

*На правах рукописи*



**ВОРОБЕЙ Софья Сергеевна**

**МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ МИНЕРАЛОВ ПОРОД  
КРАТОННОЙ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ НА ПРИМЕРЕ  
КСЕНОЛИТОВ ТРУБОК МИР И ОБНАЖЕННАЯ, ЯКУТИЯ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва

**Научный руководитель:**

**Гаранин Виктор Константинович** доктор геолого-минералогических наук, профессор, научный руководитель Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва

**Официальные оппоненты:**

**Зинчук Николай Николаевич,**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик АН РС (Я), Председатель Западно–Якутского научного центра (ЗЯНЦ) АН РС(Я), г. Мирный, РС (Я)

**Агашев Алексей Михайлович,**  
кандидат геолого-минералогических наук, старший сотрудник лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений, Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева, г. Новосибирск

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

Защита диссертации состоится 5 октября 2023 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН)

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а

e-mail: [amosova@igc.irk.ru](mailto:amosova@igc.irk.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, адрес сайта: <http://www.igc.irk.ru/ru/nauka/dissertatsionnyj-sovet>

Автореферат разослан \_\_\_\_ 2023.г.

Ученый секретарь



диссертационного совета, к.х.н.

А.А. Амосова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Реконструкции изменений пород основания литосферной мантии на протяжении долгого времени уделяется огромное внимание [Соболев и др., 1964; Griffin et al., 1971; Соболев, 1974; Соболев и др., 1975; Dawson et al., 1975; 1975a; Dawson, 1980; 1984; Соболев и др., 1984; Галимов, 1984; Harte, 1983; Гаранин и др., 1991; Haggerty et al., 1990; 1991; Похиленко и др., 1993; Францессон и др., 1995; Соловьева и др., 1997; Афанасьев и др., 1998; 1999; Харьков и др., 1998; Зинчук и др., 2003; Taylor et al., 2003; Agashev et al., 2004; Dawson, 2004; Розен и др., 2006; Agashev et al., 2006; 2013; Соловьева и др., 2012; Костровицкий и др., 2015; Шарыгин, 2014; Алифирова, 2015; Резвухин, 2016, Сафонов и др., 2016; Калашникова, 2017 и другие]. Однако вопросы, связанные с условиями, местом, временем, средой таких преобразований и составом метасоматизирующих агентов являются до сих пор предметом многочисленных научных дискуссий и полностью еще не решены.

Установлено, что ксенолиты ультраосновных и основных глубинных пород, в том числе алмазоносных, часто несут следы метасоматических и близповерхностных преобразований различной степени интенсивности, которые указывают на многоэтапную и сложную историю эволюции в мантийных условиях. Эти процессы протекают в мантии еще до захвата ее субстрата кимберлитовым расплавом, затем в процессе подъема кимберлита до поверхности Земли.

Согласно литературным данным [Griffin et al., 1996; 1999; Walter, 1999; Griffin et al., 2009], литосферная мантия первоначально имела реститовое происхождение, по составу она отвечала деплетированным гарцбургит-дунитовым породам. В результате обогащения и просачивания по трещинам флюидов/расплавов (базальтового, карбонатитового и силикатного составов) [Agashev et al., 2013; Pokhilenko et al., 2017] произошла рефертилизация (вторичное обогащение) литосферной мантии Сибирского кратона [Harte, 1983; Kelemen et al., 1998; Griffin et al., 1996; 1999; 2007; Zedgenizov et al., 2007; Agashev et al., 2013; и другие].

Детальные минералого-петрографические и геохимические исследования мантийных ксенолитов позволяют дополнить и расширить информацию о составе и строении литосферной мантии под Мирнинским кимберлитовым полем (трубка Мир) и Куойкским (трубка Обнаженная) и сделать обобщающий вывод о ее происхождении.

**Цель исследования:** выявление процессов, приводящих к изменениям минеральных ассоциаций мантийных пород кратонной литосферной мантии до их захвата в виде ксенолитов кимберлитовыми расплавами, а также в процессе подъема расплавов и формирования трубок Мир и Обнаженная (ЯАП).

**Объект исследования** - метасоматические ассоциации минералов пород и их генезис в субкратонной литосферной мантии.

**Предмет исследования** – ксенолиты пород перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная Якутской алмазоносной провинции (ЯАП)

### **Задачи исследования:**

1. определение минералого-петрографических особенностей ксенолитов гранатовых, гранат-шпинелевых и шпинелевых лерцолитов, гранатовых пироксенитов и эклогитов из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная;

2. изучение келифитовых кайм на гранатах из ксенолитов двух кимберлитовых трубок;

3. получение информации о новых минеральных фазах, найденных в ксенолите гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная;
4. определение P-T-условий кристаллизации мантийных ксенолитов;
5. исследование геохимических особенностей пород, а также распределение главных и редких элементов в минералах;
6. проведение экспериментов по моделированию образования редких K-Al-Ti-содержащих фаз в породах при различных P-T-параметрах, соответствующих условиям верхней мантии.

**Фактический материал, методы и личный вклад автора.** Основой для проведения исследования стала коллекция мантийных ксенолитов, собранных в процессе полевых работ Лазько Е.Е. Коллекция включала 25 образцов из алмазоносной трубки Мир и 20 ксенолитов из трубки Обнаженная. Минералого-петрографическое исследование образцов проводилось автором лично. Исследования были выполнены на современных приборах в ЦКП МГУ имени М.В. Ломоносова, в ИЭМ РАН (г. Черноголовка) и ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева (г. Новосибирск). В ходе работы изучено более 70 шлифов. Для породообразующих минералов, продуктов их распада, келифитовых кайм и вторичных минералов выполнено более 3400 анализов рентгеноспектральным методом на приборах «Jeol JSM-6480L», «JEOL JXA-8100» (Япония) и «JEOL 6380LA». Обработано более 800 оптических и электронно-зондовых изображений. Проведено порядка 20 экспериментов на установке «наковальня с лункой» НЛ-13Т по изучению условий образования редких K-титанатов, а также их аналогов, полученных в эксперименте.

**Научная новизна:**

Впервые обнаружена минеральная фаза, *изоструктурная линдквиститу*, находящаяся в сростаниях с имэнгитом, матиаситом, кальцитом, доломитом, флогопитом, серпентином и рутилом в магнезиальном алюмохромите из гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная.

Обнаружение K-титанатов в природном ксенолите трубки Обнаженная послужило основой для проведения экспериментов при 5 ГПа и 1200° С. В системе хромит + ильменит+H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (флюид) продемонстрирована совместная кристаллизация имэнгита и прайдерита, тогда как в системе хромит + рутил +H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (флюид) происходит образование матиасита и K-Cr прайдерита, не содержащего Ва. Полученные результаты напрямую подтверждают возможность совместного образования титанатов в результате метасоматоза верхнемантийных перидотитов с участием карбонатных флюидов или расплавов в условиях высокой активности калия.

**Практическая значимость:**

1) Находки в виде включений в магнезиальном алюмохромите редких K-титанатов (*минерал, изоструктурный линдквиститу, имэнгит и матиасит*), которые образуют полиминеральные сростания с рутилом, кальцитом, доломитом, серпентином, флогопитом, дают ценную информацию о глубинных мантийных и близповерхностных процессах изменения. Минералого-петрографические и геохимические характеристики могут свидетельствовать о различных глубинных процессах под Мирнинским и Куойкским кимберлитовыми полями, что существенно повлияло на формирование алмазоносных и неалмазоносных кимберлитовых трубок.

2) Материалы диссертации могут быть использованы в учебном курсе «Минералогия алмаза» и «Минералогия месторождений алмаза» на кафедре геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

### **Защищаемые положения:**

• 1. *Геохимические признаки метасоматических процессов надежно устанавливаются в мантийных породах кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная на основании распределения РЗЭ в гранатах и клинопироксенах. Судя по отношению TiO<sub>2</sub>-Zr и Y-Zr зерна граната из двух кимберлитовых трубок были подвержены низкотемпературному флогопитовому и высокотемпературному расплавному метасоматозу. На основании редкоэлементного состава клинопироксена можно выделить два типа мантийного метасоматоза, происходившего до кимберлитового магматизма – карбонатитовый и силикатный в трубке Мир, и силикатный метасоматоз в трубке Обнаженная.*

• 2. *Нахождение в магнезиальном алюмохромите из ксенолита гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная включений К-титанатов (фазы, изоструктурной линдквиститу с эмпирической формулой  $(K_{0.89}Ba_{0.11})_{\Sigma 1.00} Fe^{3+}_{0.99} (Mg_{2.82}Fe^{2+}_{1.18})_{\Sigma 4.00} (Al_{5.05}Cr_{4.80}Ti_{3.28}V_{0.08})_{\Sigma 13.21} O_{27}$ , имэнгита и матиасита) свидетельствует о проявлении процесса мантийного метасоматоза, протекающего под влиянием флюида/расплава, обогащенного Ti и K.*

3. *Экспериментальные исследования образования редких титанатов (из группы магнетоплюмбита и кричтонита) при реакции хромит + ильменит/рутил с флюидом H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при 5 ГПа и 1200<sup>0</sup>С показали, что совместная кристаллизация: 1) прайдерита и матиасита происходит в системе хромит-рутил-флюид; 2) имэнгита и прайдерита происходит в системе хромит-ильменит-флюид. Совместное образование титанатов, а также впервые синтезированного К-Сr прайдерита, не содержащего Ba, происходит в результате метасоматоза верхнемантийных перидотитов с участием карбонатных флюидов или расплавов в условиях высокой активности калия.*

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности:** 1.6.4-Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации опубликовано 7 статей в российских и зарубежных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы были представлены как лично автором, так и соавторами на Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (2017); Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (2017); Международной школе «Науки о Земле им. профессора Л.Л. Перчука» (2017); Международной конференции «Проблемы магматической и метаморфической петрологии, геодинамики и происхождения алмазов» (2018); Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (2018); EMPG – XVII 17th International Symposium on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry (2021); XII-я Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия» (2021); XIV Научные чтения имени Г.П. Кудрявцевой (2021).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 9 глав и заключения общим объемом 199 страниц. В ней содержится 67 рисунков, 24 таблиц и 3 приложения. Список литературы включает 198 наименований. **Во введении** определены цели и задачи работы, дана общая характеристика работы, сформулированы защищаемые положения. **Первая глава** посвящена описанию геологического расположения и строения кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная, которые располагаются на территории ЯАП. **Во второй главе** дается краткий литературный обзор глубинных процессов. **В третьей**

**главе** описаны методы исследования, использованные в работе. **В четвертой главе** приведены результаты исследований главных породообразующих минералов. **Пятая глава** – описание структур распада в гранатах и пироксенах. **Шестая глава** – изучение и описание развитых келифитовых кайм на минералах и вторичные изменения по трещинам и прожилкам. **В седьмой главе** даны результаты изучения редких включений К-А1-Тi-содержащих фаз в магнезиальном алюмохромите из природного образца гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная. **Восьма глава** посвящена синтезу экзотических фаз и подтверждению их мантийного происхождения. **В девятой главе** рассмотрены геохимические характеристики мантийных ксенолитов, реконструкция этапов формирования и оценки РТ-условий образования. В заключении приведены основные выводы.

**Благодарности.** Диссертант выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю и наставнику, профессору, доктору геолого-минералогических наук В.К. Гаранину за научное руководство, доверие и поддержку на всех этапах работы. Автор особенно благодарит за ценные советы и неоценимую поддержку к.г.-м.н. Т.В. Калашникову.

