

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛОГИИ ИМ. В. С. СОБОЛЕВА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

СЕРЕБРЯННИКОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ

**ХРОМШПИНЕЛИДЫ В АЛМАЗАХ И КИМБЕРЛИТАХ КАК  
ИНДИКАТОРЫ АЛМАЗОНОСНЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ**

1.6.4. МИНЕРАЛОГИЯ, КРИСТАЛЛОГРАФИЯ. ГЕОХИМИЯ,  
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ НАУК

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ  
К.Г.-М.Н. ЛОГВИНОВА АЛЛА МИХАЙЛОВНА

НОВОСИБИРСК – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ .....	11
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	18
2.1. Подготовка материалов .....	18
2.2. Методы исследования.....	18
2.2.1. Оптические методы.....	18
2.2.2. ИК-спектроскопия.....	19
2.2.3. Сканирующая микроскопия .....	21
2.2.4. Рентгеноспектральный микроанализ.....	22
2.2.5. Католюминесценция .....	23
2.2.6. Рамановская спектроскопия .....	24
2.2.7. Лазерная абляция с индуктивно связанной плазмой .....	24
ГЛАВА 3 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ.....	26
ГЛАВА 4 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХРОМШПИНЕЛИДОВ ИЗ АЛМАЗОВ, КСЕНОЛИТОВ И АЛМАЗОНОСНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ.....	32
4.1. Морфологическая характеристика алмазов и хромшпинелидов .....	32
4.1.1. Алмазы с включениями хромшпинелидов из кимберлитовых тел и ореолов рассеяния .....	32
4.1.2. Хромшпинелиды из кимберлитов .....	35
4.2. Расположение включений хромшпинелидов в кристалле алмаза-матрицы .....	37
4.3. Парагенетические ассоциации хромшпинелидов в алмазе .....	40
4.4. Дефектно-примесный состав алмаза .....	43
4.5. Химический состав хромшпинелидов.....	47
4.5.1. Микронзондовый анализ .....	47
4.5.2. Лазерная абляция .....	56
4.6. Вариации химического состава включений магнезиохромита в пределах кристалла алмаза-матрицы .....	64
4.7. Микропримесный состав хромшпинелидов «курунгского» типа.....	70
ГЛАВА 5 ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ХРОМШПИНЕЛИДОВ ИЗ АЛМАЗОВ.....	77
5.1. Использование Zn-шпинелевого геотермометра для включений в алмазе.....	77
5.2. Генетическое значение микроэлементов в хромшпинелидах из алмазов Архангельской и Якутской алмазоносных провинций.....	80
5.3. Микропримесный состав хромшпинелидов как индикатор алмазоносных кимберлитов.....	92

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	97
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	100
СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ .....	113

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Хромшпинелиды, наряду с пиропом и оливином, являются основными минералами-спутниками алмаза, а также постоянными минералами широкой серии ультраосновных пород различных геологических обстановок и относящихся к различным фациям глубинности. Они 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. С точки зрения петрогенеза, хромит является одним из первых минералов, кристаллизующихся из первичных магм, и одним из последних расходуется при частичном плавлении мантии. Таким образом, вариации в составе хромитов потенциально могут способствовать получению важной информации о мантийных процессах. 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. Включения хромшпинелидов в алмазе относятся к группе магнезиохромита. Ранее было опубликовано много работ (Соболев и др., 1975; Мацюк и др., 1989), касающихся состава по содержанию главных элементов в хромшпинелидах из кимберлитовых пород, и особенно во включениях магнезиохромита в алмазе. 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 алмазонасностью. Однако систематических исследований по составу элементов-примесей в хромшпинелидах, захваченных алмазом в процессе роста, до сих пор не проводилось. В данной работе проведены систематические исследования содержания примесных элементов в хромшпинелидах из алмазов разных кимберлитовых трубок Якутской алмазонасной провинции (в дальнейшем ЯАП), Архангельской алмазонасной провинции (в дальнейшем ААП), россыпей северо-востока Сибирской платформы, а также алмазонасного участка Улахан-Курунг-Юрях (Курунг-Юрях). Основную проблему при поисках алмазных месторождений на участках с россыпной алмазонасностью составляют хромшпинелиды, не имеющие генетической связи с алмазом.

В данной работе доказано, что по содержанию микропримесных элементов в хромшпинелидах можно четко выявить различия хромитов, находящихся в одной россыпи в пределах алмазонасного района и имеющих типичные для алмазонасного парагенезиса составы, но генетически относящихся к разным типам пород. Это позволит внести уточнения в уже известные минералогические критерии поисков алмазов. Такие исследования играют важную роль для решения проблемы коренных источников алмазов Якутии.

### **Объекты исследования**

- 1) Кристаллы алмаза, содержащие минеральные включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок ЯАП (Мало-Ботуобинский алмазонасный район: тр. Мир, Интернациональная, 23 партсъезда КПСС; Далдыно-Алакитский алмазонасный 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 бассейна реки Улахан-Курунг-Юрях Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции.

### **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.

**Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора**

Работа базируется на результатах исследований, проведенных лично автором в период с 2020 по 2024 гг., включая ознакомление и подбор необходимой литературы по освещению проблемы, 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. Помимо этого, для сравнения с включениями хромшпинелидов алмазного парагенезиса были отобраны хромшпинелиды с включениями OI, Prp, Cr-Du из концентрата кимберлитов 4 кимберлитовых трубок ЯАП, хромшпинелиды из ксенолитов трубки Удачная (ЯАП) и хромшпинелиды алмазоносной россыпи Курунг-Юрях.

Хромшпинелиды включения в алмазах извлекались дроблением или шлифовкой.

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

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).

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 полученные результаты обработаны с применением программного обеспечения (MS Excel, OPUS, Statistica).

### **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 связанные с этим типом пород (Курунг-Юрях).

### **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 Р-Т полю стабильности алмаза. Наряду с морфологией кристаллов и количественными характеристиками, важным поисковым критерием является химический состав (по главным элементам) хромшпинелидов алмазоносного 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 значительно 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) значительно 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 Николая Владимировича Соболева «Процессы минералообразования при высоких давлениях, происхождение алмаза и мантийных магм» (г. Новосибирск, 2025).

**Соответствие результатов работы научным специальностям.** Результаты работы соответствуют пунктам 1, 2, 13, 21 (или 18) паспорта научной специальности 1.6.4.

**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 124 наименования.

**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.

## 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 микронзондового 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. Была построена корреляционная диаграмма между содержащимися в кимберлитовых телах хромшпинелидами подобного состава и их алмазоносностью (Соболев, 1971). 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. Известно, что определяющую роль в генезисе алмазов играет фактор давления. Поэтому при поисках алмазных месторождений основное внимание должно быть направлено на выявление признаков барофильности в составе сопутствующих минералов. Давление расширяет пределы изоморфного замещения либо возможности

вхождение в структуру некоторых элементов. В ряде работ было показано, что шпинель закономерно реагирует на изменение P-T параметров, поэтому по ее составу возможны относительные геотермобарометрические оценки (Nickel, 1986; Girnig et al., 1999; Туркин, Соболев, 2009). Экспериментальные исследования продемонстрировали, что при кристаллизации минеральной ассоциации, моделирующей парагенезис гранатовых гарцбургитов, содержание кноррингитового компонента в гранате увеличивается с повышением давления и температуры. В отличие от граната, содержание хрома в шпинели возрастает с повышением давления и убывает с ростом температуры. Эта закономерность сохраняется в широком P-T диапазоне – 30-80 кбар, 800-1800°C, что позволяет проводить геотермобарометрические оценки условий формирования мантийных перидотитов по составу, сосуществующих граната и шпинели. На основе состава шпинели разработан геотермометр, использующий содержание Zn для определения температуры (Ryan et al., 1996). Еще один важный критерий, который необходимо учитывать при прогнозировании алмазоносности района – это окисленность минералов спутников. В случае со шпинелью концентрации железа достаточно высоки, что позволяет производить расчет концентрации двух- и трехвалентного железа на основе рутинного анализа химического состава (Wood, Vigro, 1989). В работе Ramsay, Tompkins (1999) была показана важность использования диаграмм, отображающих железистость и хромистость шпинелей. Шпинели с хромистостью выше 0,7 попадают в группу шпинелей, ассоциирующих с алмазом. Однако, в работе приведен очень ограниченный набор данных. Дополнение подобной диаграммы позволит более четко выделить поля шпинели из разных фаций.

В работе (Griffin et al., 1993) впервые сделан акцент на выяснении различий между хромшпинелидами из кимберлитов, лампроитов и алмазов по содержанию главных элементов Cr и Al, а также примесных элементов Mg, Ni, Zn, Ti, Ga. Содержание Zn в хромитах, сосуществующих с пиропом и оливином, обратно коррелирует с температурой, а содержание никеля увеличивается с температурой. Содержание Ni > 600 ppm, Zn < 700 ppm, Ga < 30 ppm, в гарцбургитовых и

дунитовых хромитах из поля устойчивости алмаза. С учетом высокого содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  эти параметры можно использовать для оценки доли потенциально связанного с алмазами материала при проведении разведочных работ на алмаз.

Таким образом, 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. Поэтому необходимость исследования примесных элементов в хромшпинелидах является весьма актуальной.

Шлиховая проба представляет собой смесь минералов, состоящую из минералов различных пород в области сноса и минералов тяжелой фракции кимберлитов. Минералы тяжелой фракции кимберлитов также включают минералы как самих кимберлитов, так и минералов из различных коровых и мантийных ксенолитов. То есть в шлиховой пробе может находиться несколько популяций хромшпинелидов различного состава. И поэтому, важно выделить химические характеристики минералов, типоморфные для алмазосодержащих пород или пород, находящихся в Р-Т поле стабильности алмаза. Идентификация МСА основана на относительно простом критерии – химическом составе минералов из включений в алмазе или минералов из алмазосодержащих ксенолитов (Соболев и др., 1974; Харьков и др., 1995; Nowicki et al., 2007). В данном случае важную роль играет исследование минеральных включений в хромшпинелидах, встреченных в алмазоносных россыпях. Типоморфизм МСА выражается в характерных полях состава МСА на дискриминационных диаграммах, которые только немного перекрываются с областями составов одноимённых минералов не алмазоносных пород. Наиболее хорошо дискриминационные диаграммы для идентификации МСА по составу разработаны для пикроильменита, хромистого шпинелида, граната, хромдиопсида. Подробно данные дискриминационные диаграммы рассмотрены в обзорных работах (Quirt, 2004; Nowicki et al., 2007; Афанасьев и др., 2010; Cookenboo and Grütter, 2010). Кроме того, зависимость

изоморфизма компонентов в минералах переменного состава (изоморфных рядах) от термодинамических параметров позволяет использовать распределение этих компонентов между равновесно сосуществующими парами минералов в качестве термометров и барометров. Использование этих термометров и барометров позволяет реконструировать термальный режим литосферной мантии (строить палеогеотерму) и, таким образом, оценивать мощность литосферы и алмазного окна. К сожалению, включения ильменита и рутила встречаются чрезвычайно редко в алмазе, поэтому существует очень ограниченное количество работ, в которых приводятся характеристические составы этих минералов в ассоциации с алмазом (Meyer and Mccallum, 1986; Sobolev, Efimova, 2000).

Ранее в ряде работ уже была отмечена тенденция изменения состава хромшпинелидов в алмазах от центра к краю в зависимости от их локализации в алмазе-матрице. Например, в статье Булановой (Bulanova, 1995) в двух образцах была зафиксирована закономерность увеличения хромистости и понижение магнезиальности хромшпинелидов в пределах одного кристалла алмаза в зависимости от их расположения в алмазе-матрице: от центральной к краевой части. Различные ростовые зоны при этом определялись методом катодолюминесценции. Авторы предположили, что это связано с процессами магматической дифференциации и понижением температуры в ходе роста алмаза и захватом им расплава. В работе Н.В. Соболева и Э.С. Ефимовой (1998) изучены составы более 500 включений хромшпинелидов приблизительно из 80 образцов алмазов, т.е. в одном кристалле-матрице находилось несколько включений. Особое внимание было уделено хромшпинелидам из кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции. Установлено, что только в 10% изученных алмазов хромшпинелиды имели одинаковые характеристики по хромистости и магнезиальности, в остальных же случаях составы хромшпинелидов из одного алмаза на диаграмме в координатах  $\#Cr$ -  $\#Mg$  показывали некоторый разброс. Отсутствие каких-то закономерностей в этой работе можно объяснить тем фактом, что хромшпинелиды извлекались методом сжигания алмаза-матрицы в специальных платиновых тиглях в муфельной печи при температуре более 900 °C

и выявить конкретную зону роста алмаза, из которой «вывалилось» то или иное включение было просто невозможно. В работах Н.В. Соболева с соавторами (1993, 1997) также были опубликованы составы хромшпинелидов из алмазов Архангельской алмазоносной провинции и кимберлитовой трубки Маджгаван (Индия). Для ААП составы всех изученных хромшпинелидов внутри одного алмаза несколько отличались по главным элементам. В трех же алмазах из Индии, содержащих от 2 до 7 включений хромшпинелидов, фиксировался полностью идентичный состав по главным элементам ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ). Несмотря на то, что в вышеперечисленных статьях были сняты так же  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{ZnO}$  каких-либо закономерностей в их распределении выявлено не было, либо из-за их отсутствия, либо из-за иного целеполагания работы. Таким образом, ранее было установлено, что большинство включений хромшпинелидов из алмазов ЯАП и ААП имеют различный состав по главным элементам ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ) в пределах одного кристалла. Однако для четкой интерпретации этого факта тогда не было возможности шлифовать каждый кристалл алмаза до выведения заключенных в нем хромшпинелидов в единую полировку и затем изучать методом катодолюминесценции.

В опубликованной в 2008 году обобщающей работе о происхождении алмазов (Stachel, Harris, 2008) один из разделов посвящен включениям хромшпинелидов в алмазе. Отмечено, что существование включений шпинели в алмазе связано с высоким содержанием  $\text{Cr}/\text{Al}$  в кратонных перидотитах, что стабилизирует богатую  $\text{Cr}$  шпинель глубоко в поле стабильности граната (Webb and Wood, 1986; Klemme, 2004). На основании экспериментальных данных (Дорошев и др., 1997) установлено, что в пределах поля стабильности алмаза в кратонных гарцбургитах и лерцолитах стабильны только хромшпинели с хромистостью ( $\#\text{Cr}$ ) не менее 80. С этим положением хорошо согласуются данные по природным образцам: только 2% включений имеют хромистость ниже 80. Шпинели с  $\#\text{Cr} < 80$  не могли сосуществовать с ортопироксеном и гранатом и, следовательно, должны происходить из дунитовой среды. Включения шпинели редко наблюдаются вместе с гранатом (24 из 812 включений), поэтому точный

парагенезис большинства Mg-хромитов неизвестен. В небольшой классифицированной подгруппе доминирует гарцбургитовый парагенезис (92%), что может отражать как общее более высокое содержание гарцбургитовых алмазов, так и более распространенное насыщение шпинелью (т.е. высокое отношение Cr/Al) в гарцбургитовых источниках. Включения Mg-хромита демонстрируют большой разброс по содержанию магния. В 95% случаях вариации по #Mg составляют от 60 до 80. Эта изменчивость в основном отражает различия в составе источника, но также контролируется температурой кристаллизации (контролируя разделение Fe/Mg с оливином) (Stachel, Harris, 2008).

Цинк в шпинели откалиброван как эмпирический геотермометр (Ryan et al., 1996) для использования при разведке алмазов и может отражать температурный эффект. Однако необычно высокое содержание цинка в хромшпинелидах в месторождениях Венесия (ЮАР) и трубка 154 (Дайвик, Канада), как предполагается в статье (Donnelly et al., 2007) не может быть связано с нереально низкими температурами, а можно объяснить необычно обогащенной Zn средой во время образования алмазов, что подтверждается высоким содержанием Zn в оливине. В некоторых местах включения шпинели относительно богаты кремнием (например, среднее содержание SiO<sub>2</sub> – 0,30 мас. % для месторождения Бирим, Гана), тогда как в других преобладают низкие содержания SiO<sub>2</sub>, не превышающие 0,11 мас. %. Корреляции Si с другими элементами, а также с температурой кристаллизации не наблюдаются, и поэтому контроль этого переменного содержания Si не понятен. На основе более 800 включений хромшпинелидов в алмазах из кимберлитов разных регионов (ЮАР, Ботсвана, Канада, Россия) были определены наиболее типичные для алмазной матрицы средние составы хромшпинелей (Соболев, 1971; Stachel, Harris, 2008) (мас. %): SiO<sub>2</sub> – 0,16; TiO<sub>2</sub> – 0,18; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6,82; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 64,6; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,19; MnO – 0,24; NiO – 0,1; MgO – 14,3; ZnO – 0,06.

Однако несмотря на то, что хромшпинелиды являются одними из самых распространённых включений в алмазах, данные по ним из разных алмазоносных регионов ограничены. Например, в алмазах ААП изучено всего 82 включения

хромшпинелида из алмазов, где помимо главных элементов были исследованы содержания  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{SiO}_2$  (Соболев и др., 1997; Квасница и др., 1993; Rubanova et al., 2009; Garanin et al., 2021). В россыпях Уральского региона изучено ещё меньше включений хромшпинелидов в алмазах – 13 кристаллов (Sobolev et al., 2019).

Типоморфизм состава хромшпинелидов алмазной ассоциации по элементам-примесям изучался весьма ограниченно. В конце прошлого века были установлены корреляционные взаимоотношения содержания  $\text{NiO}$  и  $\text{ZnO}$  в хромшпинелидах из алмазов различных месторождений Африки: хромшпинелиды склонны иметь положительную корреляцию между  $\text{FeO}$  и  $\text{ZnO}$  и отрицательную корреляцию  $\text{FeO}$ - $\text{NiO}$ . Так же отмечалось пониженное содержание  $\text{FeO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Ga}$  в хромшпинелидах из алмазов по сравнению с хромшпинелидами из концентрата тех же трубок (Griffin et al., 1989). Помимо этого авторы отмечают, что для каждой трубки, области составов хромшпинелидов из алмазов и хромшпинелидов из концентрата имеют небольшое перекрытие, но генетически не связаны. Так же стоит отметить, что во многих работах, в том числе в тех, что упоминались ранее, где изучался состав хромшпинелидов из алмазов помимо содержаний  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  были также исследованы  $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  и в некоторых случаях  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , но при этом авторами анализируются лишь содержания  $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$  и  $\text{TiO}_2$ .

Данные о содержании редких элементах в хромшпинелидах из алмазов до настоящего времени практически полностью отсутствовали. В работе (Taylor et al., 2003) приводятся в качестве фактуры содержания  $\text{Sc}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Zr}$  и  $\text{Nb}$  по нескольким включениям хромшпинелидов в алмазах трубок Мир и Удачная ЯАП без аналитических выводов. В работе (Griffin et al., 1993) измерялись концентрации  $\text{Ga}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Y}$  и  $\text{Zr}$ , но, как и в предыдущем случае, без аналитических выводов. Не ясно, с чем могли быть связаны эти решения, но благодаря этим работам, нам известно, что в хромшпинелидах из алмазов вышеописанные элементы могут присутствовать в значимых количествах.

## **ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В работе исследованы алмазы, содержащие включения хромшпинелидов, из кимберлитов Сибирского и Восточно-Европейского кратонов, хромшпинелиды из мантийных ксенолитов и «коровые» хромшпинелиды из алмазоносного участка бассейна реки Улахан-Курунг-Юрях Сибирского кратона.

### **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. Это весьма трудоемкий процесс, требующий множества дополнительных приспособлений, включающих наличие специальных зажимных цанг разного размера, нескольких устройств, фиксирующих выбранную по размеру кристалла цангу, а также наличие навыков работы с очень мелкими кристаллами алмаза.

Для исследования внутреннего строения, а также характера распределения примесей из алмазов была изготовлена 41 плоскопараллельная пластинка толщиной около 250 мкм, пришлифованные преимущественно по плоскости (110).

Извлеченные путем дробления 29 кристаллов алмаза включения, а также зерна хромшпинелидов из ксенолитов и россыпи были вставлены в алюминиевую обойму с эпоксидной смолой.

### **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 шлифованных кристаллов алмаза и хромшпинелидов, смонтированных в шашки, в отражённом и проходящем свете были сделаны на микроскопе Olympus BX51, совмещённом 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. Этим методом получают спектры поглощения вещества в инфракрасном диапазоне. Съёмка проводилась на ИК-Фурье спектрометре (FTIR) VERTEX 70 фирмы Bruker, оснащённым микроскопом HYPERION 2000. Параметры съёмки – апертура 50 мкм в диапазоне от 7500 до 750  $\text{см}^{-1}$  при разрешении 2  $\text{см}^{-1}$ . Спектры для получения количественных результатов были обработаны в программе OPUS 8. Всего было получено 263 спектра и снято 50 кристаллов алмаза, часть образцов была шлифована с формированием плоскопараллельной пластинки, другая часть имела хорошо сформированные не эродированные грани октаэдра (111) и шлифовке не подвергалась. Образцы перед съёмкой очищались ультразвуком и помещались в индиевые пластинки. Полученный анализ образца представляет собой спектр поглощения в координатах волновое число ( $\text{см}^{-1}$ ) – интенсивность поглощения ( $\text{см}^{-1}$ ), которые соответственно определяют тип дефекта/примеси в веществе, т.к. каждому дефекту соответствует свой набор спектральных линий и интенсивность поглощения определённой спектральной линии, т.е. количество дефекта/примеси. Уравнение Бугера-Ламберта связывает интенсивность прошедшего через вещество излучения, интенсивность падающего излучения и величины, характеризующие поглощающее вещество согласно формуле:

$J=J_0*\exp(-\alpha t)$ , где  $J$  – интенсивность прошедшего света,  $J_0$  – интенсивность входящего света,  $t$  – толщина образца,  $e=2,718$ ,  $\alpha$  – линейный коэффициент

поглощения:  $\alpha = \ln(J_0/J) \cdot (1/t)$  (Бокий и др., 1986). Затем в программе OPUS был произведён пересчёт спектра и получение количественных (ppm) значений содержания дефекта/примеси.

По дефектно-примесному составу кристаллы алмаза разделяют на 2 типа: тип I – кристаллы с примесью азота (Kaiser et al., 1959) и тип II – кристаллы с примесью бора либо же условно беспримесные. Тип I же подразделяется ещё на 2 подтипа: Ia – агрегированные атомы азота в форме A и B1 дефектов и Ib – одиночные атомы азота в форме C дефекта (Robertson et al., 1934; Smith et al., 1959; Кросс, 1961).

Все исследованные алмазы относились к типу Ia. Были получены данные о количественном содержании дефектов A, B1, а также степень агрегации азота – B%. Степень агрегации – это отношение A дефекта к B1 дефекту и несёт важную информацию о температурном режиме, в котором прибывал алмаз и времени нахождения в мантии.

Дефект A представляет собой 2 соседствующих атома азота. Проявляется в ИК спектрах поглощения в виде системы линий: 1215, 1100 и 484  $\text{см}^{-1}$  с максимумом в 1282  $\text{см}^{-1}$ . Количество A дефекта вычисляется по пику 1282  $\text{см}^{-1}$  с максимальной интенсивностью поглощения линии спектра, по формуле:

$(A) = 16,5 \cdot \mu_A(1282 \text{ см}^{-1})$ , где (A) – концентрация азота в ppm,  $\mu_A$  – коэффициент поглощения в  $\text{см}^{-1}$  (Boyd et al, 1994).

Дефект типа B1 состоит из 4 атомов азота собранных вокруг вакансии в форме тетраэдра. Проявляется в ИК спектрах поглощения в виде системы линий: пик 1332  $\text{см}^{-1}$ , плато 1320-1230  $\text{см}^{-1}$ , пик 1175  $\text{см}^{-1}$ . Количество дефекта B1 вычисляется по пику 1175  $\text{см}^{-1}$  с максимальной интенсивностью поглощения линии спектра, по формуле:

$(B_1) = 28,6 \cdot \mu_{B_1}(1175 \text{ см}^{-1})$ , где (B<sub>1</sub>) – концентрация азота в ppm,  $\mu_{B_1}$  – коэффициент поглощения в  $\text{см}^{-1}$  (Boyd et al, 1995).

Дефект типа C представлен нейтральным единичным атомом азота. Проявляется в ИК спектрах поглощения в виде системы линий: 1344, 1130, 1100  $\text{см}^{-1}$ . Для оценки концентрации азота C типа используется коэффициент поглощения самой интенсивной линии 1130  $\text{см}^{-1}$ , согласно формуле:

$(C)=25*\mu_C(1130\text{ см}^{-1})$ , где  $(C)$  – концентрация азота в ppm,  $\mu_{V1}$  – коэффициент поглощения в  $\text{см}^{-1}$  (Clark, Davey, 1984).

### 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 в ряде случаев, 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.

Исследуемый образец в условиях высокого вакуума сканируется сфокусированным электронным пучком. В зависимости от алгоритма регистрирования сигнала различают несколько режимов работы сканирующего электронного микроскопа: режим отражённых электронов, режим вторичных электронов и др. Разработанные методики позволяют исследовать не только свойства поверхности образца, но и получать и визуализировать информацию о свойствах подповерхностных структур.

Сигналами для получения изображения в сканирующем электронном микроскопе служат вторичные и отраженные электроны. Первичные электроны, падающие на образец, взаимодействуют с электронами внешних оболочек атомов мишени, передавая им часть своей энергии. Происходит ионизация атомов образца, а высвобождающиеся в этом случае электроны могут покинуть образец и быть выявлены в виде вторичных электронов. Они характеризуются малой энергией (до 50 эВ) и поэтому выходят из участков образца очень близких к поверхности. Глубина слоя, дающего вторичные электроны, составляет 1 – 10 нм. В пределах этого слоя рассеивание электронов пренебрежимо мало, и поэтому при получении изображений во вторичных электронах разрешающая способность определяется, прежде всего, диаметром первичного электронного зонда. Вторичные электроны

обеспечивают максимальную, в сравнении с другими сигналами, разрешающую способность порядка 5-10 нм. Поэтому в растровой сканирующей электронной микроскопии они являются главным источником информации для получения изображения поверхности объекта. Количество образующихся вторичных электронов слабо зависит от атомного номера элемента мишени. Основным параметром, определяющим выход вторичных электронов, является угол падения пучка первичных электронов на поверхность мишени. Таким образом, вариации наклона микроучастков поверхности вызывают резко выраженные изменения в выходе вторичных электронов. Этот эффект используется для получения информации о топографии поверхности (Рид, 2008; Миронов, 2009).

#### **2.2.4. Рентгеноспектральный микроанализ**

Рентгеноспектральный микроанализ или микрозондовый анализ (EPMA) – метод, позволяющий получить данные об элементном составе минерала. Суть метода заключается в регистрации рентгеновского излучения - рентгеновских спектров изучаемого образца, которое он излучает при воздействии на него электронным пучком, и сравнение их интенсивности с интенсивностями линий образца-эталоны. метод, позволяющий получить данные об элементном составе минерала. Этот метод является одним из основных методов определения состава минеральных включений в алмазах – объектов, характеризующихся исключительно малыми размерами: от 0,05 до 0,3 мм (Павлова, 2008).

Перед собственно съёмкой на приборе алмазы с включениями хромшпинелидов, были обработаны на шлифовальном круге с целью выведения включений поверхность. Затем полученные пластинки алмаза были очищены от механических загрязнений в ультразвуковой ванночке. Часть обколотых алмазов, в которых включения хромшпинелидов выходили на сколах на поверхность, были раздроблены в победитовой ступке с последующим извлечением включений. В обоих случаях подготовленные алмазы и включения хромшпинелидов монтировались в алюминиевую обойму и фиксировались в ней с применением эпоксидной смолы, затем шлифовались на тонких специальных абразивных

порошках и полировались на алмазной пасте. Затем производилось покрытие шашек токопроводящим материалом, нами было использовано золотое напыление (Павлова, 2008). Съёмка проводилась с помощью микроанализаторов с электронным зондом Camebax-micro фирмы Camesa 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, а также Mg. Эталоны, использовавшиеся при съёмке этих элементов: природный хромит “79-62” для Al, Cr, Mg, Fe; синтетический  $V_2O_3$  для V; для Ti – ильменит “GF-55”; для Zn –  $ZnFe_2O_4$  (франклинит); для Ni –  $NiFe_2O_4$  (треворит); для Mn – марганцевый гранат “Mn-IGEM”. Предел обнаружения для MnO составляет 0,03 мас. %, для ZnO 0,05 мас. %, для  $TiO_2$  0,02 мас. %, для MgO 0,03 мас. %, для  $SiO_2$  мас. %, для NiO 0,025 мас. %, для  $V_2O_3$  0,03 мас. %.

Предварительно микропримеси в этих минералах определены на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 (TESCAN, Чехия).

### **2.2.5. Катодолюминесценция**

Изображения в катодолюминесцентном излучении образуются при возбуждении вещества потоками электронов, ускоренных во внешнем электрическом поле. Электроны, бомбардирующие поверхность образца, вызывают эмиссию видимого света, переходя на валентные уровни, которые в обычном состоянии являются незаполненными (Спивак и др., 1986).

Локализация энергетических уровней на разных подуровнях между валентной зоной и зоной проводимости возрастает с ростом количества дефектов кристаллической решетки. Интенсивность катодолюминесценции в некоторых случаях сильно связана с плотностью дефектов.

Полученные изображения позволяют выделить ростовые зоны в кристалле алмаза.

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:  $690\text{ см}^{-1}$  and  $730\text{ см}^{-1}$ .

### **2.2.7. Лазерная абляция с индуктивно связанной плазмой**

Содержание редких элементов в составе хромшпинелидов были определены 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 газ-носителя использовался гелий. Аргон использовался в качестве добавочного газа и смешивался с газом-носителем через T-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-Gemос.

Содержание элементов-примесей в 50 включениях хромшпинелидов также определялось на установке лазерной абляции Analyte Excite с ячейкой HeEx 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<sup>2</sup>, 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.

Методом лазерной абляции значимые содержания элементов в изученных хромшпинелидах были получены только по следующим элементам: Na, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Nb, Ta. Средние пределы обнаружения (99% достоверность) составляют (в ppm): Na = 8.58; Si = 149; Ca = 82; Sc = 0.207; Ti = 5.79; V = 0.294; Mn = 0.53; Co = 0.171; Ni = 7.32; Cu = 1.28; Zn = 1.75; Ga = 0.248; Ge = 0.644; Nb = 0.020; Ta = 0.014. Концентрации остальных элементов были ниже предела обнаружения более чем в 2/3 случаев.

### ГЛАВА 3 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ

Объектами данной работы являются включения хромшпинелидов в алмазах из 8 кимберлитовых трубок двух алмазоносных районов ЯАП (Мало-Ботуобинского, к которому относятся тр. Интернациональная, Мир и 23-го партсъезда КПСС; и Далдыно-Алакитского, к которому приурочены тр. Удачная, Комсомольская, Сытыканская, Айхал и Юбилейная) и 3 кимберлитовые трубки Золотицкого поля ААП (тр. Ломоносовская, Пионерская и Карпинского-1). Для сравнения изучены хромшпинелиды из ксенолитов тр. Удачная и алмазоносных аллювиальных отложений Мало-Ботуобинского района (участок Улахан Курунг-Юрях).

Якутская алмазоносная провинция располагается на северо-востоке Сибирского кратона, на территории Анабарской и Непско-Ботуобинской антеклизы и Тунгусской и Вилюйской синеклизы и Сюгджерской седловины (рисунок 1) (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. В неогене и палеогене формировались только делювий и аллювий. Четвертичные отложения занимают обширные области и разнообразны по своим типам. Мощность осадочного чехла в середине провинции по геофизическим данным достигает 3—4 км. Осадочные породы палеозоя прорваны интрузиями траппов и кимберлитов. Трапповый магматизм связывают с пермским периодом и нижним триасом. Кимберлитовые тела обнаружены в основном за пределами максимального развития траппов. Предполагаются три периода внедрения кимберлитов: триасовый, средне-верхнетриасовый и верхнеюрский-

нижнемеловой.

В пределах провинции выделяют следующие алмазоносные области: Ботуобинскую, Далдыно-Алакитскую, Марха-Тюнгинскую, Анабарскую и Предверхоаянскую, в которых имеется восемь районов кимберлитовых полей, территориально совпадающих со структурами второго порядка – антеклизмами, синеклизмами и передовыми прогибами. Внутри областей наблюдается различное расположение тел кимберлитов – линейное, кустовое, одиночное. В пределах провинции известно много кимберлитовых тел. В центральной части провинции все известные кимберлитовые тела относятся к взрывному типу; по периферии наряду с трубками широко развиты интрузивные кимберлиты, форма которых в плане более вытянутая и часто дайкообразная. В Мало-Ботуобинском районе известны кимберлитовые трубки Мир, Интернациональная, 23 партсъезда КПСС, Спутник и др. Форма трубок в плане овальная, вытянутая по длинной оси в северо-западном направлении.

В Далдыно-Алакитском районе трубки вытянуты в плане и имеют субширотное простирание длинных осей. В районе известно несколько трубок, в том числе Удачная, Айхал, Комсомольская, Юбилейная, Сытыканская и др. Трубка Удачная состоит из двух сопряженных трубок (Удачная-Западная и Удачная-Восточная) и наклонена к юго-западу.

В течение геологической истории Якутской алмазоносной провинции формировались неоднократно россыпи. В четвертичную эпоху в пределах каждой области образовывались многочисленные россыпи различной перспективности и отличающиеся рядом особенностей. Для Ботуобинской области наиболее характерны долинные россыпи. Россыпи алмазов приурочены к песчано-гравийным отложениям, концентрируются в 20-30 км от коренных источников. В Далдыно-Алакитской области коренные источники Перекрыты траппами и почти не эродированы. Россыпи локализуются в непосредственной близости от выходов кимберлитов и представлены делювиальными 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](https://stav-geo.ru/_ld/122/36368196.jpg)

Типичными формами залегания кимберлитовых пород является разнообразие по конфигурации трубчатые тела, так называемые трубки взрыва или диатремы. Их размеры в плане на уровне современного среза изменяются от 0,01 до 140 га. Убывание площади поперечного сечения с глубиной наблюдается у всех трубок без исключения. Кимберлитовая трубка кимберлитовыми брекчиями (собственно кимберлит), а также ксенолитами.

Кимберлитовые трубки имеют конусообразное строение и глобально сложены кимберлитом, состоящим из оливина, пироба, флогопита, пироксена, серпентина, хромшпинелидов, ильменита и других минералов, а также брекчиями вмещающих пород с ксенолитами мантийных пород. Кроме этого, тело кимберлита часто пронизывают кимберлитовые дайки и силлы. Верхняя часть трубки взрыва

обычно заполнена туфами вулканического конуса, образованными в процессе подъёма кимберлитового расплава.

