшпинелидов. Кристаллы с гладкими блестящими гранями встречаются редко. Большинство из них в той или иной степени корродировано магматическим расплавом (рисунок 3 г-з).

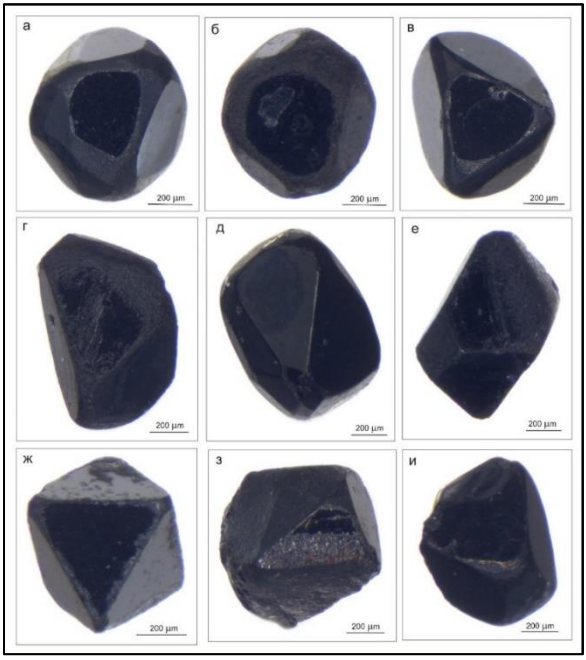

Рисунок 3. Кристаллы хромшпинелидов из кимберлитовых трубок Мир и Интернациональная:(а, б, з, и) – октаэдры в комбинации с {110} и мелкими гранями других простых форм; (в – е) – октаэдры с мелкими гранями разных простых форм на ребрах и вершинах кристалла; (ж) – остроребердный октаэдр с развитием коррозии на ребрах.

Для хромшпинелидов курунгского типа характерен ярко выраженный октаэдрический габитус (приложение 1, рисунок II). Преобладают остроребердные, островершинные формы, реже встречаются различные притупления ребер в виде продольной штриховки, образованной торцами слоев роста по октаэдру. Вициальные участки, притупляющие ребра и вершины октаэдров, на кристаллах курунгского типа совершенно отсутствуют (Афанасьев и др., 2010).

4.2. Расположение включений хромшпинелидов в кристалле алмаза-матрицы

Проведенные в данной работе исследования алмазов, содержащих кристаллы хромшпинелидов, показали в большинстве случаев приуроченность этих включений к одной ростовой зоне кристалла-матрицы (рисунок 4). Включения хромшпинелидов в алмазах имеют различный морфологический облик: от изометричных до продолговатых включений, иногда доходящих до плоскогранных идиоморфных октаэдров. Цвет хромшпинелидов смоляно-чёрный, в тонких сколах просвечивает бордово-красным. Размер включений значительно варьирует от 5 до 230 мкм. В алмазе они локализуются преимущественно в центральной как скоплениями, так и одиночными включениями.

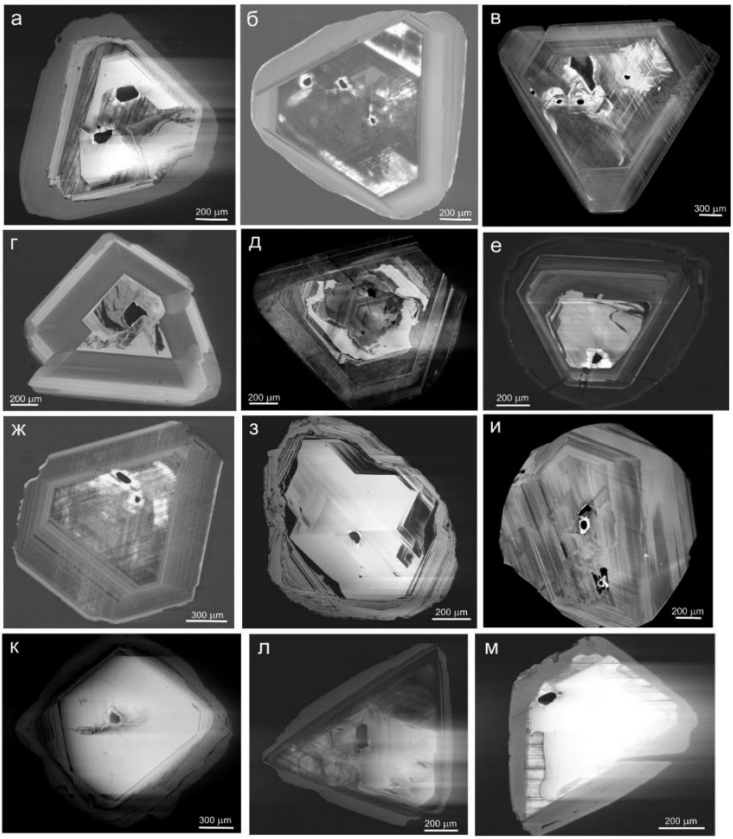

Рисунок 4. КЛ изображения алмазов с включениями хромшпинелидов: (а, м) – тр. Айхал (ЯАП); (б-д, ж, л) – тр. Интернациональная (ЯАП); е – тр. Комсомольская (ЯАП); (з, к) – тр. Снэп Лэйк (Канада); и – тр. Пионерская (ААП).

4.3. Парагенетические ассоциации хромшпинелидов в алмазе

Наряду с включениями хромшпинелидов в кристаллах алмаза также были встречены включения оливина, пиропа, клинопироксена, флогопита и другие. Включения оливина были встречены в 84 кристаллах алмаза с включениями хромшпинелидов. Включения оливина обычно прозрачны, изометричного облика, иногда образуют срастания с хромшпинелидами. Включения пиропа являются более редкими, имеют окраску от слабо- до насыщенного лилово-розового, часто имеют октаэдрическую форму. В двух образцах алмаза с множественными темноцветными включениями (Kms-84 и Mts-31) в срастании с магнезиохромитом зафиксированы включения оливина. В двух образцах алмаза обнаружен редкий парагенезис магнезиохромита: с пиропом лерцолитового парагенезиса (Yubk-235) и с флогопитом (обр. Mts-30).