Глубокую признательность диссертант выражает д.г.-м.н. А.Б. Перепелову, д.г.-м.н. С.И. Костровицкому, к.г.-м.н. В.Г. Бутвиной, д.г.-м.н. М.А. Горновой, профессору д.г.-м.н. А.В. Боброву, профессору д.г.-м.н. О.Г. Сафонову, д.г.-м.н. С.А. Силантьеву, д.г.-м.н. О.А. Луканину, профессору д.г.-м.н. А.А. Арискину, к.г.-м.н. Е.С. Сидкиной, профессору д.г.-м.н. А.Ю. Бычкову.

Автор выражает свою благодарность за содействие и конструктивные замечания к.г.-м.н. И.С. Шарыгину, к.г.-м.н. А.М. Дымшиц, к.г.-м.н. Л.Н. Похиленко, к.г.-м.н. А.М. Агашеву, профессору д.г.-м.н. А.Ф. Шацкому, к.г.-м.н. М.О. Булах, к.г.-м.н. А. В. Каргину, д.г.-м.н. А.В. Гирнису, к.г.-м.н. А.А. Гибшер, к.г.-м.н. О.В. Резвухиной, к.г.-м.н. Д.И. Резвухину, д.г.-м.н. Т.В. Посуховой, к.г.-м.н. Т.А. Алифировой, к.г.-м.н. Г.Ю. Криулиной. За содействие в проведении аналитических работ автор выражает благодарность с.н.с. Д.А. Варламову, вед. инженеру Е.В. Гусевой, к.г.-м.н. С.В. Ращенко, вед. инженеру Н.Н. Коротаевой, к.г.-м.н. Н.С. Карманову, Л.В. Усовой, к.г.-м.н. В.Д. Щербакову, к.г.-м.н. В.О. Япаскурту, к.г.-м.н. А.Л. Рогозину, инженеру исследователю А.А. Денисенко.

**Принятые обозначения минералов и принятых терминов в работе:**  
Породообразующие: Ol – оливин; Орх – ортопироксен; Срх – клинопироксен; Grt – гранат, Pgr – пироп; Spl – шпинель; Plm – ильменит; Rt – рутил; Chr – хромит; Amp – амфиболы; Phl – флогопиты; Ap – апатит; Yim – имэнгит; Ma – матиасит; Pri – прайдерит; Lqt – линдквистит; Srp – серпентин, TCP – тонкие (зачаточные) структуры распада; PЗЭ – редкоземельные элементы; ЛРЗЭ – легкие редкоземельные элементы; СРЗЭ – средние редкоземельные элементы; ТРЗЭ – тяжелые редкоземельные элементы; LILE – крупноионные литофильные элементы; HFSE – высокозарядные элементы.

*Мантийный метасоматоз* - замещение горных пород с изменением химического состава, при котором растворение старых минералов и отложение новых происходит почти одновременно, так что в течение процесса замещаемые горные породы все время сохраняют твердое состояние [Коржинский, 1973].

Термин *модальный метасоматоз* («modal metasomatism») был предложен в работе [Harte, 1983] для обозначения процесса, приводящего к образованию новых минеральных фаз. Доусон [Dawson, 1984] впервые использовал термин *скрытый метасоматоз* («cryptic metasomatism») для описания изменений в составе минералов, особенно в отношении редких и рассеянных элементов.

Термин «Келифит» («kelyphyte») широко используется в литературе для описания периферических изменений - развитие вторичных минералов (пироксена, амфибола, флогопита и др.) вокруг кристаллов граната [Рид и др., 1972; Obata 1994].

## ГЛАВА 1. Геологическая характеристика района исследования

Якутская алмазоносная провинция (далее – ЯАП) занимает северо-восточную часть Сибирской платформы, которая протягивается с юга на север на 1500 км от Малоботуобинского района почти до моря Лаптевых и с запада на восток на 1000 км от Харамайского поля в Красноярском крае до р. Лены (рис.1). Все кимберлитовые поля с высокопродуктивными алмазоносными трубками находятся в южной части провинции, где выделяется Мирнинское (к нему относится трубка Мир, изученная в настоящей работе), Накынское, Алакит-Мархинское, Далдынское и Верхне-Мунское поля, включающие все известные коренные месторождения алмазов Якутии [Бобриевич и др., 1959; Харьков и др., 1998; Зинчук и др., 2010].

Высокоалмазоносная трубка Мир (Мирнинское поле) располагается в Мало-Ботуобинском районе и находится в относительной близости к границам Маганского и Мархинского террейнов [Розен и др., 2006]. Возраст трубки Мир соответствует 362 млн. лет по U-Pb методу, датированному по цирконам [Дэвис и др., 1980] и относится к позднедевонскому.

Неалмазоносная трубка Обнаженная находится в пределах Куойкского рудного поля, приуроченном к Биректинскому террейну на северо-востоке Сибирского кратона [Милашев, 1959; Калашникова, 2017]. По U-Pb датировке цирконов возраст трубки составляет  $148 \pm 3$  млн. лет, что относится к позднеюрскому [Дэвис и др., 1980; Харьков и др., 1998; Костровицкий и др., 1991; 2012].

Среди разнообразных ксенолитов глубинных пород в трубке Мир преобладают гранатовые лерцолиты [Соболев, 1974; Гаранин и др., 1983; Уханов и др., 1988; Специус, Серенко, 1990; Beard et al., 1996; Харьков 1998; Sobolev et al., 1998; Sobolev et al., 2009; Agashev et al., 2001; Bulanova et al., 2014; Howarth et al., 2014; Agashev et al., 2014; Agashev et al., 2018]. В трубке Обнаженная распространены ксенолиты шпинелевых и гранат-шпинелевых лерцолитов, а также гранатовых и шпинелевых пироксенитов с широкими вариациями содержания орто- и клинопироксена [Howarth et al., 2014; Ионов, 2015; Калашникова и др., 2015; Sun et al., 2014; Ionov et al., 2018; Sun et al., 2020].

## ГЛАВА 2. Краткий литературный обзор глубинных процессов метасоматоза

В работе будет часто использоваться термин «метасоматоз», под которым Д.С. Коржинский [1973] предлагал понимать "всякое замещение горных пород с изменением химического состава, при котором растворение старых минералов и отложение новых происходит почти одновременно, так что в течении процесса замещаемые горные породы все время сохраняют твердое состояние". В результате этого процесса происходит преобразования глубинных пород под воздействием флюидов/расплавов вне зависимости от их происхождения и состава [Harte et al., 1975; Lloyd et al., 1975; Добрецов 1980; Bailey, 1982; Dawson, 1984; Bailey, 1987; Menzies et al., 1987; Соловьева и др., 1997; Spetsius et al., 2002; Dawson, 2004; Misra et al., 2004; Coltorti et al., 2008; Сафонов и др., 2016].

Следы многоэтапных процессов изменений наблюдаются в изученных нами ксенолитах перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов из трубок Мир и Обнаженная, что свидетельствует о сложной их истории в мантийных условиях: 1) геохимические спектры распределения РЗЭ, которые отражают следы метасоматического воздействия на породы в мантии; 2) структуры распада в зернах граната и пироксена; 3) келифитовые каймы разной мощности и минерального состава, возникающие при процессах частичного плавления вокруг граната; 4) находки уникальных и редких К-титанатов (фазы, изоструктурной *линдквиститу*, имэнгита, матиасита), которые образуются при мантийном метасоматозе в результате реакций хромшпинели с

высококалиевыми водно-солевыми флюидами/расплавами [Чуканов, Воробей и др., 2018; Бутвина, Воробей и др., 2018; Butvina, Vorobey et al., 2019].

Формированию уникальных по своей природе фаз отвечает модальный метасоматоз [Harte, 1983], который является важнейшим процессом в верхней мантии, определяющим не только многообразие парагенезисов самих мантийных пород, но и образование при их частичном плавлении специфических по составу магм [O'Reilly, Griffin, 2013]. В процессе модального метасоматоза появляются редкие фазы, среди них особое место занимают минералы группы кричтонита, магнетоплюмбита и голландита [Haggerty, 1991] – редкие титанаты, обогащенные крупноионными литофильными (LILE), прежде всего К и Ва, высокозарядными (HFSE), легкими редкоземельными (LREE) элементами, а также U и Th. Минералы этих групп присутствуют в метасоматизированных перидотитах из мантийных ксенолитов в кимберлитах, лампроитах и щелочных лампрофирах, а также встречаются в виде включений в алмазах [Haggerty, 1991]. Образование К-Ва-титанатов характеризует, по-видимому, наивысшие степени метасоматических изменений в условиях высоких активностей калия, больших, чем необходимо для образования флогопита и калиевого рихтерита [Сафонов и др., 2016; Бутвина, Воробей и др., 2019; Бутвина и др., 2021; Butvina et al., 2022].

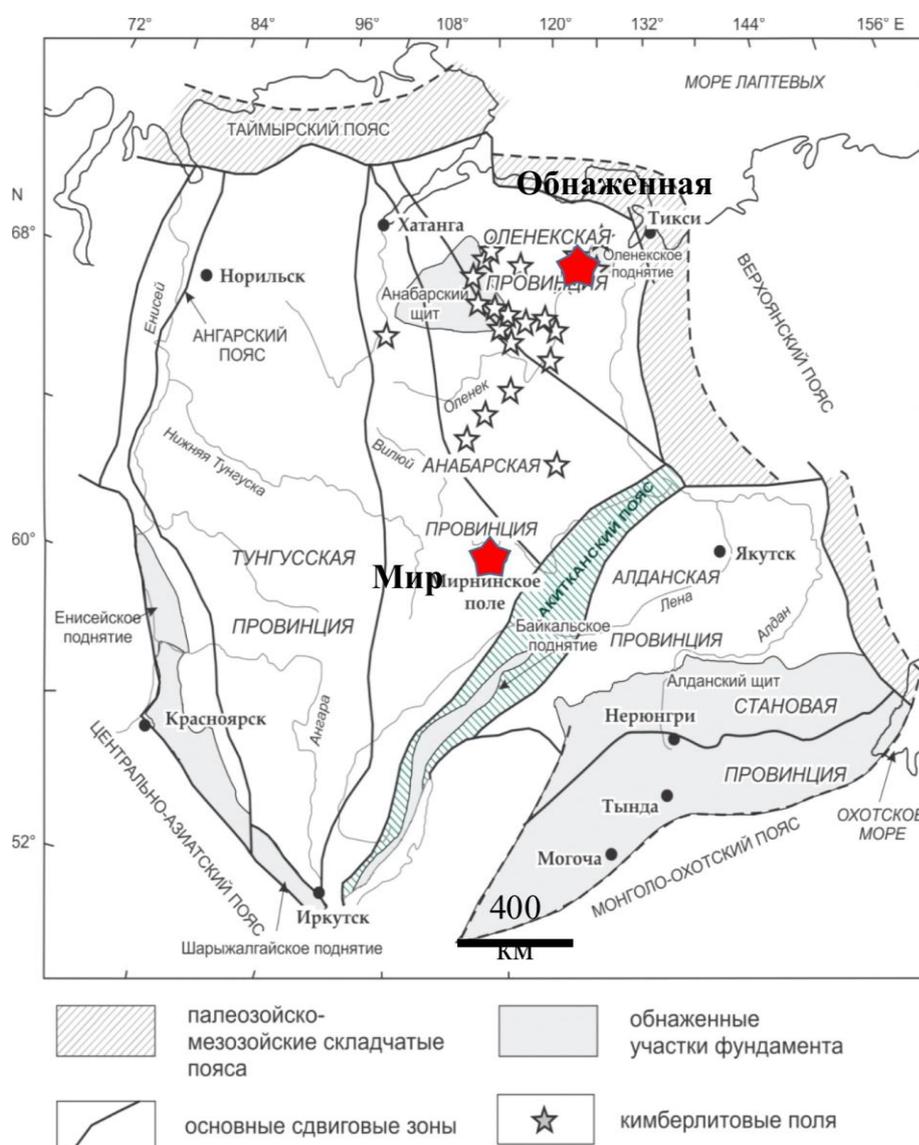


Рис 1. Расположение изученных кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная на территории Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) [Rosen et al., 1994]

### ГЛАВА 3. Методы исследования

Исследование и изучение главных породообразующих минералов, структур распада, келифитовых кайм, вторичных изменений по прожилкам, а также включений редких К-титанатов проводилось с использованием различных методик: оптической, сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом, ICP- MS с лазерной абляцией, КР- спектроскопии. Синтез экзотических К- содержащих фаз осуществлялось на установке НЛ-13Т при 5 ГПа и 1200 °С.