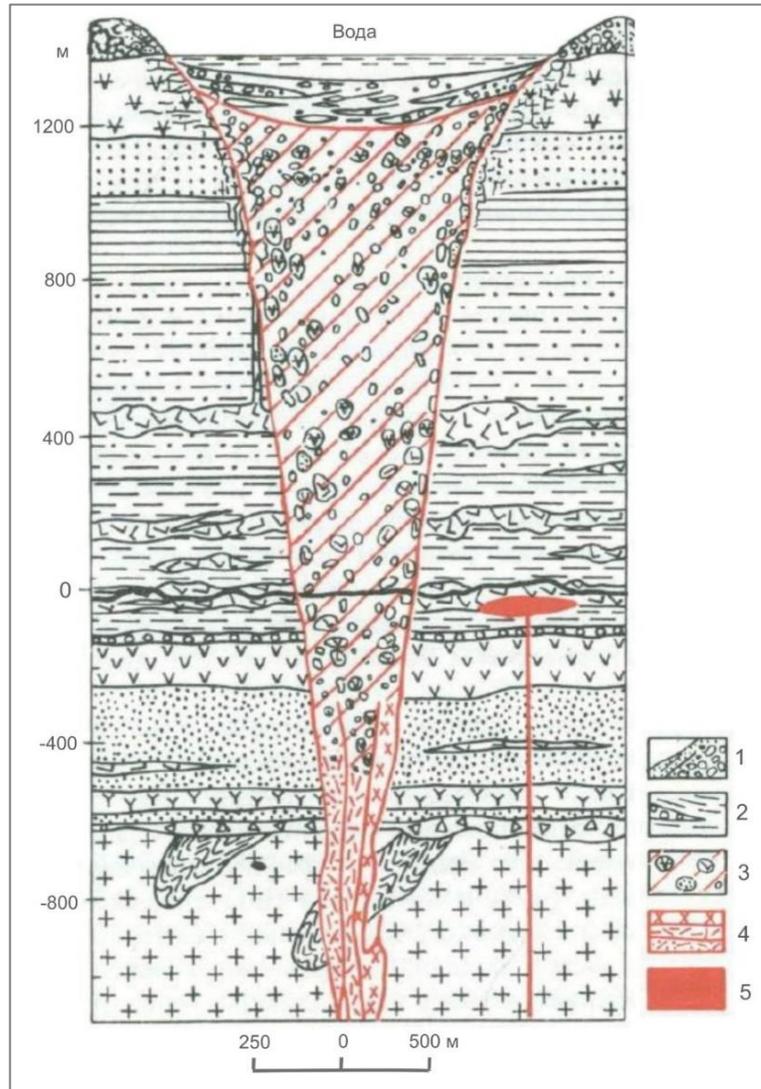


Рисунок 2. Структурно-петрографическая модель кимберлитовой трубки (Милашев, 1984). 1 – туфы вулканического конуса; 2 – тонко- и грубозернистые осадки; 3 – агломераты и туфы; 4 – интрузивные брекчии; 5 – интрузивные кимберлиты (силлы).

U-Pb датирование по цирконам, показало, что все эти трубки относятся к палеозойскому этапу внедрения кимберлитов (Агашев и др., 2019). Кимберлиты Далдынского и Алакит-Мархинского алмазоносных полей относятся к позднедевонскому-раннекарбонному этапу (370-344 млн лет) (Kinny et al., 1997): тр. Сытыканская - 345 млн. лет, тр. Юбилейная - 358 млн. лет (Дэвис и др., 1980; Мальковец и др., 2017); возраст трубок Айхал и Комсомольская были определены

Rb-Sr датированием и составляют 398 млн. лет и 367 млн. лет соответственно (Брахфогель и др, 1997). Трубка же Удачная имеет более сложное строение и состоит из двух частей и соответственно имеет два возраста: возраст формирования трубки Удачная-Восточная на основании U-Pb датирования перовскитов из кимберлитов 361 млн. лет; – Удачная-Западная 346 млн. лет (Kinny et al., 1997, Mass et al., 2005, Рагозин и др., 2014). Для Мало-Ботубинского района возраст определялся U-Pb методом по цирконам и для тр. Мир, Интернациональная, 23-го партсъезда он равен соответственно 358, 433 и 368 млн. лет (Колганов и др, 2008).

Упомянутые ранее прорывают раннепалеозойские породы чехла и несогласно перекрываются терригенно-осадочными породами среднего карбона - верхней перми (Шацкий и др., 2005) (рисунок 2).

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-нижнекарбонный (410-340 млн. лет). В пределах провинции выделяют несколько магматических полей: Золотицкое кимберлитовое поле, Кепинское и Верхотинское кимберлит-оливин мелилититовые поля, Турьинское базальтовое поле, Ижмозерское пикрит-оливин мелилититовое поле и Мельское кимберлит-карбонатитовое поле (Богатиков и др., 1999; Ларионова и др., 2016).

Промышленно-алмазоносные трубки сосредоточены в двух полях: 1) Золотицкое поле, где находится месторождение им. М. В. Ломоносова (трубки Архангельская, им. Карпинского 1, им. Карпинского 2, Пионерская, Поморская, Ломоносовская) и 2) Верхотинском с единственной кимберлитовой трубкой им. В. Гриба (Богатиков и др., 1999; Agasheva et al., 2023).

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. Верхотинское поле располагается к северо-востоку от Золотицкого поля и в структурном плане локализуется в пределах Чубальского прогиба кристаллического фундамента (Agasheva, 2021).

Большинство кимберлитовых трубок ААП перекрываются осадочными отложениями карбона, перми и четвертичного периода, мощность которых варьирует от 20 до 80 метров.

## **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 аллювиальных россыпей в изученной коллекции имеют округлую форму и представлены бесцветными кристаллами додекаэдроидов с резорбированной поверхностью (рисунок 3 а, б). По морфологии, изученные в данной работе алмазы из ААП полностью отражают общую кристалломорфологическую 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 (рисунок 3 в, г). Причем все они искажены – заметны уплощения и удлинения по тройным, четверным и двойным осям симметрии индивидов. Всего три алмаза были представлены кристаллами комбинационной формы (сочетание октаэдра и додекаэдроида). На поверхности кристаллов отмечены сноповидная и занозистая штриховки, блочность, каплевидные холмики, шагрень.

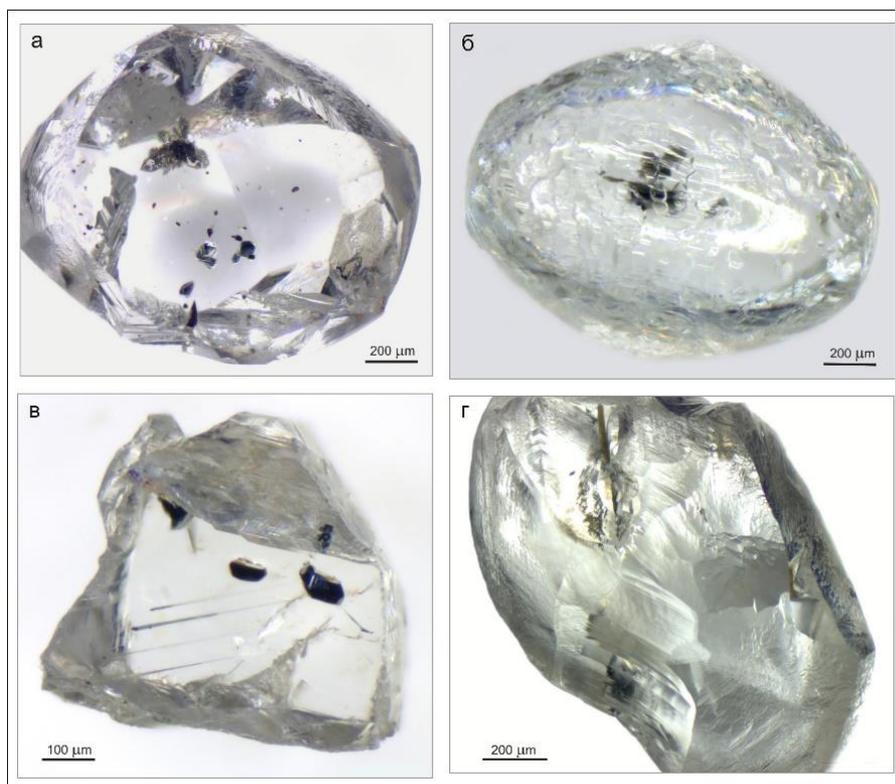


Рисунок 3 Кристаллы алмаза с включениями хромшпинелидов: (а, б) – россыпи северо-востока Сибирского кратона (обр. Исток-205 и Ан-42); (в, г) – Архангельская алмазоносная провинция (тр. Ломоносовская: обр. Л-57 и Л-5).

Алмазы из изученных кимберлитовых трубок ЯАП преимущественно представлены кристаллами октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов, в редких случаях форма меняется до псевдоромбодэкаэдрических, когда образуются кривогранные поверхности. В большинстве случаев это хорошо ограненные плоскогранные, острорёберные октаэдры (рисунок 4 а, в, е, ж). На гранях октаэдра встречаются ямки травления треугольной формы. В ряде случаев ребра притупляются развитием сноповидной, занозистой или параллельной штриховками (рисунок. 4 б, д, з, и, к, м).

Находящиеся внутри алмазов кристаллы хромшпинелидов не имеют собственной огранки и представлены исключительно плоскогранными многогранниками – хорошо образованными октаэдрами, кубоктаэдрами и куб-ромбододекаэдр-октаэдрами. Поверхность граней этих включений несколько шероховатая. Изометричные индивиды отмечены среди ультрамикрористаллов хромшпинелида.

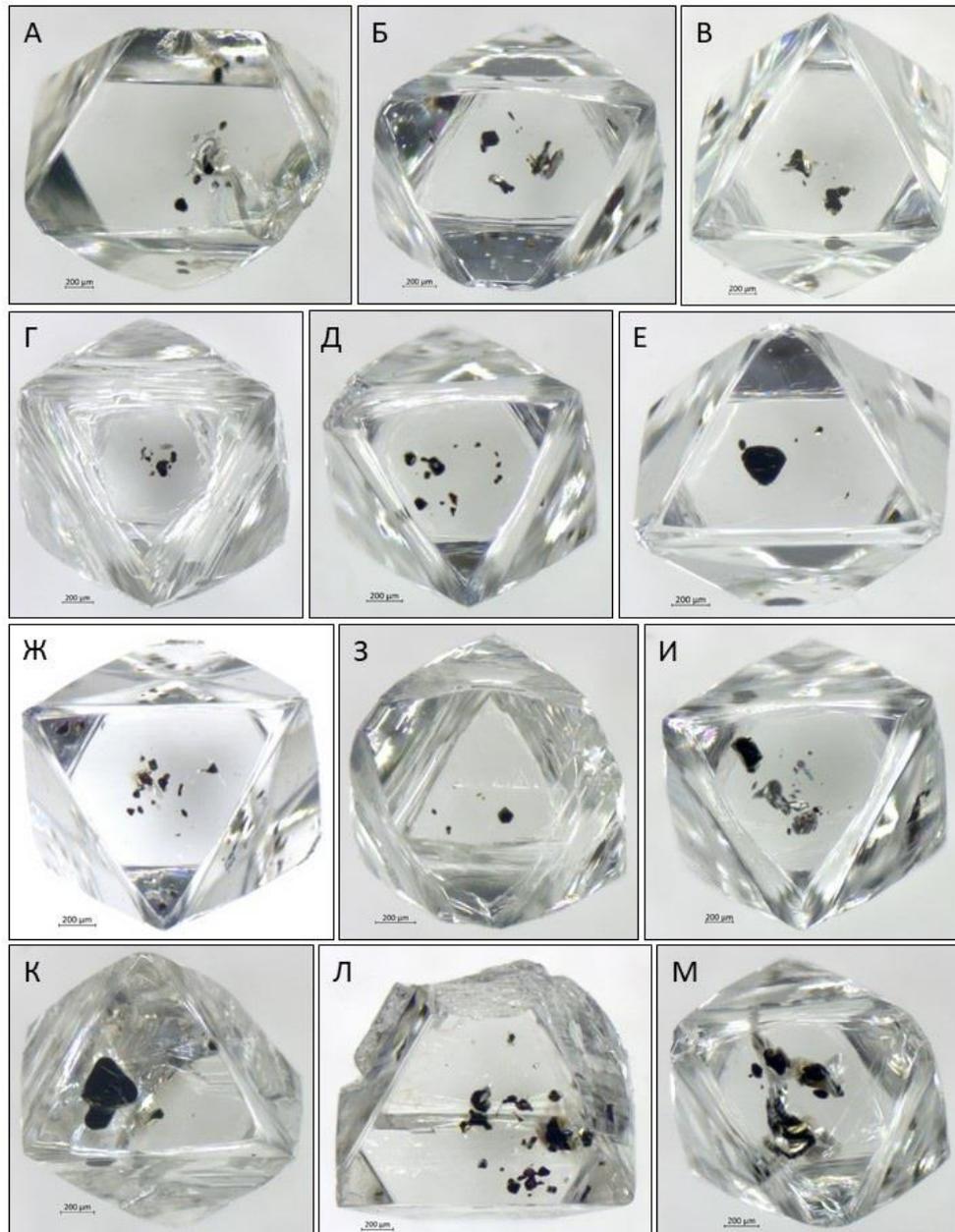


Рисунок 4. Кристаллы алмазов с множественными включениями хромшпинелидов: А – октаэдр, (обр. Инс-170); Б – кристалл переходной формы с занозистой штриховкой (обр. Инс-138); В – октаэдр (обр. Мтс-24); Г – кристалл переходной формы со сноповидной штриховкой на ромбододекаэдрических поверхностях (обр. Инс-61); Д – кристалл переходной формы со сноповидной штриховкой (обр. Инс-173); Е – октаэдр (обр. Удс-36); Ж – октаэдр (обр. Мтс-17); З – кристалл переходной формы со сноповидной штриховкой (обр. Мтс-32); И – октаэдр со сноповидной штриховкой (обр. Инс-136); К – октаэдр со сноповидной штриховкой (обр. Инс-147); Л – октаэдр со сколом (обр. Инс-156); М – кристалл переходной формы со сноповидной штриховкой (обр. Инс-174).

#### 4.1.2. Хромшпинелиды из кимберлитов

Понятие «кимберлитовые» хромшпинелиды подразумевает все зерна хромшпинелидов из разных типов мантийных ксенолитов. Ксенолиты ультраосновных пород с хромшпинелидами в кимберлитах – это представители деплетированных зернистых пород «холодной» верхней мантии, обладающих повышенными и высокими значениями хромистости (Соболев, 1974; Dawson, 1980; Похиленко, 1990; Похиленко и др. 1993). Наиболее характерны для гарцбургит-дунитов, редко встречаются в лерцолитах. Хромшпинелиды из кимберлитов обладают высокой степенью идиоморфизма, что делает их востребованными для морфологических исследований и получения информации, в первую очередь, об условиях глубинного морфогенеза, а во вторую – по идентификации шлиховых ореолов при решении задач прогнозирования (Квасница и др., 1988). Особенности морфологии хромшпинелидов из кимберлитов достаточно хорошо освещены в литературе (Ровша, Илупин, 1970; Филиппов, Захарова, 1973; Квасница и др., 1988). 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-Ботубинского алмазоносного района (участок Улахан-Курунг-Юряхский). Различают четыре основные морфологические группы хромшпинелидов из кимберлитов: октаэдры, октаэдры с сильно закругленными шероховатыми вершинами и ребрами, сложно ограненные кристаллы и ксеноморфные выделения (Квасница и др., 1988).

Типичные из исследованных в данной работе кристаллы из указанных выше трубок показаны на рисунке 5. Для них характерны вицинальные 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 5 г-з). Некорродированные кристаллы могли сохраниться только в ксенолитах глубинных пород и высвободились на поздних этапах формирования кимберлитовых тел (Афанасьев и др., 2010).

Коррозия в первую очередь затрагивает вицинальные образования на ребрах и вершинах октаэдра, постепенно распространяясь от периферии к центру граней. При этом поверхность граней октаэдра на начальной стадии процесса коррозии остается гладкой и блестящей, и лишь на последующих стадиях корродирования поверхность тускнеет за счет микроаверн (Афанасьев, 2010).

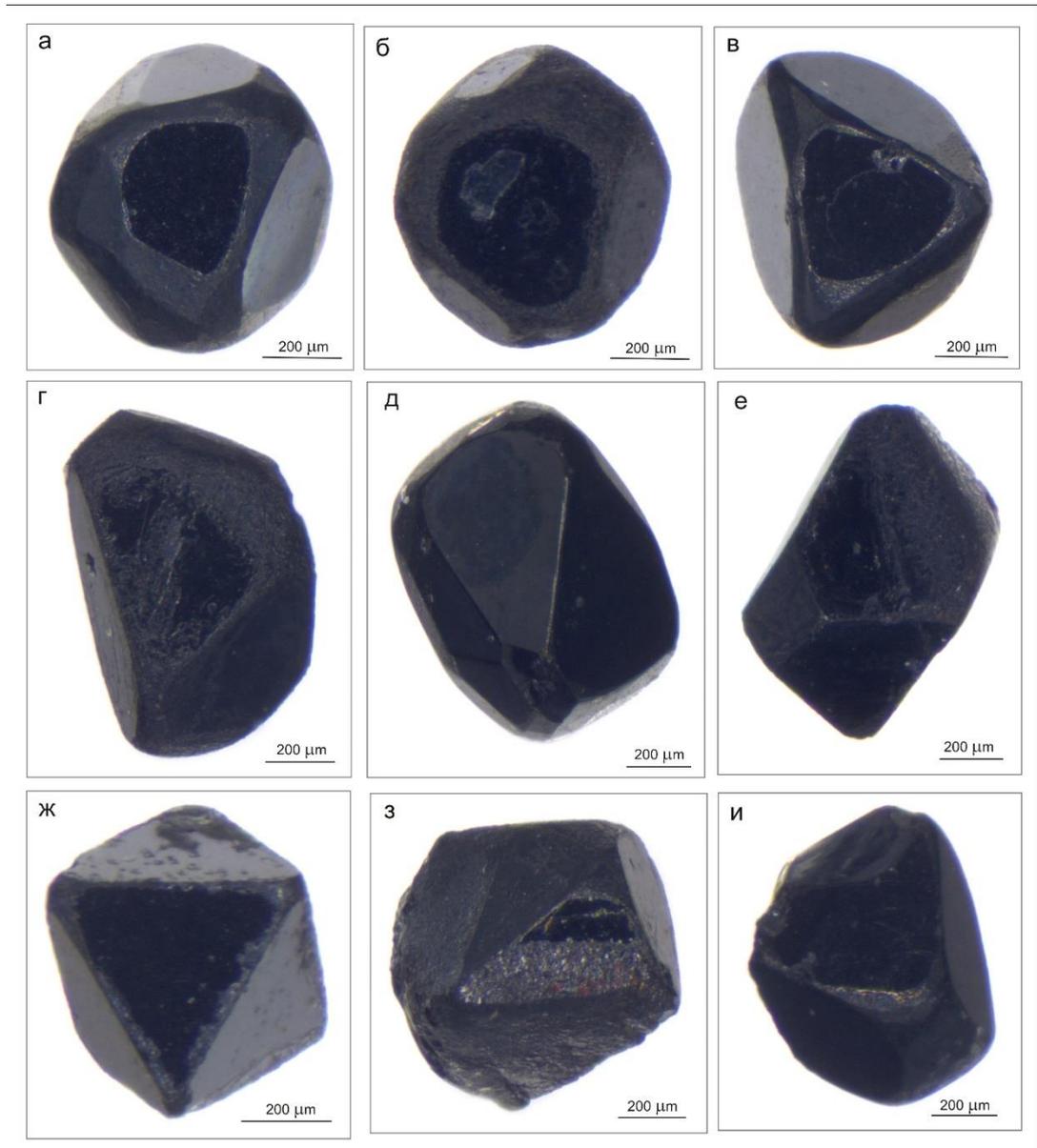


Рисунок 5. Кристаллы хромшпинелидов из кимберлитовых трубок Мир и Интернациональная: (а, б, з, и) – октаэдры в комбинации с  $\{110\}$  и мелкими гранями других простых форм; (в – е) – октаэдры с мелкими гранями разных простых форм на ребрах и вершинах кристалла; (ж) – острорёберный октаэдр с развитием коррозии на ребрах.

Для хромшпинелидов курунгского типа характерен ярко выраженный октаэдрический габитус (рисунок 6). Преобладают осторёберные, островершинные формы, реже встречаются различные притупления ребер в виде цилиндрических поверхностей и продольной штриховки, образованной торцами слоев роста по октаэдру. Вицинальные участки, притупляющие ребра и вершины октаэдров, на кристаллах курунгского типа совершенно отсутствуют (Афанасьев и др., 2010). Для них характерен скелетный и полицентрический механизмы роста, в связи с чем грани имеют слоистое строение; слои роста вблизи ребер октаэдра торцами могут формировать штриховку, в отдельных случаях наблюдается расщепление вершин октаэдра (рисунок 6 а, в).

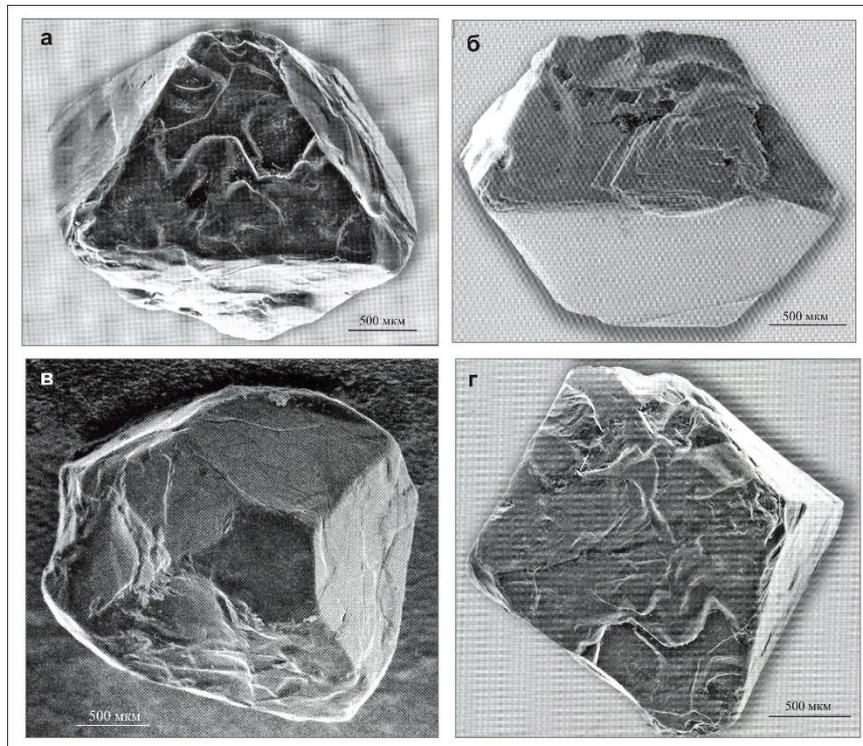


Рисунок 6. Типичная морфология кристаллов хромшпинелидов «курунгского» типа. Фотографии кристаллов заимствованы из (Афанасьев и др., 2010).

#### 4.2. Расположение включений хромшпинелидов в кристалле алмаза-матрицы

Известно, что внешняя морфология кристаллов отражает только последние этапы роста кристаллов и для алмаза часто определяется процессами растворения

(Орлов, 1984). Внутреннее строение, выраженное в различном распределении структурных дефектов по зонам и секторам роста, напротив фиксирует отдельные этапы эволюции кристаллов. Проведенные в данной работе исследования алмазов, содержащих кристаллы хромшпинелидов, показали в большинстве случаев приуроченность этих включений к одной ростовой зоне кристалла-матрицы (рисунок 7 и 8). Этот факт отражен в статье (Логвинова и др., 2021).

Включения хромшпинелидов в алмазах имеют различный морфологический облик: от изометричных до продолговатых включений, иногда достигающих 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 части большими скоплениями, однако встречаются и одиночные включения.

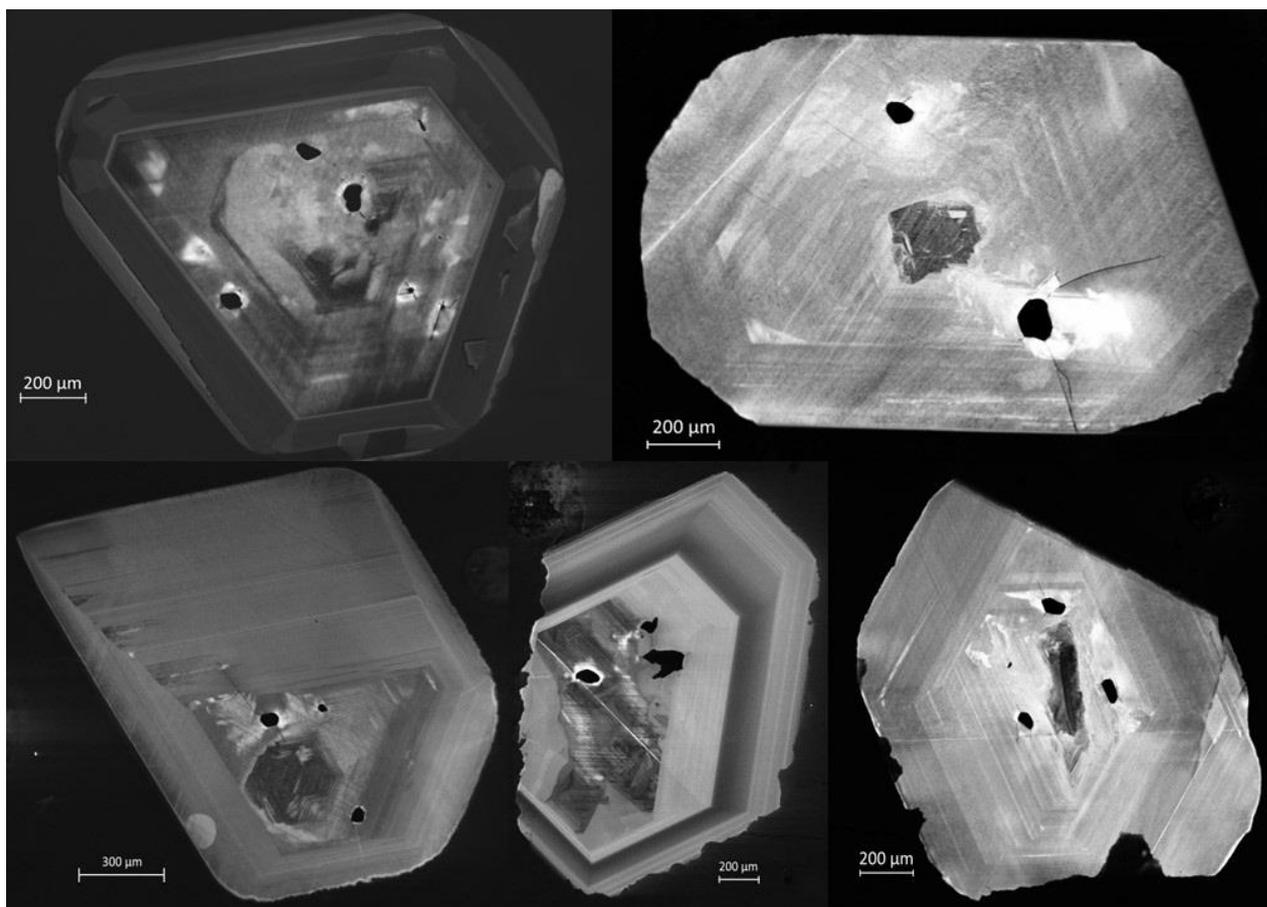


Рисунок 7. КЛ изображения алмазов (ЯАП) с включениями хромшпинелидов, приуроченными к одной ростовой зоне.

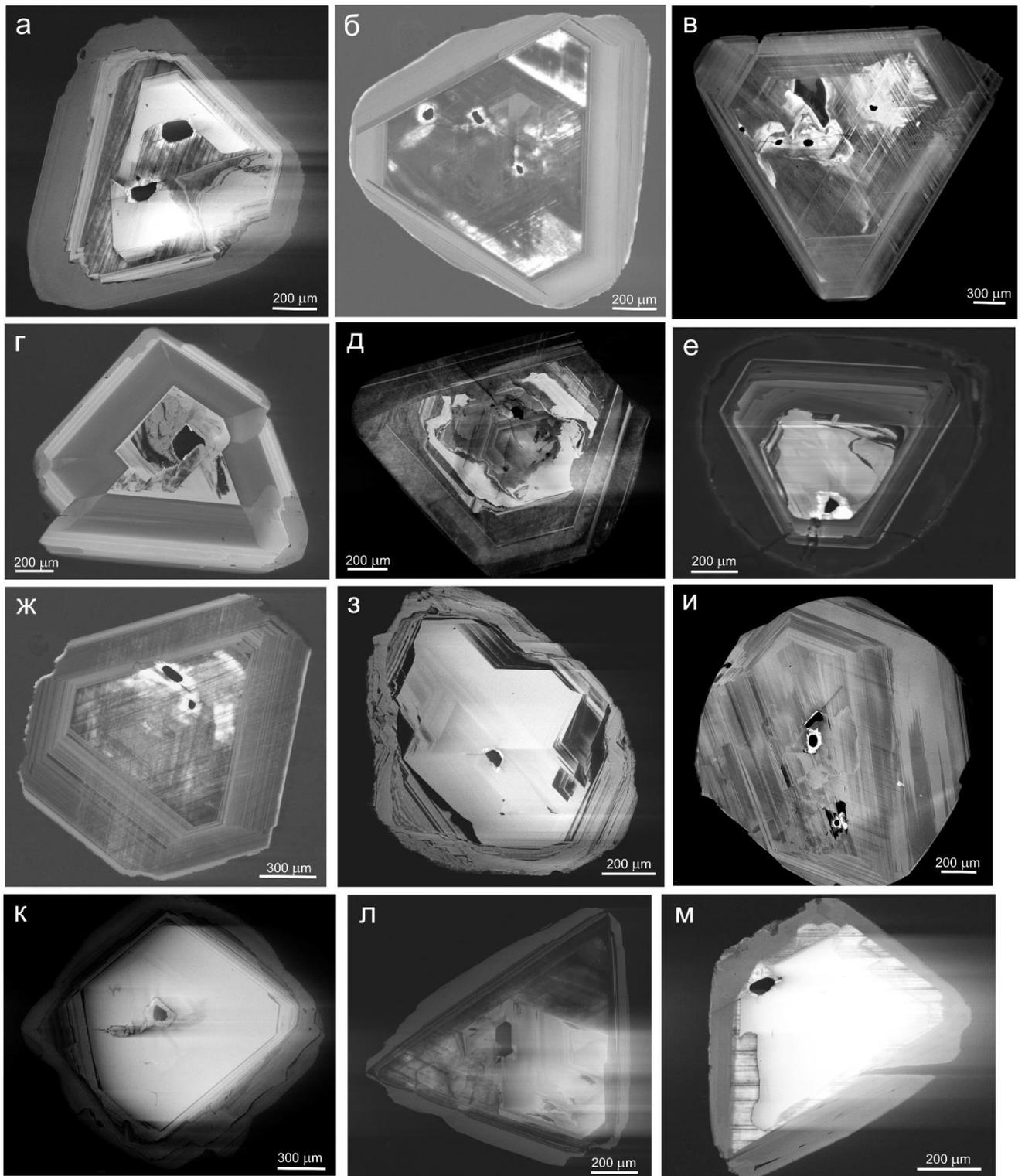


Рисунок 8. КЛ изображения алмазов с включениями хромшпинелидов: (а, м) – тр. Айхал (ЯАП); (б-д, ж, л) – тр. Интернациональная (ЯАП); е – тр. Комсомольская (ЯАП); (з, к) – тр. Снэп Лэйк (Канада); и – тр. Пионерская (ААП).

При своем росте кристаллы могут проявлять удивительное свойство – по-разному взаимодействовать с посторонними частицами, избирательно отталкивая растущими гранями одни из них и поглощая (всесторонне обрастая) другие. Если захват осуществлялся периодически, то включения располагаются в кристалле зонально, а катодолюминесценция позволяет выявить анатомию кристалла. Растущий минерал захватывает включения разными элементами – в одних случаях всей поверхностью всех граней, в иных же – только некоторыми из граней или только одной из развитых в кристалле кристаллографических форм. В других случаях включения захватываются не гранями, а ребрами, что объясняется особенностями силового поля вдоль ребер (Кулик, 2024). Это является одной из причин трудности в определении взаимной ориентировки включения и минерала-матрицы. Как показали исследования прошлых лет, не обнаружено ни одного включения магнезиохромита в алмазе, ориентировка которого отвечала бы эпитаксиальному критерию (Нойзер и др., 2015). Только отдельные включения в трех алмазах демонстрировали ориентировку, близкую к закономерной (Соболев и др., 2020).

Такая приуроченность включений хромшпинелидов к центральной зоне алмаза-матрицы является типичной для разных регионов. Для сравнения на рисунке 8 показаны кристаллы алмаза из трех алмазоносных провинций: Якутской, Архангельской и Канады.

### **4.3. Парагенетические ассоциации хромшпинелидов в алмазе**

Наряду с включениями хромшпинелидов в кристаллах алмаза также были встречены включения оливина, пирропа, клинопироксена, флогопита и др. Включения оливина являются типичными включениями для ультраосновного парагенезиса в ассоциации с хромшпинелидами (Meyer, Boyd, 1972; Соболев и др., 1974; Harris et al., 1992).

Включения оливина были встречены в 84 кристаллах алмаза с включениями хромшпинелидов. Включения оливина обычно прозрачны, изометричного облика, иногда образуют срастания с хромшпинелидами (рисунок 9). Включения пирропа

являются более редкими, имеют окраску от слабо- до насыщенного лилово-розового, часто имеют октаэдрическую форму (рисунок 9 а).