4.4. Дефектно-примесный состав алмаза

Спектры ИК-поглощения были сняты в 50 кристаллах алмаза, содержащих включения хромшпинелидов, из пяти кимберлитовых трубок Якутии (трубки Мир, Интернациональная, Удачная, Комсомольская и Юбилейная). Получены количественные данные по общему содержанию азота в алмазах, количеству A и B1-дефектов, степени агрегации (процентное содержание B1 дефекта к общему содержанию азота). В изученных алмазах азот в основном находится в A и B1 форме. Соотношение между этими центрами может быть различно, однако резко преобладают кристаллы типа IaA. Полученные данные по содержанию в структуре алмаза примеси азота показывают широкие вариации состава в пределах одной кимберлитовой трубки. Каких-либо значимых закономерностей в распределении азота в изученных кристаллах алмаза выявлено не было.

4.5. Химический состав хромшпинелидов

4.5.1. Микрозондовый анализ

Около ~90% всех изученных в данной работе хромшпинелидов по составу главных элементов полностью соответствуют критериям, выявленным ранее рядом авторов для кимберлитов, включая так называемую «алмазную ассоциацию»: Cr_2O_3 (> 62 мас. %), Al_2O_3 (< 7,5 мас. %) и TiO_2 (< 0,7 мас. %) (рисунок 5) (Соболев, 1971). При этом существенных различий по главным (Cr, Al, Mg, Fe) элементам в составе хромшпинелидов из алмазов, рассматриваемых в работе двух алмазоносных провинций, не выявлено.

Примесь TiO_2, практически во всех изученных нами включениях низка (до 0,95 мас. %). Содержания TiO_2 в хромшпинелидах варьируют: от 0,03 до 0,95 мас. % для ЯАП и от 0,03 до 0,49 мас. % для ААП, но при этом средние содержания для хромшпинелидов из ЯАП и ААП довольно близки и составляют 0,22 и 0,25 мас. % соответственно. В мантийных ксенолитах из кимберлитовых трубок Удачная TiO_2 варьирует от 0,11 до 0,55 мас. %, а среднее составляет 0,34 мас. %. В хромшпинелидах

алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях TiO_2 изменяется в пределах 0,02-0,91 мас. % и в среднем равняется 0,10 мас. %.

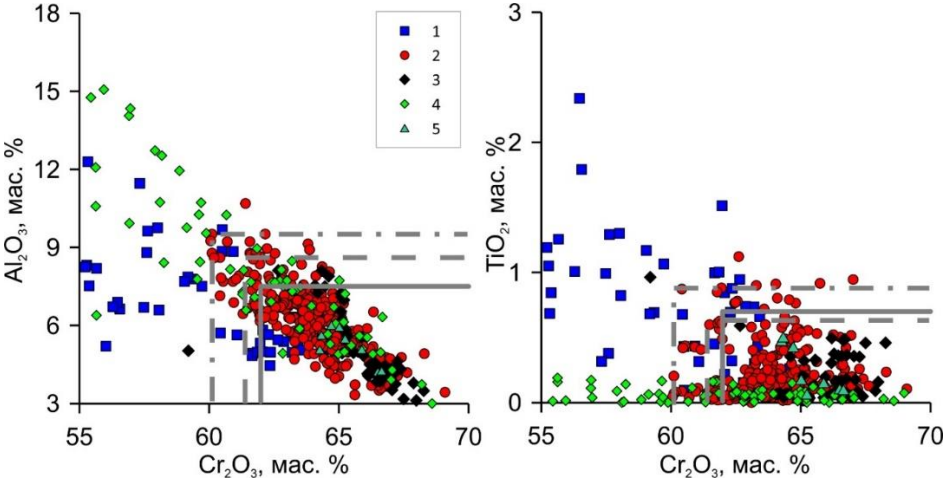

Рисунок 5. Особенности химического состава изученных хромшпинелидов из алмазов и хромшпинелидов из концентрата кимберлитов (ксенолиты): 1 – зерна хромшпинелидов из концентрата с включениями пиропа, хромдиопсида и оливина; 2 – Якутская алмазоносная провинция; 3 – Архангельская алмазоносная провинция; 4 – алмазоносный участок Улахан-Курунг-Юрях. 5 – северо-восток Сибирской платформы; Сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии отделяют, соответственно, 90, 95 и 99 процентили хромшпинелидов алмазной ассоциации.

Значения V_2O_3 варьируют в пределах от 0, 13 до 0, 39 мас. % для хромшпинелидов из алмазов ЯАП и от 0,19 до 0,29 мас. % для ААП (в среднем 0,30 и 0, 22 мас. % соответственно. Существенное отличие по содержанию примеси ванадия показали хромшпинелиды «курунгского» типа, где средние содержания V_2O_3 составляют менее 0,14 мас. %. В ксенолитах Далдыно-Алакитского (тр. Удачная) и Мало-Ботуобинского (тр. Интернациональная и 23 партсъезда) районов V_2O_3 варьирует от 0,14 до 0,32 мас. % и от 0,16 до 0,43мас. %, а среднее составляет 0,24 и 0,27 мас. %, соответственно.

Значения ZnO варьируются от 0,05 до 0,13 мас. % и от 0,04 до 0,12 для ЯАП и ААП соответственно. Средние содержания составляют 0,07 мас% и 0,08 мас. % для ЯАП и ААП. В хромшпинелидах из ксенолитов тр. Удачная ZnO варьирует от 0,04 до 0,14 мас. % при среднем значении 0,07 мас. %. Из полученных данных можно сделать вывод, что шпинелиды из мантийных ассоциаций, вместе с включениями в алмазах, имеют близкий средний состав по содержанию цинка, не превышающий 0,08 мас. %. Хромшпинелиды «курунгского» типа значимо отличаются от кимберлитовых, содержание цинка в них выше и в среднем составляет около 0,17 мас. %.

Значения NiO варьируются от 0,2 до 0,14 мас. % и от 0,05 до 0,16 для ЯАП и ААП соответственно. Средние содержания составляют 0,09 мас. % для ЯАП и ААП. В ксенолитах из кимберлитовых трубок Удачная и Интернациональная NiO варьирует от 0,08 до 0 17 мас. % и от 0,05 до 0,28 мас. % соответственно при среднем значении 0,12мас. %. В хромшпинелидах алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях NiO изменяется в пределах 0,02-0,20 мас. % и в среднем равняется 0,06 мас. %.

Значения MnO варьируются от 0,17 до 0,31 мас. % и от 0,21 до 0,31 для ЯАП и ААП соответственно, при этом средние содержания составляют 0,20 мас% и 0,26 мас. % соответственно

В хромшпинелидах алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях MnO изменяется в пределах 0,12-0,34 мас. % и в среднем равняется 0,25 мас. %. В ксенолитах из трубок Удачная и Интернациональная MnO варьирует от 0.17 до 0,27 и от 0,11 до 0,34 мас. % соответственно при среднем значении 0,22 мас. %.