### ГЛАВА 4. Минералого-петрографическая характеристика мантийных ксенолитов

Коллекция мантийных ксенолитов из 45 образцов включает породы с тремя типами парагенезисов: *перидотитовый* (21 образец), *пироксенитовый* (20 образцов) и *эклогитовый* (4 образца). В изученной коллекции ксенолитов перидотитового парагенезиса алмазоносной трубки Мир выделяются гранатовые лерцолиты (10 образцов). В образцах из неалмазоносной трубки Обнаженная можно выделить *гранатовые* (5 образцов), *гранат-шпинелевые* (2) и *шпинелевые лерцолиты* (4). Изученные породы имеют преимущественно крупно- и среднезернистую структуру, массивную текстуру.

Среди пород пироксенитового парагенезиса встречаются чаще всего гранатовые разновидности, которые представлены вебстеритами из кимберлитовой трубки Мир (11 образцов) и Обнаженная (9 образцов). Структура от мелко- до крупнозернистых, текстура массивная. В изученной коллекции, также присутствуют ксенолиты эклогитового типа (4 образца) из трубки Мир. Породы характеризуется средне- и крупнозернистой структурой, а также массивной текстурой.

### ГЛАВА 5. Структуры распада в породообразующих минералах.

В изученной коллекции пород из трубок Мир и Обнаженная в зернах граната и пироксена отмечаются моно- и полиминеральные продукты распада (рис. 2).

В зернах *граната* продукты распада могут быть распределены как хаотично, так и равномерно по всему объему. Они представлены преимущественно рутилом и ильменитом, реже встречается клинопироксен в сростаниях с рутилом. Структуры распада в гранате наблюдаются в виде: а) развитых игл длиной 1-20 мкм; б) тонких (зачаточных) игл длиной менее 0.5 мкм (рис.2 а-б).

В клинопироксене и ортопироксене также встречаются структуры распада, которые характеризуются различным минеральным составом, морфологией и размером. Основными минералами среди продуктов распада *клинопироксена* является рутил, ильменит, ортопироксен, шпинелид, отмечаются единичные бочонковидные зерна апатита.

Морфология структур распада в клинопироксене (рис.3) более разнообразна, чем в зернах граната, и представлена: а) очень тонкими (зачаточными) иглами (толщиной менее 1 мкм, длиной 3–10 мкм); б) тонкими иглами (толщиной 2–5 мкм и длиной 10–100 мкм); в) крупными пластинками (толщиной до 150 мкм и длиной до 250 мкм).

Структуры распада в ортопироксене из ксенолитов трубки Мир отсутствуют, тогда как в зернах ортопироксена из неалмазоносной трубки Обнаженная были обнаружены ламели клинопироксена, шпинелидов и ильменита. По морфологии здесь выделяются: а) тонкие иглы (толщиной до 1 мкм и длиной до 100 мкм); 2) вытянутые пластинки (толщиной до 10 мкм и длиной до 200 мкм); в) ламели (толщиной от 1–5 мкм и длиной до 100 мкм).

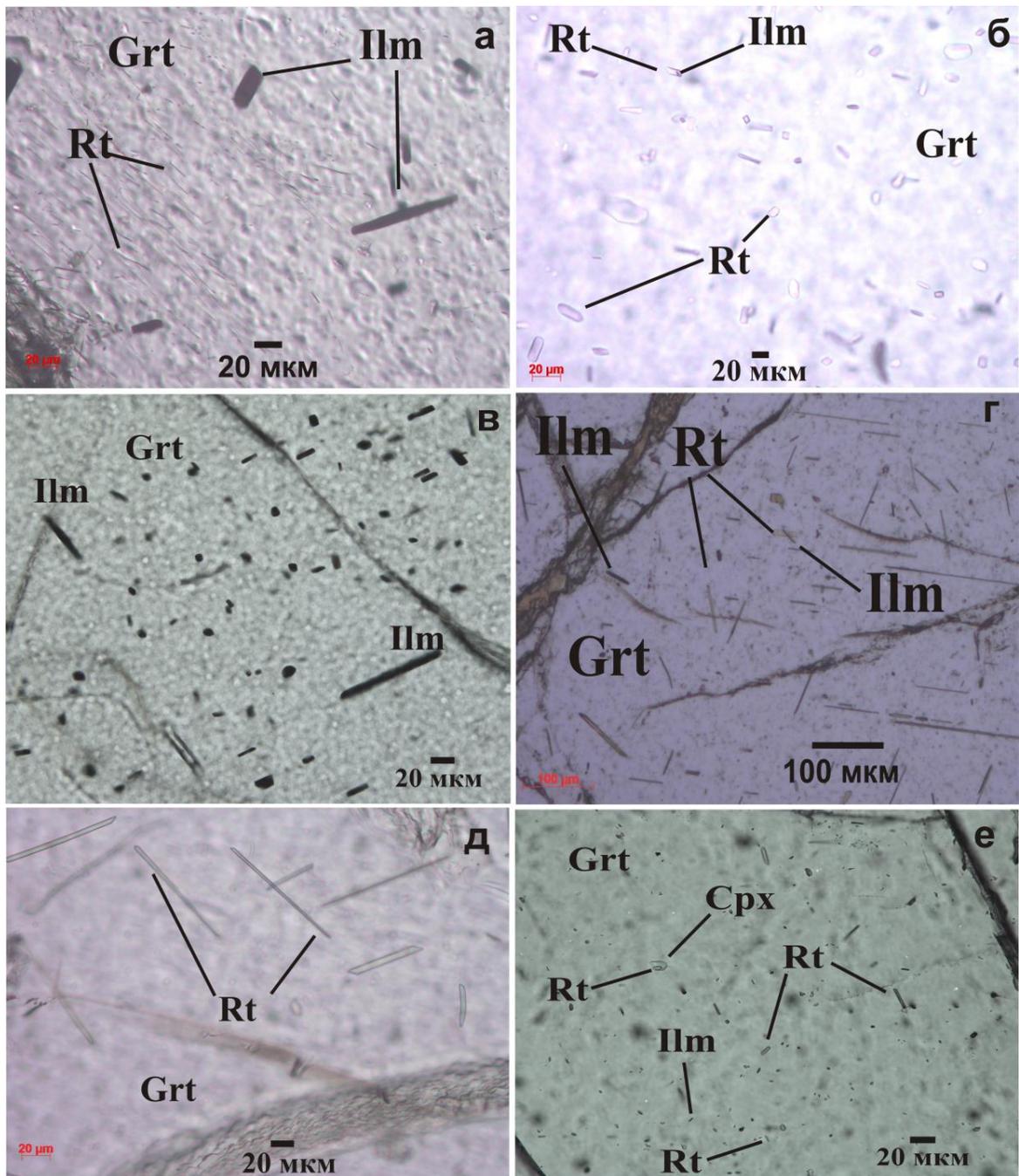


Рис.2. Продукты распада в гранатах (проходящий свет): А) – зачаточные (тонкие) иглы рутила и ильменита (гранатовый перидотит, обр. ТМ–44, трубка Мир); Б) – зачаточные (тонкие) иглы рутила (гранатовый вебстерит, обр. ТМ–126, трубка Мир); В) – хорошо выраженные иглы ильменита (гранатовый вебстерит, обр. ТМ–91, трубка Мир); Г) – тонкие иглы и рутила с ильменитом, (гранатовый лерцолит, обр. ТО–281, трубка Мир); Д) – хорошо выраженные иглы ильменита и рутила (гранатовые вебстериты, обр. ТО – 138, трубка Обнаженная); Е) – иглы рутила и ильменита, пластинка рутила в ламели клинопироксена (гранатовый вебстерит, обр. ТО–131, трубка Обнаженная).

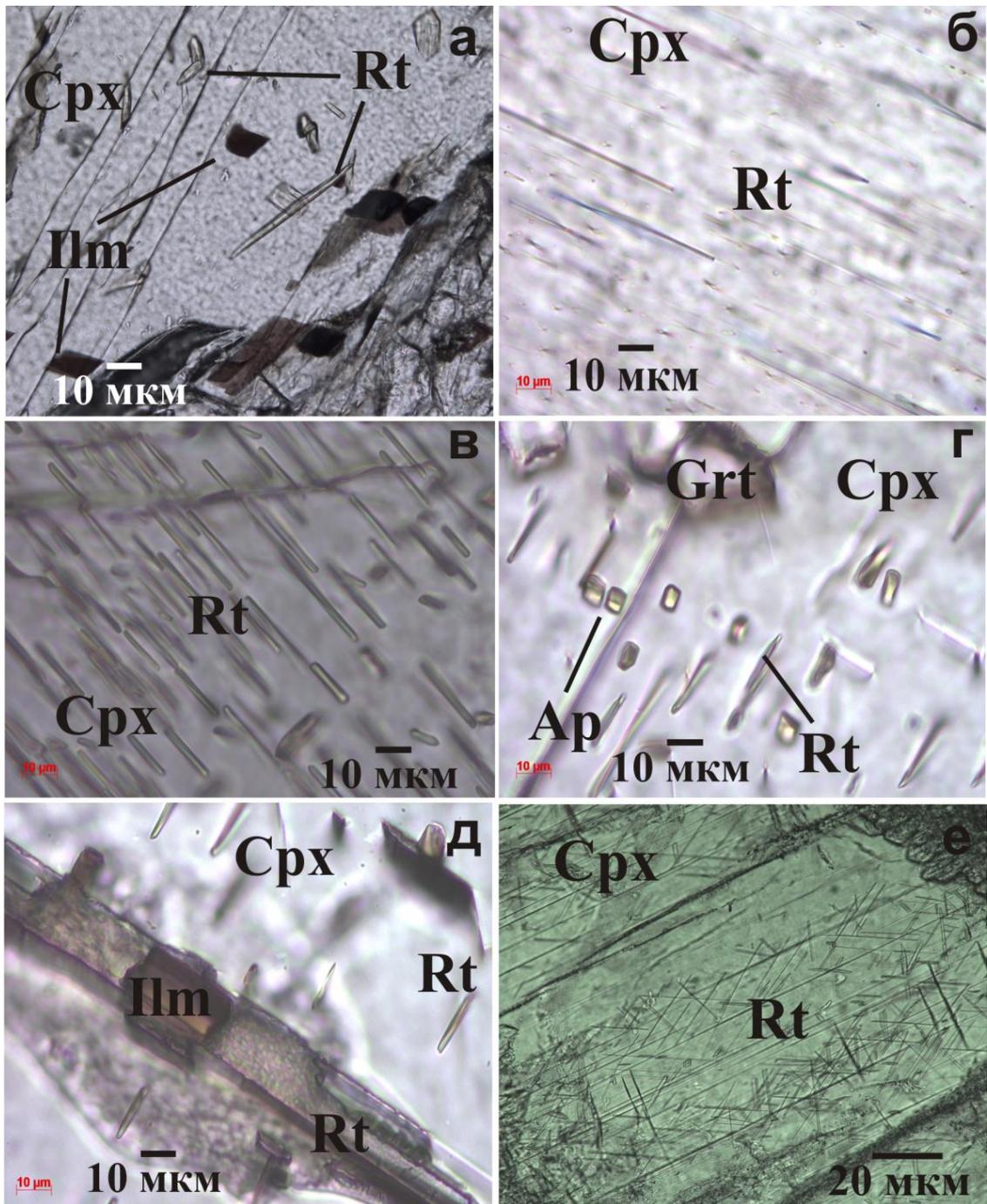


Рис. 3. Продукты распада в клинопироксене (проходящий свет): А) – структуры распада ильменита и рутила (эжюлит, обр. ТМ-109, трубка Мир); Б) – ориентированные тонкие иглы рутила (гранат-шпинелевый лерцолит, обр. ТО-212, трубка Обнаженная); В) – ориентированные иглы рутила (шпинелевый лерцолит ТО-91, трубка Обнаженная); Г) – ориентированные иглы рутила и апатита (верлит, обр. ТО-78, трубка Обнаженная); Д) – составные продукты распада ильменита и рутила ( верлит, обр. ТО-78, трубка Обнаженная); Е) – тонкие иглы рутила (гранатовый вебстерит, обр. ТО-131, трубка Обнаженная).