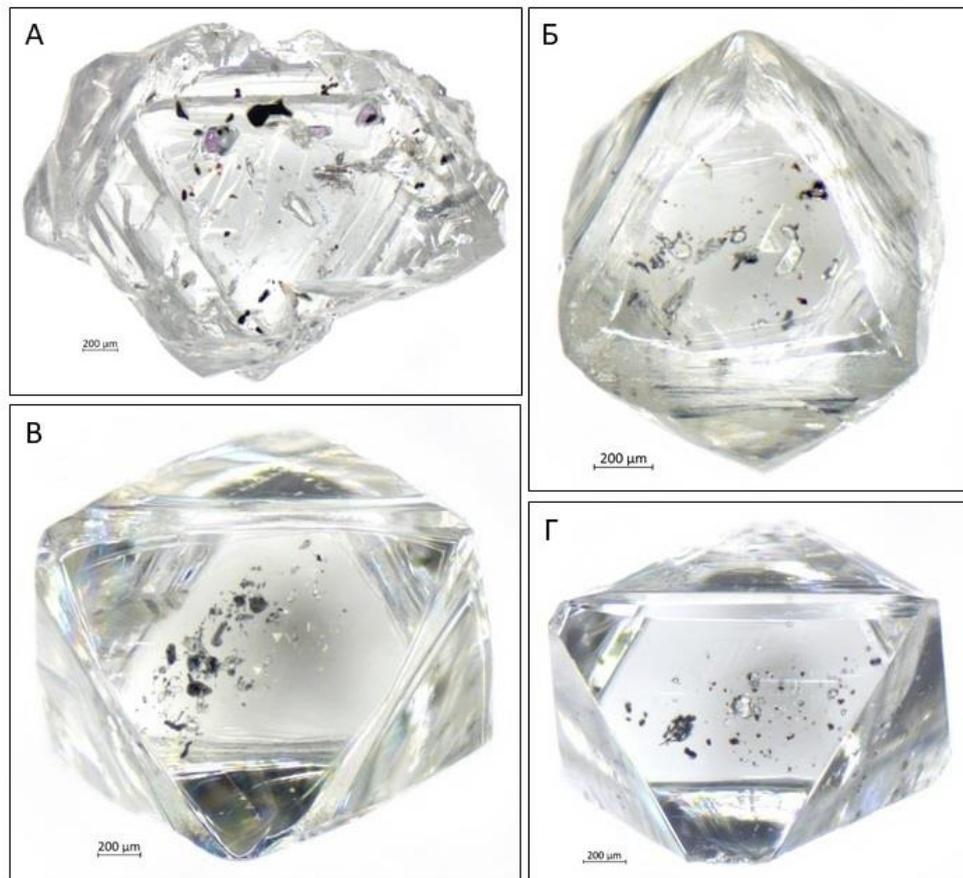


Рисунок 9. Кристаллы алмаза с множественными включениями хромшпинелидов (а-г), оливина (а-г) и пиропы (а).

В двух образцах алмаза с множественными темноцветными включениями (Kms-84 и Mts-31) в сростании 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) (рисунок 10). А хромшпинелид, ассоциирующий с ним, существенно отличается по составу от типичных магнезиохромитов, включенных в алмазы (Соболев, 1974; Griffin et al., 1993), характеризующихся содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , превышающим 60 – 62 мас. %.

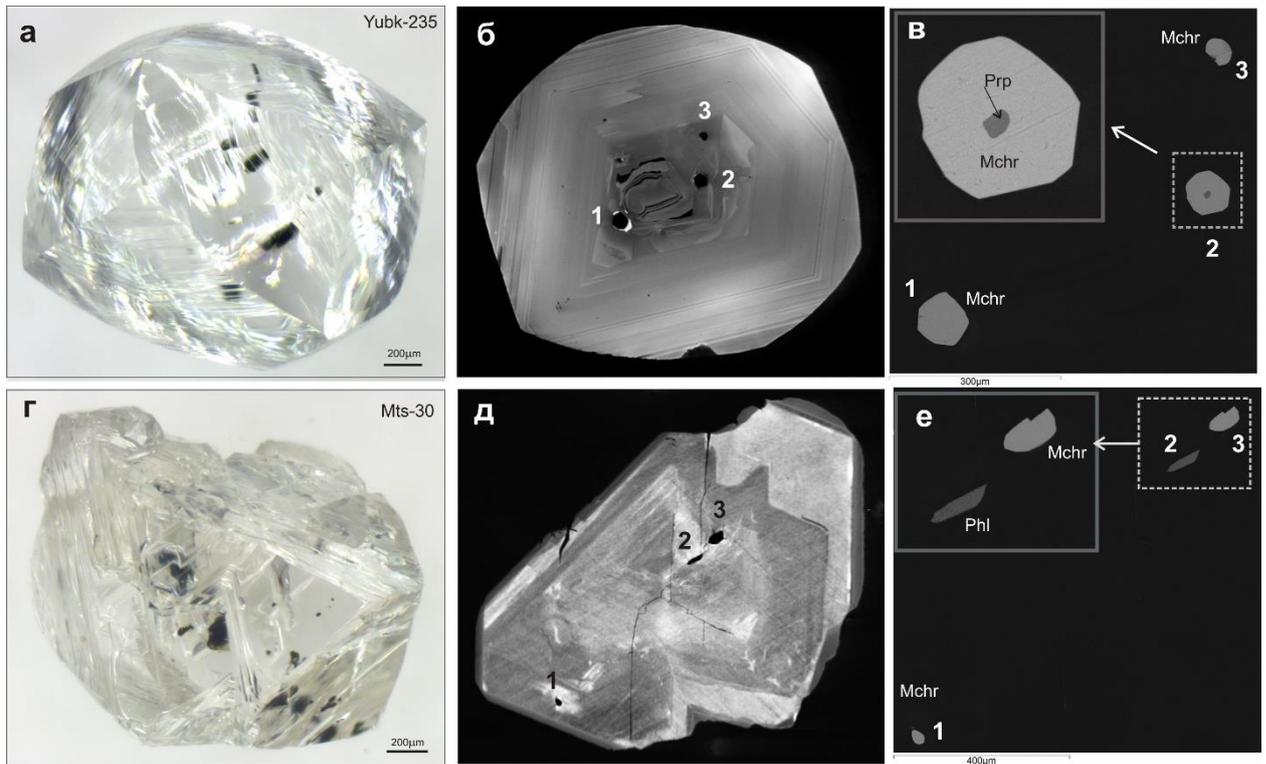


Рисунок 10. Общий вид двух кристаллов алмаза из кимберлитовых трубок Юбилейная (Yubk-235) и Мир (Mts-30) перед шлифованием (а, г); (б, д) - КЛ изображения тех же алмазов с номерами пришлифованных включений, положение пришлифованных включений в каждом алмазе. Условные обозначения: Prp – пироп, Phl – флогопит, Mchr – магнезиохромит. На рисунках (в и е) пунктиром и стрелками показано положение увеличенных врезок редких включений (Логвинова и др., 2021).

Флогопит, обнаруженный в образце Mts-30, относится к числу наиболее редких включений в алмазах и свидетельствует об участии летучих в их образовании (Соболев и др., 2009). Для трети изученных 34 образцов алмазов с включениями флогопита и биотита (Соболев и др., 2009) флогопит ассоциирует с магнезиохромитом, содержащим  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  от 61,7 до 66,3 мас. %, причем в трех образцах установлен Cl от 0,25 до 0,49 мас. %. В представленном в настоящей работе обр. Mts-30 также содержится 0,18 мас. % Cl. Кроме этого, здесь зафиксирована примесь BaO до 0,57 мас. %. По низкому показателю #Cr 8,7, высокому #Mg 93,7 и низкой примеси  $\text{TiO}_2$  0,62 мас. %, выявленный флогопит относится к дунит-гарцбургитовому парагенезису.

#### 4.4. Дефектно-примесный состав алмаза

Известно, что основной структурной примесью в природных алмазах является азот, основные формы нахождения которого обладают характерными спектрами ИК-поглощения. Дефектно-примесный состав является важным показателем условий образования 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 А и В1-дефектов, степени агрегации (процентное содержание В1-дефекта к общему содержанию азота). В изученных алмазах азот в основном находится в А и В1-форме. Соотношение между этими центрами может быть различно, однако резко преобладают кристаллы типа IaA (рисунок 11). Приведённые в таблице 1 данные по содержанию в структуре алмаза примеси азота показывают широкие вариации состава в пределах одной кимберлитовой трубки.

Сравнение полученных результатов по алмазам с включениями из кимберлитов разных алмазоносных районов Якутии, а также на основе литературных данных выявило некоторые существенные различия (Хачатрян, 2013). Кристаллы из трубок Интернациональная (Мало-Ботуобинский алмазоносный район) и Юбилейная (Далдыно-Алакитский алмазоносный район) отличаются по распределению азота и степени его агрегации. Большинство алмазов из трубки Интернациональная относится к IaA. Во всех исследованных в данной работе алмазах из трубки Юбилейная отмечено повышенное содержание азота только лишь в центральной зоне кристаллов, в то время как для алмазов из трубки Интернациональная зафиксировано равномерное распределение азота по всему кристаллу, варьирующее от 600 до 900 ppm. Для кристаллов алмаза из трубки Комсомольская, содержащих включения хромшпинелидов, характерно невысокое содержание азота, в среднем не превышающее 100 ppm. А алмазы из трубки Мир характеризуются гораздо большим диапазоном вариаций дефектно-примесного состава: общее содержание азота изменяется в пределах от 60 до 800 ppm, степень

агрегации – от 5 до 40 % (рисунок 11). Это свидетельствует о различиях в условиях их образования. Именно степень агрегации азота из А-формы в В1 в кристаллах алмаза свидетельствует об условиях и скорости процессов образования алмазов. Высокая степень агрегации азота свидетельствует о длительном периоде нахождения кристалла алмаза при высокой температуре (Taylor et al, 1990). Во всех изученных алмазах присутствуют линии поглощения 1405 и 3107  $\text{см}^{-1}$ , связанные со структурными примесями водорода. Как правило, данные линии поглощения относятся к колебаниям С–Н, что доказывает вхождение водорода в структуру исследуемых алмазов (Runciman and Carter, 1971; Woods, Collins, 1983).

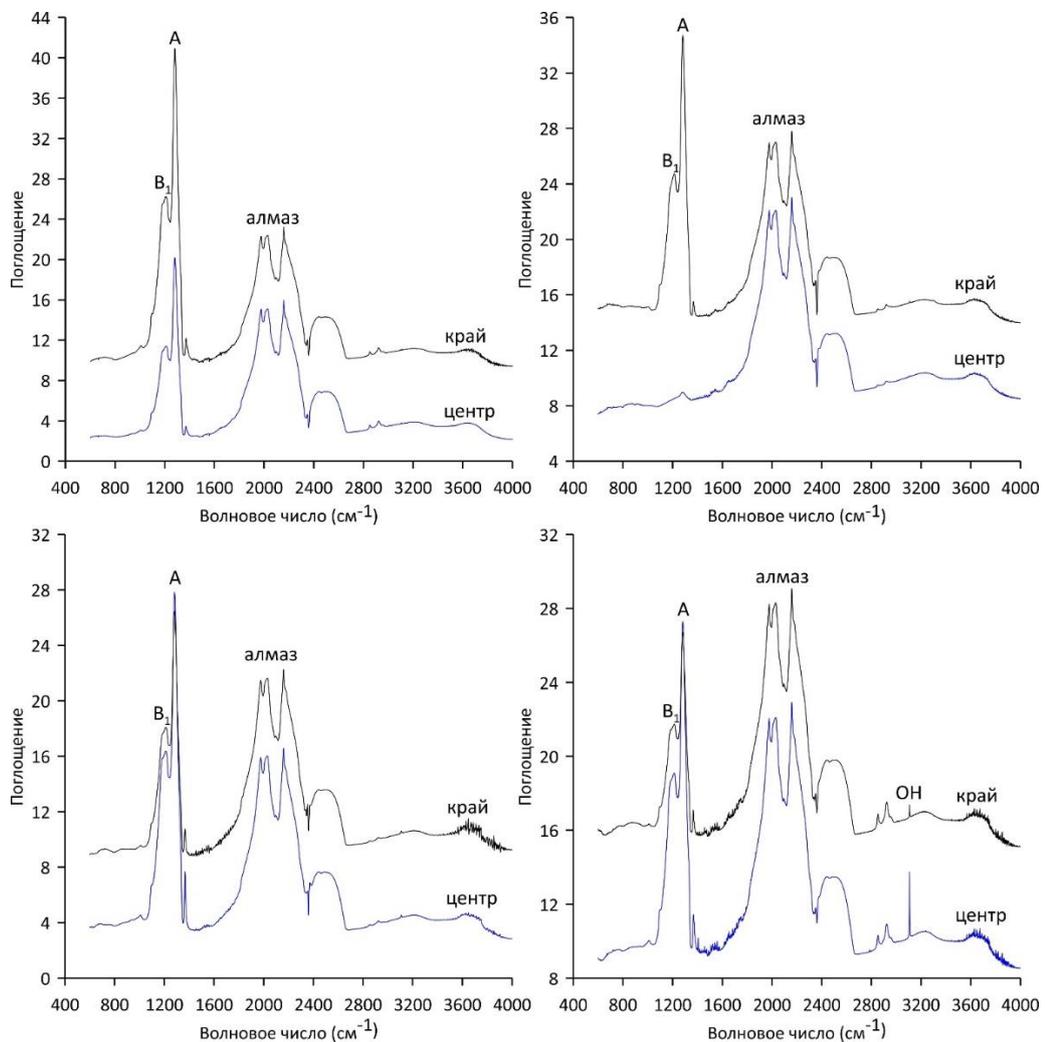


Рисунок 11. Типичные спектры поглощения алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок Якутии: А – обр. Мтс-24 (тр. Мир); Б – обр. Инс-68 (тр. Интернациональная); В – обр. Атс-17 (тр. Айхал); Г – обр. Удс-44 (тр. Удачная).

Таблица 1 Дефектно-примесный состав алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок Якутии

Кимберлитовая трубка	№ обр.	Зона	A, ppm	B, ppm	N <sub>tot</sub> , ppm	%B	
Айхал	АТС-13	Центр	452	272	724	38	
		Край	363	149	512	29	
	АТС-15	Центр	380	286	666	43	
		Край	388	303	691	44	
	АТС-27	Центр	0	0	0	0	
		Край	0	0	0	0	
	АТС-16	Центр	4	13	18	76	
		Край	14	7	21	32	
	АТС-17	Центр	380	86	465	18	
		Край	281	43	323	13	
	АТС-8	Центр	59	9	68	13	
		Край	50	9	58	15	
	Сытыканская	СТС-1	Центр	23	8	30	25
			Край	26	6	32	18
Комсомольская	КТС-11	Центр	20	14	34	42	
		Край	25	54	79	69	
	КТС-12	Центр	17	9	25	34	
		Край	7	9	15	57	
	КТС-16	Центр	106	72	177	40	
		Край	66	29	95	30	
Мир	МТС-14	Центр	106	14	120	12	
		Край	119	14	133	11	
	МТС-15	Центр	238	60	298	20	
		Край	284	51	335	15	
	МТС-17	Центр	624	152	775	20	
		Край	868	215	1082	20	
	МТС-18	Центр	54	3	57	5	
		Край	51	0	51	0	
	МТС-19	Центр	36	0	36	0	
		Край	30	0	30	0	
	МТС-20	Центр	76	51	127	40	
		Край	149	143	292	49	
	МТС-21	Центр	142	9	150	6	
		Край	1056	329	1385	24	
	МТС-24	Центр	281	37	318	12	
		Край	488	92	580	16	
	МТС-31	Центр	721	137	858	16	
		Край	842	154	996	16	
МТС-35	Центр	130	14	145	10		
	Край	130	14	145	10		
Юбилейная	YUBC-2	Центр	228	49	276	18	
		Край	297	40	337	12	
	YUBC-23	Центр	234	109	343	32	
		Край	276	149	424	35	
	YUBC-26	Центр	8	0	8	0	
		Край	0	0	0	0	

Удачная	UDC-1	Центр	102	6	108	5
		Край	96	6	101	6
	UDC-3	Центр	18	0	18	0
		Край	13	0	13	0
	UDC-7	Центр	10	0	10	0
		Край	8	0	8	0
	UDF-78	Центр	160	200	360	56
		Край	69	9	78	11
	UDS-13	Центр	152	189	341	55
		Край	125	137	263	52
	UDS-22	Центр	12	0	12	0
		Край	12	0	12	0
	UDS-33	Центр	30	0	30	0
		Край	30	0	30	0
	UDS-43	Центр	63	34	97	35
		Край	23	0	23	0
UDS-44	Центр	289	57	346	17	
	Край	173	29	202	14	
UDS-45	Центр	109	0	109	0	
	Край	111	0	111	0	
INC-104	Центр	531	80	611	13	
	Край	-	-	-	-	
INC-41	Центр	343	40	383	10	
	Край	190	17	207	8	
INC-13	Центр	7	169	175	96	
	Край	10	3	13	22	
INC-28	Центр	23	0	23	0	
	Край	17	0	17	0	
INC-70	Центр	35	2	36	5	
	Край	57	0	57	0	
Im-103	Центр	31	0	31	0	
	Край	30	0	30	0	
INS-137	Центр	561	129	690	19	
	Край	776	200	976	21	
INS-149	Центр	58	0	58	0	
	Край	61	0	61	0	
INS-154	Центр	129	14	143	10	
	Край	132	13	145	9	
INS-156	Центр	56	3	59	5	
	Край	53	14	67	21	
INS-161	Центр	53	0	53	0	
	Край	83	0	83	0	
INS-169	Центр	5	43	48	90	
	Край	8	7	15	46	
INS-172	Центр	271	57	328	17	
	Край	281	63	343	18	
INS-174	Центр	553	97	650	15	
	Край	597	120	717	17	
INS-68	Центр	17	0	17	0	
	Край	330	29	359	8	
Интернациональная	INC-104	Центр	531	80	611	13
		Край	-	-	-	-
	INC-41	Центр	343	40	383	10
		Край	190	17	207	8
	INC-13	Центр	7	169	175	96
		Край	10	3	13	22
	INC-28	Центр	23	0	23	0
		Край	17	0	17	0
	INC-70	Центр	35	2	36	5
		Край	57	0	57	0
	Im-103	Центр	31	0	31	0
		Край	30	0	30	0
	INS-137	Центр	561	129	690	19
		Край	776	200	976	21
	INS-149	Центр	58	0	58	0
		Край	61	0	61	0
	INS-154	Центр	129	14	143	10
		Край	132	13	145	9
INS-156	Центр	56	3	59	5	
	Край	53	14	67	21	
INS-161	Центр	53	0	53	0	
	Край	83	0	83	0	
INS-169	Центр	5	43	48	90	
	Край	8	7	15	46	
INS-172	Центр	271	57	328	17	
	Край	281	63	343	18	
INS-174	Центр	553	97	650	15	
	Край	597	120	717	17	
INS-68	Центр	17	0	17	0	
	Край	330	29	359	8	

## 4.5. Химический состав хромшпинелидов

### 4.5.1. Микронзондовый анализ

Методом EPMA были получены концентрации оксидов главных элементов:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  ( $\text{FeO}_{\text{tot}}$ ),  $\text{TiO}_2$ , а также примесных элементов:  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  в составе хромшпинелидов из алмазов и ксенолитов кимберлитовых трубок двух территориально разобщенных алмазоносных провинций (ЯАП и ААП).

Хромиты, ассоциирующие с алмазами, занимают крайнее положение, являясь наиболее обогащенными хромом (рисунок 12). 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»:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (> 62 мас. %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (< 7,5 мас. %) и  $\text{TiO}_2$  (< 0,7 мас. %) (Соболев, 1971; Meyer et al, 1972). В 95 и 99 перцентиль попадают хромшпинелиды следующих составов:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  > 61,4 мас. %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  < 8,6 мас. %,  $\text{TiO}_2$  < 0,6 мас. % и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  > 60,1 мас. %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  < 9,5 мас. %,  $\text{TiO}_2$  < 0,9 мас. %, соответственно.

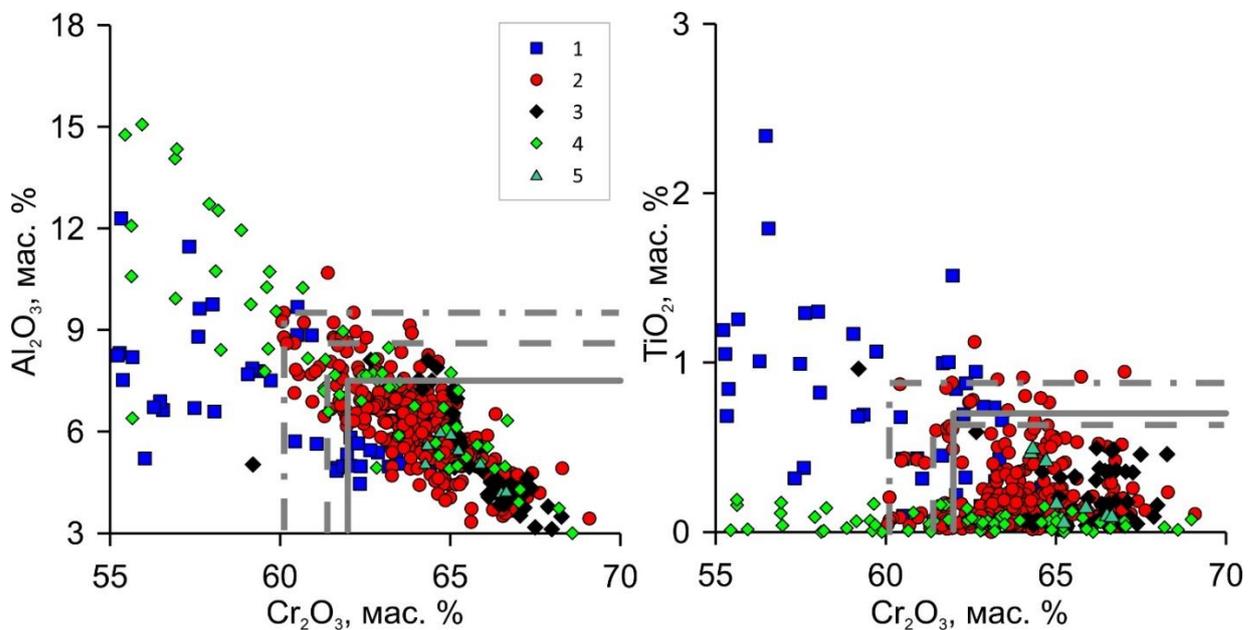


Рисунок 12. Особенности химического состава изученных хромшпинелидов из алмазов и хромшпинелидов из концентрата кимберлитов (ксенолиты): 1 – зерна хромшпинелидов из концентрата с включениями пирропа, хромдиопсида и оливина; 2 – Якутская алмазоносная провинция; 3 – Архангельская алмазоносная провинция;

4 – алмазоносная россыпь Курунг-Юрях. 5 – северо-восток Сибирской платформы; Сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии отделяют, соответственно, 90, 95 и 99 процентиля хромшпинелидов алмазной ассоциации.

Наиболее важными характеристиками состава хромшпинелидов из кимберлитов являются магнезиальность  $\#Mg = (MgO / (MgO + FeO)) * 100$  и хромистость  $\#Cr = (Cr_2O_3 / (Cr_2O_3 + Al_2O_3)) * 100$ . Магнезиальность колеблется от 33,5% до 63,8% для Далдыно-Алакитского и от 33,9% до 51,6% для Мало-Ботуобинского района. Хромистость варьирует от 85,2% до 95,2% в Далдыно-Алакитском и от 87,7% до 95,3% в Мало-Ботуобинском районах (таблица 2). Средние содержания  $\#Cr$  и  $\#Mg$  для хромшпинелидов из алмазов ЯАП составляют 91,5 и 45,4 мас. % соответственно.

Таблица 2. Средние значения магнезиальности ( $\#Mg$ ) и хромистости ( $\#Cr$ ) хромшпинелидов из алмазов Якутской и Архангельской алмазоносных провинций, и алмазоносной россыпи Курунг-Юрях.

Район/поле	Объект	$\#Mg$ (%)	$\#Cr$ (%)
<b>Якутская алмазоносная провинция</b>			
Далдыно-Алакитский	Сытыканская (n=38)	47,2	91,2
	Удачная (n=30)	41,9	91,8
	Айхал (n=30)	46,5	91,7
	Комсомольская (n=30)	48,0	90,3
	Юбилейная (n=11)	39,6	92,2
	Северо-восток Сибирской платформы (n=9)	44,1	92,8
Мало-Ботуобинский	Мир (n=50)	43,6	91,6
	Интернациональная (n=38)	40,7	90,8
	Курунг-Юрях (n=51)	37,5	85,91
<b>Архангельская алмазоносная провинция</b>			
Золотицкое поле	Пионерская (n=21)	46,5	94,1
	Карпинского-I (n=10)	51,9	90,9
	Ломоносовская (n=22)	45,3	94,5

Наиболее высокими значениями магнезиальности по нашим данным

характеризуются три кимберлитовые трубки Далдыно-Алакитского района (Комсомольская, Сытыканская, Айхал). (таблицы 2 и 3).

Магнезиальность хромшпинелидов из алмазов Архангельской алмазоносной провинции (ААП) колеблется от 42,2% до 56,1%, а хромистость от 89,5 % до 95,6 % и в среднем составляет 47,4 и 93,4 % соответственно (таблица 4, рисунок 13).

В хромшпинелидах из концентрата #Mg и #Cr варьируют в диапазоне 20,7 - 59,9 % и 46,0-95,5 %, а средние значения составляют от 38,71 и 85,5 мас. % соответственно.

В хромшпинелидах алмазоносной россыпи Курунг-Юрях магнезиальность и хромистость варьируются в более широких пределах: #Mg от 24,2 до 57,6 мас. % и #Cr от 53,2 до 95,8 мас. %, а средние содержания составляют 35,9 и 86,8 мас. % соответственно (рисунок 13).

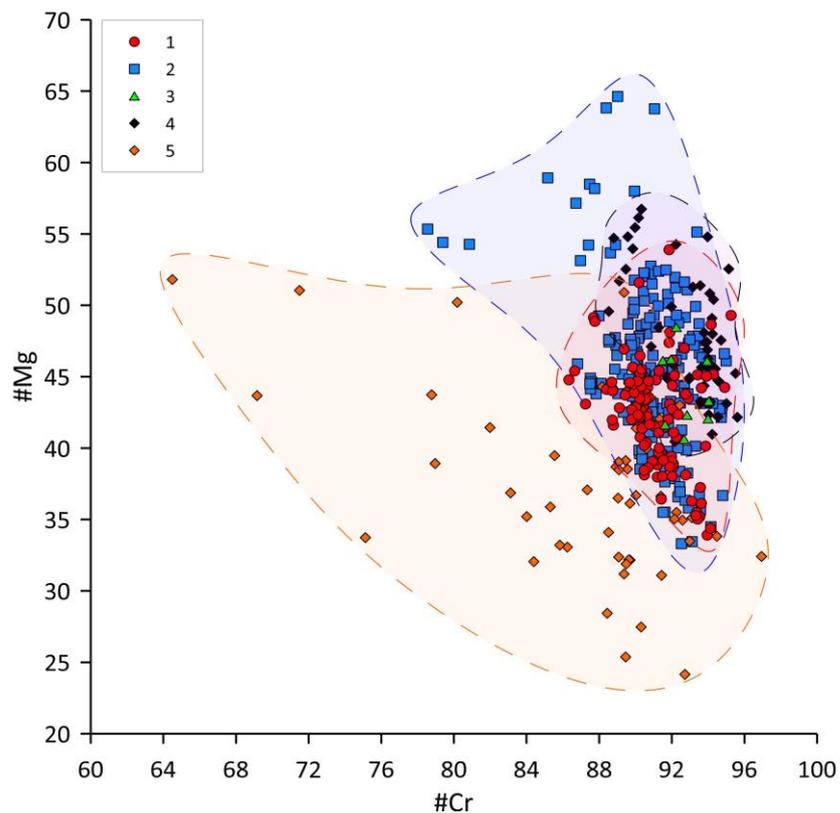


Рисунок 13. Химический состав хромшпинелидов из алмазов (1-4) и «курунгского» типа (5): 1 – Мало-Ботуобинский алмазоносный р-н, 2 – Далдыно-Алакитский алмазоносный р-н, 3 – Северо-восток Сибирской платформы, 4 - Архангельская алмазоносная провинция.

В составе изученных хромшпинелидов из алмазов наблюдаются некоторые колебания по содержанию  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{FeO}$  (рисунок 13). Концентрации  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  колеблется в весьма узких пределах от 61,4 до 68,5 мас. %, от 62,0 до 69,1 мас. %, от 64,3 до 66,6 мас. % и от 64,1 до 67,0 мас. % для ДА, МБ и россыпей северо-востока Сибирского кратона и ААП соответственно.

Концентрации  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  и  $\text{MgO}$  немного разнятся между провинциями и в среднем составляют 15,6 и 12,6 мас. % для хромшпинелидов ЯАП и 14,9 и 13,4 мас. % для ААП соответственно.

Таким образом, существенных различия по главным элементам в составе хромшпинелидов из алмазов, рассматриваемых в работе двух алмазоносных провинций, не выявлено.

Примесь  $\text{TiO}_2$ , большая роль которой отмечена рядом исследователей для хромшпинелидов из многих кимберлитовых трубок (Соболев и др., 1975) практически во всех изученных нами включениях низка (до 0,95 мас. %). Содержания  $\text{TiO}_2$  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  $\text{TiO}_2$  варьирует от 0,11 до 0,55 мас. %, а среднее составляет 0,34 мас. % (таблица 5). В хромшпинелидах алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях  $\text{TiO}_2$  изменяется в пределах 0,02-0,91 мас. % и в среднем равняется 0,10 мас. %.

Исходя из небольшого содержания титана в составе хромшпинелидов, существует возможность определения в них с помощью микронзондового анализа примеси ванадия. Значения  $\text{V}_2\text{O}_3$  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) (таблицы 3 и 4). Существенное отличие по содержанию примеси ванадия показали хромшпинелиды «курунгского» типа, где средние содержания  $\text{V}_2\text{O}_3$  составляют менее 0,14 мас. %. В ксенолитах Далдыно-Алакитского (тр. Удачная) и Мало-Ботуобинского (тр. Интернациональная и 23 партсъезда) районов  $\text{V}_2\text{O}_3$  варьирует от 0,14 до 0,32 мас. % и от 0,16 до 0,43 мас. %,

а среднее составляет 0,24 и 0,27 мас. %, соответственно (таблица 5).

Цинк является важным элементом, входящим в состав структуры хромшпинелида, так как его используют для определения температуры кристаллизации, т.е. в качестве геотермометра (Griffin et al., 1993). 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 же «курунгского» типа значительно отличаются от кимберлитовых, содержание цинка в них выше и в среднем составляет около 0,17 мас. %.

1 Таблица 3 Представительные анализы содержания главных (мас. %) и редких элементов (г/т) в хромшпинелидах из  
2 алмазов Далдыно-Алакитского алмазоносного района и ореолов рассеяния.

№обр.	гр. Сытыканская								гр. Удачная					гр. Айхал				
	С-5/88	С-6/88	16/88	17/88	18/88	31/88	32/88	49/88	2017	510к	510к	510к	504к	149	149	168	12	156
SiO <sub>2</sub>	0.11	0.08	0.15	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.07	0.12	0.20	0.13	0.05	0.09	0.11	0.17	0.12	0.19
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.25	0.09	0.11	0.21	0.11	0.17	0.21	0.19	0.20	0.18	0.18	0.56	0.15	0.16	0.30	0.20	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.89	6.52	5.74	6.52	5.88	6.29	7.20	5.27	6.82	5.34	5.54	4.97	5.89	9.22	8.95	7.07	4.64	5.10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	64.2	64.7	65.2	66.3	66.1	64.7	64.3	65.5	63.1	64.3	64.2	65.3	64.9	61.6	62.2	63.3	66.6	66.2
FeO	14.4	12.6	15.2	9.3	13.1	15.6	13.7	15.3	15.9	15.9	15.6	14.7	12.9	13.0	12.5	13.4	14.3	13.1
MnO	0.19	0.22	0.20	0.27	0.23	0.22	0.22	0.21	0.18	0.25	0.19	0.21	0.19	0.23	0.22	0.18	0.25	0.18
MgO	13.6	14.0	13.0	16.4	13.2	12.8	13.6	13.3	12.6	12.7	13.0	13.3	14.3	14.8	14.8	14.3	13.2	13.7
ZnO	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08	0.07	0.03	0.06	0.09	0.08	0.05	0.06	0.06	0.04	0.08	0.05	0.05	0.04
NiO	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.09	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.07	0.11	0.13	0.11	0.14	0.10	0.09
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28	0.29	0.32	0.23	0.34	0.38	0.39	0.33	0.25	0.29	0.31	0.30	0.25	0.22	0.36	0.25	0.28	0.23
Сумма	100.0	98.8	100.1	99.5	99.3	100.3	99.9	100.4	99.3	99.3	99.3	99.3	99.2	99.4	99.5	99.1	99.8	98.9
#Cr	90.3	90.8	91.9	91.1	91.8	91.1	89.9	92.5	90.2	92.3	92.0	92.9	91.7	87.0	87.4	90.0	93.5	92.9
#Mg	48.6	52.8	46.0	63.8	50.1	45.1	49.7	46.6	44.1	44.4	45.4	47.3	52.5	53.1	54.2	51.8	47.9	51.1
Sc	2.01	2.51	2.17	2.38	1.88	1.47	1.59	1.57	5.62	2.68	2.72	2.47	3.30	1.21	1.89	4.16	3.46	1.76
Ti	917	1339	502	660	1098	508	875	1125	1054	1016	1064	986	3292	783	897	1718	1142	409
V	2322	2113	2298	2147	2112	2430	2080	2318	1710	2249	2108	2204	1632	2036	2507	1821	1906	1560
Mn	1767	1703	1723	2131	1572	1791	1654	1852	1664	1774	1670	1875	1561	1411	1756	1623	2014	1540
Co	272	265	267	333	238	275	264	273	235	263	227	254	238	218	268	238	271	239
Ni	828	799	854	931	730	839	813	764	793	853	872	760	918	765	838	988	801	813
Cu	7.62	10.8	7.80	66.8	47.3	11.4	19.2	13.1	1.53	16.0	10.7	15.2	12.2	9.13	17.3	15.0	8.12	18.7
Zn	836	887	747	1021	768	949	767	848	681	880	672	831	635	779	899	641	750	623
Ga	19.9	16.2	19.3	15.4	18.5	23.5	20.2	25.0	6.66	21.1	18.4	17.5	26.3	18.8	20.6	23.0	12.7	26.7
Ge	0.72	1.69	1.23	1.74	1.75	1.33	1.41	0.84	1.23	1.55	1.05	1.36	1.32	0.83	0.74	0.82	1.60	0.95
Nb	1.13	1.03	1.59	0.67	1.25	1.02	0.87	0.76	0.64	1.33	1.46	0.96	1.01	0.63	0.78	3.26	0.84	1.05
Ta	0.12	0.02	0.05	0.02	0.10	0.05	0.07	0.04	0.05	0.10	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.49	0.04	0.07

3 Примечание: н/п – содержание элемента ниже предела обнаружения.