Результаты по основным примесным элементам, полученные с помощью микрозондового анализа показали не существенные различия в составе хромшпинелидах из алмазов ЯАП и ААП. В последних статистически зафиксировано слегка повышенное содержание марганца и пониженное ванадия, в сравнении с хромшпинелидами ЯАП.

4.5.2. Лазерная абляция

В хромшпинелидах из алмазов элементами с самыми высокими содержаниями являются Mn (1078-2848 ppm), V (868-3075 ppm), Ti (109-5764 ppm), Na (8-2573 ppm), Ni (200-1075 ppm), Si (940-2731 ppm) и Zn (404-1884 ppm). Содержание этих элементов успешно определяется методом микрозондового анализа. Содержание остальных элементов-примесей не превышает 1000 ppm. К ним относятся Ca (74-829 ppm), Sc (0,31-9,83 ppm), Co (204-475 ppm), Cu (1,53-72 ppm), Ga (4,15-58 ppm), Ge (0,600-2,72 ppm), Nb (0,163-4,27 ppm) и Ta (0,012-0,528 ppm).

Для хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях набор элементов с наивысшими концентрациями практически полностью аналогичен хромшпинелидам из алмаза – Mn (1034-2790 ppm) V (496-1556 ppm), Ti (13,8-1042), Ni (225-1595), Si (800-1968 ppm) и Zn (523-2594 ppm), за исключением Na, который отсутствует вовсе. Средние концентрации же остальных элементов, не превышающие 1000 ppm – Ca (91-578 ppm), Sc (0,48-12,1 ppm), Co (246-563 ppm), Cu (0,519-54 ppm), Ga (6,2-61 ppm), Ge (0,524-2,45 ppm), Nb (0,082-1,63 ppm) и Ta (0,005-0,132 ppm).

Сравнение концентраций элементов примесей хромшпинелидов ЯАП и ААП показывает значимые различия в содержаниях Na, Ca, Ti, V, Mn, Zn, и Ta (таблица 1). При сравнении хромшпинелидов алмазного парагенезиса с хромшпинелидами алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях видны значимые различия в концентрациях практически всех изученных элементов – Sc, Ti, V, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Nb.

Сравнение между хромшпинелидами из алмазов различных алмазоносных провинций и районов, показывает различия в концентрациях Ta, но при этом близость по содержанию Nb; повышенные концентрации Zn, Ga, Cu и Ca в хромшпинелидах ААП в сравнении с хромшпинелидами ЯАП; а также повышенные концентрации Sc и Cu в хромшпинелидах северо-востока Сибирской платформы в сравнение с остальными хромшпинелидами из алмазов ЯАП.

Таблица 1 Средние значения и стандартные отклонения состава примесных элементов хромшпинелидов из алмазов и «курунгского» типа.

Элемент	Якутская алмазоносная провинция		Архангельская алмазоносная провинция		Алмазоносный участок Улахан-Курунг-Юрях	
	$\chi_{сред}$, ppm	σ, ppm	$\chi_{сред}$, ppm	σ, ppm	$\chi_{сред}$, ppm	σ, ppm
Na	512	499	365	219	—	—
Si	1632	287	1499	178	1250	230
Ca	165	78	755	104	248	143
Sc	2,73	1,47	2,53	0,884	4,79	2,45
Ti	1224	1035	1592	1111	337	299
V	2023	413	1678	246	845	258
Mn	1793	249	2113	285	2031	342
Co	270	36	319	40	428	67
Ni	792	100	752	106	460	304
Cu	14,6	10,7	16,2	7,94	3,38	3,03
Zn	852	173	1144	269	1585	420
Ga	21	8,58	26	7,68	18,6	11,1
Ge	1,34	0,390	1,11	0,149	0,991	0,546
Nb	1,26	0,674	1,41	0,750	0,300	0,269
Ta	0,10	0,081	0,18	0,083	0,013	0,006

Примечание: χ сред - среднее значение; σ – стандартное отклонение.

4.6. Вариации химического состава включений магнезиохромита в пределах кристалла алмаза-матрицы

Проведены исследования по возможному изменению химического состава включений магнезиохромита в зависимости от нахождения их в разных ростовых зонах алмаза-матрицы на примере шести образцов из четырех главных коренных алмазных месторождений Якутии: кимберлитовых трубок Мир, Интернациональная, Юбилейная и Комсомольская.

В 33 изученных кристаллах алмаза хромшпинелиды включения локализуются преимущественно в одной ростовой зоне в центральной части алмаза матрицы. В таких кристаллах разница в содержании Cr_2O_3 и Al_2O_3 варьирует в узких пределах: в среднем от 0,5 до 1,0 мас. %. В 8 остальных образцах хромшпинелиды включения располагались в разных ростовых зонах. В этом случаем разница в концентрациях Cr_2O_3 и Al_2O_3 в среднем составляет от 2,0 до 2,5 мас. % в краевой и центральной зонах (рисунок 6, таблица 2). В краевой части повышено содержание хрома и понижено алюминия, а в центральной наоборот. С использованием Zn-геотермометра (Ryan, 1996) зафиксирована разница в температурном режиме около 100 °С.

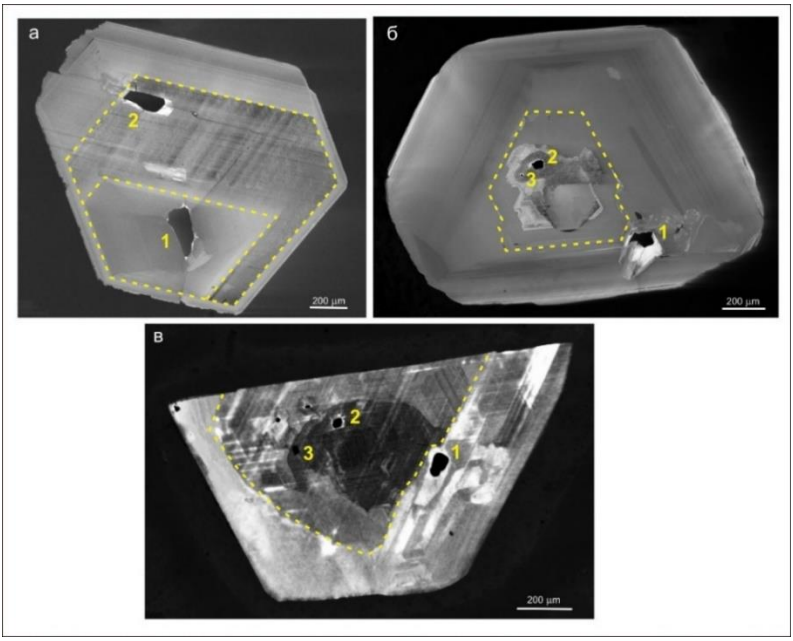

Рисунок 6. Кристаллы алмаза с включениями магнезиохромита, расположенными в разных зонах кристалла-матрицы: а – Kms-84/35; б – Kms-81; в – I-5-29. Штрихпунктирной линией указаны границы ростовых зон алмаза-матрицы.