*В результате детального изучения структур распада в породообразующих минералах граната и пироксена из двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная выявлены отличия в минеральном составе и морфологии. В трубке Мир идентифицированы преимущественно редкие и тонкие (либо зачаточные) структуры распада рутила и ильменита, тогда как в трубке Обнаженная в зернах граната и пироксена преобладают хорошо выраженные тонкие иглы, представленные рутилом, ильменитом, шпинелью, апатитом, орто- и клинопироксеном.*

## ГЛАВА 6. Процесс келифитизации минералов

Помимо структур распада на границе минеральных фаз из ксенолитов обеих трубок отмечаются келифитовые каймы на гранатах, которые существенно различаются по мощности и минеральному составу. Процессом образования келифитовых кайм на гранатах, занимались, и до сих пор остается увлекательным исследованием для многих ученых [Соболев и др., 1962; Илупин и др., 1969; Reid et al., 1972; Тронева и др., 1979; Fediukova, 1979; Lock et al., 1980; Hunter et al., 1982; Харьков и др., 1989; Godard and Martin, 2000; Obata, 2011; Шарыгин, 2014; Соловьев и др., 2019; Pokhilenko, 2021]. *Келифитовые каймы* были описаны и изучены в наших образцах по периферии гранатов из ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов.

Каймы вокруг зерен граната из *перидотитового типа пород* трубки Мир сложены преимущественно неоднородными по составу зернами шпинелидов, где центр высокохромистый, а кайма высокоглиноземистая (рис.4), флогопита и амфибола (преимущественно эденитового, паргаситового составов). В образцах из неалмазоносной трубки Обнаженная каймы мощные, многослойные и состоят из хорошо выраженных слоев чешуйчатого флогопита, реже амфибола (паргаситового состава) (рис.5).

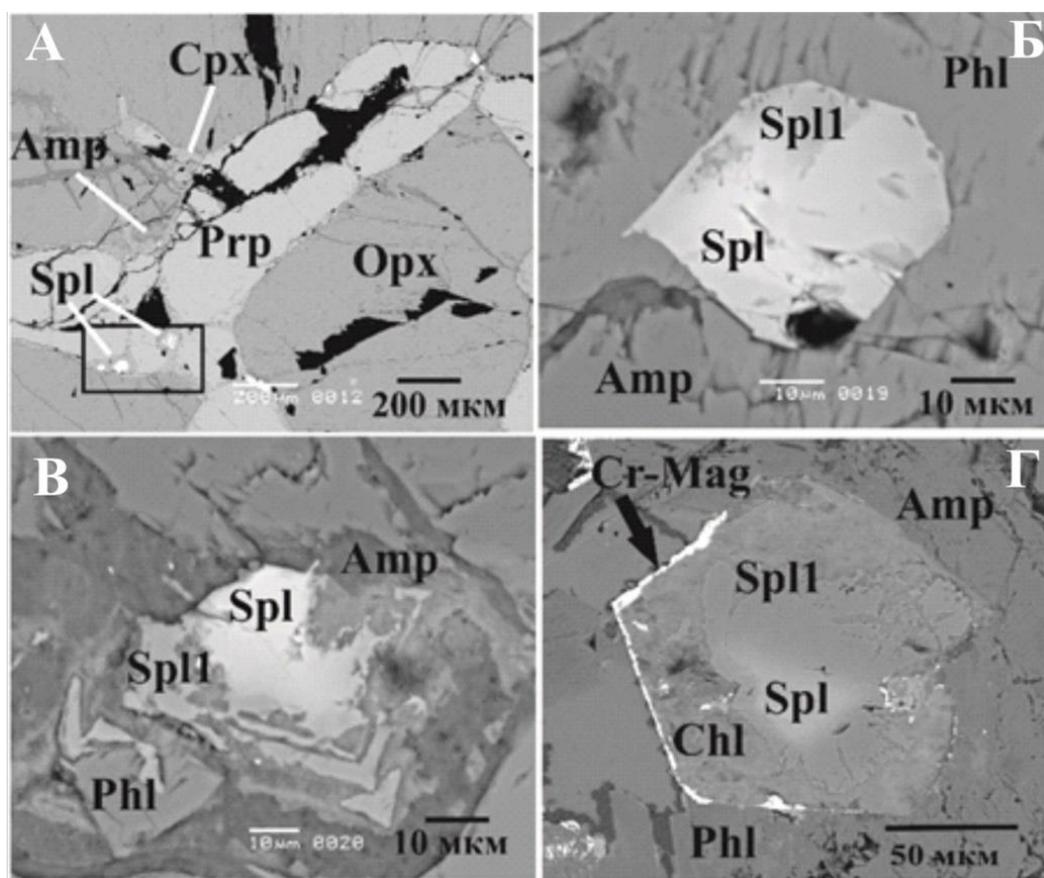


Рис.4. Келифитовые каймы с включениями неоднородных зерен шпинелидов: А) – общий вид келифитовой каймы вокруг граната, гранатовый лерцолит (обр. ТМ–74, трубка Мир); Б–В) – неоднородное зерно шпинелида в кайме, гранатовый лерцолит (обр. ТМ–74, трубка Мир); Г) – зональные зерна шпинелидов в амфибол-флогопитовых каймах, гранатовый лерцолит (обр. ТМ–73, трубка Мир).

Изображения в обратно рассеянных электронах.

Келифитовые оторочки на гранатах трубки Мир *пироксенитового парагенезиса* отличаются по минеральному составу от *перидотитовых кайм*, они сложены клинопироксеном, высокохромистой шпинелью, хромитом, флогопитом и амфиболом (различных типов: паргаситового, а также куммингтонитового и эденитового составов). Каймы на гранатах трубки Обнаженная сложены флогопитом и амфиболом

(паргаситового состава), что и в перидотитовом типе пород. В *эклогитовом парагенезисе* келифитовые каймы по периферии гранатов из трубки Мир сложены флогопитом, а также амфиболом разнообразного состава: куммингтонитового, эденитового, катофоритового и паргаситового.

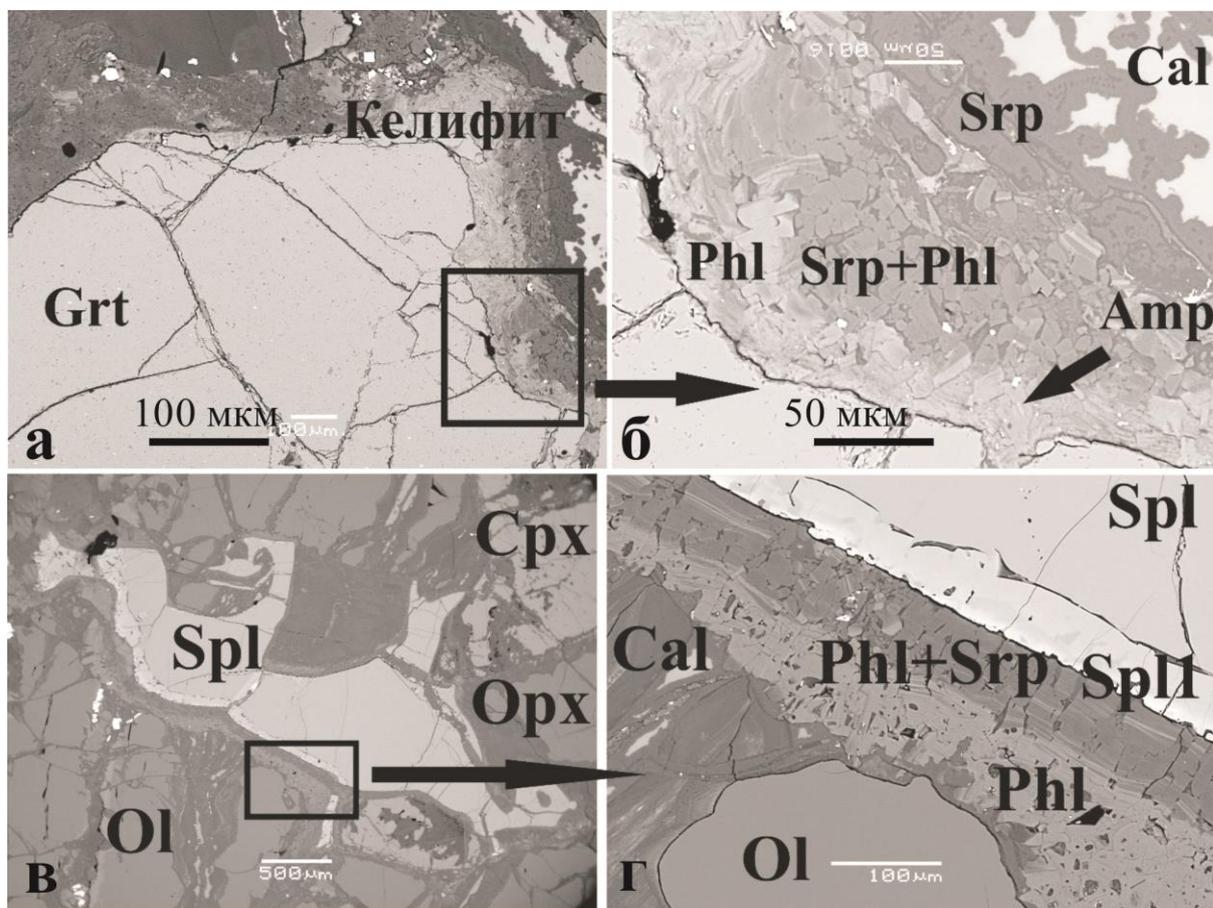


Рис. 5. Келифитовые каймы вокруг граната и реакционная кайма на границе минеральных фаз со шпинелидом: А–Б) – мощная и многослойная кайма флогопитового состава, гранатовый лерцолит (обр. ТО–281, трубка Обнаженная); В–Г) – мощная кайма вокруг шпинелида, шпинелевый лерцолит (обр. ТО–91, трубка Обнаженная). Изображения в обратно рассеянных электронах.

Согласно статье 2019 года [Spengler et al., 2019] по изученным в настоящей работе структурам распада можно сделать вывод о том, что породы, содержащие силикаты со структурами распада, кристаллизовались из высокомагнезиальных расплавов, прошли этап изобарического остывания от очень высоких температур (в среднем свыше 1500 °С, при давлениях, близких к 3 ГПа). В ходе данного этапа остывания произошло формирование структур распада в мантийных силикатах, а затем уже кристаллизовавшиеся породы переуравновесились при температурах и давлениях, соответствующих локальному геотермическому градиенту.