№обр.	гр. Комсомольская					гр. Юбилейная					северные россыпи					
	44/35	78/49	88/49	88/49	48/35	Юк-31	Юк-32	Юк-33	Юк-34	Юк-35	3/59	3/59	5/80	22/80	22/80	33/80
SiO <sub>2</sub>	0.13	0.13	0.13	0.12	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.06	0.14	0.14	0.11	0.10	0.15	0.13
TiO <sub>2</sub>	0.11	0.15	0.16	0.15	0.06	0.17	0.18	0.21	0.20	0.06	0.10	0.11	0.06	0.43	0.15	0.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.98	7.34	5.37	5.43	7.74	5.22	5.24	5.33	5.05	6.81	4.29	4.22	5.48	6.00	5.08	5.63
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63.6	63.4	65.2	65.9	62.9	63.8	64.3	65.5	65.1	63.1	66.6	66.5	65.2	64.7	65.9	64.3
FeO	15.4	15.9	15.2	13.9	16.2	18.6	18.8	15.9	17.3	18.0	14.9	15.8	14.0	14.8	15.9	15.3
MnO	0.18	0.17	0.18	0.17	0.15	0.22	0.20	0.24	0.23	0.22	0.24	0.21	0.21	0.19	0.15	0.23
MgO	12.8	11.5	12.7	13.3	12.7	11.1	11.0	12.1	11.5	11.3	12.8	12.1	13.1	12.7	11.7	13.2
ZnO	0.06	0.06	0.09	0.09	0.04	0.05	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06
NiO	0.09	0.08	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35	0.24	0.31	0.27	0.27	0.29	0.29	0.35	0.32	0.32	0.28	0.25	0.38	0.28	0.50	0.33
Сумма	99.7	98.9	99.4	99.4	100.3	99.7	100.3	99.9	99.9	100.0	99.6	99.5	98.8	99.4	99.6	99.8
#Cr	90.1	89.6	92.4	92.4	89.0	92.4	92.5	92.5	92.8	90.3	94.0	94.0	92.2	91.5	92.8	92.0
#Mg	45.4	42.0	45.6	48.8	43.8	37.3	36.9	43.2	39.9	38.5	46.1	43.3	48.5	46.1	42.3	46.2
Sc	1.62	5.12	1.03	0.75	1.53	3.89	2.53	2.64	3.77	1.04	2.81	2.51	4.02	6.23	2.65	2.91
Ti	570	863	823	829	272	1255	1013	1165	1082	331	574	518	2120	728	2350	2992
V	2654	1509	2234	1918	1869	2547	2025	2292	2321	2230	1674	1847	2254	2119	2354	2111
Mn	1838	1876	1752	1754	1577	2249	1954	1936	1895	1795	1948	2036	1652	1653	2008	1951
Co	274	292	293	284	252	311	282	285	274	298	344	278	241	243	300	279
Ni	855	967	865	843	870	724	714	761	656	612	735	714	707	848	821	875
Cu	14.0	13.9	9.08	9.46	4.53	28.9	15.6	18.1	22.9	11.0	41.9	9.44	9.50	7.57	28.5	14.8
Zn	881	814	889	880	761	1061	928	879	849	1156	978	875	846	689	1043	801
Ga	37.2	14.5	21.3	19.7	16.8	12.4	29.2	19.1	10.9	24.2	16.6	15.1	13.5	8.86	26.0	23.0
Ge	1.50	1.47	1.36	1.21	0.97	1.15	1.51	1.16	1.88	н/п	н/п	1.74	1.22	1.22	1.75	1.31
Nb	1.89	1.38	2.26	2.00	1.09	1.03	0.86	0.84	0.98	0.91	1.54	1.00	0.98	2.25	1.09	1.20
Ta	0.14	0.15	0.19	0.22	0.03	0.02	0.04	0.05	н/п	0.01	0.09	0.03	0.06	0.08	0.02	0.11

5 Примечание: н/п – содержание элемента ниже предела обнаружения.

6 Таблица 4 Представительные анализы содержания главных (мас. %) и редких элементов (г/т) в хромшпинелидах из  
7 алмазов Архангельской алмазоносной провинции

№обр.	гр. Пионерская						гр. Карпинского				гр. Ломоносовская			
	Пи-25	Пи-28	Пи-86	Пи-103	Пи-14	Пи-28	К-1-10	К-1-4	К-1-13	К-1-69	Л-108	Л-227	Л-227	Л-267
SiO <sub>2</sub>	0.09	0.12	0.11	0.08	0.17	0.10	0.10	0.09	0.14	0.16	0.06	0.09	0.08	0.08
TiO <sub>2</sub>	0.30	0.48	0.16	0.04	0.37	0.48	0.07	0.08	0.02	0.07	0.16	0.17	0.18	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.19	3.95	4.41	5.58	4.25	4.28	6.22	4.34	7.09	7.50	3.12	4.11	4.17	4.38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	66.2	66.7	66.5	65.3	66.3	66.6	65.1	67.2	65.1	64.5	68.0	67.1	67.1	66.7
FeO	15.6	15.6	16.0	15.6	15.3	15.1	14.4	14.9	12.0	12.4	16.8	15.5	15.5	14.8
MnO	0.29	0.29	0.29	0.24	0.25	0.27	0.28	0.26	0.26	0.23	0.26	0.23	0.23	0.25
MgO	13.1	13.1	12.8	13.2	12.8	13.4	13.5	13.5	15.4	15.0	12.3	13.1	13.1	13.3
ZnO	0.07	0.10	0.08	0.09	0.07	0.11	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08
NiO	0.10	0.10	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.08	0.08	0.07	0.07	0.09
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.20	0.23	0.22	0.20	0.19	0.19	0.27	0.22	0.19	0.25	0.28	0.27	0.24
Сумма	100.2	100.6	100.6	100.5	99.8	100.6	100.0	100.8	100.5	100.2	101.1	100.7	100.9	100.0
#Cr	94.0	94.4	93.8	92.1	94.0	94.0	91.3	93.9	90.2	89.6	95.6	94.2	94.2	93.8
#Mg	45.7	45.6	44.4	45.8	45.6	46.9	48.5	47.4	56.1	54.8	42.2	45.7	45.8	47.4
Sc	1.48	2.79	2.54	3.06	1.60	3.98	3.48	3.60	4.63	2.06	н/п	н/п	3.08	2.26
Ti	1837	3145	920	231	2614	3529	500	519	113	489	908	1072	1129	389
V	1437	1586	1783	1605	1814	1875	1530	2074	1637	1377	1720	2059	1858	2187
Mn	1974	2149	1976	1952	2169	2334	1962	2128	2109	1912	2399	2051	2002	2340
Co	272	295	282	292	321	355	288	326	346	347	346	380	305	368
Ni	682	728	715	624	831	937	764	749	794	1068	819	687	673	833
Cu	9.18	24.1	24.0	9.46	33.5	25.2	13.7	11.1	7.04	12.5	12.9	6.26	6.00	14.8
Zn	992	1026	889	881	1374	1384	889	1259	1236	1233	972	715	1343	1366
Ga	32.8	26.4	32.5	27.6	37.1	30.4	17.1	14.4	14.7	16.6	25.5	27.6	28.8	24.4
Ge	1.06	0.99	0.91	1.22	н/п	1.32	1.01	н/п	1.24	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п
Nb	1.18	1.46	1.73	1.01	1.81	1.29	1.26	2.86	0.50	0.95	0.55	2.79	3.34	0.45
Ta	0.10	0.29	0.15	0.09	0.21	0.22	0.10	0.21	н/п	0.09	0.04	0.35	0.34	н/п

8 Примечание: н/п – содержание элемента ниже предела обнаружения.

9           Значения NiO варьируются от 0,2 до 0,14 мас. % и от 0,05 до 0,16 для ЯАП и  
10 ААП соответственно. Средние содержания составляют 0,09 мас. % для ЯАП и  
11 ААП.

12 Таблица 5. Представительные анализы содержания главных (мас. %) и редких  
13 элементов (г/т) в хромшпинелидах из мантийных ксенолитов кимберлитовой  
14 трубки Удачная

№обр.	Уд-25	Уд-26	Уд-27	Уд-28	Уд-29	Уд-31	Уд-32	Уд-33	Уд-35	Уд-36
SiO <sub>2</sub>	0.10	0.07	0.10	0.11	0.04	0.08	0.12	0.09	0.10	0.09
TiO <sub>2</sub>	0.36	0.35	0.25	0.24	0.46	0.11	0.54	0.55	0.28	0.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.13	5.15	4.13	4.07	9.06	5.02	15.6	15.7	7.09	7.33
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61.3	62.9	63.7	63.9	60.1	63.3	50.9	50.7	58.3	58.4
FeO	18.2	18.5	18.7	18.6	17.5	18.2	17.2	17.1	20.7	20.5
MnO	0.23	0.23	0.24	0.22	0.27	0.23	0.17	0.18	0.26	0.25
MgO	11.9	11.4	12.2	12.0	11.6	12.5	15.4	15.3	12.1	12.0
ZnO	0.09	0.06	0.07	0.04	0.15	0.05	0.05	0.05	0.08	0.09
NiO	0.09	0.11	0.10	0.12	0.08	0.10	0.17	0.15	0.15	0.14
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	0.30	0.29	0.27	0.33	0.31	0.14	0.17	0.16	0.17
Сумма	97.6	99.1	99.8	99.6	99.6	99.9	100.3	99.9	99.2	99.3
#Cr	92.3	92.4	93.9	94.0	86.9	92.7	76.5	76.4	89.2	88.9
#Mg	39.5	38.2	39.4	39.3	39.9	40.7	47.4	47.3	36.8	36.9
Sc	н/п	н/п	2.28	н/п	1.72	н/п	н/п	н/п	2.33	2.41
Ti	2091	1936	1253	1371	2577	446	3720	3708	1425	1557
V	2452	2340	1983	2691	2544	2455	1674	1718	1340	1486
Mn	2309	2428	2072	2356	1967	2592	2061	2429	3272	3126
Co	446	379	341	419	358	370	369	403	437	406
Ni	1348	1199	1105	1427	743	1084	2021	2181	1961	1911
Cu	39.8	32.8	30.9	34.6	11.5	37.8	22.8	22.5	45.2	42.1
Zn	1620	1322	815	1046	1638	1084	1409	1451	1203	1111
Ga	56.3	51.5	31.1	35.9	40.5	24.9	47.4	53.6	81.5	68.4
Ge	н/п									
Nb	0.52	0.50	0.15	0.20	0.36	0.42	0.28	0.35	1.30	0.96
Ta	0.04	н/п	0.06	0.08						

15 Примечание: н/п – содержание элемента ниже предела обнаружения

16 В ксенолитах из кимберлитовых трубок Удачная и Интернациональная NiO  
17 варьирует от 0,08 до 0 17 мас. % (таблица 5) и от 0,05 до 0,28 мас. % соответственно

18 при среднем значении 0,12 мас. %. В хромшпинелидах алмазоносной россыпи  
19 Курунг-Юрях NiO изменяется в пределах 0,02-0,20 мас. % и в среднем равняется  
20 0,06 мас. %.

21 Значения MnO варьируются от 0,17 до 0,31 мас. % и от 0,21 до 0,31 для ЯАП  
22 и ААП соответственно, при этом средние содержания составляют 0,20 мас% и 0,26  
23 мас. % соответственно (таблицы 3 и 4).

24 В хромшпинелидах алмазоносного участка Курунг-Юрях MnO изменяется в  
25 пределах 0,12-0,34 мас. % и в среднем равняется 0,25 мас. %.

26 В ксенолитах из трубок Удачная и Интернациональная MnO варьирует от  
27 0,17 до 0,27 и от 0,11 до 0,34 мас. % соответственно при среднем значении 0,22 мас.  
28 % (таблица 5).

29 Таким образом, результаты по главным и примесным элементам, полученные  
30 с помощью микронзондового анализа показали не существенные различия в составе  
31 хромшпинелидах из алмазов ЯАП и ААП. В последних статистически  
32 зафиксировано слегка повышенное содержание марганца и пониженное ванадия, в  
33 сравнении с хромшпинелидами ЯАП.

34

#### 35 **4.5.2. Лазерная абляция**

36 В данном разделе приводятся данные, полученные методом лазерной  
37 абляции. Были получены содержания следующих элементов: Na<sup>23</sup>, Al<sup>27</sup>, Si<sup>29</sup>, Ca<sup>43</sup>,  
38 Sc<sup>45</sup>, Ti<sup>49</sup>, V<sup>51</sup>, Mn<sup>55</sup>, Fe<sup>57</sup>, Co<sup>59</sup>, Ni<sup>60</sup>, Cu<sup>63</sup>, Zn<sup>66</sup>, Ga<sup>71</sup>, Ge<sup>74</sup>, Sr<sup>88</sup>, Y<sup>89</sup>, Zr<sup>91</sup>, Nb<sup>93</sup>, Mo<sup>95</sup>,  
39 Cd<sup>111</sup>, In<sup>115</sup>, Sn<sup>118</sup>, Ba<sup>137</sup>, La<sup>139</sup>, Sm<sup>149</sup>, Lu<sup>175</sup>, Hf<sup>179</sup>, Ta<sup>181</sup>, W<sup>182</sup>, Pb<sup>208</sup>, Bi<sup>209</sup>, Th<sup>232</sup>, U<sup>238</sup>.  
40 Значимые содержания элемента (за исключением Al<sup>27</sup> и Fe<sup>57</sup>) были определены для  
41 Na<sup>23</sup>, Si<sup>29</sup>, Ca<sup>43</sup>, Sc<sup>45</sup>, Ti<sup>49</sup>, V<sup>51</sup>, Mn<sup>55</sup>, Co<sup>59</sup>, Ni<sup>60</sup>, Cu<sup>63</sup>, Zn<sup>66</sup>, Ga<sup>71</sup>, Ge<sup>74</sup>, Nb<sup>93</sup>, Ta<sup>181</sup>,  
42 концентрации остальных элементов были ниже предела обнаружения в более чем  
43 2/3 образцов.

44 В хромшпинелидах из алмазов элементами с самым высоким содержаниями  
45 являются Mn (1078-2848 ppm), V (868-3075 ppm), Ti (109-5764 ppm), Na (8-2573  
46 ppm), Ni (200-1075 ppm), Si (940-2731 ppm) и Zn (404-1884 ppm). Содержание этих  
47 элементов успешно определяется методом микронзондового анализа. Содержание

48 остальных элементов-примесей не превышает 1000 ppm. К ним относятся Ca (74-  
49 829 ppm), Sc (0,31-9,83 ppm), Co (204-475 ppm), Cu (1,53-72 ppm), Ga (4,15-58 ppm),  
50 Ge (0,600-2,72 ppm), Nb (0,163-4,27 ppm) и Ta (0,012-0,528 ppm).

51 Для хромшпинелидов алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях набор  
52 элементов с наивысшими концентрациями практически полностью аналогичен  
53 хромшпинелидам из алмаза – Mn (1034-2790 ppm) V (496-1556 ppm), Ti (13,8-1042),  
54 Ni (225-1595), Si (800-1968 ppm) и Zn (523-2594 ppm), за исключением Na, который  
55 отсутствует вовсе. Средние концентрации же остальных элементов, не  
56 превышающие 1000 ppm – Ca (91-578 ppm), Sc (0,48-12,1 ppm), Co (246-563 ppm),  
57 Cu (0,519-54 ppm), Ga (6,2-61 ppm), Ge (0,524-2,45 ppm), Nb (0,082-1,63 ppm) и Ta  
58 (0,005-0,132 ppm).

59 Сравнение концентраций элементов примесей хромшпинелидов ЯАП и ААП  
60 показывает значимые различия в содержаниях Na, Ca, Ti, V, Mn, Zn, и Ta (таблица  
61 б). При сравнении же хромшпинелидов алмазного парагенезиса с  
62 хромшпинелидами алмазоносной россыпи Курунг-Юрях видны значимые  
63 различия в концентрациях практически всех изученных элементов – Sc, Ti, V, Co,  
64 Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Nb (таблицы 9, 10).

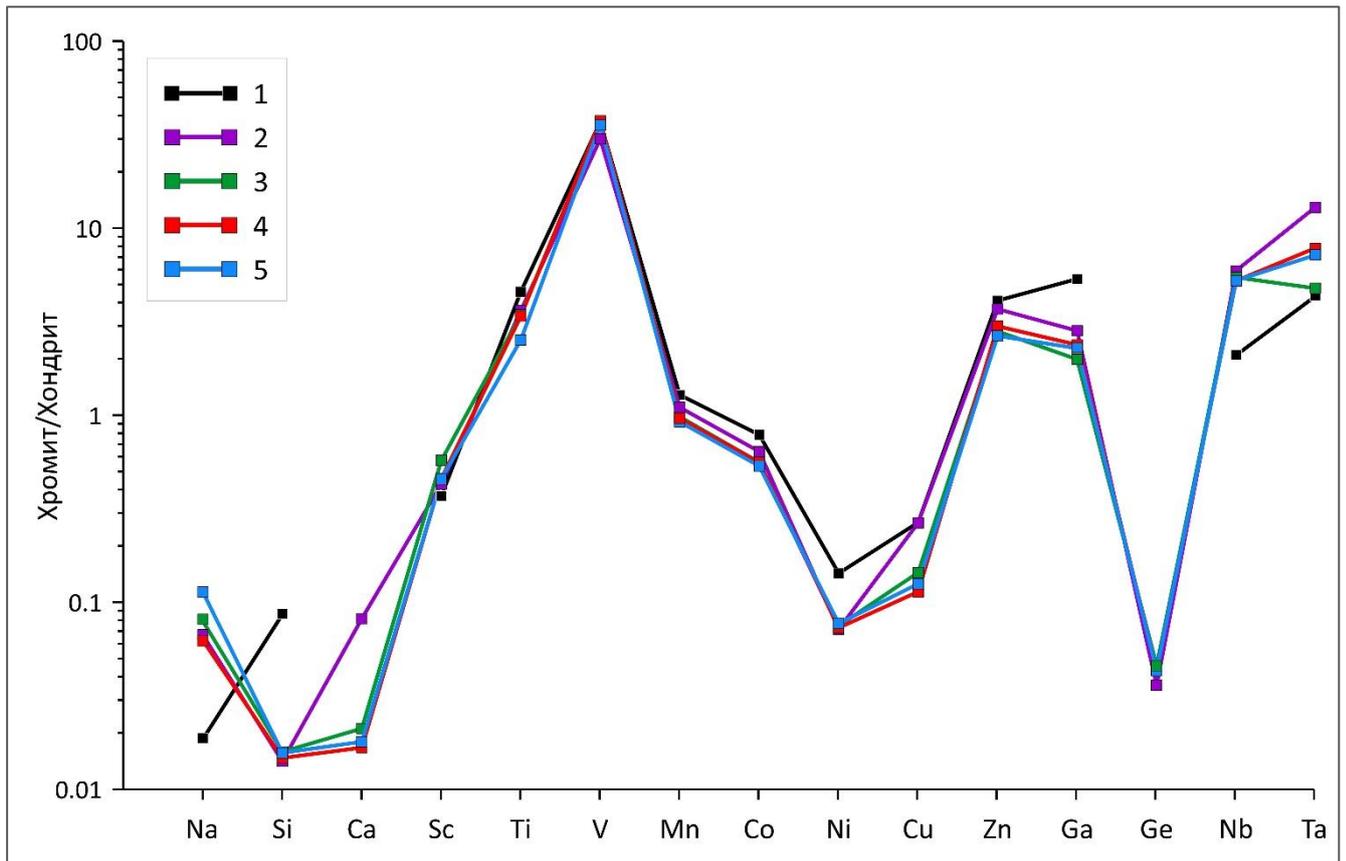
65 Если проводить сравнение между хромшпинелидами из алмазов различных  
66 алмазоносных провинций и районов, то можно отметить различия в концентрациях  
67 Ta, но при этом близость по содержанию Nb; повышенные концентрации Zn, Ga,  
68 Cu и Ca в хромшпинелидах ААП в сравнении с хромшпинелидами ЯАП; а также  
69 немного повышенные концентрации Sc и Cu в хромшпинелидах северо-востока  
70 Сибирской платформы в сравнение с остальными хромшпинелидами из алмазов  
71 ЯАП.

72 Если рассматривать отдельные кимберлитовые трубки на примере  
73 мультиэлементных спектров (рисунок 14), то отчётливо видно, что спектры имеют  
74 одинаковую форму, что свидетельствует о близости составов хромшпинелидов из  
75 алмазов этих трубок.

77 Таблица 6. Средние значения и стандартные отклонения состава примесных  
 78 элементов хромшпинелидов из алмазов и «курунгского» типа.

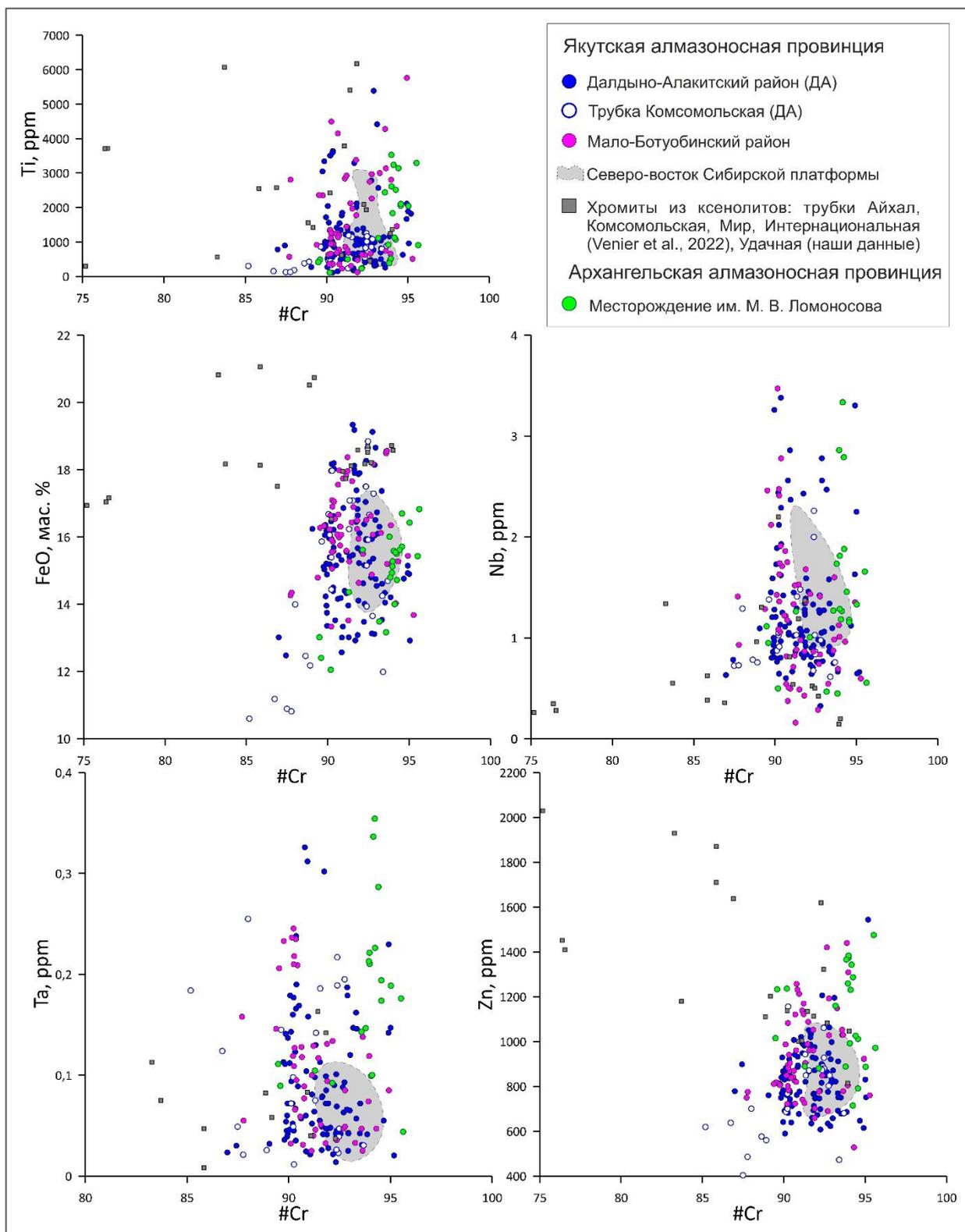
Элемент	Якутская алмазоносная провинция		Архангельская алмазоносная провинция		Алмазоносный участок Улахан-Курунг-Юрях	
	$\chi_{\text{сред}}$ , ppm	$\sigma$ , ppm	$\chi_{\text{сред}}$ , ppm	$\sigma$ , ppm	$\chi_{\text{сред}}$ , ppm	$\sigma$ , ppm
Na	512	499	365	219	—	—
Si	1632	287	1499	178	1250	230
Ca	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

79 Примечание:  $\chi_{\text{сред}}$  - среднее значение;  $\sigma$  – стандартное отклонение.

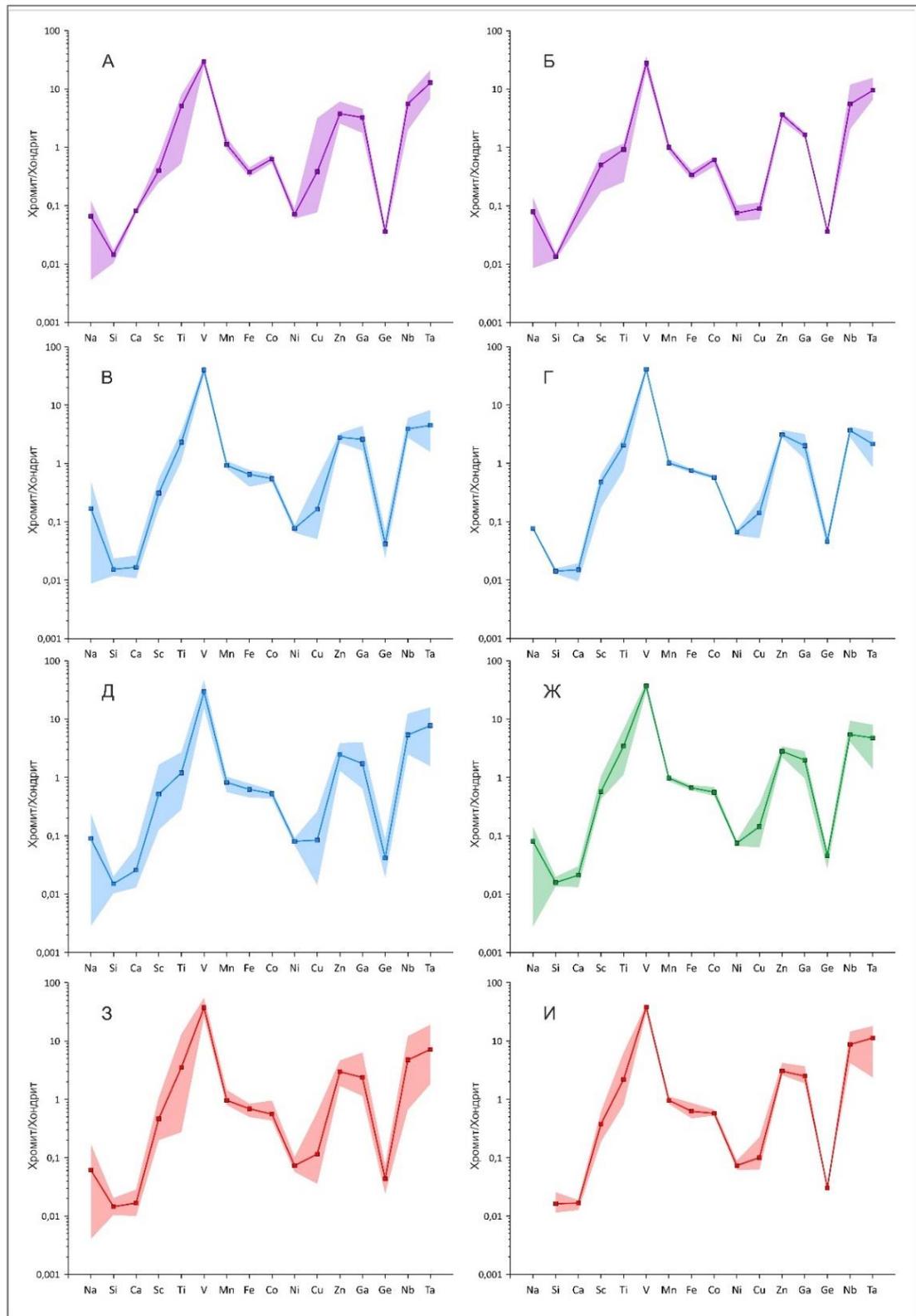


80  
 81 Рисунок 14 Спайдер-диаграмма средних составов хромшпинелидов из мантийных  
 82 ксенолитов (1) и включений в алмазах (2-5): 1 – тр. Удачная; 2 – Золотицкое  
 83 алмазоносное поле (ААП); 3 – россыпи северо-востока Сибирской платформы; 4 –  
 84 Мало-Ботуобинский алмазоносный р-н (ЯАП); 5 – Далдыно-Алакитский  
 85 алмазоносный р-н (ЯАП).

86 Сравнение содержаний элементов в хромшпинелидах отдельных  
 87 кимберлитовых трубок со средними содержаниями в районе/провинции,  
 88 практически все трубки имеют сходный с ними состав, за исключением тр.  
 89 Комсомольская (рисунок 15).



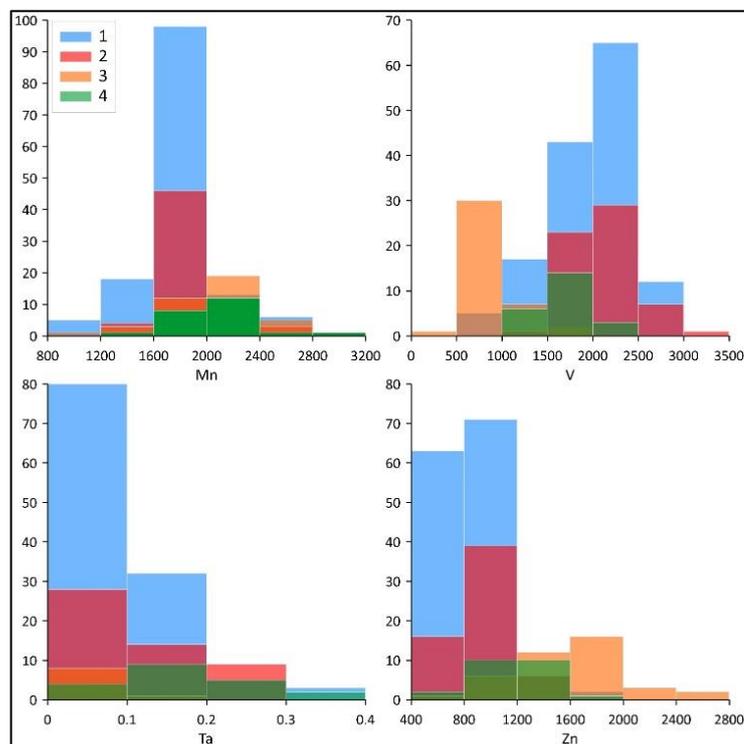
91 Рисунок 15. Составы хромшпинелидов из алмазов и мантийных ксенолитов.



92

93 Рисунок 16. Мультиэлементные диаграммы спектров хромшпинелидов из алмазов  
 94 кимберлитовых трубок: А – тр. Пионерская, Б – тр. Карпинского-1, В – тр.  
 95 Сытыканская, Г – тр. Юбилейная, Д – тр. Комсомольская, Ж – россыпи северо-  
 96 востока Сибирского кратона, З – тр. Мир, И – тр. Интернациональная. Поля разной  
 97 цветовой гаммы показывают разброс концентраций элементов.

98 Как видно из спайдер-диаграмм отдельных трубок на рисунке 16, широкий  
 99 разброс значений концентраций в хромшпинелидах характерен лишь для 3  
 100 небольших групп элементов: во-первых, это Na и Ca – крупноионные элементы,  
 101 которые из-за своего размера не могут входить в структуру хромшпинелидов и их  
 102 наличие в полученных анализах возможно связано со структурами распада  
 103 силикатов в хромшпинелидах (Yamamoto et al., 2009); во-вторых, это Cu, Ta и Nb –  
 104 элементы, кларк которых в мантии чрезвычайно низок, поэтому даже небольшое  
 105 изменение концентраций сильно отразится на графике при нормировании на  
 106 хондрит; и в-третьих, это Ti, допустимый разброс которого в хромшпинелидах  
 107 алмазного парагенезиса довольно велик (от 0,00 до 0,70 мас. %). Исходя из этого  
 108 факта, мы можем позволить напрямую проводить сравнение средних по  
 109 мультиэлементным диаграммам не отдельных кимберлитовых трубок, а целых  
 110 алмазоносных районов и провинций.

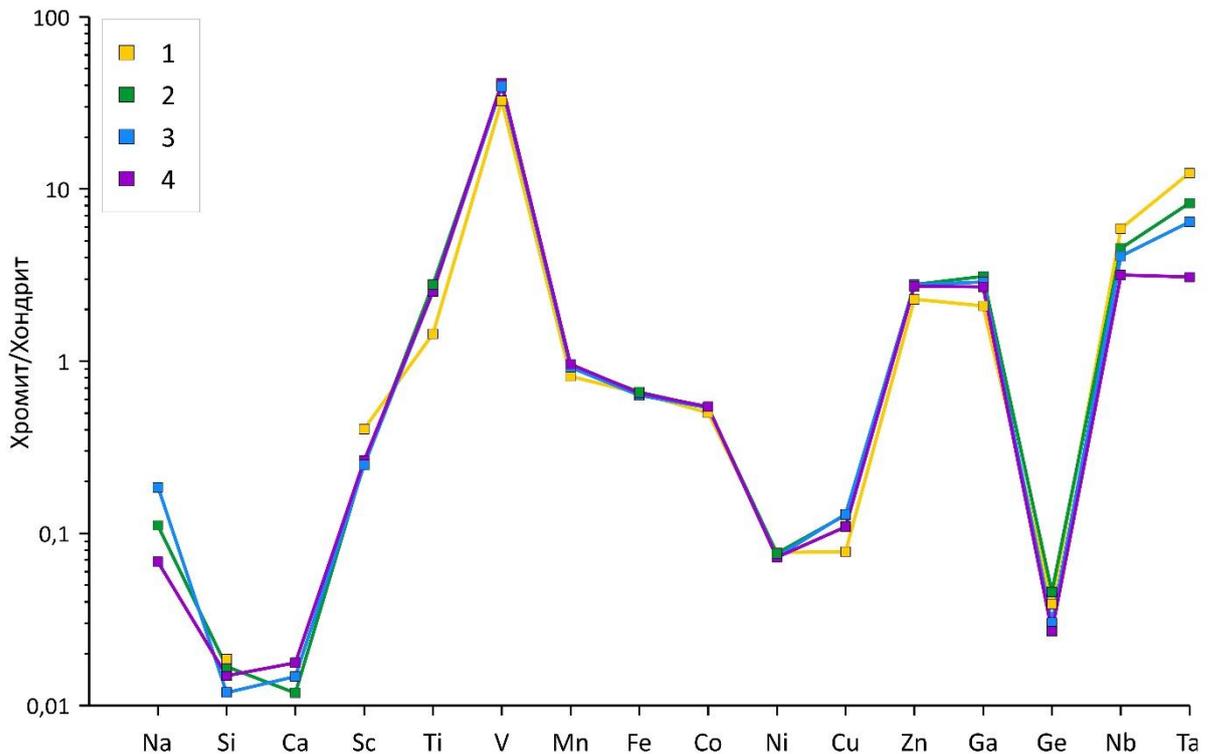


111  
 112 Рисунок 17. Гистограммы содержания примесных элементов (Mn, V, Ta, Zn) в  
 113 хромшпинелидах, включенных в алмазе из кимберлитовых трубок Далдыно-  
 114 Алакитского алмазоносного района (n=142) (1), Мало-Ботубинского (n=61) (2),  
 115 участка Улахан-Курунг-Юрях («курунгский» тип, n=40) (3) и Золотицкого поля  
 116 Архангельской алмазоносной провинции (n=26) (4).