Таблица 2. Химический состав включений магнезиохромита в алмазе из тр. Комсомольская и Интернациональная

№ обр.	Kms-84/35		Kms-81			I-5-29		
Зона	край	центр	край	центр	центр	край	центр	центр
№ вкл.	1	2	1	2	3	1	2	3
SiO_2	0,11	0,08	0,11	0,06	0,06	0,11	0,06	0,09
TiO_2	0,06	0,05	0,35	0,41	0,42	0,03	0,07	0,04
Cr_2O_3	64,4	62,4	63,9	61,2	60,5	62,5	60,1	60,1
Al_2O_3	6,14	8,51	6,3	7,91	7,83	7,04	9,51	9,25
MgO	12,1	13,6	12,8	13,6	13,4	12,7	12,9	12,9
V_2O_3	0,26	0,27	0,24	0,25	0,23	0,34	0,35	0,36
ZnO	0,07	0,06	0,08	0,08	0,07	0,11	0,05	0,07
FeO	16,2	14,0	14,8	14,8	14,7	15,9	15,9	15,6
NiO	0,09	0,11	0,07	0,07	0,06	0,05	0,06	0,07
MnO	0,19	0,16	0,17	0,18	0,16	0,13	0,14	0,14
Сумма	99,62	99,24	98,86	98,56	97,43	98,91	99,14	98,62

4.7. Микропримесный состав хромшпинелидов «курунгского» типа

Среди хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях отобраны кристаллы, по содержанию Cr_2O_3 и Al_2O_3 близкие к хромшпинелидам, включенным в алмазе. На начальных этапах проводимых исследований методом микрозондового анализа были выявлены существенные различия этих двух групп по содержанию ванадия, никеля и цинка (рисунок 7 а, в).

Хромшпинелиды «курунгского» типа характеризуются меньшим содержанием ванадия, никеля и в большей степени обогащены, цинком. Для подтверждения такой закономерности все образцы были исследованы методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с лазерной абляцией. с целью подтверждения характера распределения примесных элементов в их составе (рисунок 7 б, г). Было выяснено, что характер распределения микропримесей в исследованных двух группах хромшпинелидов по данным EPMA и LA-ICP-MS аналогичен.

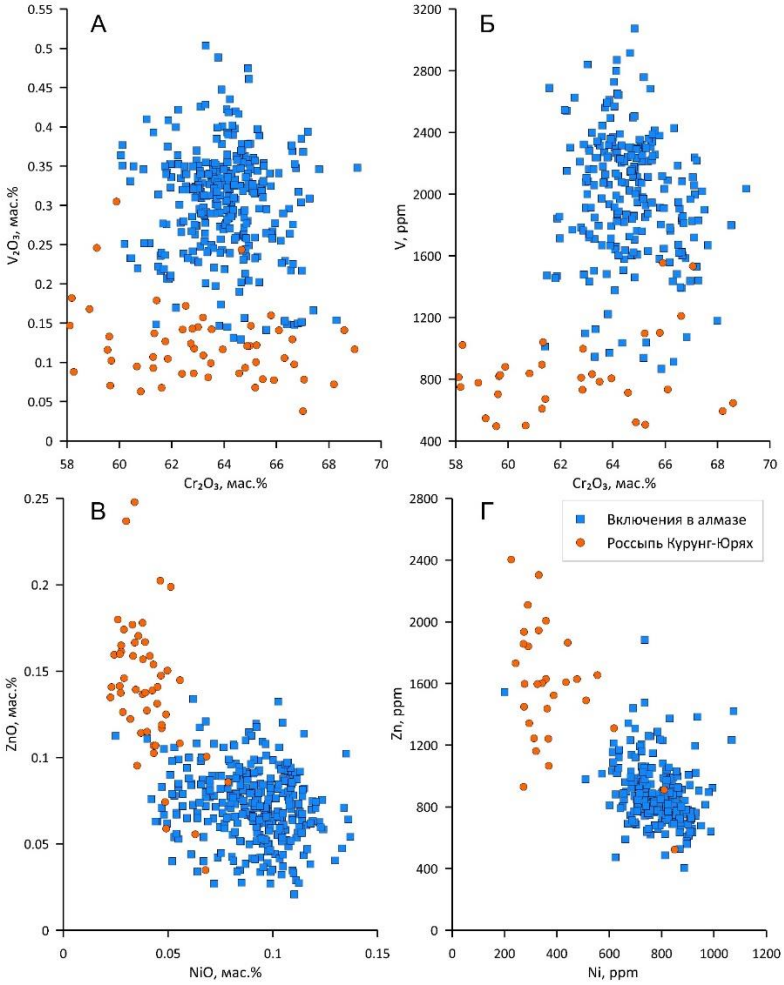

Рисунок 7. Распределение элементов в составе хромшпинелидов «курунгского» типа и включений в алмазах из кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского района Сибирского кратона: (А) V_2O_3 – Cr_2O_3 (ЕРМА); (Б) V – Cr_2O_3, значения V – LA-ICP-MS; (в) ZnO – NiO (ЕРМА); (г) Zn – Ni (LA-ICP-MS).

Спайдер диаграммы средних составов хромшпинелидов из алмазов ЯАП, ААП, мантийных ксенолитов и хромшпинелидов участка Улахан-Курунг-Юрях наглядно демонстрируют различия в содержаниях примесных элементов: четко прослеживаются отличия курунгских хромшпинелидов по содержанию V, Ni, Zn, Co, Cu, а также Sc, Nb и Ta (рисунок 8).