*В диссертационной работе также были подробно описаны составы флогопита и впервые выделены разновидности амфибола по минеральному составу в каждом слое келифитовой каймы по периферии граната из разных парагенетических групп. Детальное описание келифитовых кайм на минералах из ксенолитов двух кимберлитовых трубок вносит большой вклад в изучение и выделение на разных этапах воздействие мантийного и кимберлитового метасоматоза.*

*В трубке Мир каймы преимущественно маломощные (от 5 до 150 мкм), агрегатного строения (без четко выраженных зон) и с преобладанием в них неоднородных зерен шпинелидов, флогопита, амфибола, реже клинопироксена и ортопироксена. В породообразующих минералах отмечались многочисленные прожилки*

серпентин-, серпентин-хлоритового и серпентин-хлорит-карбонатного составов. В межзерновом пространстве встречаются включения различных минералов: джерфешерита, пентландита, хизливудита, миллерита. В трубке Обнаженная келифитовые каймы мощные и многослойные (до 250 мкм), сложены флогопитом, реже амфиболом. Вторичная минерализация представлена серпентин-хлорит-карбонатным и серпентиновым составом в виде многочисленных прожилков внутри первичных минералов.

## ГЛАВА 7. Природные включения редких K-Al-Ti-содержащих фаз в магнезиальном алюмохромите из ксенолита гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная

Интерес к минералам группы магнетоплюмбита (МГМ) связан как с их присутствием в качестве аксессуарных компонентов в разных типах горных пород, в основном метасоматического генезиса, так и с тем, что синтетические аналоги некоторых из этих минералов нашли широкое применение в качестве *ферритмагнитных материалов* с высокой коэрцитивной силой [Stäblien, 1982]. Редкие K-Al-Ti фазы обнаружены в ксенолите гранат-шпинелевого лерцолита (обр. ТО-125) (размером 2.6×1.4 см) из кимберлитовой трубки Обнаженная (Куойское поле). Данная порода характеризуется гипидиоморфнозернистой структурой и массивной текстурой. Породообразующие минералы в ксенолите – гранат (30–35 об.%), ортопироксен (15–35 об.%), клинопироксен (10–30 об.%) и оливин (10–20 об.%) [Чуканов, Воробей и др., 2018]. В центральной части ксеноморфных выделений магнезиального алюмохромита обнаружены включения размером до 150 мкм, состоящие из минерала (*изоструктурного линдквиститу*), флогопита и рутила (рис.6).

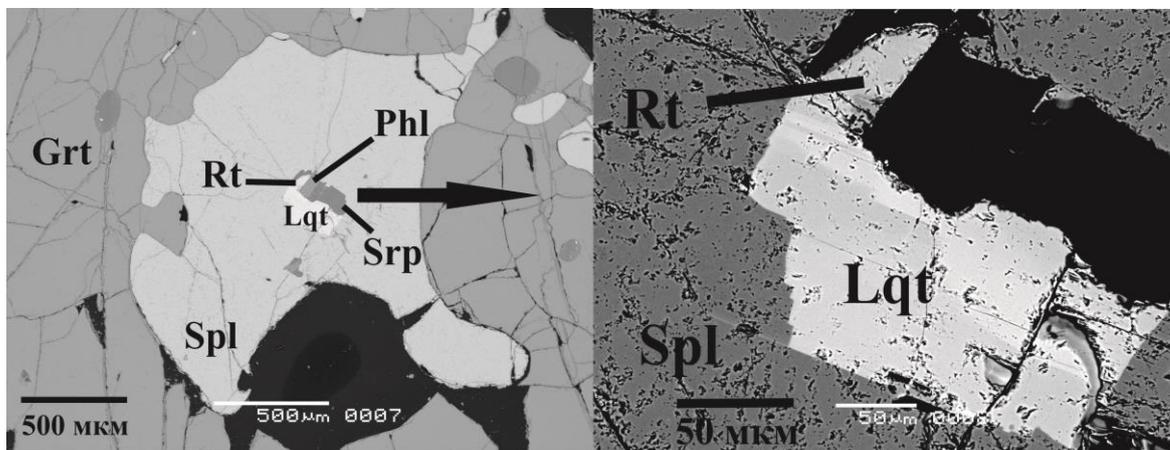


Рис 6. Ксенолит гранат-шпинелевого лерцолита, неалмазоносная трубка Обнаженная. Справа – общий вид, включение в магнезиальном алюмохромите; Слева – полиминеральные срастания фаз: минерал, изоструктурный линдквиститу, флогопит, серпентин и рутил. Изображение в обратно-рассеянных электронах

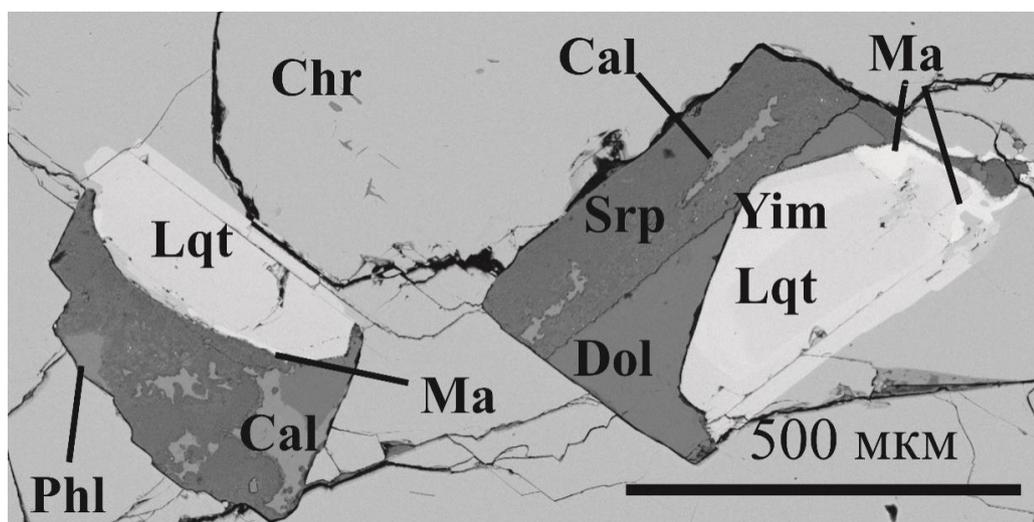


Рис. 7. Ксенолит гранат-шпинелевого лерцолита, неалмазоносная трубка Обнаженная. Полиминеральные срastания, содержащие редкие К-Al-Ti-содержащие фазы. Изображение в обратно-рассеянных электронах

Впервые в виде включений в магнезиальном алюмохромице из ксенолита гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная одновременно идентифицированы редкие и экзотические фазы К-титанатов - имэнгита, матиасита и фазы, изоструктурной линдквиститу из группы магнетоплюмбита, которые образуют полиминеральные срastания с минералами как первичной (рутил-флогопит-доломитовой), так и вторичной (серпентин-кальцитовой) ассоциаций (рис.6, рис.7).

В другом зерне магнезиального алюмохромице обнаружены три включения, которые представлены срastаниями (минерала, *изоструктурного линдквиститу*), имэнгита, матиасита, кальцита, доломита, серпентина и флогопита (рис.7).

Появление этих фаз может быть результатом воздействия флюида, обогащенного Ti и K, что свидетельствует о метасоматозе мантийных пород. Для определения неизвестной и редкой минеральной фазы, изоструктурной линдквиститу была расшифрована кристаллическая структура минерального вида (рис.8), со следующей формулой  $X(K_{0.89}Ba_{0.11})_{\Sigma 1.00}AFe^{3+}_{0.99}T(Mg_{2.82}Fe^{2+}_{1.18})_{\Sigma 4.00}M(Al_{5.05}Cr_{4.80}Ti_{3.28}V_{0.08})_{\Sigma 13.21}O_{27}$ (гекс.), которая проводилась на базе дифракционных данных, полученных при съёмке монокристалла размером  $\sim 0.1 \times 0.1 \times 0.05$  мм на дифрактометре STOE IPDS-2T, где в 12-координационной позиции X могут располагаться большие катионы K и Ba, в тетраэдрической позиции T находится  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$ , в октаэдрической позиции M  $Al^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$  и  $Ti^{3+}$ .

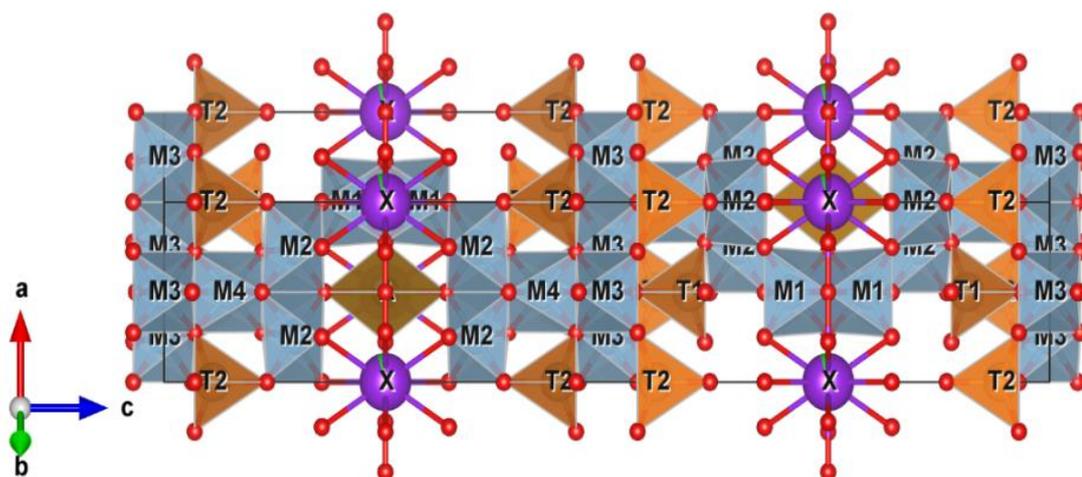


Рис. 8. Кристаллическая структура минерала, изоструктурного *линдквиститу*

## ГЛАВА 8. Синтез редких К-титанатов в системах шпинель-рутил/ильменит-флюид при 5 ГПа

В данной главе приведены результаты первых экспериментов по кристаллизации имэнгита, матиасита и хромистого прайдерита в системе хромит + ильменит/рутил с флюидом  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{K}_2\text{CO}_3$  при 5 ГПа и 1200 °С с использованием аппаратуры высокого давления НЛ-13Т (ИЭМ РАН им. Д.С. Коржинского, г. Черноголовка).

В качестве флюидной составляющей использовалось разное соотношение  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и щавелевой кислоты. Природные К-Ва-титанаты, обогащенные хромом, тесно ассоциируют с хромитом. Поэтому для выяснения образования любой из этих фаз при непосредственном взаимодействии хромита с калиевой жидкостью были проведены эксперименты со смесью *хромит* +  $\text{K}_2\text{CO}_3$  в *присутствии рутила/ильменита*.