117 Хромшпинелиды из алмазов Золотицкого поля ААП отличаются несколько  
118 повышенным содержанием тантала в составе по сравнению с аналогичными  
119 включениями в алмазах Далдыно-Алакитского и Мало-Ботубинского районов  
120 ЯАП (рисунки 14 и 17; таблицы 4 и 5).

121 Хромшпинелиды в алмазной матрице могут находиться в ассоциации с  
122 разными минералами ультраосновного парагенезиса (оливин, хромдиопсид, пироп  
123 и др.). В работе предпринята попытка оценить, меняется ли характер распределения  
124 редких элементов в хромшпинелидах из алмаза в зависимости от минеральной  
125 ассоциации.

126 В исследованной коллекции алмазов в четырех кристаллах из трубок  
127 Сытыканская и Айхал зафиксирована ассоциация хромшпинелида и хромистого  
128 пироба. Методом лазерной абляции установлено, что характер распределения  
129 редких элементов в этих хромшпинелидах полностью повторяет их средние  
130 содержания в хромшпинелидах из алмазов Мало-Ботубинского района в целом и  
131 отдельных кимберлитовых трубок в частности (рисунок 18). На графике виден  
132 некоторый разброс в содержании Sc, Ti, Mn, Cu, Zn и Ga хромшпинелидов трубок  
133 Айхал и Сытыканская, однако выборка всего из четырех зерен не позволяет сделать  
134 каких-либо надёжных утверждений о различиях состава в зависимости от  
135 парагенезиса и принадлежности к конкретному кимберлитовому телу.



136  
 137 Рисунок 18. Спайдер-диаграмма составов хромшпинелидов из алмазов в сростании  
 138 с гранатом. 1) тр. Айхал; 2-4) тр. Сытыканская.

139  
 140 **4.6. Вариации химического состава включений магнезиохромита в**  
 141 **пределах кристалла алмаза-матрицы**

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

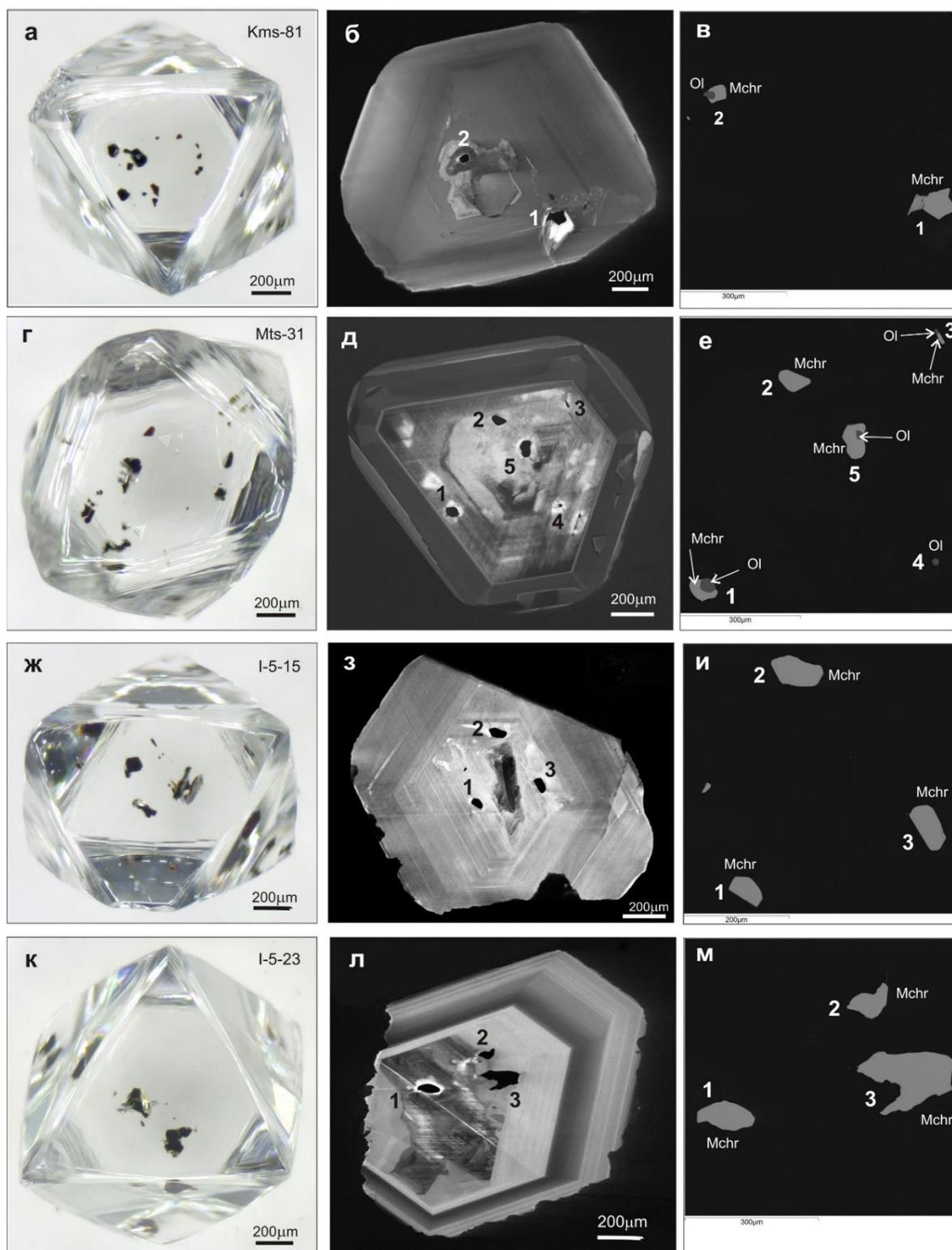
147 Отдельные зоны роста исследованных алмазов, а также зоны с  
 148 преимущественным расположением включений выявлены с помощью  
 149 катодolumинесценции. Различная ростовая история изученных шести кристаллов  
 150 алмаза отражена на рисунках 19 (б, д, з, л) и 10 (б, д) в КЛ изображениях различной  
 151 интенсивности. Номера, представленные на КЛ изображениях алмазов, а также в  
 152 правой части рисунков вместе с символами включенных минералов  
 153 демонстрируют общий вид и расположение включений на пришлифованной

154 поверхности каждого алмаза-матрицы. Морфология зерен включенных минералов  
155 отражает влияние вмещающих их алмазов в разной степени: от полного или почти  
156 полного сохранения первичной огранки (обр. Mts-31, I-5-15, Yubk-235) до почти  
157 полностью резорбированных зерен (обр. Kms-81, I-5-23, Mts-30).

158 Уникальным по представительности доступных для анализа включений  
159 магнезиохромита и оливина является обр. Mts-31 (рисунок 19, г, д, е), в котором на  
160 шлифованной поверхности выведены четыре включения магнезиохромита,  
161 причем три из них содержат оливин в виде включений и сростка. Анализы  
162 включений представлены в таблице и характеризуются близкими составами  
163 оливина (таблица 7) с Fo 93,4 – 93,6, но с различиями в составах магнезиохромита  
164 от 60,1 – 61, 1 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 8,47 - 8,78 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в центральной части алмаза  
165 (ан. 2 и 5) до 63,1 – 63,2 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 6,82 – 6,88 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в краевой части (ан.  
166 1 и 3). Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приведено только для изолированного включения  
167 оливина (ан. 4), во избежание фона от ассоциирующих магнезиохромитов.

168 Достаточно четкие различия в содержании Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также #Mg  
169 характерны для обр. Kms-81 с уменьшением #Mg и увеличением #Cr к внешней  
170 части образца (рисунок 19 а, б, в), а также I-5-29 и Kms-84/35 (рисунок 20).  
171 Химические анализы пронумерованных на рисунках включений приведены в  
172 таблицах 7 и 8. Разница в содержании Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> варьирует в этих образцах от 2  
173 до 2,5 мас. % в зависимости от расположения включений в пределах определенных  
174 ростовых зон алмаза-матрицы. С помощью Zn-геотермометра зафиксирована  
175 разница в температурном режиме около 100 °С.

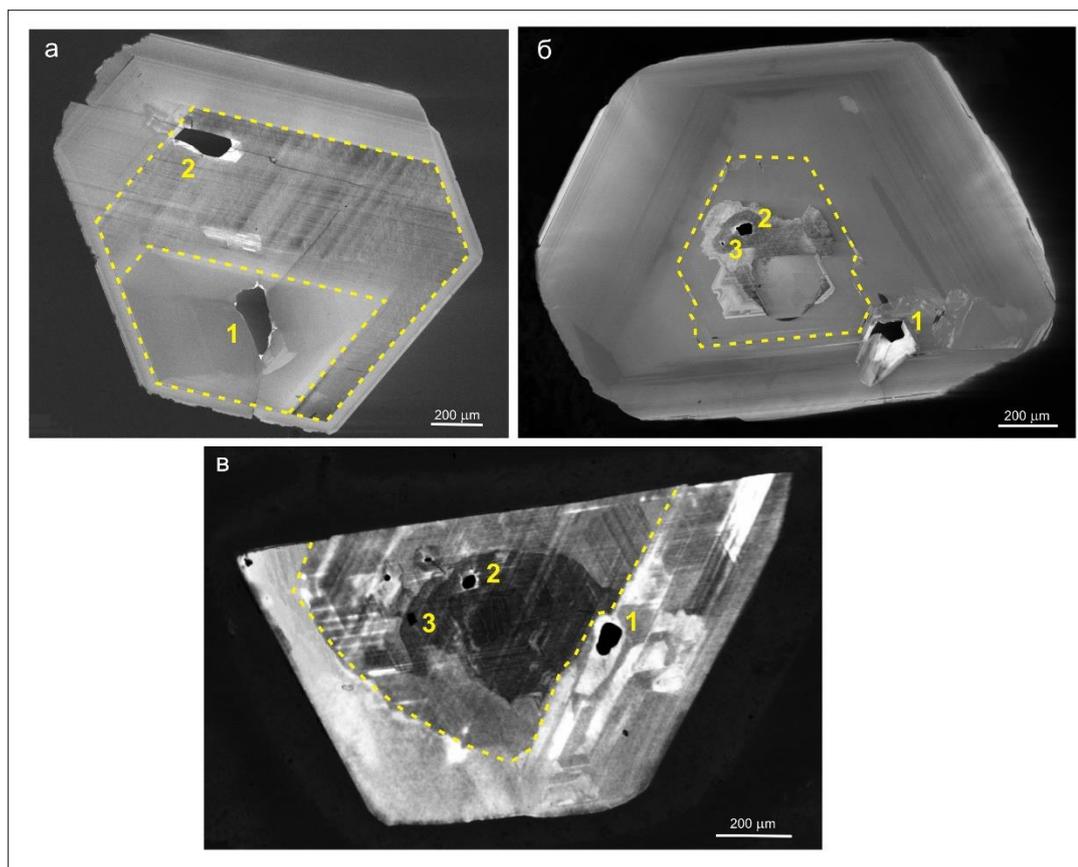
176 Остальные два образца, представленные на рисунках 19, I-5-15 (ж, з, и) и I-5-  
177 23 (к, л, м) содержат по три включения магнезиохромита, приуроченных к одной  
178 основной зоне роста алмаза. Составы включений в каждом из образцов  
179 практически не различаются (таблица 7).



180  
 181 Рисунок 19. Общий вид кристаллов алмаза из кимберлитовых трубок  
 182 Комсомольская (Kms-81), Мир (Mts-31), Интернациональная (I-5-15 и I-5-23) перед  
 183 шлифованиём (а, г, ж, к), КЛ изображения тех же алмазов с номером  
 184 пришлифованных включений (б, д, з, л); положение пришлифованных включений  
 185 в каждом алмазе. Условные обозначения: Mchr – магнезиохромит, Ol – оливин.  
 186 Номера включений соответствуют номерам анализов в таблице 7.

187 Таблица 7 Химический состав минеральных включений в алмазах (мас. %)

1. Магнезиохромит															
Образец	№ вкл-ния	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	ZnO	NiO	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма	#Cr	#Mg	
Kms-81	1	0,11	0,35	6,34	63,9	14,8	0,17	12,8	0,08	0,07	0,24	98,86	87,1	63,2	
	2	0,06	0,41	7,91	61,2	14,8	0,18	13,4	0,08	0,07	0,25	98,36	83,8	65,8	
Mts-31	1	0,05	0,19	6,88	63,2	16,7	0,19	12,0	0,08	0,06	0,36	99,71	86,0	59,4	
	2	0,08	0,20	8,78	60,1	16,6	0,17	12,6	0,11	0,09	0,39	99,12	82,1	61,9	
	3	0,04	0,17	6,82	63,1	16,4	0,18	12,0	0,10	0,06	0,34	99,21	86,1	59,8	
	5	0,08	0,19	8,47	61,1	16,5	0,19	12,0	0,07	0,05	0,29	98,94	82,8	59,3	
I-5-15	1	0,12	0,11	6,82	63,0	16,7	0,18	12,1	0,07	0,07	0,34	99,51	86,1	60,0	
	2	0,01	0,10	7,17	63,1	16,7	0,16	12,4	0,05	0,06	0,34	100,2	85,5	61,1	
	3	0,06	0,09	7,16	62,9	16,8	0,17	12,2	0,08	0,07	0,31	99,84	85,5	60,3	
I-5-23	1	0,12	0,08	6,82	63,0	16,6	0,19	12,1	0,04	0,06	0,32	99,33	86,1	60,1	
	2	0,08	0,06	6,68	62,7	17,1	0,17	12,0	0,09	0,06	0,32	99,26	86,3	59,8	
	3	0,09	0,05	6,87	62,9	16,6	0,18	12,2	0,10	0,06	0,31	99,36	86,0	60,6	
Yubk-235	1	0,17	0,87	14,2	54,8	13,0	0,11	15,5	0,03	0,06	0,20	98,94	72,1	71,4	
	2	0,19	0,82	13,2	55,7	12,8	0,11	15,2	0,08	0,08	0,16	98,34	73,9	70,9	
	3	0,15	0,83	14,4	53,9	12,7	0,13	15,7	0,06	0,08	0,17	98,12	71,5	72,9	
Mts-30	1	0,03	0,43	7,69	60,9	17,3	0,18	12,3	0,07	0,09	0,35	99,34	84,2	60,5	
	2	0,09	0,44	7,69	60,5	17,0	0,18	12,3	0,06	0,08	0,35	98,69	84,1	60,6	
2. Оливин															
Образец	№ вкл-ния	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Сумма	Fo			
Mts-31	1	40,9	<0,01	н.о.	-	6,42	0,10	51,0	0,01	0,36	98,79	93,4			
	3	41,2	<0,01	н.о.	-	6,34	0,09	51,2	0,01	0,38	99,22	93,5			
	4	41,0	<0,01	н.о.	0,15	6,29	0,10	51,1	<0,01	0,34	98,99	93,5			
	5	40,8	<0,01	н.о.	-	6,28	0,09	51,3	0,02	0,35	98,84	93,6			
Kms-81	1	41,6	<0,01	н.о.	-	5,52	н.о.	52,1	<0,01	0,34	99,56	94,4			
3. Пироп															
Образец	№ вкл-ния	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	#Cr	#Mg			
Yubk-235	1	41,3	0,32	19,5	6,05	4,9	0,48	21,4	5,37	99,32	17,2	88,6			
4. Флогопит															
Образец	№ вкл-ния	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O	NiO	BaO	Cl	Сумма	#Cr	#Mg
Mts-30	1	41,5	0,62	12,6	1,79	2,93	< 0,01	24,5	10,6	0,28	0,57	0,18	95,57	8,7	93,7



189  
 190 Рисунок 20. Кристаллы алмаза с включениями магнезиохромита, расположенными  
 191 в разных зонах кристалла-матрицы: а – Kms-84/35; б – Kms-81; в – I-5-29.  
 192 Штрихпунктирной линией указаны границы ростовых зон алмаза-матрицы.

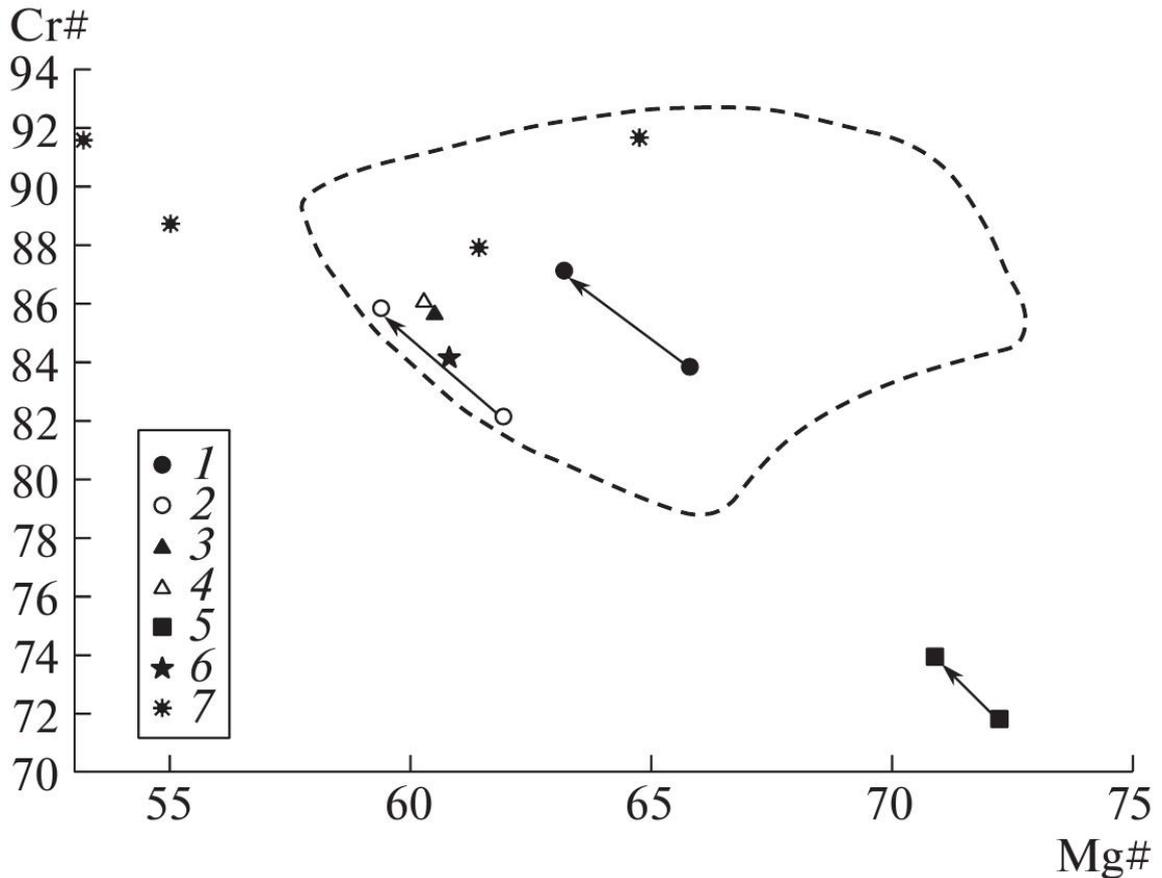
193 Таблица 8. Химический состав включений магнезиохромита в алмазе из тр.  
 194 Комсомольская и Интернациональная

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

195  
 196 На рисунке 21 стрелками показана общая тенденция изменения хромистости  
 197 и магнезиальности в магнезиохромитах, расположенных в разных зонах алмаза. В  
 198 период роста индивидуальных кристаллов алмаза происходит постепенное  
 199 снижение температуры. Выявленные закономерности убедительно

200 обосновываются применением Zn геотермометра для хромшпинелидов,  
 201 включенных в алмазы с определением температурного интервала при росте  
 202 конкретного кристалла алмаза до 400°C при понижении температуры (Griffin et al.,  
 203 1994).

204 Полученные в работе результаты по соотношению катодOLUMИнесценции и  
 205 анализа изменения состава включенных минералов позволяют оценить сложный  
 206 характер роста алмаза-матрицы в каждом конкретном случае.



207  
 208 Рисунок 21. Вариации состава включений магнезиохромита в процессе роста  
 209 исследованных алмазов: Kms-81 (1), Mts-31 (2), I-5-15 (3), I-15-23 (4), Yubk-235 (5),  
 210 Mts-30 (6). Положение точек состава магнезиохромитов, извлеченных из внешней  
 211 части четырех образцов крупных алмазов трубки Удачная (7) по (Соболев и др.,  
 212 2001). Стрелками указано общее направление понижения температуры роста  
 213 алмазов (Wiggers et al., 2011; Логвинова и др., 2021). Пунктирная линия  
 214 оконтуривает область вариаций состава магнезиохромитов в алмазах (Bulanova,  
 215 1995; Соболев и др., 2020).

217

218

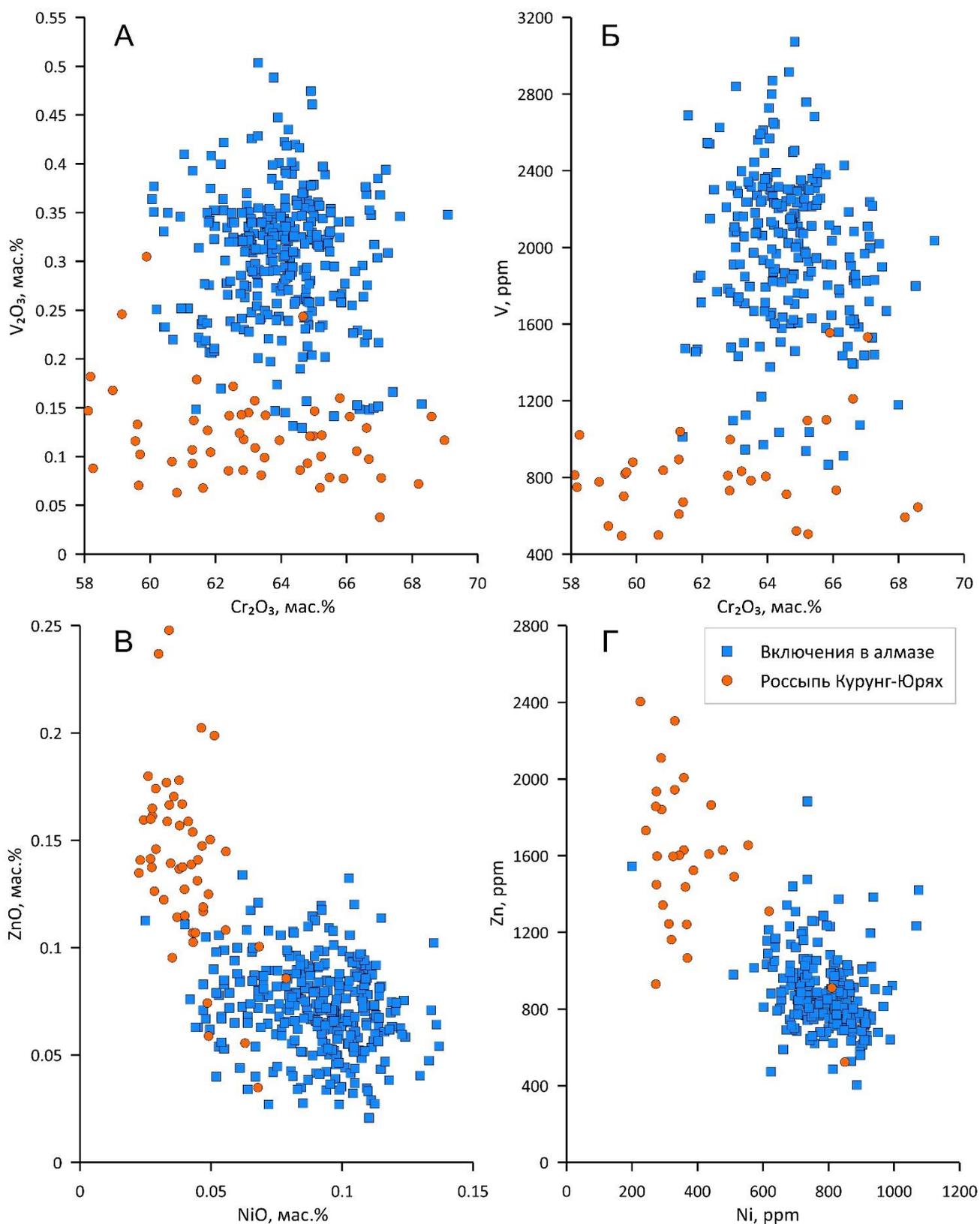
#### 219 **4.7. Микропримесный состав хромшпинелидов «курунгского» типа**

220 В этом разделе проведен сравнительный анализ редкоэлементного состава  
221 хромшпинелидов «курунгского» типа и таковых включений в алмазах из  
222 кимберлитовых трубок Мир и Интернациональная, которые находятся в том же  
223 Мало-Ботуобинском алмазоносном районе, где и участок Курунг-Юрях.

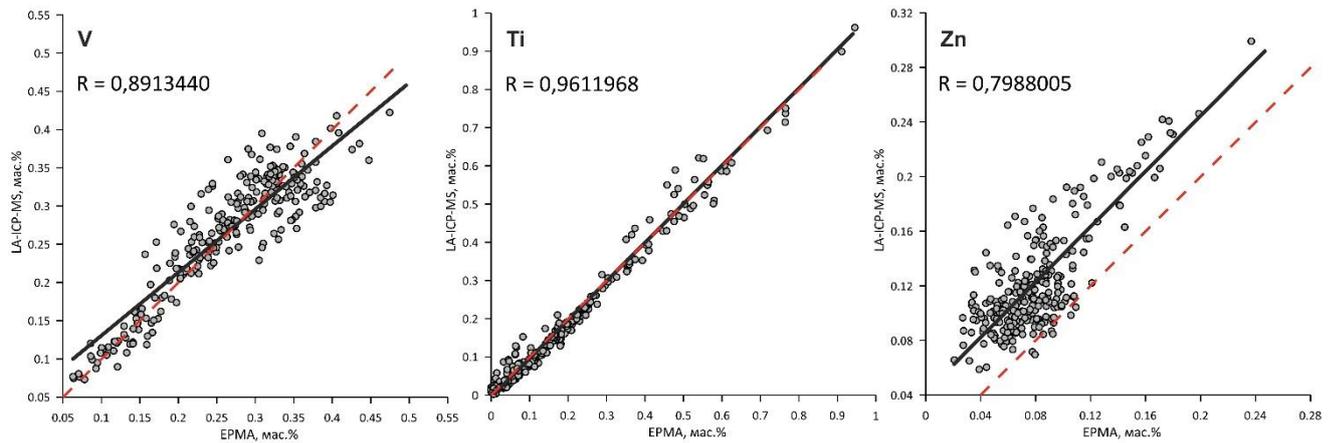
224 Среди хромшпинелидов из россыпи Курунг-Юрях отобраны кристаллы, по  
225 содержанию  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  близкие к хромшпинелидам, включенным в алмазе  
226 (рисунок 12).

227 На начальных этапах проводимых исследований методом микрозондового  
228 анализа были выявлены существенные различия этих двух групп по содержанию  
229 ванадия, никеля и цинка (рисунок 22 а, в; таблица 1). Хромшпинелиды  
230 «курунгского» типа характеризуются меньшим содержанием ванадия, никеля и в  
231 большей степени обогащены, цинком. Для подтверждения такой закономерности  
232 все образцы были исследованы методом масс-спектрометрии с индуктивно-  
233 связанной плазмой с лазерной абляцией. с целью подтверждения характера  
234 распределения микроэлементов в их составе (рисунок 22 б, г). Было выяснено, что  
235 характер распределения микроэлементов в исследованных двух группах  
236 хромшпинелидов по данным EPMA и LA-ICP-MS аналогичен.

237 На представительном количестве образцов также были построены  
238 корреляционные диаграммы по содержанию титана, ванадия и цинка в  
239 хромшпинелиде из алмазов, определенных методом микрозондового анализа  
240 (EPMA) и масс-спектрометрии с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) (рисунок 23).  
241 Значения коэффициентов корреляции получились около 1 (для Ti -0,96; для V -0,89  
242 и для Zn -0,80).



243  
 244 Рисунок 22 Распределение элементов в составе хромшпинелидов «курунгского»  
 245 типа и включений в алмазах из кимберлитовых трубок Мало-Ботубинского района  
 246 Сибирского кратона: (А)  $V_2O_3 - Cr_2O_3$  (EPMA); (Б)  $V - Cr_2O_3$ , значения  $V$  – LA-ICP-  
 247 MS; (в)  $ZnO - NiO$  (EPMA); (г)  $Zn - Ni$  (LA-ICP-MS).



248  
 249 Рисунок 23. Графики положительной корреляции по содержанию титана (Ti),  
 250 ванадия (V) и цинка (Zn) в хромшпинелидах из алмазов, определенных методом  
 251 микрозондового анализа (EPMA) и лазерной абляции (LA ICP MS). R –  
 252 коэффициент корреляции (чёрная линия); Красная пунктирная линия – R=1 (X=Y).

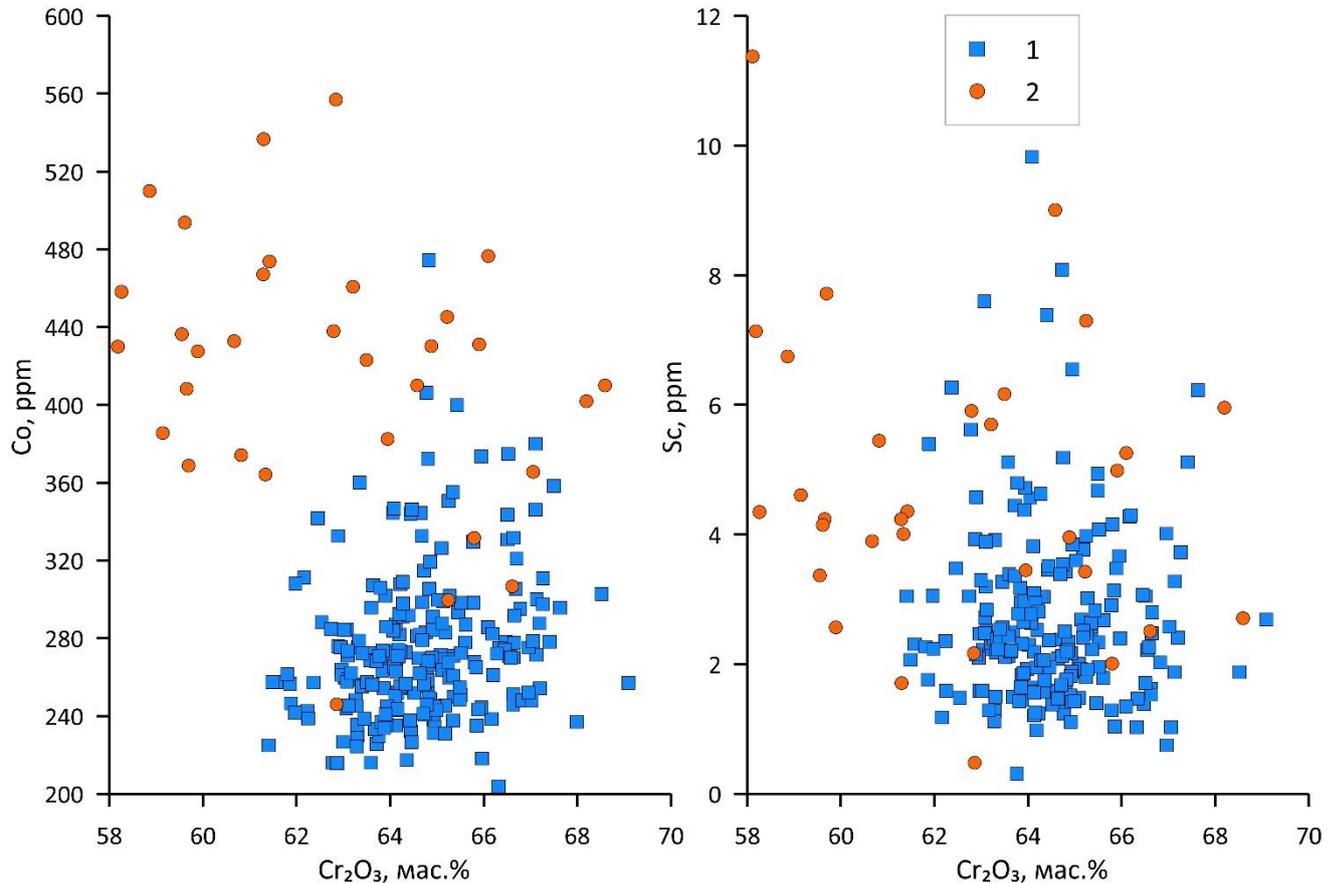
253 Это означает, что для идентификации хромшпинелидов алмазного  
 254 парагенезиса при нахождении их в условиях аллювиальных отложений, вместе с  
 255 хромшпинелидами других генетических типов, можно определять их химический  
 256 состав с использованием более доступного метода микрозондового анализа.

257 Более детальные исследования содержания редких элементов были  
 258 проведены методом LA ICP MS на двух приборах в ИГХ СО РАН (г. Иркутск) и  
 259 Гуанчжоуского Института Геохимии (Китай). Представительные результаты для  
 260 указанных двух выборок хромшпинелидов приведены в таблицах 9 и 10.

261 Построение спайдер диаграммы средних составов хромшпинелидов из  
 262 алмазов ЯАП, ААП, мантийных ксенолитов и хромшпинелидов участка Улахан-  
 263 Курунг-Юрях позволяет наглядно продемонстрировать различия в содержаниях  
 264 примесных элементов: на этой спайдер-диаграмме четко прослеживаются отличия  
 265 курунжских хромшпинелидов по содержанию V, Ni, Zn, Co, Cu, а также Sc, Nb и Ta  
 266 (рисунки 24, 25).