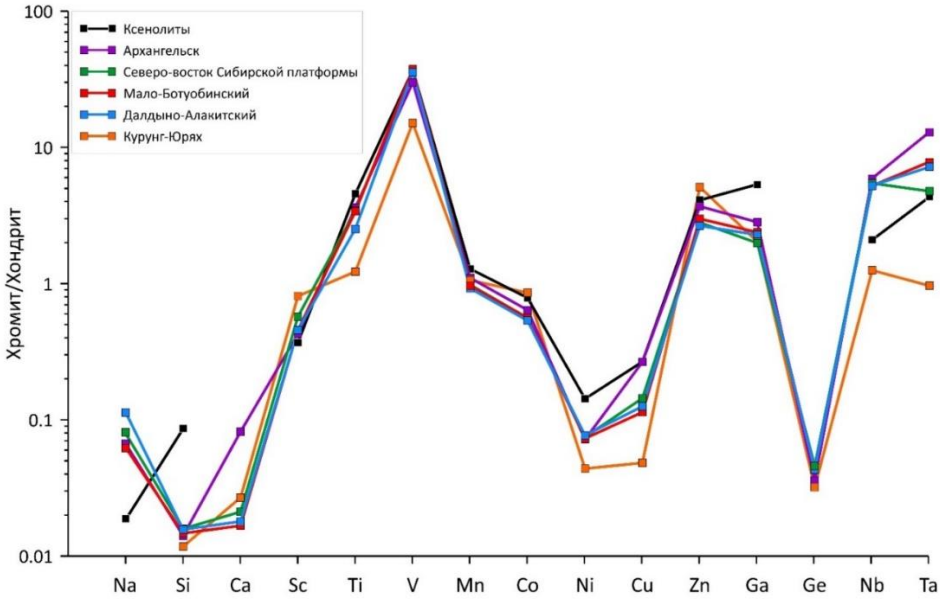

Рисунок 8. Диаграмма распределения микроэлементов в хромшпинелидах из алмазов, мантийных ксенолитов и хромшпинелидов «курунгского» типа. Данные нормированы на хондрит CI.

ГЛАВА 5 ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ХРОМШПИНЕЛИДОВ ИЗ АЛМАЗОВ

5.1. Использование Zn-шпинелевого геотермометра для включений в алмазе

Согласно формуле (Ryan et al, 1996), были рассчитаны температуры для всех имеющихся хромшпинелидов из алмазов:

$$T_{Zn} = \frac{1000}{-0{,}9 + 0{,}26\mathrm{Ln}(\mathrm{ppm}\ Zn_{chr})} - 273$$

Средние температуры для алмазов из Далдыно-Алакитского и Мало-Ботуобинского районов ЯАП составляют около 900±74°C и 813±71°C соответственно. Средние температуры образования хромшпинелидов из алмазов ДА выше температуры хромшпинелидов МБ на ~50 °C (923 °C и 880 °C соответственно).

Литературные данные по T_{Zn} в среднем оказались немного завышены по сравнению с нашими, но общая тенденция, что включения хромшпинелидов в алмазах МБ имели меньшую температуру равновесия, чем хромшпинелиды ДА, а хромшпинелиды ААП меньшую, чем хромшпинелиды из ЯАП согласуется и с нашими

данными. Мы предполагаем, что более низкие рассчитанные нами температуры обусловлены использованием данных LA-ICP-MS в нашем исследовании, тогда как оригинальный термометр Ryan (1996) был откалиброван с использованием анализов протонного зонда, аналогично работе Griffin et al., 1993; в работе Квасницы и соавторов (1993) представлены данные микрозондового анализа, который занижает содержания Zn относительно данных LA-ICP-MS.

5.2. Генетическое значение содержания микроэлементов в хромшпинелидах из алмазов Архангельской и Якутской алмазоносных провинций

В работе впервые получены представительные данные по примесным элементам в хромшпинелидах, включенных в алмазе из разных кимберлитовых трубок Якутской и Архангельской алмазоносных провинций, а также россыпей северо-востока Сибирской платформы. Для сравнения с хромшпинелидами из алмазов были использованы составы хромшпинелидов из дунитов Кемпирсайского массива (Hu et al., 2022), Казахстан и бонинитов массива Тетфор Мин, Канада (Page, Barnes, 2009).

Хромшпинелиды из алмазов ЯАП и ААП значимо различаются по содержанию таких примесных элементов как V, Mn, Zn, Nb, Ta. Если же рассматривать отдельные кимберлитовые трубки, то в пределах одного алмазоносного района и провинции значимых различий в составе хромшпинелидов-включений в алмазе не наблюдается для большинства трубок, что показывает близость состава минералообразующего расплава, из которого эти хромшпинелиды кристаллизовались и, в более широком варианте, отражает состав мантийного вещества под каждым конкретным кимберлитовым полем.

Несмотря на структурную несовместимость Si с кристаллической структурой хромшпинелидов его содержание оказалось надёжным показателем хромшпинелидов алмазного парагенезиса. В хромшпинелидах из алмазов содержание Si варьирует от 940 до 2731 ppm, что выше, чем в хромшпинелидах из концентрата кимберлитов и Кемпирсайского массива (17,8-439 ppm и 47-140 ppm, соответственно) и значительно ниже, чем в хромшпинелидах из мантийных ксенолитов (6957-12263 ppm).

Хотя диапазон содержания Sc в хромшпинелидах алмазной ассоциации довольно широк (0,750–9,83 ppm), подавляющее большинство (>95%) всех составов попадает в диапазон от 1 до 4 ppm. Хромшпинелиды из дунитов Кемпирсайского массива показывают схожий диапазон составов, с большинством значений между 4,5 и 5,5 ppm (среднее = 4,33 ppm), в то время как хромшпинелиды из бонинитов Тетфор-Мин показывают почти вдвое большее среднее содержание, чем Кемпирсай – среднее 8,33 ppm. Это различие может быть связано с отсутствием граната в бонинитах – основном концентраторе скандия в мантийных породах (Chasse et al., 2018), что приводит к перераспределению избытка Sc в пироксены, оливины и хромшпинелиды.

Одним из главных минералов-концентраторов ванадия в мантии является хромшпинелид, обладая самым высоким коэффициентом распределения D_V

минерал/расплав, среди таких мантийных фаз как клинопироксен, ортопироксен, гранат и оливин (Righter et al., 2006). Сравнение концентраций ванадия в хромшпинелидах-включениях в алмазах с хромшпинелидами других геологических обстановок показало, что хромшпинелиды алмазного парагенезиса ЯАП и ААП имеют более высокие содержания ванадия (~2000 и ~1700 ppm) по сравнению с включениями хромшпинелидов из алмазов месторождений Ботсваны и ЮАР (~1300 ppm) (Stachel et al., 2008). Это может быть связано с разным составом подстилающей субконтинентальной литосферной мантии в районе расположения кимберлитовых тел: кимберлиты ЯАП и ААП относятся к типу I (низкощелочная разновидность кимберлитов), в то время как кимберлиты Южной Африки – к типу II (высокощелочной разновидности), их называют «оранжеитами» (Smith et al., 1985). Хромшпинелиды массивов Кемпирсай и Тетфор Мин существенно обеднены ванадием и его содержание не превышает 900 ppm.