В системе *хромит-рутил-флюид* получены - прайдерит и матиасит (рис.9), а в системе *хромит-ильменит-флюид* - имэнгит и прайдерит (рис.10). Отсюда можно сделать вывод, что для образования редких титанатов в экспериментах необходимо присутствие дополнительных Ti-содержащих фаз, связанных с хромитом. Хромит и ильменит являются наиболее типичными минералами перидотитов, ассоциирующими с К-Ва-титанатами, и, поэтому образование последних обычно связывают с реакциями, в которых участвует прежде всего хромит и флюид, обогащенный щелочами с низкой активностью  $\text{SiO}_2$  [Giuliani et al., 2012; Konzett et al., 2013]. Впервые была сделана попытка [Бутвина, Воробей и др., 2019; Бутвина и др., 2021] экспериментально воспроизвести при условиях верхней мантии реакции образования с участием калиевого водно-углекислого флюида двух титанатов - прайдерита и имэнгита. Особо надо отметить, что хром-доминантная разновидность прайдерита встречается исключительно в метасоматизированных перидотитах [Haggerty, 1991].

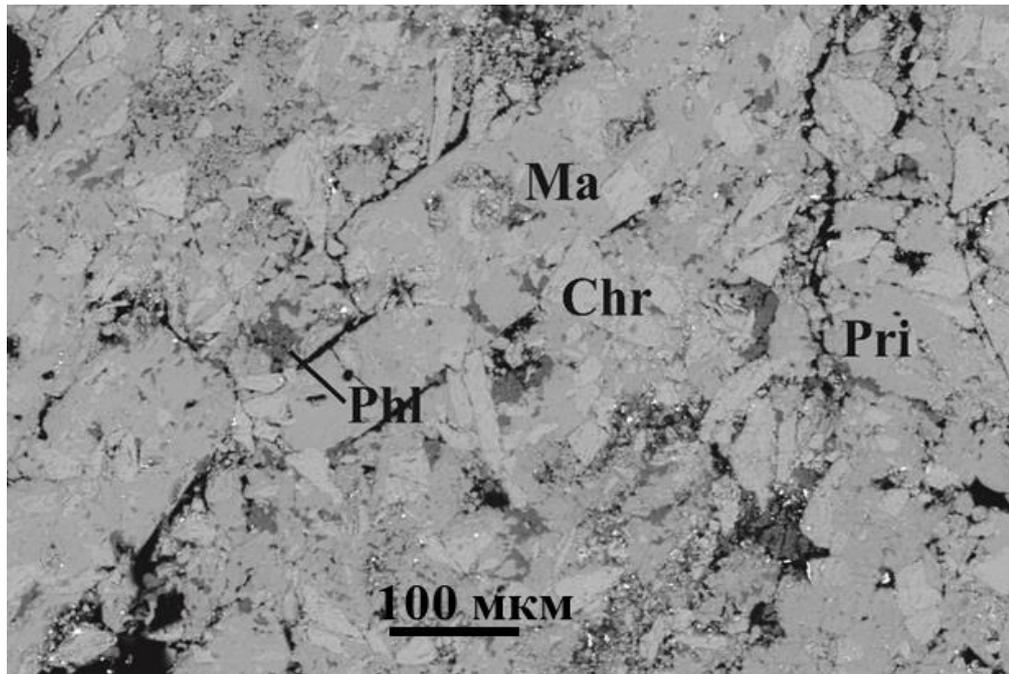


Рис 9. Продукты эксперимента в системе хромит-рутил-  $K_2CO_3-H_2O-CO_2$  при 5 ГПа и  $1200^{\circ}C$ . Срастание хромита, матиасита, прайдерита и флогопита. Изображение в обратно рассеянных электронах

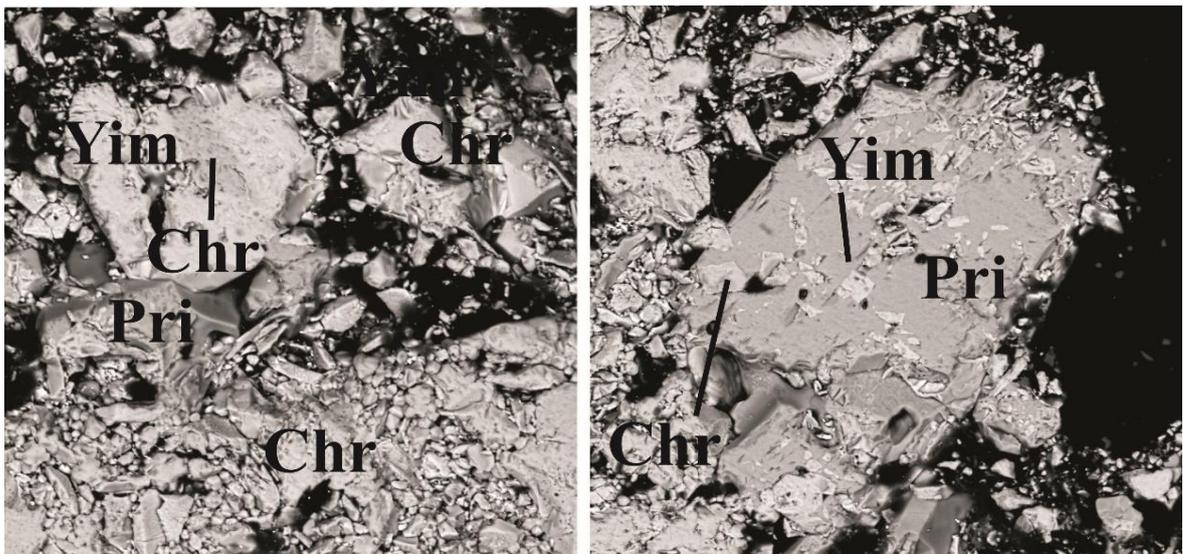


Рис. 10. Продукты эксперимента: в системе хромит-ильменит -  $K_2CO_3-H_2O-CO_2$  при 5 ГПа и  $1200^{\circ}C$ . Срастание прайдерита, хромита и имэнгита. Изображения в обратно рассеянных электронах

Экспериментальные данные [Foley et al., 1994; Konzett et al., 2015] свидетельствуют о том, что за стабильность как прайдерита, так и имэнгита в мантийных парагенезисах ответственны не столько температура и давление, сколько состав среды, прежде всего, концентрация калия – компонента, поставляемого метасоматизирующими флюидами или расплавами. Возможность образования этих минералов при взаимодействии минералов перидотитов с калиевыми флюидами различного состава ранее экспериментально не изучалась.

## ГЛАВА 9. Генетические вопросы происхождения мантийных ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная

Спектры распределения РЗЭ (редкоземельные элементы) в гранатах и клинопироксенах из различных типов пород двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная демонстрируют широкие вариации. Распределение РЗЭ в гранатах из *перидотитового парагенезиса* показывает обеднение в области ЛРЗЭ (легкие редкоземельные элементы) и обогащение в области ТРЗЭ (тяжелые редкоземельные элементы) в трубке Мир (рис.11а). В трубке Обнаженная спектра РЗЭ в гранате выражены более интенсивно в области ЛРЗЭ (рис.11б), что может быть непосредственным признаком процессов метасоматоза, далее наблюдается обогащение в области СРЗЭ (средние редкоземельные элементы) и ТРЗЭ. В зернах граната из *перидотитового типа* трубки Обнаженная некоторые линии приближаются к «синусоидальному» распределению с обеднением в области ТРЗЭ, что также относится к метасоматическим процессам изменений. Синусоидальные профили РЗЭ могут являться продуктом более раннего метасоматического преобразования, на что указывает обогащение в области ЛРЗЭ-СРЗЭ.

Спектры РЗЭ в гранатах из *пироксенитового парагенезиса* трубки Мир демонстрируют обеднение в области ЛРЗЭ и обогащение в области ТРЗЭ, следует отметить, что в области ЛРЗЭ наблюдается (рис.11в) отрицательный пик Pr и положительный Nd, а в области СРЗЭ явный пик Eu-аномалии, распределение РЗЭ в составе граната более интенсивны с выраженными пиками Nd и Eu по сравнению со спектрами распределения из перидотитового парагенезиса, что свидетельствует о присутствии проявлений процессов метасоматоза. В трубке Обнаженная спектры РЗЭ в гранате выражены еще более интенсивно по сравнению со спектрами из перидотитового типа. В области распределения ЛРЗЭ отмечаются отрицательные пики Pr и Nd, а в области СРЗЭ Eu-аномалия (рис.11г). Спектры распределения РЗЭ в гранате и клинопироксене из *эклогитового парагенезиса* имеет типичный вид.

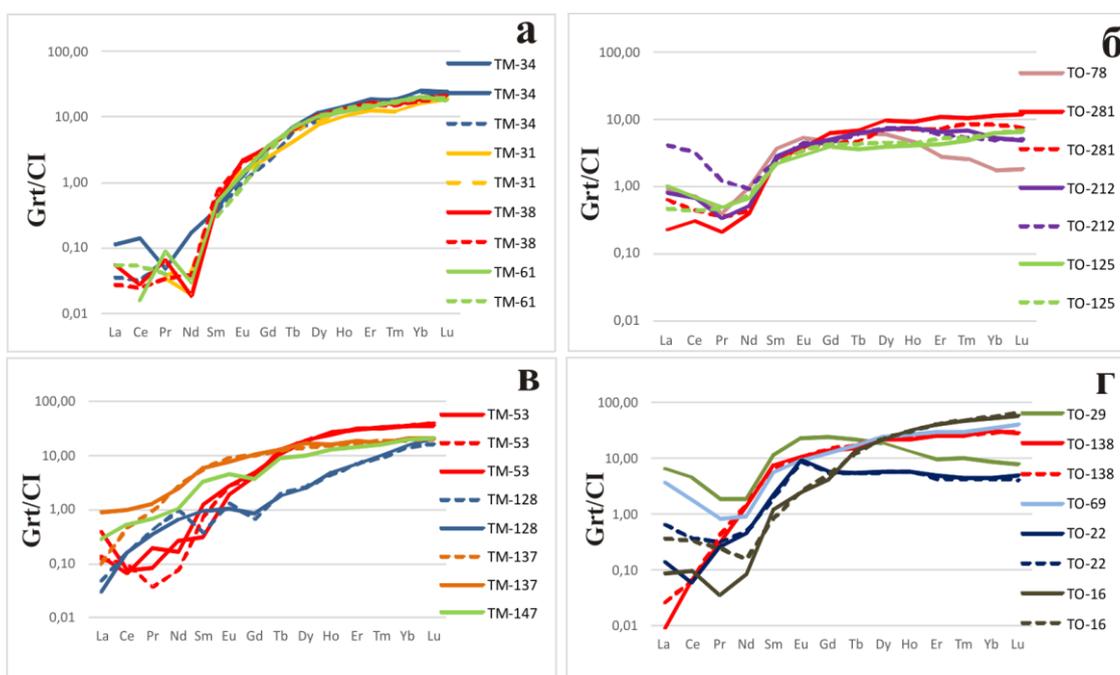


Рис.11. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов в зернах граната (центральные части сплошная линия, краевые участки (пунктирная линия). Содержание элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough Sun, 1995). А) – перидотитовый парагенезис, кимберлитовая трубка Мир; Б) – перидотитовый парагенезис, кимберлитовая трубка Обнаженная; В) – пироксенитовый парагенезис, кимберлитовая трубка Мир; Г) – пироксенитовый парагенезис, кимберлитовая трубка Обнаженная.

Вариации составов граната из различных парагенезисов пород кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная представлены на графиках  $\text{TiO}_2$  - Zr (ppm) (рис.12 а) и Y- Zr (ppm) (рис.12б). На графиках видно, что составы зерен граната имеют широкий разброс по [Griffin, Ryan et al., 1999], и попадают в область расплавного (глубинного) и флогопитового (низкотемпературного) метасоматоза (рис.12).