267 Содержания Ta и Nb в хромшпинелидах из алмазоносной россыпи Курунг-  
 268 Юрях, оказались значительно ниже, чем в хромшпинелидах из алмазов. Для  
 269 «курунжских»:  $Ta_{\text{сред}} - 0,027$  и  $Nb_{\text{сред}} - 0,030$  ppm; для «алмазных»:  $Ta_{\text{сред}} - 0,113$  и  
 270  $Nb_{\text{сред}} - 1,28$  ppm. Вероятно, это связано с тем, что хромшпинелиды алмазоносной  
 271 россыпи Курунг-Юрях имеют коровое происхождение, в то время как

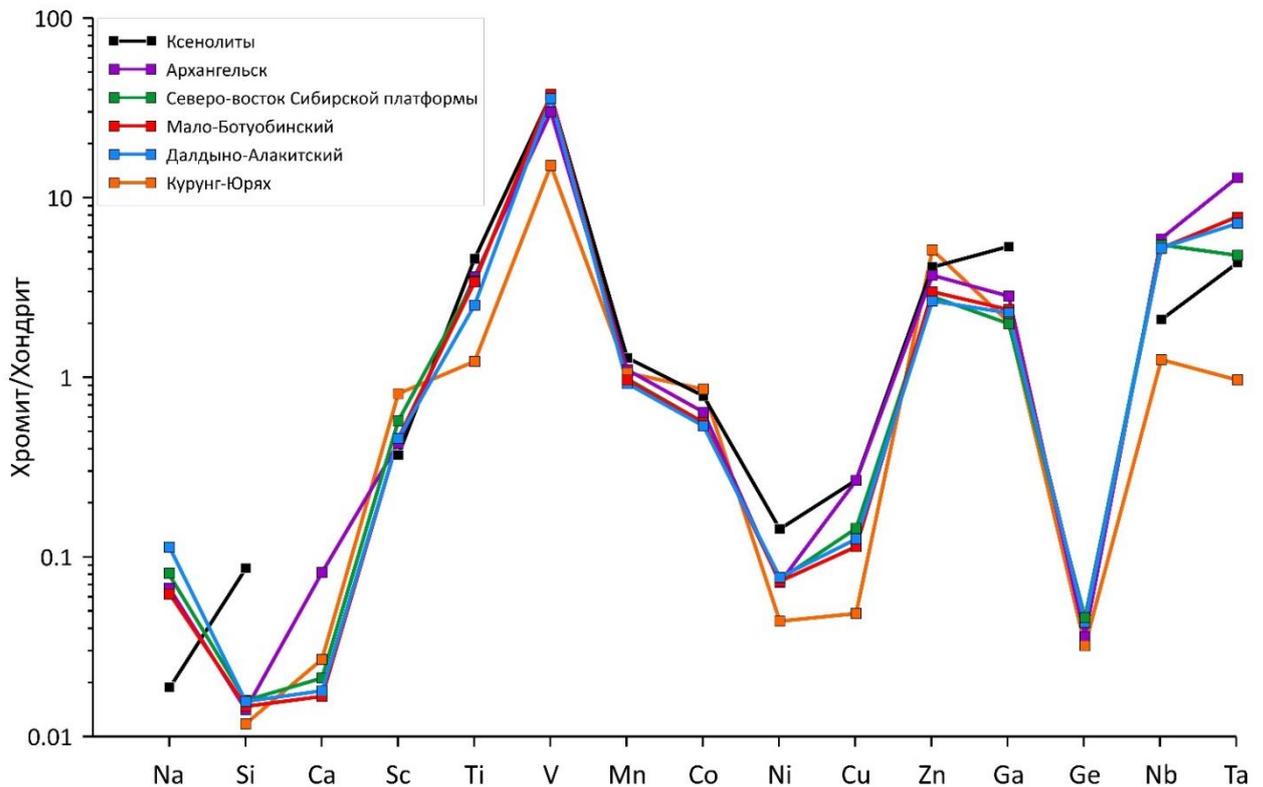
272 хромшпинелиды из алмазов являются мантийными (Афанасьев и др., 2000), и  
 273 разница в концентрациях Ta и Nb должна быть связана с общим обеднением земной  
 274 коры этими элементами по сравнению с веществом мантии (Rudnik et al., 2000;  
 275 Weyer et al., 2003).



276  
 277 Рисунок 24. Диаграммы зависимости Co (ppm) и Sc (ppm) (ICP-MS) от Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (мас.  
 278 %) (Микрозонд) в составе хромшпинелидов «курунгского» типа и включений в  
 279 алмазах из кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского района Сибирского  
 280 кратона: Условные обозначения на рисунке 22.

281 Проверка нашего предположения путём сравнения примесного состава  
 282 хромшпинелидов алмазного парагенезиса с хромшпинелидами из алмазоносного  
 283 участка Улахан-Курунг-Юрях показало различие в концентрациях по всем  
 284 изученным элементам, за исключением Si. Наиболее значимые, двукратные  
 285 различия были обнаружены в концентрациях – ZnO -0,07 мас. % и 0,15 мас. % в  
 286 хромшпинелидах алмазного парагенезиса и хромшпинелидов из алмазоносной  
 287 россыпи Курунг-Юрях соответственно, и в концентрациях V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,30 мас. % и 0,15  
 288 мас. % аналогично.

289 Содержание Ga в хромшпинелидах рассматриваемых групп практически  
 290 одинаковое (таблица 6). В таблице 6 приведены средние значения и стандартное  
 291 отклонение содержания всех элементов, входящих в состав хромшпинелидов.



292  
 293 Рисунок 25 Диаграмма распределения микроэлементов в хромшпинелидах из  
 294 алмазов, мантийных ксенолитов и хромшпинелидов «курунгского» типа. Данные  
 295 нормированы на хондрит CI.

296 Таким образом, полученные результаты по микропримесному составу в  
 297 хромшпинелидах из алмазов и «курунгского» типа позволяют надежно разделить  
 298 эти две группы в условиях аллювиальных отложений. Важную роль такие  
 299 исследования играют для решения проблемы поисков коренных источников  
 300 алмазов.

301 Таблица 9. Представительные анализы содержания главных (мас. %) и редких элементов (г/т) в хромшпинелидах-  
302 включений в алмазах из кимберлитовых трубок Мало-Ботубинского алмазоносного района.

№обр.	гр. Мир																гр. Интернациональная				
	673	678	679	771	773	788	789	792	793	795	797	799	801	803	19	29	104	И-10	153	И-5	И-23
SiO <sub>2</sub>	0,05	0,05	0,11	0,10	0,11	0,09	0,06	0,18	0,09	0,10	0,08	0,11	0,10	0,18	0,05	0,06	0,05	0,08	0,04	0,08	0,09
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,25	0,22	0,40	0,18	0,11	0,17	0,12	0,13	0,16	0,15	0,24	0,26	0,13	0,53	0,40	0,52	0,22	0,06	0,06	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,42	6,16	6,59	6,81	6,86	8,77	6,93	5,20	6,18	7,56	6,55	7,03	4,07	4,19	5,05	5,09	6,12	6,83	6,97	6,68	6,87
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	65,5	63,6	64,4	63,2	64,2	62,5	64,2	65,9	64,9	63,6	64,2	64,8	67,3	67,6	64,7	65,2	63,5	63,3	63,4	62,7	62,9
FeO	16,5	18,1	15,7	16,3	15,6	14,3	15,1	14,9	15,3	14,8	16,3	13,3	15,3	14,0	18,2	16,1	18,0	17,1	16,2	17,1	16,6
MnO	0,23	0,23	0,23	0,19	0,24	0,18	0,22	0,21	0,28	0,20	0,24	0,22	0,22	0,23	0,22	0,26	0,24	0,20	0,17	0,20	0,17
MgO	12,1	11,3	12,7	12,8	12,9	13,8	13,1	13,2	12,7	13,1	12,6	14,2	12,6	13,3	11,2	12,5	11,4	11,8	12,2	12,0	12,2
ZnO	0,07	0,11	0,06	0,05	0,07	0,05	0,10	0,03	0,11	0,04	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10
NiO	0,09	0,08	0,09	0,12	0,09	0,10	0,14	0,11	0,10	0,09	0,08	0,11	0,11	0,11	0,09	0,08	0,08	0,10	0,06	0,06	0,06
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33	0,35	0,37	0,33	0,34	0,32	0,39	0,28	0,47	0,33	0,44	0,29	0,31	0,35	0,23	0,23	0,25	0,24	0,34	0,32	0,31
Сумма	100,4	100,3	100,4	100,3	100,5	100,2	100,3	100,2	100,2	100,0	100,7	100,4	100,2	100,2	100,4	100,0	100,2	100,0	99,6	99,3	99,4
#Cr	92,4	91,2	90,7	90,3	90,3	87,7	90,3	92,7	91,3	89,4	90,8	90,2	94,3	94,2	92,8	92,8	91,2	90,3	90,1	90,4	90,1
#Fe	57,6	61,7	55,3	56,0	54,7	50,9	53,5	53,0	54,6	53,1	56,5	48,4	54,8	51,3	61,9	56,2	61,2	59,2	57,0	58,6	57,7
Sc	1,43	2,06	2,84	3,48	2,11	3,54	2,52	4,68	2,41	4,38	1,86	3,10	4,72	4,08	1,26	2,58	1,48	3,67	н/п	н/п	1,93
Ti	619	1446	1196	2354	955	571	946	667	693	918	777	1351	1459	688	2972	2266	2926	1259	633	357	354
V	1743	2446	2161	1971	2219	1794	2151	2152	2872	1827	2594	1824	1670	1910	1715	1605	1670	1727	2212	2324	2002
Mn	1678	1967	1716	1633	1680	1550	1768	1716	2148	1637	1817	1618	1617	1777	1840	2099	1851	1741	1885	2145	1718
Co	245	295	256	245	254	245	279	238	270	247	271	243	216	244	308	307	295	262	284	332	284
Ni	705	637	743	845	777	815	980	840	808	602	661	827	869	774	717	683	700	781	806	942	796
Cu	10,7	12,2	9,76	9,01	11,2	4,30	4,50	4,38	14,9	10,5	10,3	14,8	4,27	11,7	7,06	18,3	6,98	8,89	7,48	11,3	7,98
Zn	848	1170	820	805	869	750	896	690	904	811	961	722	528	680	1193	1028	1122	882	987	904	849
Ga	18,9	14,6	13,5	22,1	14,4	11,5	14,8	14,9	16,1	21,3	27,7	25,7	12,9	13,2	36,2	14,8	36,2	25,9	21,4	21,1	19,3
Ge	н/п	1,91	н/п	1,19	0,86	1,49	0,75	1,85	1,35	1,65	1,15	0,82	1,28	1,50	н/п	0,75	0,83	0,94	н/п	н/п	н/п
Nb	0,86	0,83	1,18	2,12	1,91	1,41	1,36	0,74	0,88	1,29	1,75	1,09	0,96	1,28	0,84	1,41	1,52	1,63	н/п	2,78	3,47
Ta	0,03	0,04	0,08	0,23	0,24	0,16	0,11	0,05	0,05	0,15	0,09	0,12	0,05	0,14	0,05	0,09	0,13	0,22	0,03	0,10	0,24

303 Примечание: : н/п – содержание элемента ниже предела обнаружения

304 Таблица 10. Представительные анализы содержания главных (мас. %) и редких элементов (г/т) в хромшпинелидах  
305 «курунгского» типа.

№ <sub>обр.</sub>	K1	K20	K48	K90	K93	K114	K138	K142	K147	K161	Ю123	Ю264	Ю265	Ю159	Ю200	Ю80	Ю17	Ю169	Ю83	Ю205	Ю9	
SiO <sub>2</sub>	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	0,02	н/п	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	н/п	н/п	0,02	н/п	
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,01	0,07	0,01	0,01	0,05	0,01	0,04	0,08	0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	0,03	0,07	0,03	0,05	0,14	0,11	0,04	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,29	10,3	7,78	7,21	7,31	7,2	6,07	4,93	5,6	10,3	3,73	5,1	10,7	8,13	4,29	6,75	4,99	7,5	8,41	8,16	5,88	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61,3	60,7	59,5	65,2	63,2	61,3	64,5	62,8	65,8	59,6	68,2	65,9	59,7	61,3	66,3	63,9	65,2	62,9	58,3	60,8	63,5	
FeO	21,6	17,4	22,8	16,1	19,9	21,1	20	24,4	18,3	18,8	16,6	17,6	17,6	19,3	18,2	18,2	19,5	18,2	22,6	20,1	19,8	
MnO	0,28	0,24	0,33	0,21	0,28	0,28	0,23	0,34	0,25	0,26	0,2	0,24	0,22	0,28	0,27	0,26	0,29	0,24	0,31	0,27	0,21	
MgO	9,78	11,3	9,05	11,4	9,45	9,89	9,04	7,78	9,89	10,5	11,3	10,9	11,7	9,91	10,5	10	9,45	10,9	9,93	10,1	9,5	
ZnO	0,12	0,14	0,11	0,12	0,16	0,12	0,24	0,16	0,16	0,18	0,14	0,07	0,1	0,16	0,17	0,14	0,17	0,11	0,17	0,14	0,2	
NiO	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	0,023	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01	0,06	0,04	0,03	0,05	
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,1	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,09	0,16	0,13	0,07	0,08	0,1	0,14	0,08	0,12	0,1	0,12	0,09	0,06	0,1	
Сумма	100,5	100,2	99,8	100,4	100,4	100,1	100,2	100,6	100,3	99,9	100,3	99,9	100,3	99,3	99,88	99,5	99,8	100,1	99,9	99,8	99,3	
#Cr	89,4	85,6	88,4	90	89,6	89,5	91,4	92,7	92,2	85,3	94,8	92,8	84,8	88,3	94,0	90,5	92,9	89,3	87,4	88,2	91,5	
#Fe	68,8	60,5	71,6	58,6	67,8	68,1	68,9	75,8	65,0	64,1	59,5	61,7	60,0	66,0	63,4	64,5	67,4	62,6	69,4	66,4	67,6	
Sc	5,96	2,71	7,14	5,45	6,17	9,01	1,71	6,85	2,57	5,26	2,62	3,90	4,21	5,92	3,37	5,99	6,76	5,70	4,36	3,96	2,17	
Ti	555	208	749	79,4	108	530	140	401	913	107	142	83,5	245	34,4	183	445	128	294	1043	634	226	
V	594	646	751	838	785	714	610	817	881	735	518	500	767	810	496	834	778	834	673	522	732	
Mn	2151	1975	2539	1705	2244	2201	2029	2790	2068	2124	1740	2145	1869	2013	2112	1980	2457	1828	2724	2322	2046	
Co	402	410	430	374	423	410	537	431	428	477	456	433	465	438	436	438	510	461	474	430	557	
Ni	367	358	274	320	242	312	225	281	290	272	415	272	537	358	344	418	330	387	555	363	330	
Cu	н/п	1,76	н/п	8,87	н/п	н/п	н/п	н/п	3,25	н/п	2,59	н/п	3,42	0,69	2,61	1,07	0,58	1,43	0,63	н/п	0,52	
Zn	1242	1630	1449	1162	1731	1244	2404	1810	1841	1857	1440	930	1545	2007	1602	1651	1944	1523	1655	1437	2304	
Ga	18,2	24,0	16,6	10,7	11,0	16,3	9,19	15,6	24,0	14,3	10,3	7,80	19,8	11,2	8,2	14,9	10,1	16,1	21,9	18,5	14,8	
Ge	н/п	н/п	0,77	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	1,31	н/п	н/п	н/п	0,7	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	0,69	0,68	н/п
Nb	0,37	0,53	0,37	0,37	0,3	0,47	0,5	0,37	0,38	0,39	0,15	0,09	0,09	0,11	0,12	0,08	0,14	0,11	0,12	0,1	0,11	
Ta	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	0,01	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	

306 Примечание: н/п – содержание элемента ниже предела обнаружения

## ГЛАВА 5 ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ХРОМШПИНЕЛИДОВ ИЗ АЛМАЗОВ

### 5.1. Использование Zn-шпинелевого геотермометра для включений в алмазе

Изменение P-T параметров в минералообразующих средах вносит коррективы в состав сосуществующих фаз, которые стремятся в этом случае к равновесию в создавшихся новых условиях. На этом основана современная геотермобарометрия мантийных минералов и пород. В литосферной мантии резко преобладают ультраосновные породы, в связи с чем для термобарометрических построений обычно используют особенности реакции гранатизации перидотитов. Наиболее точные расчеты получаются для природных систем, включающих хотя бы четыре сосуществующие фазы (оливин, пироп, клинопироксен и хромит). Однако, как правило, из первичных не измененных фаз можно использовать пироп, встречающийся достаточно редко. Поэтому наиболее надежным способом является расчет температуры по закапсулированным включениям в алмазе, в частности хромшпинелидах (Griffin, Ryan, 1995).

Содержание хрома в пиропе служит индикатором давления, а цинка в хромите – определения температуры, на основе чего была разработана методика определения температуры равновесия глубинных ультраосновных пород по содержанию цинка в хромите (Griffin et al., 1993; Лаврентьев и др., 2005).

Поскольку концентрации Zn в мантийных ксенолитах являются практически неизменными ( $52 \pm 14$  ppm) (Ryan et al., 1996; Nimis, 2022), то концентрация Zn в хромшпинелидах мантийного генезиса, и во включениях в алмазах в частности, может быть использована для определения температуры для зёрен хромшпинелидов. Согласно формуле (Ryan et al, 1996), были рассчитаны температуры для всех имеющихся хромшпинелидов из алмазов:

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

Средние температуры для алмазов из Далдыно-Алакитского и Мало-Ботуобинского районов ЯАП составляют около  $900 \pm 74$  °С и  $813 \pm 71$  °С соответственно. Средние температуры образования хромшпинелидов из алмазов ДА выше температуры хромшпинелидов МБ на  $\sim 50$  °С ( $923$  °С и  $880$  °С соответственно) (таблица 11).

Таблица 11 Определенные по Zn-шпинелевому геотермометру (Ryan et al., 1996) температуры равновесия хромшпинелидов-включений в алмазах из кимберлитовых трубок ЯАП и ААП

Трубка/объект	$T_{\text{мин}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{медиан}}, ^\circ\text{C}$
<b>Якутская алмазоносная провинция</b>			
Сытыканская	840	970	890
Краснопресненская	890	1000	950
Удачная	720	1050	910
Айхал	870	1030	940
Комсомольская	790	1240	940
Юбилейная	800	900	880
Мир	740	1100	890
Интернациональная	760	920	890
Северные трубки	830	980	900
<b>Архангельская алмазоносная провинция</b>			
Пионерская	670	920	820
Карпинского	770	880	780
Ломоносовская	750	960	800

В обзорной работе (Griffin et al., 1993) рассматриваются соотносящиеся температуры, полученные для включений хромшпинелидов ( $T_{Zn}$ ) в ассоциации с гранатами ( $T_{Ni}$ ) в алмазах ЯАП. Рассчитанные температуры для трубок ДА в среднем составляют  $1115-1145$  °С и  $1015$  для трубок МБ. Для сравнения с ААП были рассчитаны температуры для хромшпинелидов из алмазов кимберлитовой трубки Карпинского-I (Квасница и др., 1993): они варьируются в пределах  $885-$

353 960 °C ( $T_{\text{сред.}} = 920$  °C). Литературные данные по  $T_{\text{Zn}}$  в среднем оказались немного  
354 завышены по сравнению с нашими, но общая тенденция, что включения  
355 хромшпинелидов в алмазах МБ имели меньшую температуру равновесия, чем  
356 хромшпинелиды ДА, а хромшпинелиды ААП меньшею, чем хромшпинелиды из  
357 ЯАП согласуется и с нашими данными. Мы предполагаем, что более низкие  
358 рассчитанные нами температуры обусловлены использованием данных LA-ICP-  
359 MS в нашем исследовании, тогда как оригинальный термометр Ryan (1996) был  
360 откалиброван с помощью анализов с протонного зонда: аналогично протонный  
361 зонд был использован в работе Griffin et al., 1993; в работе Квасницы и соавторов  
362 (1993) представлены анализы микрозонда, который как упоминалось ранее (4.7)  
363 занижает содержания Zn относительно данных LA-ICP-MS. Эти методологические  
364 различия вероятно и являются причиной такой разницы. Каких-либо значимых  
365 различий по температурам в пределах трубок одной алмазоносной провинции или  
366 района выявлено не было (таблица 11). Можно отметить, что в ААП полученные  
367 температуры в среднем на 90 °C ниже, температур хромшпинелидов ЯАП.

368       Активная дискуссия, обсуждающая соотношение алмаза и включенных  
369 минералов, практически не затрагивает проблему сложного характера роста самих  
370 алмазов, выявляемого рядом подходов, в число которых входит  
371 катодолюминесценция, анализ изменения состава включенных минералов (Griffin  
372 et al., 1993; Bulanova, 1995; Wiggers et al., 2011), а также сопоставление  
373 соотношения алмазов и ассоциирующих минералов в известных ксенолитах  
374 алмазосодержащих перидотитов в кимберлитах (Илупин и др., 1982; Соболев и др.,  
375 2020). В период роста индивидуальных кристаллов алмаза происходит постепенное  
376 снижение температуры, что убедительно показано применением Zn геотермометра  
377 для хромшпинелидов, включенных в алмазы с определением температурного  
378 интервала при росте конкретного кристалла алмаза до 400°C при понижении  
379 температуры (Griffin et al., 1994). Присутствие в неизменном образце  
380 мегакристаллического алмазоносного дунита включений магнезиохромита и  
381 оливина в алмазе, полностью заключенном в оливине, позволяет рассматривать  
382 оливин в качестве сингенетического включения по отношению к алмазу (Илупин и

383 др., 1982). То же самое относится к магнезиохромиту, изменяющему свой состав в  
384 процессе роста алмаза, хотя можно признать часть таких включений в качестве  
385 протогенетических (Сереткин и др., 2020). Сложная история роста алмазов и  
386 вариации химического состава включенных минералов свидетельствуют о  
387 возможности нахождения сингенетических и протогенетических включений в  
388 одном кристалле алмаза.

389 Предполагается, что хромшпинелиды-включения из алмазов были  
390 равновесны с мантией в момент захвата, что и позволяет нам использовать Zn в  
391 качестве геотермометра (Ryan et al., 1996). Это допущение сильно ограничивает  
392 диапазоны возможных концентраций Zn в хромшпинелидах из алмазов: так,  
393 например, в обзорной статье (Stachel, Harris, 2008), где содержания цинка были  
394 измерены в более, чем 450 образцах хромшпинелидов-включениях в алмазе, Zn  
395 варьировал в диапазоне ~100-2100 ppm. Аналогично и в наших образцах  
396 содержания Zn находятся в диапазоне ~400-1880 ppm. Таким образом,  
397 хромшпинелиды из алмазов в большинстве случаев не будут превышать по  
398 содержанию Zn уровня в 2000-2100 ppm. Поэтому сравнение их с какими-либо  
399 высокоцинкистыми хромитами, например, хромшпинелидами Тимано-Уральского  
400 региона, где содержания Zn в хромшпинелидах могут достигать более 10 мас. %  
401 лишено какого-либо смысла (Силаев и др., 2008).

402

## 403 **5.2. Генетическое значение микроэлементов в хромшпинелидах из** 404 **алмазов Архангельской и Якутской алмазоносных провинций**

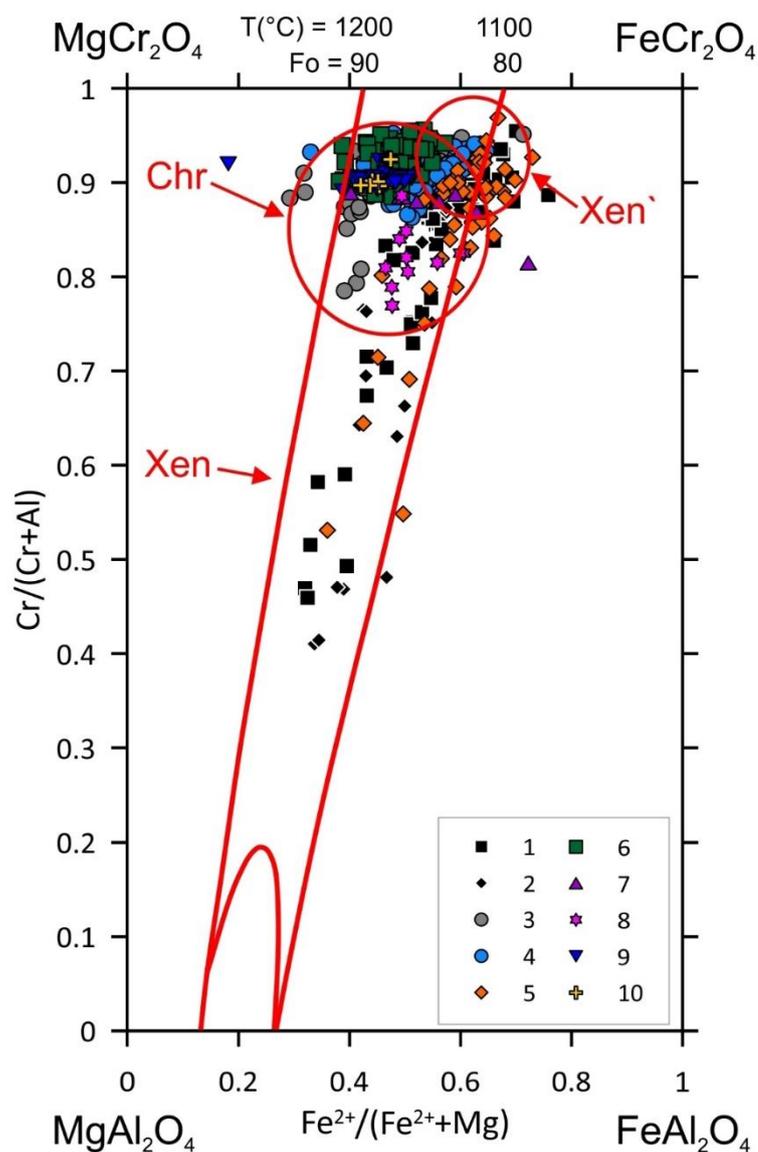
405 Проблема вещественной неоднородности континентальной литосферной  
406 мантии в последнее время широко обсуждается в геологической литературе (Venier  
407 et al., 2022; Agasheva et al., 2023; Gubanov, Zedgenizov, 2023).

408 В данной работе впервые получены представительные данные по примесным  
409 элементам в хромшпинелидах, включенных в алмазе из разных кимберлитовых  
410 трубок Якутской и Архангельской алмазоносных провинций, а также россыпей  
411 северо-востока Сибирской платформы. Для сравнения с хромшпинелидами из  
412 алмазов были использованы составы хромшпинелидов из дунитов Кемпирсайского

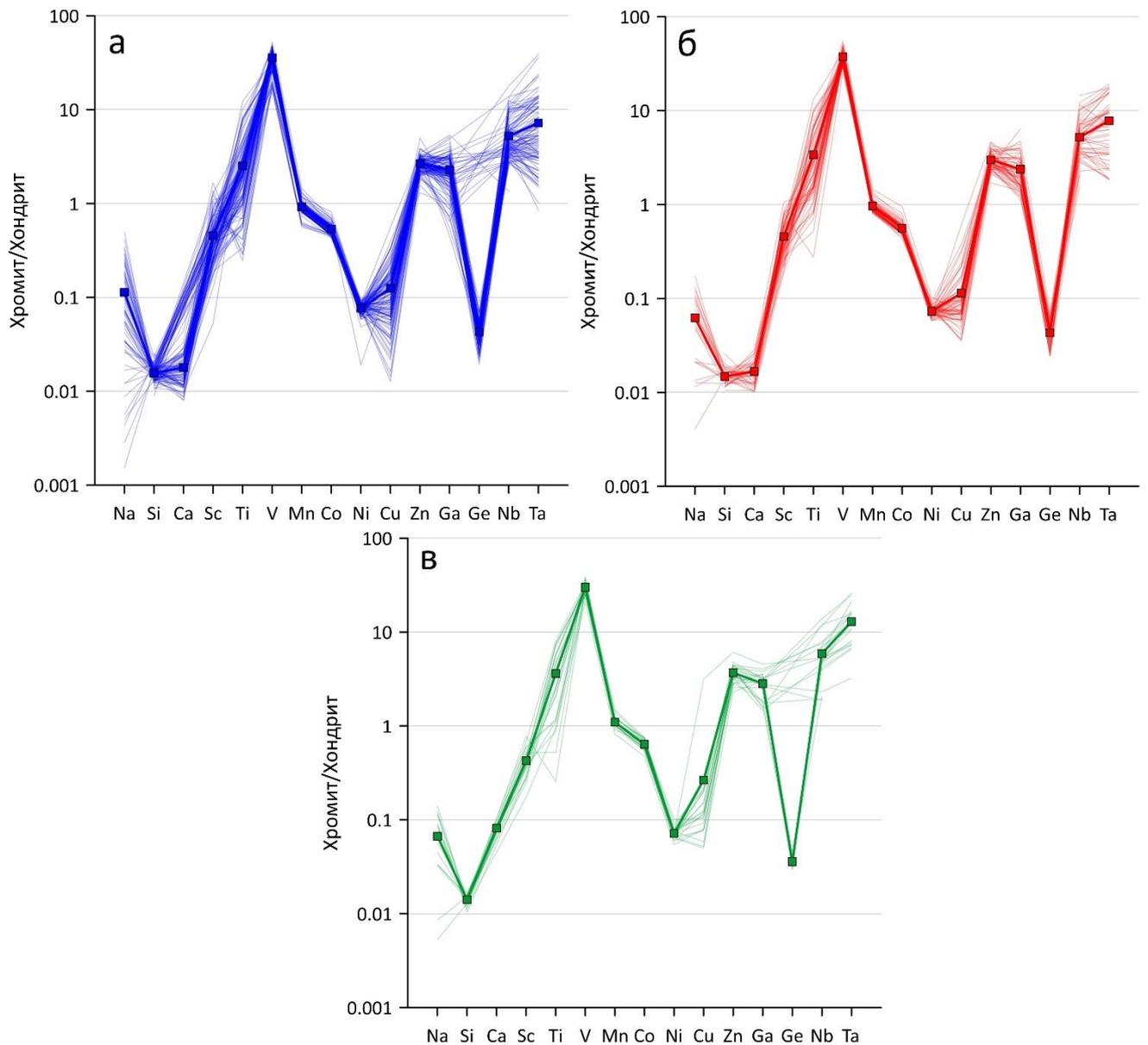
413 массива (Hu et al., 2022), Казахстан и бонинитов массива Тетфор Мин, Канада  
414 (Page, Barnes, 2009). Они были выбраны поскольку, во-первых, относятся к  
415 высокохромистой разновидности хромшпинелей ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 55$  мас. %) и, во-вторых,  
416 имеют глубинно-мантийное происхождение (Кемпирсай), что делает их  
417 генетически и по химическому составу сопоставимыми с хромшпинелидами  
418 алмазной ассоциации.

419 Обсуждение широкого спектра составов кимберлитовой шпинели  
420 облегчается выделением шести распространённых групп шпинели, или стадий её  
421 роста. Это ксенокристаллическая перидотитовая шпинель (Xen),  
422 метасоматизированная ксенокристаллическая перидотитовая шпинель (Xen'),  
423 хромит (Chr), а также плеонастовая шпинель, магнезиоульвошпинель и магнетит.  
424 На рисунке 26 представлены две линии, представляющие собой так называемые  
425 изопотенциальные линии (по Irvine, 1965) шпинели, находящейся в равновесии с  
426 оливином при постоянной температуре. Изопотенциальные линии отражают состав  
427 шпинели, находящейся в равновесии с оливином (Fo 90 и 80) при постоянной  
428 температуре 1200 °C и 1100 °C. Предполагается, что большинство зёрен Chr-  
429 шпинелида (Chr) представляют собой первичный хромит, кристаллизовавшийся  
430 непосредственно из кимберлитовой магмы. Самые ранние зёрна шпинели – это  
431 ксенокристы (Xen, Xen'), кристаллизовавшиеся в перидотите верхней мантии. Эти  
432 ксенокристы образовались в результате фрагментации перидотита либо при его  
433 включении в кимберлитовую магму, либо в процессе движения к поверхности  
434 Земли.

435 Хромшпинелиды из алмазов ЯАП и ААП значимо различаются по  
436 содержанию таких примесных элементов как V, Mn, Zn, Nb, Ta. Если же  
437 рассматривать отдельные кимберлитовые трубки, то в пределах одного  
438 алмазоносного района и провинции значимых различий в составе  
439 хромшпинелидов-включений в алмазе не наблюдается для большинства трубок,  
440 что показывает близость состава минералообразующего расплава, из которого эти  
441 хромшпинелиды кристаллизовались и, в более широком варианте, отражает состав  
442 мантийного вещества под каждым отдельным кимберлитовым полем (рисунок 27).



443  
 444 Рисунок 26. Химический состав хромшпинелидов в координатах  $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$  на  
 445  $Cr/(Cr+Al)$  (Roeder, Schulze., 2008). Chr – хромит, Xen – ксенокрсты шпинели из  
 446 перидотитов, Xen' – метасоматизированные ксенокрсты шпинели из перидотитов.  
 447 1 – концентрат кимберлитов Якутской алмазоносной провинции; 2 – ксенолиты  
 448 кимберлитов Якутской алмазоносной провинции; 3 – включения в алмазах  
 449 Далдыно-Алакитского алмазоносного района; 4 – включения в алмазах Мало-  
 450 Ботубинского алмазоносного района; 5 – участок Улахан-Курунг-Юрях; 6 –  
 451 включения в алмазах Архангельской алмазоносной провинции; 7 – дуниты  
 452 Кемпирсайского массива (Hu et al., 2022); 8 – бониниты массива Тетфор Мин (Page,  
 453 Barnes, 2009); 9 – включения в алмазе кимберлитов Коиду (Lai et al., 2022); 10 –  
 454 включения в алмазе кимберлитовой трубки Маджгаван, Индия  
 455 (неопубликованные данные).



456  
 457 **Рисунки 27.** Спайдер-диаграммы состава включений хромшпинелидов в алмазе:  
 458 а) Далдыно-Алакитский алмазоносный район (ЯАП); б) Мало-Ботубинский  
 459 алмазоносный район (ЯАП); в) Золотицкое алмазоносное поле (ААП). Тонкими  
 460 линиями показаны распределения редких элементов во включениях хромшпинелей  
 461 в алмазах по отдельным кимберлитовым трубкам, утолщенная линия показывает  
 462 среднее содержание по всем трубкам.

463 Однако существуют два исключения из этой закономерности в виде  
 464 кимберлитовых трубок Комсомольская и Сытыканская. Они отличается  
 465 пониженным содержанием среди трубок ЯАП следующих элементов: V = 1656  
 466 ppm, Mn = 1584 ppm, Ga = 15,9 для тр. Комсомольская и Sc = 1,88 ppm для тр.  
 467 Сытыканская. Таким образом, хоть мы и предполагаем, что состав мантии

468 подстилающий кимберлитовые тела одной алмазоносной провинции одинаков, по  
469 всей видимости всё же могут существовать либо некоторые локальные  
470 неоднородности химизма в её составе, либо неоднородности условий  
471 формирования в ней – иные P/T условия, pH,  $f(\text{O}_2)$  и т.п.

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

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

489 Содержания ванадия в мантии весьма низкое из-за чего его собственные фазы  
490 являются большой редкостью, например, такие как делладжустаит  $\text{Al}_2\text{VO}_4$  (Samaga  
491 et al., 2018), в связи с чем ванадий концентрируется в других мантийных минералах.  
492 Одним из главных минералов-концентраторов ванадия в мантии является  
493 хромшпинелид, обладая самым высоким коэффициентом распределения  $D_V$   
494 минерал/расплав, среди таких мантийных фаз как клинопироксен, ортопироксен,  
495 гранат и оливин (Righter et al., 2006).