Ниобий танталовое отношение является важной характеристикой, позволяющей определить характер источника, из которого формировалась порода/минерал. Nb/Ta отношения для хромшпинелидов ЯАП практически двукратно превосходит его в сравнении с хромшпинелидами из алмазов ААП и составляет 17,2±8,4 против 9,5±2,5 соответственно. Nb/Ta отношение для пород литосферной мантии колеблется в довольно широких пределах и в среднем близки хондритовым (CI) значениям, что хорошо соотносится со значениями в ЯАП. Для хромшпинелидов из алмазов ААП Nb/Ta отношение значительно ниже хондритовых и в среднем соответствует абиссальным перидотитам орогенических массивов таких как Хороман (11,6), Балмуссио (11,5) и Ронда (10,8) (Weyer et al., 2003; Lenoir et al., 2001; Takazawa et al., 2000).

Содержание Ni в хромшпинелидах является чувствительным индикатором состава протолита (Stosch, 1981). Концентрации никеля возрастают с увеличением хромистости вмещающих пород и ксенолитов (O'Reilly et al., 1991) в соответствии с возрастанием степени деплетированности вмещающих пород, таким образом значения Ni будут выше для алмазов лерцолитового парагенезиса и ниже – для гарцбургит-дунитового (Paktunc and Cabri, 1995). Средние содержания для хромшпинелидов ЯАП и ААП тоже оказались близки – 792 и 752 ppm соответственно, что хорошо согласуется с данными Б. Гриффина (Griffin et al., 1993) и Н.В. Соболева (Соболев и др., 1997). Хромшпинелиды массивов Кемпирсай и Тетфор Мин по своим содержаниям близки к алмазоносным массивам, а значения Ni составляют 451–927 ppm и 441–875 ppm соответственно, что позволяет предположить в целом схожее распределение Ni в мантийных перидотитах из этих регионов.

Несмотря на то, что изученные нами составы хромшпинелидов из алмазов по Zn и Mn довольно близки и не позволяют отличить их от хромшпинелидов иных типов, было установлено, что Mn и Zn в хромшпинелидах алмазного парагенезиса демонстрируют чёткую положительную корреляцию (R = 0,734), что предполагает, что их соотношение должно варьироваться в определённых пределах. В хромшпинелидах из алмазов отношение Mn/Zn варьируется от 1,35 до 3,15. Для сравнения, в

хромшпинелидах из концентрата кимберлитов это отношение варьируется от 0,53 до 3,57, в хромшпинелидах из Кемпирсая – от 1,00 до 3,26, и из Тетфор Мин – от 1,43 до 4,39. Эти перекрытия позволяют отличать шпинелиды алмазной серии от других типов при наличии достаточного количества данных.

5.3. Микропримесный состав хромшпинелидов как индикатор алмазоносных кимберлитов

Идентификация минералов-спутников алмаза основана на относительно простом критерии – химическом составе минералов из включений в алмазе или минералов из алмаз-содержащих ксенолитов. Предшествующими исследованиями уже выявлены типоморфные особенности хромшпинелидов из так называемой «алмазной» ассоциации, которые характеризуются высокой хромистостью (выше 80%), низким содержанием титана (менее 0,7%) и малым количеством окисного железа в их составе (Соболев, 1971). Однако присутствие таких хромшпинелидов в ореолах рассеяния алмазов можно использовать только в том случае, если в парагенезисе с ними будет находиться другой индикаторный минерал на алмаз – пироп, в отсутствии которого можно пропустить перспективный на алмаз участок. Помимо этого, на данный момент появилось большое количество данных о хромшпинелидах, имеющих близкий состав: например, высокохромистые хромшпинелиды с содержанием более 62 мас. % Cr_2O_3 установлены в ультрабазитах Полярного Урала (до 65,9 мас. %), Корякского нагорья (68,4 мас. %); Индии (66,3 мас. %); Новой Каледонии (68 мас. %) и др. (Илупин, 2002).

Поэтому в этой работе были сформулированы новые критерии хромшпинелидов алмазоносного парагенезиса по элементам примесям в хромшпинелидах. Наиболее контрастные элементы были выбраны по наименьшему перекрытию областей составов и доверительных интервалов с помощью графиков “ящик с усами”. Наиболее значимые, двукратные различия были установлены в концентрациях Zn (879 и 1585 ppm), V (1990 и 845 ppm), Ni (765 и 460 ppm) и Co (275 и 430 ppm) в хромшпинелидах алмазного парагенезиса и «курунгского» типа соответственно (рисунок 9). Также содержания Ta и Nb различаются в среднем в 3-4 раза: соответственно, 0,109 ppm и 1,28 ppm для хромшпинелидов включений в алмазах и 0,027 ppm и 0,300 ppm для хромшпинелидов курунгского типа.

Помимо отдельных элементов, для диверсификации различных типов хромшпинелидов могут быть использованы отношения максимально контрастных пар элементов, например, V/Sc к Ni/Co или Zn/Nb к Co/Ta. Среднее отношение ванадия к скандию в хромшпинелидах из алмазов кимберлитов составляет 726, а для хромшпинелидов участка Улахан-Курунг-Юрях – 261; отношения же никеля к кобальту равняются 2,86 и 1,20 соответственно. А Zn/Nb и Co/Ta в среднем составляют для хромшпинелидов из алмазов: 891 и 4314, соответственно; а для хромшпинелидов «курунгского» типа 9036 и 40855, соответственно.