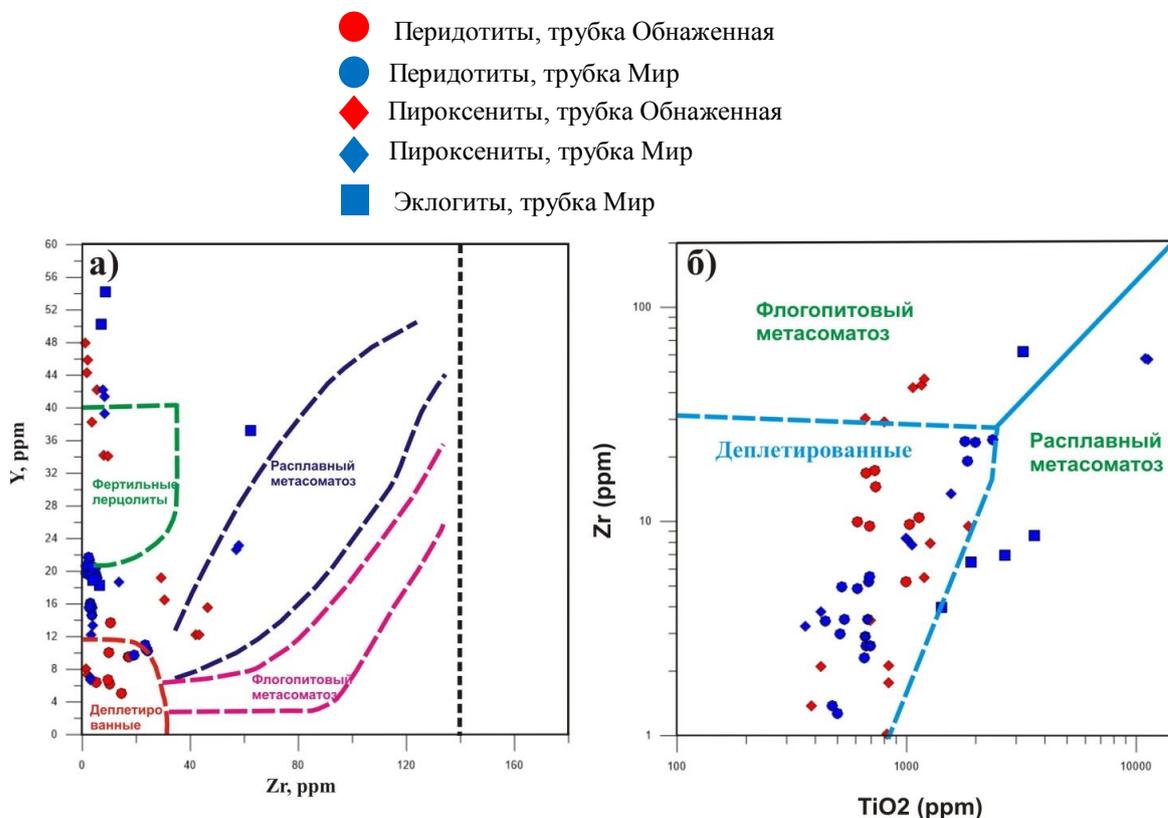


Рис. 12. Диаграммы в координатах (а)  $\text{TiO}_2$  - Zr (ppm) [Griffin, Ryan et al., 1999], (б) Y (ppm) – Zr (ppm) [Griffin, Ryan et al., 1999] для гранатов. Условные обозначения: красные кружки –перидотитовый парагенезис, трубка Обнаженная, красные ромбики – пироксенитовый парагенезис, трубка Обнаженная; синие кружки – перидотитовый парагенезис, трубка Мир, синие ромбики –пироксенитовый парагенезис, трубка Мир, синие квадратики – эклогитовый парагенезис, трубка Мир.

По соотношению  $[\text{La}/\text{Yb}]_n - \text{Ti}/\text{Eu}$  в проанализированных зернах клинопироксена на содержание редких элементов, проявлены признаки метасоматического обогащения пород. По результатам, которых, можно выделить два геохимических типа высокотемпературного мантийного метасоматоза: *карбонатитовый* (рис.13а) и *силикатный* (рис.13, рис.13а), что подтверждает активное воздействие и просачивание флюидов/расплавов, еще в глубинах мантии.

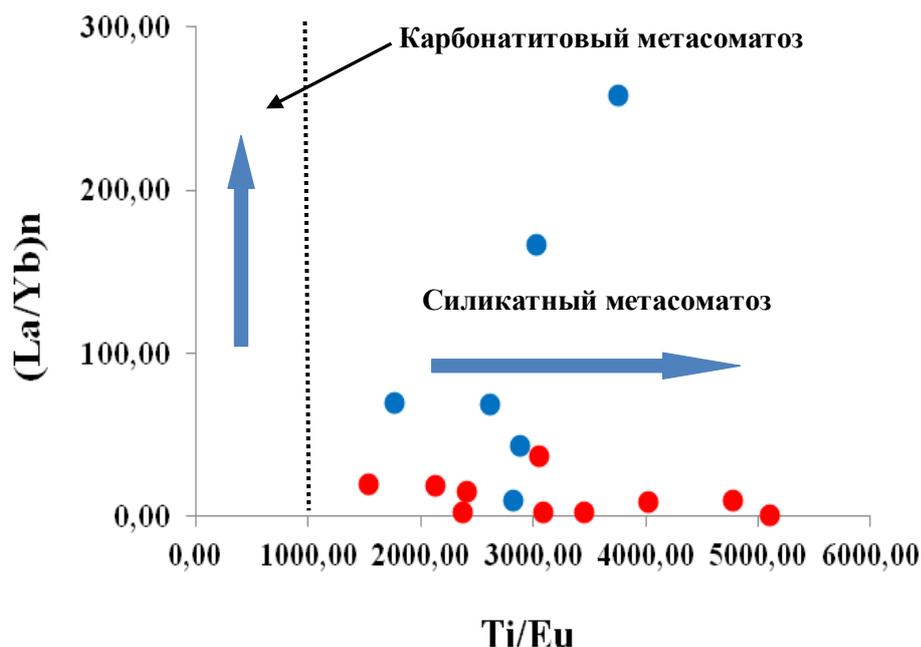


Рис.13. Положение точек состава клинопироксена в породах перidotитового парагенезиса на диаграмме соотношений  $[La/Yb]_n - Ti/Eu$  из работы Coltorti et al., (1999). Трубка Мир (красные кружки), трубка Обнаженная (синие кружки)

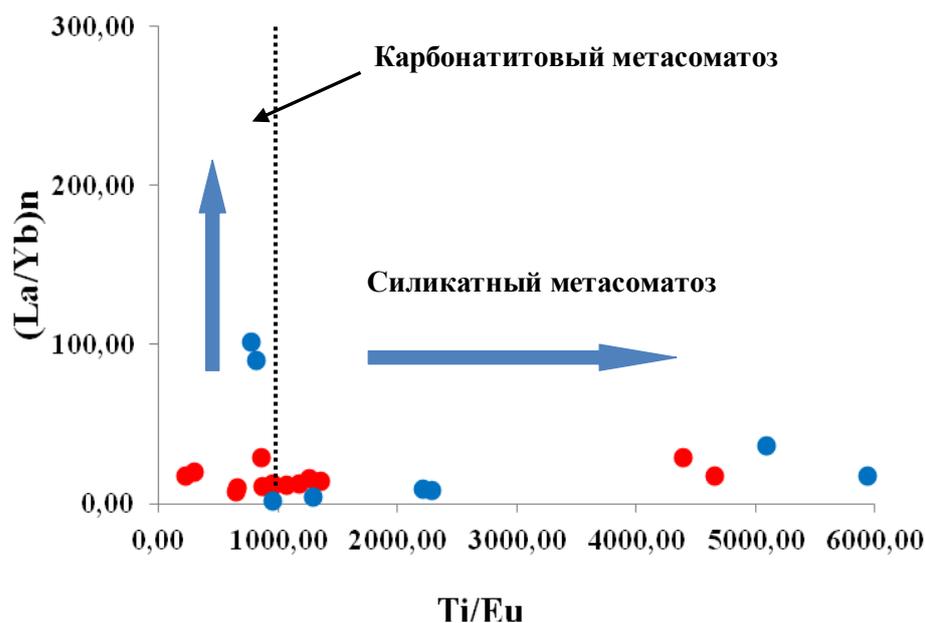


Рис.13а. Положение точек состава клинопироксена в породах пироксенитового парагенезиса на диаграмме соотношений  $[La/Yb]_n - Ti/Eu$  из работы Coltorti et al., (1999). Трубка Мир (красные кружки), трубка Обнаженная (синие кружки)

В результате расчета оценок температур и давлений пород сделан вывод, что более глубинные условия образования с высокими РТ-параметрами соответствуют ксенолитам перidotитового ( $T=581-906^{\circ}C$ ,  $P = 2-5$  ГПа) и пироксенитового ( $T= 1266^{\circ}C$ ,  $P=56$  кбар,  $T= 950-963^{\circ}C$ ,  $P = 5$  ГПа) парагенезисов высокоалмазоносной трубки Мир, где отмечаются редко проявленные и преимущественно тонкие (либо зачаточные) структуры распада, маломощные келифитовые каймы (до 150 мкм).

В неалмазоносной трубке Обнаженная наоборот, оценки температур и давлений образования ксенолитов более низкие: для перидотитового типа соответствуют ( $T = 579-719^{\circ}\text{C}$  при  $P = 1$  ГПа), пироксенитового ( $T = 585-923^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1-3$  ГПа). В минералах из ксенолитов трубки Обнаженная хорошо проявлены структуры распада, наблюдаются мощные и многослойные келифитовые каймы (до 250 мкм), о чем свидетельствуют, возможно, более длительные и интенсивные во времени глубинные процессы метасоматоза под северо-востоком Сибирского кратона.

В результате обобщения полученных нами данных об особенностях химического состава минералов, минералого-петрографических и геохимических характеристик мантийных ксенолитов, микро- и спектроскопических исследований, а также анализа наших и опубликованных данных по составам структур распада [Алифирова, 2015], келифитовых кайм, вторичных изменений по прожилкам и редких K-Al-Ti-содержащих фаз, была установлена предполагаемая схема реконструкции P-T истории и рассчитаны оценки глубин формирования пород на разных этапах от верхней мантии и до поверхности Земли (рис. 14 а).