496 Сравнение концентраций ванадия в хромшпинелидах-включениях в алмазах  
497 с хромшпинелидами других геологических обстановок показало, что

498 хромшпинелиды алмазного парагенезиса ЯАП и ААП имеют более высокие  
499 содержания ванадия (~2000 и ~1700 ppm) (таблица 5) по сравнению с включениями  
500 хромшпинелидов из алмазов месторождений Ботсваны и ЮАР (~1300 ppm)  
501 (таблица 12) (Stachel et al., 2008). Это может быть связано с разным составом  
502 подстилающей субконтинентальной литосферной мантии в районе расположения  
503 кимберлитовых тел: кимберлиты ЯАП и ААП относятся к типу I (низкощелочная  
504 разновидность кимберлитов), в то время как кимберлиты Южной Африки – к типу  
505 II (высокощелочной разновидности), их называют «оранжеитами» (Smith et al.,  
506 1985). Хромшпинелиды массивов Кемпирсай и Тетфор Мин существенно  
507 обеднены ванадием и его содержание не превышает 900 ppm.

508         Близкие значения по количеству ванадия в составе имеют хромшпинелиды  
509 из хромититов месторождения Потоси офиолитового массива Моа-Баракоа (~1300  
510 ppm) в неизменённых бедных сульфидных рудах (Proenza et al., 2001).  
511 Хромшпинелиды богатых сульфидных и брекчиевых руд были подвержены  
512 метасоматической проработке при внедрении пегматитовых габбро и оливин-  
513 норитовых даек в породы массива, в связи с чем эти хромшпинелиды, наряду с FeO,  
514 были обогащены V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и деплетированы в отношении алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и магния  
515 (MgO).

516         В работе Zhou et al (2014), где изучались породы офиолитового массива  
517 Луобуса, более низкое содержание V в хромшпинелидах подиформных  
518 хромититов, по сравнению с хромшпинелидами гарцбургитов и дунитов, авторы  
519 отчасти связывают с более восстановительными обстановками в последних: V<sup>3+</sup>  
520 свободно встраивается в структуру хромита, в то время как V<sup>5+</sup> преобладающий в  
521 окисленных обстановках является несовместимым со структурой хромита (Horn et  
522 al., 1994).

523         В статье Гусевой А.С. (2009), посвящённой кимберлитовой трубке 478 ААП  
524 Зимнебережного алмазоносного района были получены составы хромшпинелидов  
525 кимберлитового концентрата этой трубки. Было установлено, что изученные  
526 низкохромистые (диапазон Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от ~32-52 мас. %) пикрохромиты, характерные  
527 для слабо- и неалмазоносных кимберлитовых трубок, являются практически

528 безванадиевыми, что сильно контрастирует с высоким содержанием V в изученных  
529 нами хромшпинелидах из концентрата кимберлитов средне- и  
530 высокоалмазоносных кимберлитовых трубок.

531 В работе (Пушкарёв и др., 2015) были изучены хромшпинелиды  
532 платиноносных хромититов массива Кондер и минеральные включения в них.  
533 Платиноносные хромититы располагаются в центральной части массива совместно  
534 с дунитами. При изучении минеральных включений граната, оливина,  
535 клинопироксена и других минералов в хромшпинелидах хромититов было  
536 установлено, что они имеют пневматолитово-гидротермальный генезис. При этом  
537 содержания V в платиноносных хромшпинелидах хромититов и аксессуарных  
538 хромшпинелидах дунитов практически идентичны (~600 ppm). Исходя из этого,  
539 можно прийти к выводу, что низкотемпературная пневматолитово-  
540 гидротермальная проработка не может привести к обогащению или же  
541 деплетированию хромшпинелидов ванадием.

542 С другой стороны, изучение обогащенных цинком хромшпинелидов Тимано-  
543 Уральского региона различных обстановок, в том числе алмазоносной россыпи  
544 Ичетью, показало, что в большинстве случаев содержание Zn, сильно  
545 превышающее фоновые значения, носит эпигенетический характер и вызвано  
546 гидротермальной проработкой (Силаев и др., 2008). Изменение происходит по  
547 микротрещинам хромшпинелидов путем реакций ионного обмена.

548 Однако состав хромшпинелидов может изменяться в рамках регионального  
549 метаморфизма. Перидотитовый массив Бени-Боусера состоит из порции  
550 верхнемантийного вещества, внедрённого в континентальную кору. Впоследствии  
551 в коровое пространство проникла серия лейкогранитных даек. В ходе этих  
552 процессов были образованы крупные массивы сульфид-сульфоарсенидных руд.  
553 Хромшпинелиды этих руд сильно обогащены V (от 4500 до 14100 ppm) и могут  
554 быть условно разделены по этому критерию на две группы. Первая –  
555 хромшпинелиды месторождений Мина дель Рио и Маликат, они ассоциируют с  
556 флогопит- и вермикулит-содержащими рудами. В то время как хромшпинелиды  
557 второго типа из месторождения Ислан, с почти втрое более низкими

558 концентрациями V, находятся в ассоциации с плагиоклаз-клинопироксен-  
 559 сепиолитовыми рудами. Таким образом, аномально высокие содержания V в  
 560 мантийных хромшпинелидах могут быть вызваны процессами регионального  
 561 метаморфизма и метасоматоза (Hajjar et al., 2017).

562 Таблица 12. Средние содержания ванадия в составе хромшпинелидов из разных  
 563 геологических обстановок по опубликованным данным

Объект	Тип	V, ppm	Источник
Включения в алмазе			
Ботсвана, ЮАР	Кимберлитовые трубки	1291	Stachel et al., 2008
Офиолитовые массивы			
Моа-Баракоа (Западная Куба)	Бедн. сульфидная руда	1327	Proenza et al., 2001
	Богат. сульфидная руда	2161	
	Брекчиевая руда	3467	
Луобуса (Южный Тибет)	Хромититы	292	Zhou et al., 2014
	Гарцбургиты	628	
	Дуниты	645	
Бени Бусера (Сев. Марокко)	М-ние Мина дель Рио	14000	Hajjar et al., 2017
	М-ние Маликат	14100	
	М-ние Ислан	4500	
Кимберлиты			
Трубка 478 (ААП)	Концентрат	~50	Гусева, 2009
Гипербазиты			
Кондёр (Алданский щит)	Хромитит	631	Пушкарёв и др., 2015
Ореолы рассеяния			
Ичетью (Средний Тиман)	Алмазоносная россыпь	1156	Силаев и др., 2008

564  
 565 Однако состав хромшпинелидов может изменяться в рамках регионального  
 566 метаморфизма. Перидотитовый массив Бени-Боусера состоит из порции  
 567 верхнемантийного вещества, внедрённого в континентальную кору. Впоследствии

568 в коровое пространство проникла серия лейкогранитных даек. В ходе этих  
569 процессов были образованы крупные массивы сульфид-сульфоарсенидных руд.  
570 Хромшпинелиды этих руд сильно обогащены V (от 4500 до 14100 ppm) и могут  
571 быть условно разделены по этому критерию на две группы. Первая –  
572 хромшпинелиды месторождений Мина дель Рио и Маликат, они ассоциируют с  
573 флогопит- и вермикулит-содержащими рудами. В то время как хромшпинелиды  
574 второго типа из месторождения Ислан, с почти троекратно более низкими  
575 концентрациями V, находятся в ассоциации с плагиоклаз-клинопироксен-  
576 сепиолитовыми рудами. Таким образом, аномально высокие содержания V в  
577 мантийных хромшпинелидах могут быть вызваны процессами регионального  
578 метаморфизма и метасоматоза (Hajjar et al., 2017).

579 В настоящее время особое внимание отводится вхождению в состав  
580 хромшпинелидов ниобия и тантала. Современные исследования подтверждают  
581 факт, что в силикатной оболочке Земли (BSE - Bulk Silicate Earth) имеется  
582 дисбаланс масс Ta и Nb (Barth et al., 2000; Rudnick et al., 2000; Münker et al., 2003;  
583 Weyer et al., 2003; Pfander et al 2007; König&Schuth, 2011; Никитина и др., 2019). В  
584 BSE Nb/Ta составляет ~14; в PM (Primitive Mantle) – 14,7; в земной коре 12-13; в  
585 MORB (Mid ocean ridge basalts) – 14,6; в хондрите (CI) – 17,4 (Palme et al., 2003).  
586 Таким образом Nb/Ta является важной характеристикой, позволяющей определить  
587 характер источника, из которого формировалась порода/минерал. Хотя  
588 концентрации Nb и Ta в хромшпинелидах алмазной ассоциации очень низки – Nb  
589 составляет несколько ppm, а Ta – менее 1 ppm, – они всё же являются самыми  
590 высокими среди перидотитовых минералов (гранат, пироксен, оливин). Несмотря  
591 на то, что гранат имеет самый высокий коэффициент распределения  
592 минерал/порода в алмазах перидотитового типа (Stachel et al., 2022), в  
593 хромшпинелидах концентрации Nb и Ta выше из-за их более низкого объёмного  
594 содержания в породе.

595 Nb/Ta отношения для хромшпинелидов ЯАП практически двукратно  
596 превосходит его в сравнении с хромшпинелидами из алмазов ААП и составляет  
597  $17,2 \pm 8,4$  против  $9,5 \pm 2,5$  соответственно. Nb/Ta отношение для пород литосферной

598 мантии колеблется в довольно широких пределах и в среднем близки хондритовым  
599 (CI) значениям, что хорошо соотносится со значениями в ЯАП. Для  
600 хромшпинелидов из алмазов ААП Nb/Ta отношение значительно ниже  
601 хондритовых и в среднем соответствует абиссальным перидотитам орогенических  
602 массивов таких как Хороман (11,6), Балмуссио (11,5) и Ронда (10,8) (Weyer et al.,  
603 2003; Lenoir et al., 2001; Takazawa et al., 2000).

604 Содержание Ni в хромшпинелидах является чувствительным индикатором  
605 состава протолита (Stosch, 1981). Концентрации никеля возрастают с увеличением  
606 хромистости вмещающих пород и ксенолитов (O'Reilly et al., 1991) в соответствии  
607 с возрастанием степени деплетированности вмещающих пород, таким образом  
608 значения Ni будут выше для алмазов лерцолитового парагенезиса и ниже – для  
609 гарцбургит-дунитового (Paktunc and Cabri, 1995).

610 Никель в изученных нами хромшпинелидах из алмазов изменяется в весьма  
611 небольших пределах: большая часть всех значений находится в диапазоне 600-1000  
612 ppm. Средние содержания для хромшпинелидов ЯАП и ААП тоже оказались  
613 близки – 792 и 752 ppm соответственно, что хорошо согласуется с данными Б.  
614 Гриффина (Griffin et al., 1993) и Н.В. Соболева (Соболев и др., 1997) по  
615 хромшпинелидам из алмазов этих провинций. Сравнение с хромшпинелидами  
616 алмазного парагенезиса из ЮАР и Ботсваны показывает аналогичные результаты:  
617 для более 700 проанализированных образцов среднее и медианное содержание Ni  
618 равняется ~780 ppm (Stachel et al., 2008). Сравнение с хромитами офиолита  
619 Люобуса, Кондёр и Эргакским гипербазитовым массивом показывают не такую же,  
620 но похожую картину: концентрации Ni изменяются в больших пределах – от 0 до ~  
621 2000-2500 ppm, но в средние содержания так же близки 700-900 ppm.  
622 Хромшпинелиды массивов Кемпирсай и Тетфор Мин по своим содержаниям  
623 близки к алмазоносным массивам, а значения Ni составляют 451–927 ppm и 441–  
624 875 ppm соответственно, что позволяет предположить в целом схожее  
625 распределение Ni в мантийных перидотитах из этих регионов.

626 Как обсуждалось ранее (5.1.), Zn в хромшпинелидах алмазной ассоциации  
627 находится в равновесии с Zn в мантии, что позволяет использовать его в качестве

628 геотермометра (Ryan et al., 1996). Следовательно, вариации содержания Zn в  
629 алмазных хромшпинелидах ограничены. В наших образцах содержание цинка  
630 варьируется от 404 до 1884 ppm, что позволяет отличить их от высокоцинкистых  
631 хромшпинелидов (например, высокоцинкистых хромшпинелидов из алмазоносных  
632 россыпей Тимано-Уральского региона (Силаев и др., 2008), где высокие  
633 содержания Zn имеют эпигенетическую природу. Однако диапазоны составов  
634 хромшпинелидов из алмазов перекрываются с диапазонами хромшпинелидов  
635 массивов Кемпирсай и Тетфор Мин, что исключает их полное различие. Тем не  
636 менее, были описаны отдельные случаи высокоцинкистых включений ( $ZnO = 2-3$   
637 мас. %), например, в алмазах из кимберлитов Сьерра-Леоне (Meyer & Boyd, 1972).  
638 Некоторые исследователи предполагают, что обогащение Zn может быть  
639 следствием погружения в мантию низкотемпературного и низкобарического  
640 перидотитового протолита, который был захвачен алмазом до достижения  
641 равновесия с высокотемпературными, богатыми Mg породами (Arai, Ishimaru,  
642 2011).

643 Хромшпинелиды из алмазов ААП отличаются большими концентрациями  
644 Mn в сравнении с хромшпинелидами ЯАП с разницей в  $\sim 300$  ppm – средние  
645 концентрации составляют 2113 и 1793 ppm соответственно, что хорошо  
646 соотносится с данными, полученными другими исследователями по этим же  
647 алмазоносным провинциям (Rubanova et al., 2009; Garanin et al., 2021; Квасница и  
648 др., 1993; Соболев и др. 1997). Хромшпинелиды из алмазов ЮАР и Ботсваны по  
649 содержанию Mn близки хромшпинелидам ЯАП – среднее содержание составляет  
650  $\sim 1850$  ppm (Stachel et al., 2008).

651 Сходная закономерность распределения Zn наблюдается и для Mn:  
652 диапазоны составов хромшпинелидов из алмазов (1078–2848 ppm) в значительной  
653 степени перекрываются с диапазонами составов из концентрата кимберлитов,  
654 комплексов Кемпирсай, Тетфор Мин и мантийных ксенолитов (847–2659 ppm,  
655 1000–2497 ppm, 1081–1962 ppm и 1967–3272 ppm, соответственно). Поэтому  
656 содержание Mn само по себе не является надёжным геохимическим индикатором.

657 Однако установлено, что Mn и Zn в изученных нами хромшпинелидах из

658 алмазов демонстрируют чёткую положительную корреляцию ( $R = 0,734$ ), что  
659 предполагает, что их соотношение должно варьироваться в определённых  
660 пределах. В хромшпинелидах алмазного парагенезиса отношение  $Mn/Zn$   
661 варьируется от 1,35 до 3,15. Для сравнения, в хромшпинелидах из концентрата  
662 кимберлитов это отношение варьируется от 0,53 до 3,57, в хромшпинелидах из  
663 Кемпирская – от 1,00 до 3,26, и из Тетфор Мин – от 1,43 до 4,39. Эти перекрытия  
664 позволяют отличать шпинелиды алмазоносной серии от других типов при наличии  
665 достаточного количества данных. Однако отношения  $Mn/Zn$  в хромшпинелидах из  
666 ксенолитов Удачной (1,20–2,81) полностью перекрываются с таковыми во  
667 включениях алмазов, что отражает их общее мантийное происхождение. Стоит  
668 отметить, что некоторые исследования предполагают, что минеральные включения  
669 в алмазах могут не отражать фактические условия кристаллизации алмазов.  
670 Например, Rinaldi et al. (2023) утверждают, что включения являются  
671 протогенетическими и отражают состав как субстрата, так и метасоматических  
672 флюидов.

673 Концентрации  $Co$  на порядок ниже  $Mn$  и разница для между  
674 хромшпинелидами ЯАП и ААП составляет всего ~50 ppm со средними 270 и 319  
675 ppm соответственно. В офиолитовых массивах  $Co$  варьирует в сходных пределах:  
676 Акохе (Филлипины) 222-264 ppm, Моа-Баракоа (Куба) 205-300 ppm, Луобуса  
677 (Китай) 196-508 ppm (Zhou et al., 2014).

678 Медь является преимущественно халькофильным элементом, в следствие  
679 чего не свойственным хромшпинелидам, поэтому какие-либо вариации  
680 содержания меди зависят лишь от состава мантии, подстилающей кимберлитовые  
681 тела (Илупин и др., 1978).

682 Средние содержания  $Cu$  в хромшпинелидах из алмазов ЯАП и ААП  
683 оказались довольно близки: 14,6 и 16,2 ppm соответственно. Однако пределы  
684 содержания в хромшпинелидах ЯАП оказались значительно шире ААП: 2-72 ppm  
685 против 6-34 ppm соответственно. Однако это может быть связано с разными  
686 размерами выборки, а не с составом протолита.

687 Средние содержания  $Ga$  для ЯАП и ААП равны 21 и 26 ppm соответственно.

688           Существование обратной корреляции концентраций между Ga и #Cr в  
689 хромшпинелидах отмечено в статье (Paktunc, Cabri, 1995): содержание Ga  
690 увеличивается с повышением температуры. Однако наши данные не показывает  
691 какой-либо зависимости содержания Ga от хромистости. С другой стороны,  
692 наблюдается положительная корреляция между Ga и Cr и отрицательная между Ga  
693 и T. Это указывает на то, что корреляции Ga-#Cr и Ga-T, отмеченные ранее, не  
694 применимы к хромшпинелидам-включениям в алмазе. Однако эти отношения всё  
695 ещё правдивы для хромшпинелей из дунитов Кемпирсайского массива и бонинитов  
696 Тетфор Мин (Page, Barnes, 2009; Hu et al., 2022).

697

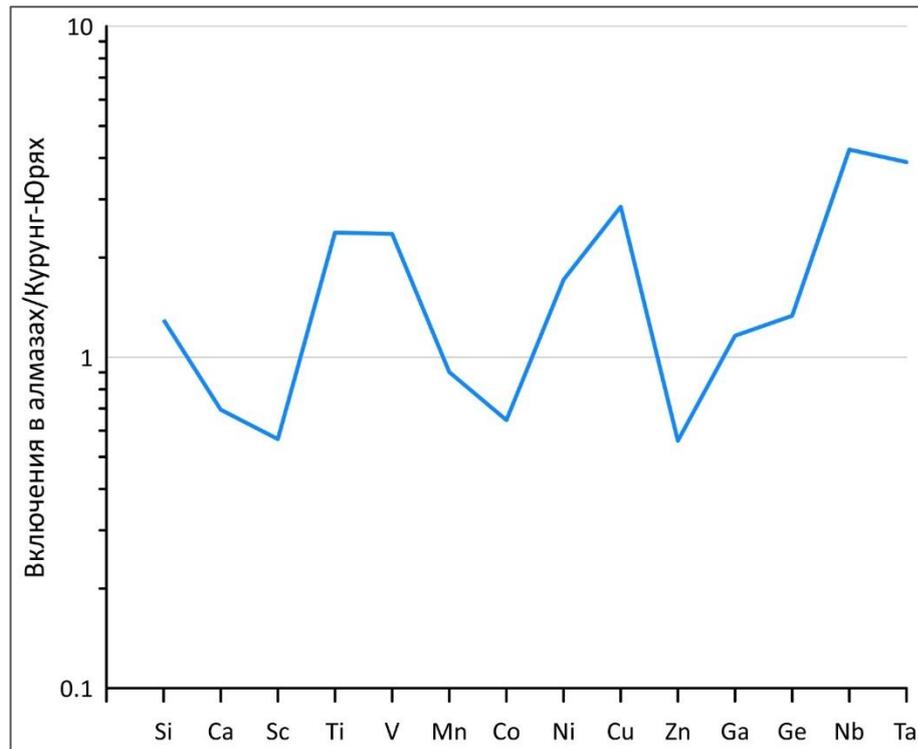
### 698           **5.3. Микропримесный состав хромшпинелидов как индикатор** 699 **алмазоносных кимберлитов**

700           Значимость полученных результатов заключается еще и в том, что  
701 хромшпинелиды, наряду с хромистым гранатом (пиропом), являются важными  
702 минералами–спутниками алмаза в аллювиальных отложениях. Однако в таких  
703 шлиховых ореолах могут находиться одновременно несколько популяций  
704 хромшпинелидов различного состава, не связанных с коренными источниками  
705 алмаза. И поэтому, важно выделить химические характеристики минералов,  
706 типоморфные для алмаз-содержащих пород или пород, находившихся в P-T поле  
707 стабильности алмаза. Идентификация минералов-спутников алмаза основана на  
708 относительно простом критерии – химическом составе минералов из включений в  
709 алмазе или минералов из алмаз-содержащих ксенолитов. Предшествующими  
710 исследованиями уже выявлены типоморфные особенности хромшпинелидов из так  
711 называемой «алмазной» ассоциации, которые характеризуются высокой  
712 хромистостью (выше 80%), низким содержанием титана (менее 0,7%) и малым  
713 количеством окисного железа в их составе (Соболев, 1971). Однако присутствие  
714 таких хромшпинелидов в ореолах рассеяния алмазов можно использовать только в  
715 том случае, если в парагенезисе с ними будет находиться другой индикаторный  
716 минерал на алмаз – пироп, в отсутствие которого можно пропустить  
717 перспективный на алмаз участок. Помимо этого, на данный момент появилось

718 большое количество данных о хромшпинелидах, имеющих близкий состав:  
719 например, высокохромистые хромшпинелиды с содержанием более 62 мас. %  
720  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  установлены в ультрабазитах Полярного Урала (до 65,9 мас. %), Корякского  
721 нагорья (68,4 мас. %); Индии (66,3 мас. %); Новой Каледонии (68 мас. %) и др.  
722 (Илупин, 2002). Отдельно необходимо отметить алмазоносный участок Улахан-  
723 Курунг-Юрях и подобные ему, хромшпинелиды которых были неотличимы от  
724 хромшпинелидов алмазного парагенезиса без привлечения дополнительных  
725 методов изучения. В дальнейшем по включениям в хромшпинелидах было  
726 установлено, что данная россыпь относится к коровому парагенезису, а не к  
727 мантийному, но коренных источников данной и аналогичных россыпей найдено не  
728 было (Афанасьев и др., 2000).

729 Поэтому в этой работе были сформулированы новые критерии  
730 хромшпинелидов алмазоносного парагенезиса по элементам примесям в  
731 хромшпинелидах. Были определены диапазоны составов характерные для  
732 хромшпинелидов из алмазов ЯАП и ААП и проведено их сравнение с  
733 хромшпинелидами из ксенолитов тр. Удачная, алмазоносного участка Улахан-  
734 Курунг-Юрях, дунитов Кемпирсайского массива (Hu et al., 2022) и бонинитов  
735 массива Тетфор Мин (Page, Barnes, 2009).

736 Нормирование среднего состава хромшпинелидов из алмазов кимберлитов  
737 ЯАП и ААП на хромшпинелиды «курунгского» типа позволяет наглядно  
738 продемонстрировать различия их химизма (рисунок 28). Таким образом четко  
739 видна более чем двукратная разница в концентрациях Ti, V, Cu, Nb, Ta и более чем  
740 полуторная Sc, Co и Zn.

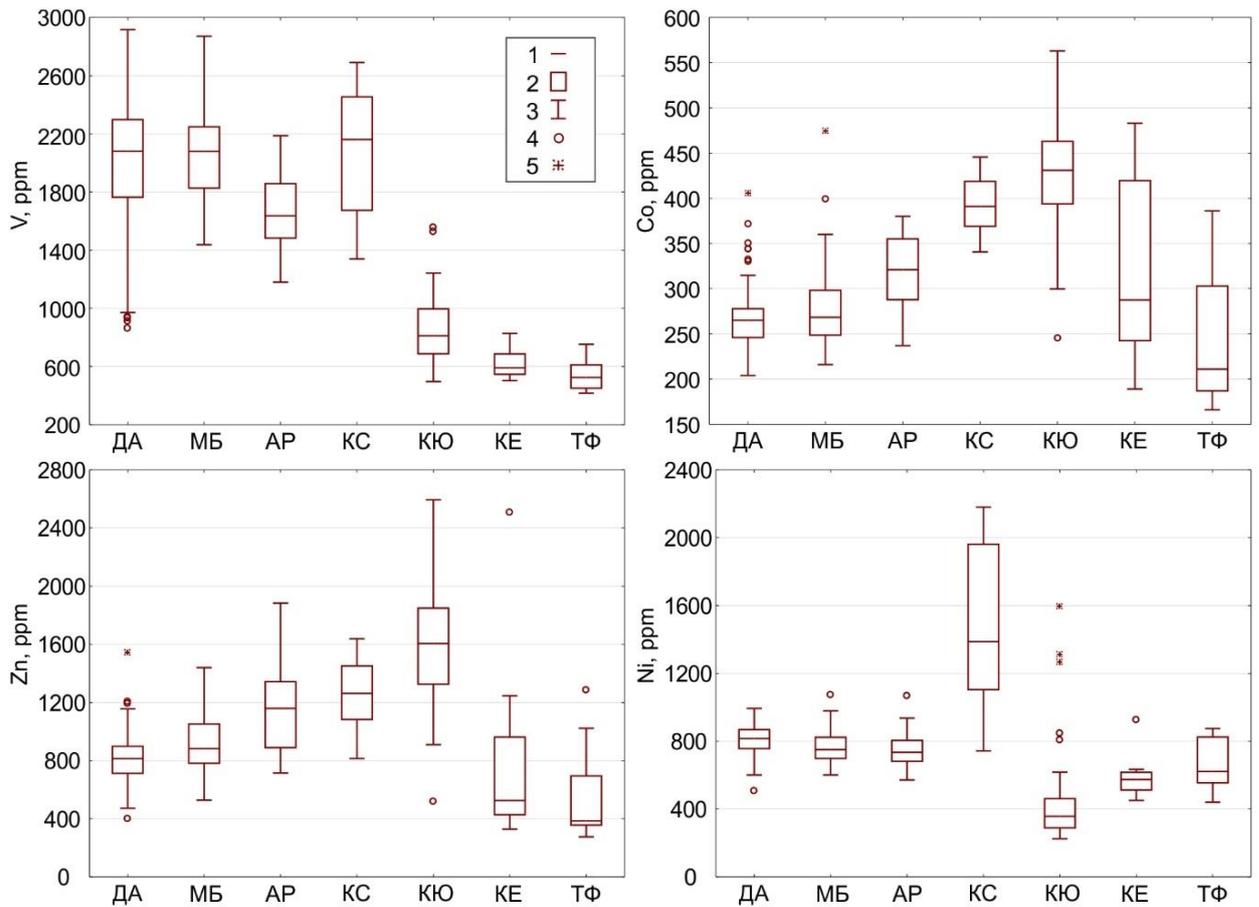


741

742 Рисунок 28. Спайдер диаграмма состава отношения хромшпинелидов из алмазов  
743 ЯАП и ААП к хромшпинелидам алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях.

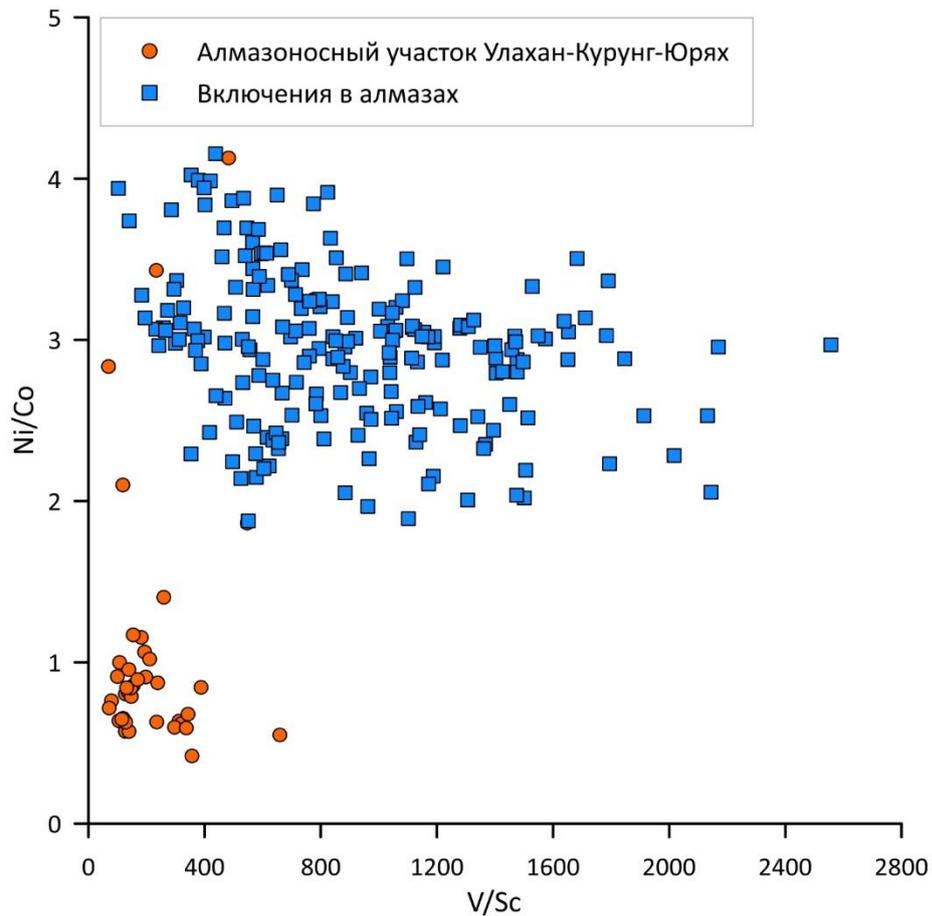
744 Было проверено равенство средних концентраций изученных примесных  
745 элементов хромшпинелидов критериями Стьюдента-Уэлча и Манна-Уитни с  
746 помощью ПО Statistica 13.5 между хромшпинелидами из алмазов и  
747 хромшпинелидами алмазоносного участка Улахан-Курунг-Юрях: установлено, что  
748 средние концентрации равны только для Sc, Ga и Ta ( $p=0,05$ ). Поэтому наиболее  
749 контрастные элементы были выбраны по наименьшему перекрытию областей  
750 составов и доверительных интервалов с помощью графиков “ящик с усами”.  
751 Наиболее значимые, двукратные различия были установлены в концентрациях Zn  
752 (879 и 1585 ppm), V (1990 и 845 ppm), Ni (765 и 460 ppm) и Co (275 и 430 ppm) в  
753 хромшпинелидах алмазного парагенезиса и «курунгского» типа соответственно  
754 (рисунок 29). Также содержания Ta и Nb различаются в среднем в 3-4 раза:  
755 соответственно, 0,109 ppm и 1,28 ppm для хромшпинелидов включений в алмазах  
756 и 0,027 ppm и 0,300 ppm для хромшпинелидов курунгского типа. И хотя ранее мы  
757 выяснили, что математически средние содержания Ta для этих двух типов  
758 хромшпинелидов равны, что вероятно связано с небольшим размером выборки

759 хромшпинелидов курунгского типа (9 шт.), мы все равно считаем, что возможно  
760 использовать концентрации тантала в качестве геохимического индикатора.



761  
762 Рисунок 29. Химический состав (график “ящик с усами”) хромшпинелидов.  
763 Включения в алмазе: ДА – Далдыно-Алакитский район; МБ – Мало-Ботуобинский  
764 район; АР – Архангельская провинция. КС – ксенолиты тр. Удачная; КЮ –  
765 «курунгский» тип; КЕ – дуниты Кемпирсайского массива (Hu et al., 2022); ТФ –  
766 бониниты массива Тетфор Мин (Page, Barnes, 2009). 1) Медиана; 2) 25%-75%  
767 квартиль; 3) Зона без выбросов; 4) Выбросы (1,5 IQR); 5) Выбросы (3 IQR); IQR –  
768 межквартильный размах.

769 Помимо отдельных элементов, для диверсификации различных типов  
770 хромшпинелидов могут быть использованы отношения максимально контрастных  
771 пар элементов, например, V/Sc к Ni/Co (рисунок 30). Так, среднее отношение  
772 ванадия к скандию в хромшпинелидах из алмазов кимберлитов составляет 726, а  
773 для хромшпинелидов участка Курунг-Юрях – 261; отношения же никеля к кобальту  
774 равняются 2,86 и 1,20 соответственно.



775  
 776 Рисунок 30. Диаграмма отношений элементных различных типов  
 777 хромшпинелидов:  $V/Sc$  к  $Ni/Co$ .

778 Таким образом, полученные результаты по микропримесному составу в  
 779 хромшпинелидах существенно расширяют возможности обнаружения алмазов в  
 780 отдельных россыпях алмазоносных районов, т.е. могут усовершенствовать  
 781 известный критерий алмазоносности по хромшпинелидам

782 Выявленные отличия в микропримесном составе хромитов, находящихся в  
 783 одной алмазоносной россыпи и имеющих типичные для алмазоносного  
 784 парагенезиса составы, но генетически относящихся к разным типам пород,  
 785 позволяют использовать полученные данные для уточнения уже известных  
 786 минералогических критериев поисков алмазов.