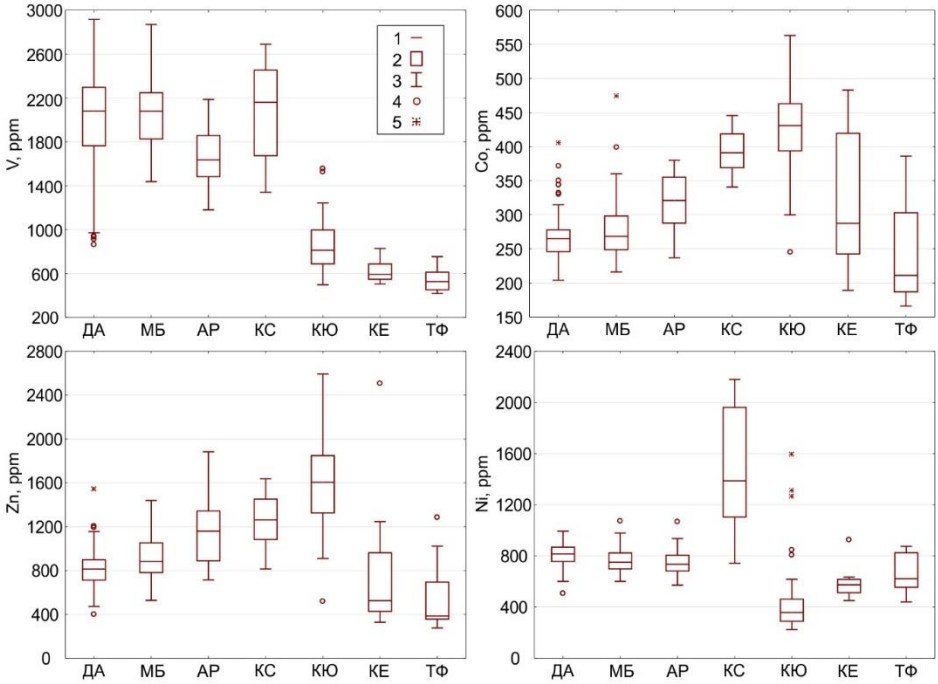

Рисунок 9. Химический состав (график “ящик с усами”) хромшпинелидов. Включения в алмазе: ДА – Далдыно-Алакитский район; МБ – Мало-Ботуобинский район; АР – Архангельская провинция. КС – ксенолиты тр. Удачная; КЮ – «курунгский» тип; КЕ – дуниты Кемпирсайского массива (Hu et al., 2022); ТФ – бонииты массива Тетфор Мин (Page, Barnes, 2009). 1) Медиана; 2) 25%-75% квартиль; 3) Зона без выбросов; 4) Выбросы (1,5 IQR); 5) Выбросы (3 IQR); IQR – межквартильный размах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые проведены систематические комплексные исследования алмазов, содержащих кристаллические включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок Сибирского и Восточно-Европейского кратонов. По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1) Около 90% алмазов с закапсулированными включениями хромшпинелидов имеют октаэдрический габитус, в редких случаях форма меняется до псевдоромбододэкаэдрических, когда образуются кривогранные поверхности.

2) На примере 63 кристаллов алмаза, содержащих включения хромшпинелидов, не выявлено типоморфных особенностей по дефектно-примесному составу. Общее количество азота, распределение азотных центров и степень агрегации варьируются в

широких пределах, и аналогичны кристаллам алмаза, не содержащим включения хромшпинелидов, для каждой из рассматриваемых в работе кимберлитовых трубок.

3) Подтверждено, что хромшпинелиды преимущественно локализуются в центральной части и одной ростовой зоне алмаза матрицы. На примере 41 кристаллов алмаза с множественными включениями хромшпинелидов показано, что включения, приуроченные к разным ростовым зонам, значимо различаются по содержанию Cr и Al, что в соответствии с рядом исследований может быть связано с постепенным снижением температуры в процессе кристаллизации.

4) Методом лазерной абляции впервые изучен состав примесных элементов 320 включений хромшпинелидов в алмазах из восьми кимберлитовых трубок Якутской и трех трубок Архангельской алмазоносных провинций. Значимые содержания элемента были определены для следующих изотопов элементов: Na^{23}, Si^{29}, Ca^{43}, Sc^{45}, Ti^{49}, V^{51}, Mn^{55}, Co^{59}, Ni^{60}, Cu^{63}, Zn^{66}, Ga^{71}, Ge^{74}, Nb^{93}, Ta^{181}. Установлено, что распределение этих элементов аналогично для всех изученных кимберлитовых трубок. Хромшпинелиды из Архангельской алмазоносной провинции отличаются от хромшпинелидов Якутской провинции более низкими концентрациями V и повышенными Ta.

5) Выявлены четкие различия в микропримесном составе хромшпинелидов «алмазного» и «курунгского» типов по содержанию V, Ti, Zn, Co, Ni, Cu, Sc, Nb, Ta.

6) Сформулированы новые критерии химического типоморфизма хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курнуг-Юрях, позволяющие отделить их от хромшпинелидов «алмазного» парагенезиса: средние содержания, соответственно, Zn = 1585 ppm и 879 ppm, V = 845 ppm и 1990 ppm, Ni = 460 ppm и 765 ppm; Co = 428 ppm и 275 ppm, Ta = 0,027 ppm и 0,109 ppm, Nb = 0,300 ppm и 0,109 ppm, V/Sc = 261 и 726, Ni/Co = 1,20 и 2,86, Zn/Nb = 9036 и 891, Co/Ta = 40855 и 4314.

7) Построенные на представительном количестве образцов положительные корреляционные диаграммы по содержанию титана, ванадия и цинка в хромшпинелиде из алмазов, определенных методом EPMA и LA-ICP-MS, позволили сделать вывод, что для идентификации хромшпинелидов алмазного парагенезиса при нахождении их в ореолах рассеяния вместе с хромшпинелидами других генетических типов, можно использовать более доступный метод микрозондового анализа.

8) Статистически показаны различия в распределении примесных элементов в составе хромитов, образовавшихся вместе с алмазами в истощенных ультраосновных породах литосферной мантии древних кратонов в сравнении с хромитами из ультраосновных массивов, образовавшихся при кратно меньших давлениях. Установленные отличия могут существенно повысить надежность выявления хромитов алмазного парагенезиса при проведении поисковых работ на алмазы и снижают вероятность ошибок на площадях, где в терригенных отложениях присутствуют ложные индикаторы – хромиты не кимберлитового происхождения.