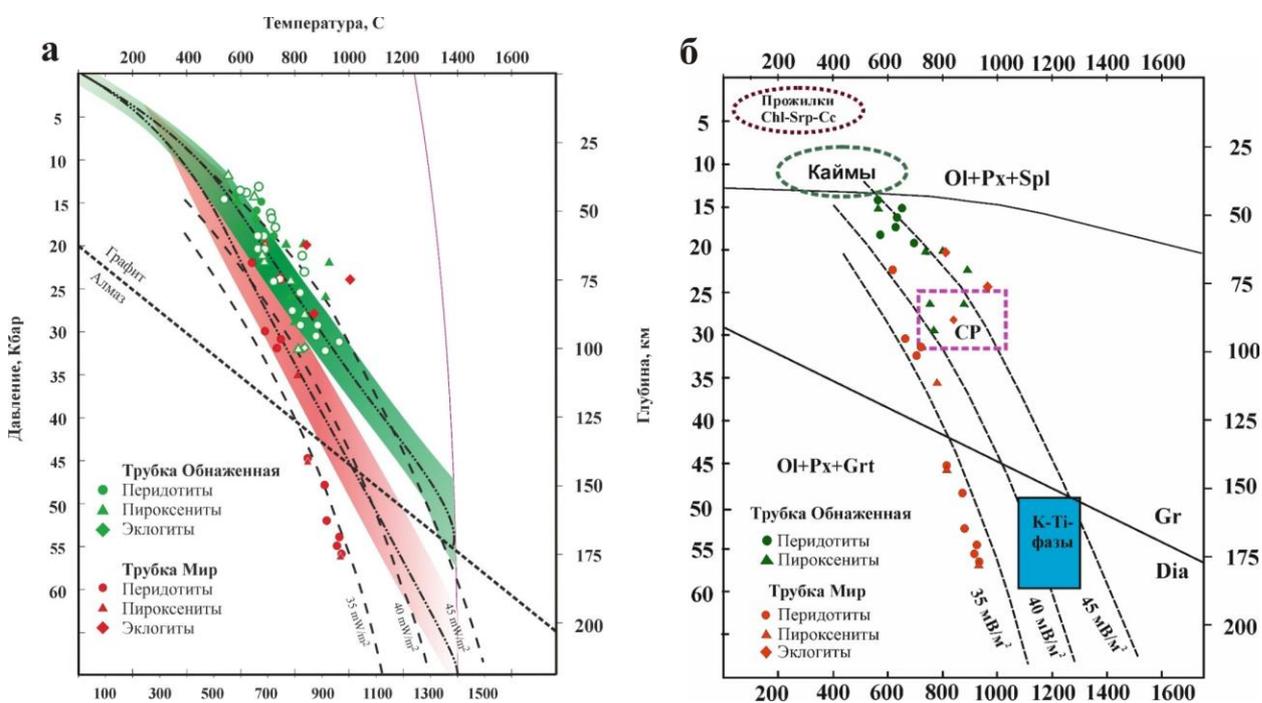


Рис.14. А) – Оценки P-T условий формирования для ксенолитов из трубок Мир (красные значки) и Обнаженная (зеленые значки).

Трубка Обнаженная: залитые значки - наши данные; незалитые значки - литературные данные [Alifirova et al., 2015; Howarth et al., 2014; Калашникова и др., 2015].

Трубка Мир: залитые значки - наши данные; незалитые значки - литературные данные по [Alifirova et al., 2015].

Зеленое поле и линия-геотерма для трубки Обнаженная; красное поле и линия-геотерма для трубки Удачная по [Howarth et al., 2014]. Линии теплового потока - по [Pollack and Chapman, 1977].

Б) – Реконструкция этапов формирования мантийных ксенолитов в районе трубки Мир и Обнаженная (ЯАП). Условные обозначения: CP – структуры распада по литературным данным (Алифирова, 2015); Ol – оливин; Px – пироксены; Grt – гранат; Spl – шпинель; Chl – хлорит; Srp – серпентин; Cc – кальцит.

На *стадии I* происходит зарождение самих минералов (Ol+Px+Grt). Далее на *II этапе* появляются редкие K-Al-Ti-содержащие фазы в виде включений в магнезиальном алюмохромите из ксенолита гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная. По мере продвижения к поверхности на *III стадии* при  $T$  около  $1000-1200^{\circ}\text{C}$  и  $P = 3$  ГПа по литературным данным [Алифирова, 2015] выпадают структуры распада в минералах (гранат и пироксен). На *IV стадии*, в интервале глубин 50-70 км по периферии граната формируются келифитовые каймы различного минерального состава и мощности. На *V*

*этапе* в породообразующих минералах образуются многочисленные хлорит-серпентин-карбонатные и серпентиновые прожилки, иногда полностью замещающие исходные зерна (рис. 14б). Обобщая полученный материал на основе РТ- условий и реконструкции формирования изученных мантийных ксенолитов в районе трубки Мир и Обнаженная показывают, что вертикальное перемещение пород с глубин ~200-250 км не было мгновенным; оно происходило в ходе многоэтапных изменений в глубинных условиях (рис. 14б).

#### **Основные научные результаты:**

- 1) На основе геохимических характеристик в зернах граната и клинопироксена из различных типов пород двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная сделан вывод о том, что процессы метасоматоза имели место в глубинах мантии, которые активно просачивались и воздействовали на минералы, о чем свидетельствуют спектры распределений РЗЭ в гранатах и клинопироксенах. Спектры распределения РЗЭ в гранатах показывают обеднение в области ЛРЗЭ и обогащение в области ТРЗЭ в трубке Мир. В трубке Обнаженная спектры распределения РЗЭ в зернах граната выражены более интенсивно в области обогащения ЛРЗЭ, что является признаком процессов метасоматоза, далее наблюдается обогащение в области СРЗЭ и ТРЗЭ. Спектры распределения РЗЭ в гранатах пироксенитового парагенезиса трубки Мир демонстрируют обеднение в области ЛРЗЭ и обогащение в области ТРЗЭ. Также следует отметить, что в области ЛРЗЭ наблюдается отрицательный пик Рг и положительный Nd, а в области СРЗЭ явный пик Eu-аномалии, распределение РЗЭ в составе граната более интенсивно выражены с пиками Nd и Eu по сравнению со спектрами распределения из перидотитового парагенезиса. В области распределения ЛРЗЭ отмечаются отрицательные пики Рг и Nd, а в области СРЗЭ Eu-аномалия, что также является непосредственным признаком метасоматоза. Распределения РЗЭ в зернах граната эклогитового парагенезиса имеют узкие вариации составов, что может быть связано с процессами перекристаллизации. Соотношение  $[La/Yb]_n - Ti/Eu$  на графиках клинопироксена из различных типов пород двух трубок позволяют выделить явно два геохимических типа высокотемпературного мантийного метасоматоза: карбонатитовый (изначальный) и силикатный (последующий), что подтверждает активное воздействие (влияние) флюидов/расплавов на породы в глубинах мантии. Явными признаками карбонатитового метасоматоза в трубке Мир является наличие карбонатных минералов в интерстициях (апатит, монтичеллит, амфибол (паргасит), флогопит). Завершающим этапом эволюции был силикатный метасоматоз, который привел к значительному росту модалных содержаний граната и клинопироксена, в изученных ксенолитах трубок Мир и Обнаженная.
- 2) Изучен ряд редких К-Al-Ti-содержащих фаз (минерал, изоструктурный линдквиститу, имэнгит и матиасит) из глубинного ксенолита метасоматически измененного гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная, который образует полиминеральные сростания с кальцитом, доломитом, флогопитом, рутилом и серпентином, сформировавшихся под влиянием флюида, обогащенного Ti и K в результате воздействия мантийного метасоматоза. В процессе, обнаруженных в виде включений редких K- титанатов были поставлены эксперименты при 5 ГПа и 1200<sup>0</sup>С, при которых продемонстрирована полистадийность и совместная кристаллизация имэнгита и прайдерита в системе хромит + ильменит + H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> флюид, матиасита и K-Cr прайдерита, не содержащего Ва в системе хромит + рутил + H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> флюид, что напрямую подтверждает возможность совместного образования титанатов в результате метасоматоза верхнемантийных перидотитов с участием карбонатных флюидов или расплавов в условиях высокой активности калия.

- 3) На примере минералов из ксенолитов высокоалмазонасной трубки Мир и неалмазонасной трубки Обнаженная показано широкое многообразие состава оксидных и силикатных фаз в структурах распада граната и пироксена, развитых келифитовых кайм, а также мощных прожилков внутри минералов. Наличие явно проявленных игл и пластинок в структурах распада, а также развитых мощных (до 250 мкм) келифитовых кайм вокруг гранатов неалмазонасной трубки Обнаженная подтверждает более интенсивные и длительные по времени процессы, обусловленные влиянием кимберлитового расплава-флюида. В высокоалмазонасной трубке Мир, напротив, наблюдаются преимущественно слабовыраженные структуры распада, маломощные келифитовые каймы (до 150 мкм), что может напрямую подтверждать их более быструю транспортировку к поверхности, которые сформировали каймы агрегатного строения без явно выраженных слоев.

### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

- 1) Воробей С.С., Гаранин В.К., Минервина Е.А., Посухова Т.В., Вэйшэн С. Минералогические и геохимические особенности мантийных ксенолитов из алмазоносных кимберлитов Китая и Якутии // Вестник московского университета. С.4. 2020. 1. С. 21-27.
- 2) Бутвина В.Г., Воробей С.С., Сафонов О.Г., Варламов Д.А., Бондаренко Г.В., Шаповалов Ю.Б. Экспериментальное изучение образования хромистого прайдерита и имэнгита- продуктов модального мантийного метасоматоза // Доклады РАН. 2018. Т. 486. №6. С. 709-713.
- 3) Чуканов Н.В., Воробей С.С., Ермолаева В.Н., Варламов Д.А., Плечов П.Ю., Янчев С., Бовкун А.В. Новые данные о химическом составе и колебательных спектрах минералов группы магнетоплюмбита // РМО. 2018. Т. 147. № 3. С. 44–59.
- 4) Butvina V.G., Vorobey S.S., Safonov O.G., Varlamov D.A. Experimental study of chromite-ilmenite-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-oxalic acid at 3.5 and 5 GPa // Doklady Earth Sciences. 2019. Т. 25. №1. P. 55-58.
- 5) Butvina V.G., Safonov O.G., Spivak A.V., Limanov E.V., Vorobey S.S., Van K.V. Synthesis of K-Ba titanates of the magnetoplumbite group at high pressure // Experiment in GeoSciences. 2022. V. 28. № 1. P. 37–40.
- 6) Butvina V.G., Safonov O.G., Van K.V., Vorobey S.S., Limanov E.V., Kosova S.A., Bondarenko G.V., Garanin V.K. Experimental study of reactions forming phlogopite and potassic titanates as mineral indicators of metasomatism in the upper mantle//*Geochemistry International*. 2021. V. 59. No.8. P.757–777.
- 7) Dymshits A., Sharygin I., Malkovets V., Yakovlev I., Gibsher A., Alifirova T., Vorobei S., Patapov S., Garanin V. Thermal state, thickness and composition of the lithospheric mantle beneath the upper Muna kimberlite fields (Siberian craton) constrained by clinopyroxene xenocrysts and comparison with Daldyn and Mirny fields // Minerals. 2020. Т.10. No. 6. P. 549.

### **Избранные тезисы докладов:**

- 1) Vorobey S.S., Garanin V.K., Bovkun A.V., Features of chemical and phase compositions of minerals of mantle xenoliths from pipes of Mir and Obnazhennaya (Yakutian kimberlite province) // IX International school of science about Earth of name professor L.L. Perchuk, Miass, Russian, 3-7 August, 2017.
- 2) Бутвина В.Г., Сафонов О.Г., Воробей С.С. Образование имэнгита и хромистого прайдерита в результате взаимодействия хромита и ильменита с калиевым водно-карбонатным флюидом при 5 ГПа (Стендовый) // Двенадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Борок, Москва, 24-28 сентября, 2018.
- 3) Vorobei S.S., Bovkun A.V., Garanin V.K. Polymineral inclusions in chromalumospinel from the Obnazhennaya kimberlite pipe xenolith (Yakutian kimberlite province)// 10 Международная конференция посвященная 110-летию академика В.С.Соболева, 9-14 июня, 2018, с.188.
- 4) Бутвина В.Г., Сафонов О.Г., Лиманов Е.В., Воробей С.С. Experimental study of some mantle metasomatism reactions at 3-5 GPa // Germany, 1-3 марта 2021.
- 5) Воробей С.С. Редкие К содержащиетитанаты в глубинном ксенолите из трубки Обнаженная и эксперименты по их синтезу // XIV Научные чтения имени Г.П. Кудрявцевой, Москва, 1 апреля 2021.
- 6) Воробей С.С., Бутвина В.Г., Сафонов О.Г., Ван К В. Экспериментальное исследование условий образования редких К-титанатов в системах шпинель-рутил/ильменит-флюид при параметрах верхней мантии // XII-я Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия», Черногоровка, 26-27 октября 2021.