787

## 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 псевдоромбодоэдрических, 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 локализируются 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, значительно 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: Na<sup>23</sup>, Si<sup>29</sup>, Ca<sup>43</sup>, Sc<sup>45</sup>, Ti<sup>49</sup>, V<sup>51</sup>, Mn<sup>55</sup>, Co<sup>59</sup>, Ni<sup>60</sup>, Cu<sup>63</sup>, Zn<sup>66</sup>, Ga<sup>71</sup>, Ge<sup>74</sup>, Nb<sup>93</sup>, Ta<sup>181</sup>. Установлено, что

818 распределение этих элементов аналогично для всех изученных кимберлитовых  
819 трубок. Хромшпинелиды из Архангельской алмазонасной провинции отличаются  
820 от хромшпинелидов Якутской провинции более низкими концентрациями V и  
821 повышенными Ta;

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

825 6) Сформулированы новые критерии химического типоморфизма  
826 хромшпинелидов алмазонасного участка Улахан-Курнуг-Юрях, позволяющие  
827 отделить их от хромшпинелидов «алмазного» парагенезиса: соответственно, Zn =  
828 1585 и 879 ppm, V = ppm и 1990 ppm, Ni = ppm и 765 ppm; Co = ppm и 275 ppm, Ta  
829 = 0,027 и 0,109 ppm, Nb = 0,300 и 0,109 ppm, V/Sc = 261 и 726, Ni/Co = 1,20 и 2,86;

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

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

846

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

847

848

849

850 #Cr – хромистость

851 #Mg – магнезиальность

852  $\sigma$  – стандартное отклонение853  $\chi$  – среднее значение

854 EPMA – микрозондовый анализ

855 LA ICP MS – метод лазерной абляции с индуктивно связанной плазмой

856 ААП – Архангельская алмазоносная провинция

857 ДА – Далдыно-Алакитский алмазоносный район

858 КАН – Китайская академия наук

859 МБ – Мало-Ботуобинский алмазоносный

860 МСА – минералы-спутники алмаза

861 н/п – содержание элемента ниже предела обнаружения

862 обр. – образец

863 РАН – Российская академия наук

864 тр. – кимберлитовая трубка

865 ЯАП – Якутская алмазоносная провинция

866

867 Сокращенные названия минералов (Whitney, Evans, 2010)

868 Ol – оливин

869 Mchr – магнезиохромит

870 Phl – флогопит

871 Prp – пироп

872

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 873
- 874 1. Агашев А.М., Серов И.В., Орихаши Ю., Толстов А.В., Николенко Е.И.,  
875 Похиленко Н.П. U-Pb датирование цирконов из аллювия рек и вторичных  
876 коллекторов Якутской алмазоносной провинции // Руды и металлы, 2019, вып.  
877 2, с. 67-73
- 878 2. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. Поисковая минералогия алмаза.  
879 Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2010, 650 с.
- 880 3. Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Логвинова А.М., Зинчук Н.Н., Эфимова Э.С.,  
881 Сафьянников В.И., Красавчиков В.О., Подгорных Н.М., Пругов В.П.  
882 Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных  
883 площадей в связи с проблемой "ложных" индикаторов кимберлитов // Геология  
884 и Геофизика, 2000, т. 41(12), с. 1729-1741
- 885 4. Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А., Кудрявцева Г.П., Васильева Е.Р.,  
886 Вержак В.В., Веричев Е.М., Парсаданян К.С., Посухова Т.В. Архангельская  
887 алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия).  
888 Москва.: Издательство Московского университета, 1999, 524 с.
- 889 5. Бокий, Г.Б., Безруков. Г.Н., Ключев Ю.А., Налетов А.М., Непша В.И. Природные  
890 и синтетические алмазы. Москва: Наука, 1986, 222 с.
- 891 6. Брахфогель Ф.Ф., Зайцев А.И., Шамшина Э.А. Возраст кимберлитов-основа  
892 прогнозирования алмазоносности территорий // Отечественная геология, 1997,  
893 вып. 9, с. 31-37
- 894 7. Гусева А. С. Особенности морфологии и химического состава минералов-  
895 спутников алмаза трубки 478 Архангельской кимберлитовой провинции //  
896 Вестник СПбГУ, 2009, т. 7(4), с. 32-43
- 897 8. Дорошев А.М., Брэй Г.П., Гирнис А.В., Туркин А.И., Когарко Л.Н. Пироп-  
898 кноррингитовые гранаты в верхней мантии: эксперименты в системе MgO-  
899 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Геология и геофизика, 1997, т. 38, с. 559-586
- 900 9. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Махин А.И. Об основных типоморфных  
901 особенностях алмазов в краевых частях Восточно-Европейской и Сибирской  
902 платформ. известия высших учебных заведений // Геология и разведка, 2001, №

903 4, с. 22-35

904 10.Илупин И.П., Ефимова Э.С., Соболев Н.В. Включения в алмазе из  
905 алмазоносного дунита // Доклады АН СССР. 1982, т. 264 (2), с. 454-456

906 11.Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францессон Е.В. Геохимия кимберлитов.  
907 Москва: Недра, 1978, 352 с.

908 12.Илупин И.П. Высокохромистые хромиты из кимберлитов и ультрабазитов —  
909 сходства и различия // Руды и металлы, 2002, вып. 4. с. 54–58

910 13.Квасница В.Н., Захарченко О.Д., Вишневский А.А., Мельников В.С.  
911 Морфология минеральных включений в алмазах Беломорья //  
912 Минералогический журнал, 1993, т. 15(4), с. 38-46

913 14.Квасница В.Н., Крочук В.М., Афанасьев В.П., Цымбал Ю.С.  
914 Кристалломорфология хромшпинелидов из кимберлитов // Минералогический  
915 журнал, 1988, т.10(3), с. 45-51

916 15.Колганов В.Ф., Бондаренко И.Ф., Давыденко А.Ю., Васильев П.В.  
917 Компьютерное моделирование при разведке и оптимизации разработки  
918 месторождений алмазов. Новосибирск: Наука, 2008, 262 с.

919 16.Кросс А.Д. Введение в практическую инфракрасную спектроскопию / Кросс  
920 А.Д.; пер. с англ. Ю.А. Пентина. Москва: Издательство иностранной  
921 литературы, 1961. 111 с.

922 17.Кулик Н.А. Онтогенез минералов: учебное пособие для вузов // Кулик Н.А.—  
923 Москва: Издательство Юрайт, 2024. 91с.

924 18.Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Королюк В.Н., Логвинова А.М. Электронно-  
925 зондовое определение примесей цинка и никеля в хромшпинелидах для целей  
926 геотермометрии перидотитов // Геология и геофизика, 2005, т.46 (7), с. 741 –  
927 745.

928 19.Лазько Е.Е. Минералы-спутники алмаза и генезис кимберлитовых пород.  
929 Москва: Недра, 1979, 192 с.

930 20.Ларионова Ю.О., Сазонова Л.В., Лебедева Н.М., Носова А.А., Третьяченко В.В.,  
931 Травин А.В., Каргин А.В., Юдин. Д.С. Возраст кимберлитов Архангельской  
932 провинции: Rb-Sr,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопно-геохронологические и минералогические

- 933 данные для флогопита // Петрология, 2016, т. 24(6), с. 607-639
- 934 21. Логвинова А.М., Серебрянников А.О., Соболев Н.В. Вариации химического  
935 состава и редкие парагенезисы множественных включений магнезиохромита в  
936 алмазах Якутии // Доклады РАН, 2021, т. 501(1), с. 26–33
- 937 22. Мальковец В.Г., Белоусова Е.А., Третьякова И.Г., Гриффин В.Л., Пирсон Н.Дж.,  
938 О’Рейлли С., Резвухин Д.И., Гибшер А.А., Шарыгин И.С., Похиленко Н.П.  
939 Новые данные о возрасте кимберлитов Сибирского кратона: результаты U-Pb  
940 датирования кимберлитовых цирконов // Геология и минерально-сырьевые  
941 ресурсы Северо-Востока России: Материалы VII Всероссийской научно-  
942 практической конференции, Россия, Якутск, апрель 2017, с. 329-333
- 943 23. Мацюк С.С., Платонов А.Н., Польшин Э.В., Таран М.Н., Татаринцев В.И.,  
944 Бадион Н.С., Вишневский А.А., Сафронов А.Ф., Смирнов Г.И. Шпинелиды  
945 мантийных. Киев: Наукова думка, 1989, 212 с.
- 946 24. Миронов В.Л. Сканирующая зондовая микроскопия твердотельных  
947 наноструктур: дис. – Учреждение Российской академии наук институт физики  
948 микроструктур РАН, 2009, с. 395
- 949 25. Никитина Л.П., Бабушкина М.С. Суперхондритовые Nb/Ta и Zr/Hf отношения  
950 в перидотитах и эклогитах субконтинентальной литосферной мантии: данные  
951 мантийных ксенолитов // Вестник СПбГУ. Науки о Земле, 2019, т. 64(2), с. 294-  
952 314
- 953 26. Нойзер Р.Д., Шертл Г.-П., Логвинова А.М., Соболев Н.В. Исследование  
954 включений оливина  
955 в сибирских алмазах методом дифракции обратнорассеянных электронов:  
956 признаки сингенетического роста? // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2),  
957 с. 416—425.
- 958 27. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. Москва: Наука, 1974, 170 с.
- 959 28. Павлова Л.А. Развитие рентгеноспектрального электронно-зондового  
960 микроанализа в Сибири // Журнал аналитической химии, 2008, т. 63(12), с. 1311-  
961 1318
- 962 29. Похиленко Н.П. Мантийные парагенезисы в кимберлитах, их происхождение и

- 963 поисковое значение. Автореф. дисс. д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск, 1990.  
964 39 с.
- 965 30. Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Бойд Ф.Р., Пирсон Д.Г., Шимизу Н.  
966 Мегакристаллические пироповые перидотиты в литосфере Сибирской  
967 платформы: минералогия, геохимические особенности и проблема  
968 происхождения // Геология и геофизика, 1993, т. 34(1), с. 71-84.
- 969 31. Пушкарёв Е.В., Каменецкий В.С., Морозова А.В., Хиллер В.В., Главатских  
970 С.П., Родеманн Т. Онтогенез рудных хромшпинелидов и состав включений как  
971 индикаторы пневматолито-гидротермального образования платиноносных  
972 хромититов массива Кондер (Алданский щит) // Геология рудных  
973 месторождений, 2015, т. 57(5), с. 394-423
- 974 32. Рагозин А.Л., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Орихаши Ю., Агашев А.М., Каги  
975 Х. U–Pb возраст рутила из ксенолита эклогита кимберлитовой трубки Удачная  
976 // Доклады академии наук, 2014, т. 457(2), с. 213-216.
- 977 33. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная  
978 микроскопия в геологии. Москва: Техносфера, 2008, 232 с.
- 979 34. Ровша В.С., Илупин И.П. Хромшпинелиды в кимберлитах Якутии // Геология и  
980 геофизика, 1970, вып. 2, с. 47-56
- 981 35. Силаев В.И., Шабалин В.Н., Голубева И.И., Хазов А.Ф., Белоусова Е.А. О  
982 цинксодержащих и цинкистых хромшпинелидах Тимано-Уральского региона //  
983 Вестник института геологии Коми научного центра УрО РАН, 2008, т. 8, с. 6-16
- 984 36. Серебрянников А.О., Логвинова А.М., Соболев Н.В. Особенности  
985 микропримесного состава хромшпинелидов-включений в алмазах из  
986 кимберлитов Якутии // Отечественная геология, 2022, т. 6, с. 50-63
- 987 37. Соболев Н.В. О минералогических критериях алмазоносности // Геология и  
988 геофизика, 1971, вып. 3., с. 70–80.
- 989 38. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней  
990 мантии. Новосибирск: Наука, 1974, 263 с.
- 991 39. Соболев Н.В., Галимов Э.М., Ефимова Э.С., Соболев Е.В., Усова Л.В.  
992 Кристаллические включения, изотопный состав углерода, азотные центры

- 993 алмазов и особенности состава граната из трубки Маджгаван (Индия) //  
994 Геология и геофизика, 1993, т.34(12), с. 85-91
- 995 40.Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Логвинова А.М., Суходольская О.В., Солодова  
996 Ю.П. Распространённость и состав минеральных включений в крупных алмазах  
997 Якутии // Доклады академии наук, 2001, т. 376(3), с. 382-386
- 998 41.Соболев Н.В., Логвинова А.М., Ефимова Э.С. Сингенетические включения  
999 флогопита в алмазах кимберлитов: свидетельство роли летучих в образовании  
1000 алмазов // Геология и геофизика. 2009. т. 50 (12), с. 1588-1606
- 1001 42.Соболев Н.В., Сереткин Ю.В., Логвинова А.М., Павлушин А.Д., Угапьева С.С  
1002 Кристаллографическая ориентировка и геохимические особенности  
1003 минеральных включений в алмазах // Геология и геофизика. 2020, т. 61 (5-6), с.  
1004 774-793.
- 1005 43.Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Особенности  
1006 состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии // Геология и  
1007 геофизика, 1975, т. 16(11), с. 7-24
- 1008 44.Соболев Н.В., Ефимова Э.С. Вариации состава включений хромита как  
1009 индикатор зональности кристаллов алмаз // Доклады академии наук, 1998, т.  
1010 358(5), с. 649-652
- 1011 45.Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Реймерс Л.Ф. Захарченко О.Д., Махин А.Н, Усова  
1012 Л.В. Минеральные включения в алмазах Архангельской кимберлитовой  
1013 провинции // Геология и геофизика, 1997, т. 38(2), с. 358-370
- 1014 46.Спивак Г.В., Пстров В.И., Антошин М.К. Локальная катодолюминесценция и  
1015 ее возможности для исследования зонной структуры твердых тел // Успехи  
1016 физических наук, 1986, том 148(4), с.689-717
- 1017 47.Туркин А.И., Соболев Н.В. Пироп-кноррингитовые гранаты: обзор  
1018 экспериментальных данных и природных парагенезисов // Геология и  
1019 геофизика, 2009, т. 50(12), с. 1506-1523
- 1020 48.Филиппов Н.Д., Захарова С.М. Некоторые особенности состава и морфологии  
1021 хромшпинелидов из кимберлитовой трубки «Мир» // Геология и геофизика,  
1022 1973, вып. 5, с. 112-117

- 1023 49.Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Геолого-генетические основы  
1024 шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений. Москва:  
1025 Недра, 1995, 348 с.
- 1026 50.Хачатрян Г.К. Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-  
1027 генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений //  
1028 Отечественная геология, 2013, вып. 2, с. 29–42
- 1029 51.Шацкий В.С., Булзукова Л.В., Ягоутц Э., Козьменко О.А., Митюхин С.И.  
1030 Строение и эволюция нижней коры Далдын-Алакитского района Якутской  
1031 алмазоносной провинции (по данным изучения ксенолитов) // Геология и  
1032 геофизика, 2005, т. 46(12), с. 1273-1289
- 1033 52.Agasheva E.V. Magmatic Material in Sandstone Shows Prospects for New Diamond  
1034 Deposits within the Northern East European Platform // Minerals, 2021, v. 11(4), p.  
1035 1-27
- 1036 53.Agasheva E.V., Gudimova A.I., Chervyakovskii V.S., Agashev A.M. Contrasting  
1037 Diamond Potentials of Kimberlites of the V. Grib and TsNIGRI-Arkhangelskaya  
1038 Pipes (Arkhangelsk Diamondiferous Province) as a Result of the Different  
1039 Compositions and Evolution of the Lithospheric Mantle: Data on the Contents of  
1040 Major and Trace Elements in Garnet Xenocrysts // Russian Geology and Geophysics,  
1041 2023, v. 64(12), p. 1459–1480
- 1042 54.Arai S., Ishimaru S. Zincian chromite inclusions in diamonds: Possibility of deep  
1043 recycling origin // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 2011, v 106(2),  
1044 p. 6
- 1045 55.Barth M.G., McDonough W.F., Rudnick R.L. Tracking the budget of Nb and Ta in  
1046 the continental crust // Chemical Geology, 2000, v. 165(3-4), p. 197-213
- 1047 56.Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. The relationship between infrared absorption and  
1048 the A defect concentration in diamond // Philosophical Magazine B, 1994, v. 69(4),  
1049 p. 1149-1153
- 1050 57.Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in  
1051 diamond // Philosophical Magazine B, 1995, v. 72(3), p. 351-361
- 1052 58.Bulanova G.P. The formation of diamonds // J. Geochem. Explor. 1995, v. 53, p. 1-

1053 23

- 1054 59. Camara F., Bindi L., Pagano A., Pagano R., Gain S.E.M., Griffin W.L. Dellagiustaite:  
1055 A Novel Natural Spinel Containing  $V^{2+}$  // *Minerals*, 2018, v. 9(1), p. 1-16
- 1056 60. Clark C.D., Davey S.T. One-phonon infrared absorption in diamond // *Journal of*  
1057 *Physics C: Solid State Physics*, 1984, v. 17(6), p. 1127-1140
- 1058 61. Chasse M., Griffin W.L., Alard O., O'Reilly S.Y., Calas G. Insights into the mantle  
1059 geochemistry of scandium from a meta-analysis of garnet data // *Lithos*, 2018, v. 310-  
1060 311, p. 409-421
- 1061 62. Cookenboo H.O., Grütter H.S. Mantle-derived indicator mineral compositions as  
1062 applied to diamond exploration // *Geochemistry Exploration Environment Analysis*,  
1063 2010, v. 10(1), p. 81-95
- 1064 63. Dawson J.B. *Kimberlites and their xenoliths* // Springer, 1980. 252 p.
- 1065 64. Donnelly C.L., Stachel T., Creighton S., Muehlenbachs K., Whiteford S. Diamonds  
1066 and their mineral inclusions from the A154 South pipe, Diavik Diamond Mine,  
1067 Northwest Territories, Canada // *Lithos*, 2007, v 98(1-4), p. 160-176
- 1068 65. Dymshits A.M., Sharygin I.S., Liu Zhe, Korolev N.M., Malkovets V.G., Alifirova  
1069 T.A., Yakovlev I.V., Xu Yi-Gang Oxidation state of the lithospheric mantle beneath  
1070 Komsomolskaya–Magnitnaya kimberlite pipe, upper Muna field, Siberian craton //  
1071 *Minerals*, 2020, v. 10(9), p. 1-22
- 1072 66. Garanin V., Garanin K., Kriulina G., Samosorov G. *Diamonds from the Arkhangelsk*  
1073 *Province, NW Russia*. Cham: Springer, 2021, 248 p.
- 1074 67. Girnis A.V., Gerhard P. B. Garnet-spinel-olivine-orthopyroxene equilibria in the FeO-  
1075 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system: II. Thermodynamic analysis // *European Journal*  
1076 *of Mineralogy*, 1999, v. 11(4), p. 619-636
- 1077 68. Griffin W.L., Ryan C.G. Trace elements in indicator minerals: area selection and  
1078 target evaluation in diamond exploration // *J. Geochem. Explor.*, 1995, v. 53, p. 311-  
1079 337.
- 1080 69. Griffin W.L., Ryan C.G., Cousens D.R., Sie S.H., Suter G.F. Trace element analysis  
1081 of chromites and its application for diamond exploration, 1989
- 1082 70. Griffin W.L., Sobolev N.V., Ryan C.G., Pokhilenko N.P., Win T.T., Yefimova E.S.

- 1083 Trace elements in garnets and chromites: Diamond formation in the Siberian  
1084 lithosphere // *Lithos*, 1993, v. 29(3-4), p. 235-2560
- 1085 71. Gubanov N.V., Zedgenizov D.A. The evolution of diamond-forming fluids indicating  
1086 a pre-kimberlitic metasomatic event in the mantle beneath the Mirny field (Siberian  
1087 craton) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2023, v. 178(23), p. 21
- 1088 72. Gurney J.J., Harris J.W., Rickard R.S. Silicate and oxide inclusions in diamonds from  
1089 the Finsch kimberlite pipe. Washington DC: American Geophysical Union, 1979, p.  
1090 1-15
- 1091 73. Haggerty E.H. Spinel in High Pressure Regimes. Washington DC: American  
1092 geophysical union, 1979, p. 183-196
- 1093 74. Hajjar Z., Gervilla F., Ilmen S., Bendaoud R. Geochemical composition of the  
1094 chromite from sulfide and graphite ores of the Beni Bousera ultramafic massif (north  
1095 Morocco) // *Mineral Resources to Discover - 14th SGA Biennial Meeting*, 2017, v. 2,  
1096 p. 539-542
- 1097 75. Harris J.W. The Properties of Natural and Synthetic Diamond. London: Academic  
1098 Press, 1992, p. 345-393
- 1099 76. Horn I., Foley S.F., Jackson S.E., Jenner G.A. Experimentally determined partitioning  
1100 of high-field strength and selected transition elements between spinel and basaltic  
1101 melt // *Chemical Geology*, 1994, v. 117, p. 193–218.
- 1102 77. Hu W.-J., Zhou M.-F., Yudovskaya M.A., Vikentyev I.V., Malpas, J., Zhang P.-F.  
1103 Trace Elements in Chromite as Indicators of the Origin of the Giant Podiform  
1104 Chromite Deposit at Kempirsai, Kazakhstan // *Economic Geology*, 2022, v. 117(7),  
1105 p. 1629-1655
- 1106 78. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator: part 1. Theory // *Canadian*  
1107 *Journal of Earth Sciences*, 1965, v. 2(6), p. 648-672
- 1108 79. Kaiser W., Bond W. Nitrogen, a major impurity in common type I diamond // *Physical*  
1109 *Review Journal*, 1959, v. 115(4), 857 p.
- 1110 80. Klemme S. The influence of Cr on the garnet-spinel transition in the Earth's mantle:  
1111 experiments in the system MgO–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and thermodynamic modelling //  
1112 *Lithos*, 2004, v. 77, p. 639–646.

- 1113 81. Kinny P.D., Griffin B.J., Heaman L.M., Brakhfogel F.F., Spetsius Z.V. Shrimp U -  
1114 Pb ages of perovskite from Yakutian kimberlites // *Russian Geology and Geophysics*,  
1115 1997, v. 38(1), p. 97-105
- 1116 82. König S., Schuth S. Deep melting of old subducted oceanic crust recorded by  
1117 superchondritic Nb/Ta in modern island arc lavas // *Earth and Planetary Science*  
1118 *Letters*, 2011, v. 301(1-2), p. 265-274
- 1119 83. Lai M.Y., Stachel T., Stern R.A., Hardman M.F., Pearson D.G., Harris J.F. Formation  
1120 of mixed paragenesis diamonds during multistage growth – Constraints from in situ  
1121  $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{15}\text{N}$ –[N] analyses of Koidu diamonds // *Geochimica et Cosmochimica Acta*,  
1122 2022, v. 323, p. 20-39
- 1123 84. Lenoir X., Garrido C.J., Bodinier J.L., Dautria J.M., Gervilla F. The Recrystallization  
1124 Front of the Ronda Peridotite: Evidence for Melting and Thermal Erosion of  
1125 Subcontinental Lithospheric Mantle beneath the Alboran Basin // *Journal of*  
1126 *Petrology*, 2001, v. 42(1), p. 141-158
- 1127 85. Maas R., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Sobolev N.V. Sr, Nd,  
1128 and Pb isotope evidence for a mantle origin of alkali chlorides and carbonates in the  
1129 Udachnaya kimberlite, Siberia // *Geology*, 2005, v. 33(7), p. 549-552
- 1130 86. Meyer H.O.A., Boyd F.R. Composition and origin of crystalline inclusions in natural  
1131 diamonds // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, v. 36 (11), p. 1255-1273
- 1132 87. Meyer H.O.A. Inclusions in diamonds. In: Nixon P.H. (ed). *Mantle xenoliths*, Willey,  
1133 Chichester, 1987, p. 501-522
- 1134 88. Meyer H.O.A., McCallum M.E. Mineral Inclusions in Diamonds from the Sloan  
1135 Kimberlites, Colorado // *The Journal of Geology*, 1986, v. 94(4), p. 600-612
- 1136 89. Münker C., Pfänder J.A., Weyer S., Büchl A., Kleine T., Mezger K. Evolution of  
1137 Planetary Cores and the Earth-Moon System from Nb/Ta Systematics // *Science*,  
1138 2003, v. 301(5629), p. 84-87
- 1139 90. Nickel K.G. Phase equilibria in the system  $\text{SiO}_2$ – $\text{MgO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{CaO}$ – $\text{Cr}_2\text{O}_3$   
1140 (SMACCR) and their bearing on spinel/garnet lherzolite relationships //  
1141 *Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 1986, v. 155(3), p. 259-287
- 1142 91. Nimis P. Pressure and Temperature Data for Diamonds // *Reviews in Mineralogy and*

- 1143 Geochemistry, 2022, v. 88(1), p. 533-565
- 1144 92. Nowicki T.E., Moore R.O., Gurney J.J., Baumgartner M.C. Chapter 46 Diamonds and  
1145 Associated Heavy Minerals in Kimberlite: A Review of Key Concepts and  
1146 Applications // *Developments in Sedimentology*, 2007, v. 58, p. 1235-1267
- 1147 93. O'Reilly S.Y., Griffin W.L., Ryan C.G., Residence of trace elements in  
1148 metasomatized spinel lherzolite xenoliths: a proton microprobe study // *Contributions*  
1149 *to Mineralogy and Petrology*, 1991, v. 109, p. 98-113
- 1150 94. Page P., Barnes S.J. Using Trace Elements in Chromites to Constrain the Origin of  
1151 Podiform Chromitites in the Thetford Mines Ophiolite, Quebec, Canada // *Economic*  
1152 *Geology*, 2009, v. 104(7), p. 997-1018
- 1153 95. Paktunc A.D., Cabri, L.J. A proton- and electron-microprobe study of gallium, nickel  
1154 and zinc distribution in chromian spinel // *Lithos*, 1995, v. 35(3-4), p. 261-282
- 1155 96. Pfänder J.A., Münker C., Stracke A., Mezger K. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island  
1156 basalts — Implications for crust–mantle differentiation and the fate of Niobium //  
1157 *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, vol. 254(1-2), p. 158-172
- 1158 97. Proenza J.A., Gervilla F., Melgarejo J.C., Vera O., Alfonso P., Fallick A.E. Genesis  
1159 of sulfide-rich chromite ores by the interaction between chromitite and pegmatitic  
1160 olivine-norite dikes in the Potosí Mine (Moa-Baracoa ophiolitic massif, Eastern  
1161 Cuba) // *Mineralium Deposita*, 2001, v. 36(7), p. 658-669
- 1162 98. Quirt D.H. Cr-diopside (clinopyroxene) as a kimberlite indicator mineral for diamond  
1163 exploration in glaciated terrains. In *Summary of Investigations*; Saskatchewan  
1164 Geological Survey. Regina: SK Canada, 2004; v. 2, 14 p.
- 1165 99. Righter K., Sutton S.R., Newville M., Le L., Schwandt C.S., Uchida H., Lavina B.,  
1166 Downs R.T. An experimental study of the oxidation state of vanadium in spinel and  
1167 basaltic melt with implications for the origin of planetary basalt // *American*  
1168 *Mineralogist*, 2006, v. 91(10), p. 1643-1656
- 1169 100. Rinaldi M., Mikhail S., Sverjensky D.A., Kalita J. The importance of carbon to the  
1170 formation and composition of silicates during mantle metasomatism // *Geochimica et*  
1171 *Cosmochimica Acta*, 2023, v. 356, p. 105-115
- 1172 101. Rubanova E.V., Palazhchenko O.V., Garanin V.K. Diamonds from the V. Grib

- 1173 pipe, Arkhangelsk kimberlite province, Russia // *Lithos*, 2009, v. 112(2), p. 880-885
- 1174 102. Rudnick R.L., Barth M.G., Horn I., McDonough W.F. Rutile-Bearing Refractory  
1175 Eclogites: Missing Link Between Continents and Depleted Mantle // *Science*, 2000,  
1176 v. 287(5451), p. 278-281
- 1177 103. Runciman W.A., Carter T. High resolution infra-red spectra of diamond // *Solid*  
1178 *State Communications*, 1971, v. 9(5), p. 315-317
- 1179 104. Ryan C.G., Griffin W.L., Pearson N.J. Garnet geotherms: Pressure-temperature  
1180 data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in volcanic rocks // *Journal of Geophysical*  
1181 *Research: Solid Earth*, 1996, v. 101(B3), p. 5611-5625
- 1182 105. Robertson R., Fox J.J., Martin A.E. Two types of diamond // *Philosophical*  
1183 *Transactions of the Royal Society*, 1933, v. 232(707-720), p. 463-535
- 1184 106. Smith W.V., Gelles I.L., Sorokin P.P. Electron spin resonance of acceptor states in  
1185 diamond // *Physical review letters*, 1959, v. 115(6), p. 1546-1552
- 1186 107. Smith C.B., Gurney J.J., Skinner E.M., Clement C.R., Ebrahim N. Geochemical  
1187 character of Southern African kimberlites: a new approach based on isotopic  
1188 constraints // *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 1985, vol. 88(2),  
1189 p. 267–280
- 1190 108. Sobolev N.V., Efimova E.S. Composition and Petrogenesis of Ti-Oxides  
1191 Associated with Diamonds // *International Geology Review*, 2000, v. 42(8), p. 758-  
1192 767
- 1193 109. Sobolev N.V., Logvinova A.M., Tomilenko A.A., Wirth R., Bulbak T.A.,  
1194 Lukyanova L.I., Fedorova E.N., Reutsky V.N., Efimova E.S. Mineral and fluid  
1195 inclusions in diamonds from the Urals placers, Russia: Evidence for solid molecular  
1196 N<sub>2</sub> and hydrocarbons in fluid inclusions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019,  
1197 v. 266, p. 197-219
- 1198 110. Соболев Н.В., Сереткин Ю.В., Логвинова А.М., Павлушин А.Д., Угапьева  
1199 С.С. Кристаллографическая ориентировка и геохимические особенности  
1200 минеральных включений в алмазах // *Геология и геофизика*, 2020, т. 61, № 5-6,  
1201 с. 774-793
- 1202 111. Stachel T., Harris J.W. The origin of cratonic diamonds — Constraints from

- 1203 mineral inclusions // *Ore Geology Reviews*, 2008, v. 34(1-2), p. 5-32
- 1204 112. Stosch H.G. Sc, Cr, Co and Ni partitioning between minerals from spinel peridotite  
1205 xenoliths // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1981, v. 78, p. 166-174
- 1206 113. Takazawa E., Frey F.A., Shimizu N., Obata M. Whole rock compositional  
1207 variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): are they  
1208 consistent with a partial melting process? // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000,  
1209 v. 64(4), p. 695-716
- 1210 114. Taylor L.A., Anand M., Promprated P., Floss C., Sobolev N.V. The significance of  
1211 mineral inclusions in large diamonds from Yakutia, Russia // *American Mineralogist*,  
1212 2003, v. 88, p. 912-920
- 1213 115. Taylor W. R., Jaques A. L., Ridd M. Nitrogen-defect aggregation characteristics of  
1214 some Australasian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of  
1215 pipe and alluvial diamonds // *American Mineralogist*, 1990, v. 75(11-12), p. 1290–  
1216 1310
- 1217 116. Venier M., Ziberna L., Princivalle F., Petrelli M., Lughì V., Logvinova A.M.,  
1218 Sobolev N.V., Turco G., Lenaz D. Trace Elements in Chromian Spinel from Four  
1219 Siberian Kimberlites // *Minerals*, 2022, v. 12(11), p. 1-16
- 1220 117. Webb S.A.C., Wood, B.J., 1986. Spinel–pyroxene–garnet relationships and their  
1221 dependence on Cr/Al ratio. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 92, 471–480.
- 1222 118. Weyer S., Münker C., Mezger K. Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle:  
1223 implications for the differentiation history of the crust–mantle system // *Earth and*  
1224 *Planetary Science Letters*, 2003, v. 205(3-4), p. 309-324
- 1225 119. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals //  
1226 *American Mineralogist*, 2010, v. 95(1), p. 185-187
- 1227 120. Wiggers de Vries D.F., Drury M.R., Winter D.A.M. Three-dimensional  
1228 cathodoluminescence imaging and electron back diffraction: tools for studying the  
1229 genetic nature of diamond inclusions // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2011, v. 161, p. 565-  
1230 579
- 1231 121. Wood B.J., Virgo D. Upper mantle oxidation state: Ferric iron contents of  
1232 Iherzolite spinels by  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectroscopy and resultant oxygen fugacities //

- 1233        Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, v. 53(6), p. 1277-1291
- 1234 122. Woods G.S., Collins A.T. Infrared absorption spectra of hydrogen complexes in  
1235        type I diamonds // Journal of Physics and Chemistry of Solids, v. 44(5), p. 471-475
- 1236 123. Yamamoto S., Komiya T., Hirose K., Maruyama S. Coesite and clinopyroxene  
1237        exsolution lamellae in chromites: *In-situ* ultrahigh-pressure evidence from podiform  
1238        chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet // Lithos, 2009, v. 109(3-4), p.  
1239        314-322
- 1240 124. Zhou Mei-Fu, Robinson P.T., Su Ben-Xu, Gao Jian-Feng, Li Jian-Wei, Yang Jing-  
1241        Sui, Malpas J.G. Compositions of chromite, associated minerals, and parental  
1242        magmas of podiform chromite deposits: The role of slab contamination of  
1243        asthenospheric melts in suprasubduction zone environments // Gondwana Research,  
1244        2014, v. 26(1), p. 262-283
- 1245

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1246

1247

Статьи:

1248

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

1249

1250

1251

1252

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

1253

1254

1255

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. 275, с. 1-15.

1256

1257

1258

1259

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

1260

1261

1262

Сборники и тезисы докладов:

1263

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)

1264

1265

1266

1267

1268

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)

1269

1270

1271

1272

1273

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.

1274

1275

1276 4) Серебрянников А. О. Особенности микропримесного состава  
1277 хромшпинелидов из алмазоносных кимберлитов // Геология: Материалы 58-й  
1278 Международной научной студенческой конференции, 10-13 апреля 2020 г. /  
1279 Новосибирский Государственный Университет — Новосибирск: ИПЦ НГУ 2020,  
1280 с. 69, ISBN 978-5-4437-1042-6 (МНСК 2020)

1281 5) Серебрянников А. О. Логвинова А.М., Особенности микроэлементного  
1282 состава хромшпинелидов мантийного генезиса // Материалы XXIX Всероссийской  
1283 молодежной конференции (г. Иркутск, 11–16 мая 2021 г.). – Иркутск: Институт  
1284 земной коры СО РАН, 2021., 245-246 с., ISBN 978–5–9908560–8–0 (XXIX  
1285 *Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика»,*  
1286 Иркутск)

1287 6) Серебрянников А. О., Логвинова А. М. Неоднородность состава  
1288 множественных включений магнезио-хромита в алмазах Якутии // 2021, 17-24  
1289 сентября, ИГГ УрО РАН. Сборник тезисов, с. 106-108 (XXVII *Всероссийская*  
1290 *научная конференция “Уральская минералогическая школа - 2021”.* г.  
1291 Екатеринбург)

1292 7) Серебрянников А. О., Логвинова А. М. Примесь ванадия в  
1293 хромшпинелидах из алмазов как петрогенетический индикатор // 2022, 10-12  
1294 апреля, ЦНИГРИ (III *Молодежная научно-образовательная конференция*  
1295 *«РУДНАЯ ШКОЛА ЦНИГРИ»*)

1296 8) Serebriannikov A. O., Logvinova A. M. Features of the trace element  
1297 composition of mantle-derived chrome spinels // 2022, 14-17 июня, ИНГГ СО РАН (X  
1298 *Международная Сибирская конференция молодых учёных по наукам о Земле,* г.  
1299 Новосибирск)

1300 9) Серебрянников А. О., Логвинова А. М., Михайленко Д. С. Минералогия  
1301 включений в коэсит-содержащих алмазах по данным КР-картирования // *Труды*  
1302 *Ферсмановской сессии, Апатиты, 2023*

1303 10) Серебрянников А. О., Логвинова А. М., Михайленко Д. С. Микропримеси  
1304 в хромшпинелидах из алмазов Архангельской и Якутской алмазоносных  
1305 провинций // *Труды Ферсмановской сессии, Апатиты, 2023*

1306 11) Серебрянников А. О., Михайленко Д. С., Логвинова А. М.  
1307 Метасоматическое преобразование глубоко-субдуцированных пород на примере  
1308 ксенолита эклогита из кимберлитовой трубки Удачная // 2023, *Сборник тезисов*  
1309 *Уральской минералогической школы*

1310 12) Серебрянников А. О., Логвинова А. М., Михайленко Д.С., Шу Ю.  
1311 Вариации микроэлементного состава хромшпинелидов из алмазов и  
1312 ультраосновных пород // *Тезисы научной конференции «Процессы*  
1313 *минералообразования при высоких давлениях, происхождение алмазов и*  
1314 *мантейных магм»*. Новосибирск, 17-19 июня 2025, с. 113-115.

1315