Список опубликованных статей по теме диссертации:

1) Серебрянников А.О., Логвинова А.М., Соболев Н.В. Особенности микропримесного состава хромшпинелидов-включений в алмазах из кимберлитов Якутии // Отечественная геология, 2022, вып. 6, с. 50-63 DOI:10.47765/0869-7175-2022-10034

2) Логвинова А.М., Серебрянников А.О., Соболев Н.В. Вариации химического состава и редкие парагенезисы множественных включений магнезиохромита в алмазах Якутии // Доклады РАН, 2021, т. 501(1), с. 26-33

3) Логвинова А.М., Угапьева С.С., Николенко Е.И., Серебрянников А.О., Афанасьев В.П. Полигенность алмазов из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы // Записки Горного института, 2025, т. 276, с. 3-17

4) Серебрянников А.О., Логвинова А.М., Михайленко Д.С., Шу Ю., Похиленко Н.П. Хромшпинелиды как индикаторы алмазоносных кимберлитов. Геология рудных месторождений, 2025. В печати

Сборники и тезисы докладов конференций:

1) Серебрянников А.О., Логвинова А.М. Особенности состава хромшпинелидов в алмазах из кимберлитов Якутии // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2018, 556-558 с., ISBN 978-5-4437-0838-6 (IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле, Новосибирск)

2) Серебрянников А. О. Вариации химического состава хромшпинелидов в алмазах из различных алмазоносных районов Якутии // Геология: Материалы 57-й Международной научной студенческой конференции, 14-19 апреля 2019 г. / Новосибирский Государственный Университет — Новосибирск: ИПЦ НГУ 2019, с. 66, ISBN 978-5-4437-0897-3 (МНСК 2019)

3) Logvinova A.M., Wirth R., Serebriannikov A.O., Sobolev N.V. Ni-rich sulfide melt inclusions in Yakutian diamonds. GSA-2019, Abstracts of Annual Scientific Meeting of Geological Society of America, Phoenix, США , 3-8 ноября 2019, #338291.

4) Серебрянников А. О. Особенности микропримесного состава хромшпинелидов из алмазоносных кимберлитов // Геология: Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции, 10-13 апреля 2020 г. / Новосибирский Государственный Университет — Новосибирск: ИПЦ НГУ 2020, с. 69, ISBN 978-5-4437-1042-6 (МНСК 2020)

5) Серебрянников А. О. Логвинова А.М., Особенности микроэлементного состава хромшпинелидов мантийного генезиса // Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 11–16 мая 2021 г.). – Иркутск: Институт земной

коры СО РАН, 2021., 245-246 с., ISBN 978–5–9908560–8–0 (XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика», Иркутск)

6) Серебрянников А. О., Логвинова А. М. Неоднородность состава множественных включений магнезио-хромита в алмазах Якутии // 2021, 17-24 сентября, ИГГ УрО РАН. Сборник тезисов, с. 106-108 (XXVII Всероссийская научная конференция “Уральская минералогическая школа - 2021”. г. Екатеринбург)

7) Серебрянников А. О., Логвинова А. М. Примесь ванадия в хромшпинелидах из алмазов как петрогенетический индикатор // 2022, 10-12 апреля, ЦНИГРИ (III Молодежная научно-образовательная конференция «РУДНАЯ ШКОЛА ЦНИГРИ»)

8) Serebriannikov A. O., Logvinova A. M. Features of the trace element composition of mantle-derived chrome spinels // 2022, 14-17 июня, ИНГГ СО РАН (X Международная Сибирская конференция молодых учёных по наукам о Земле, г. Новосибирск)

9) Серебрянников А. О., Логвинова А. М., Михайленко Д. С. Минералогия включений в коэсит-содержащих алмазах по данным КР-картирования // Труды Ферсмановской сессии, Апатиты, 2023

10) Серебрянников А. О., Логвинова А. М., Михайленко Д. С. Микропримеси в хромшпинелидах из алмазов Архангельской и Якутской алмазоносных провинций // Труды Ферсмановской сессии, Апатиты, 2023

11) Серебрянников А. О., Михайленко Д. С., Логвинова А. М. Метасоматическое преобразование глубоко-субдуцированных пород на примере ксенолита эклогита из кимберлитовой трубки Удачная // 2023, Сборник тезисов Уральской минералогической школы

12) Серебрянников А. О., Логвинова А. М., Михайленко Д.С., Шу Ю. Вариации микроэлементного состава хромшпинелидов из алмазов и ультраосновных пород // Тезисы научной конференции «Процессы минералообразования при высоких давлениях, происхождение алмазов и мантийных магм». Новосибирск, 17-19 июня 2025, с. 113-115.

Приложение 1.

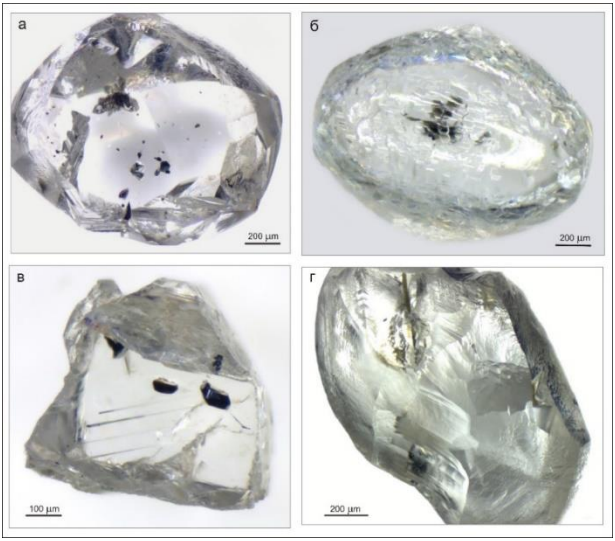

Рисунок I. Кристаллы алмаза с включениями хромшпинелидов: (а, б) – россыпи северо-востока Сибирского кратона (обр. Исток-205 и Ан-42); (в, г) – Архангельская алмазоносная провинция (тр. Ломоносовская: обр. Л-57 и Л-5).

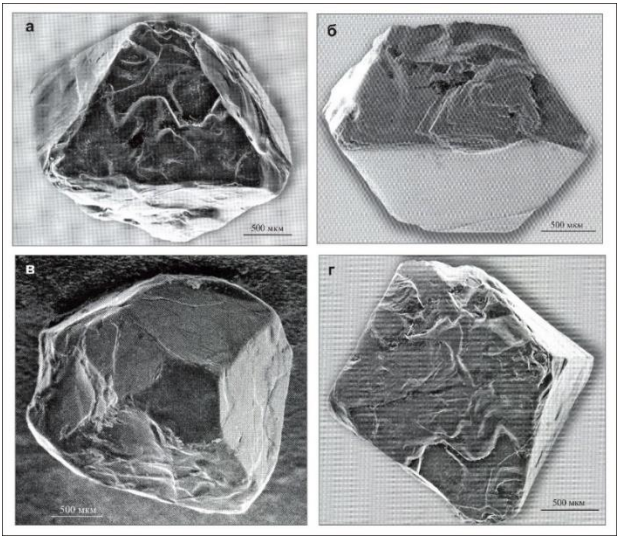

Рисунок II. Типичная морфология кристаллов хромшпинелидов «курунгского» типа. Фотографии кристаллов заимствованы из (Афанасьев и др., 2010).