

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена
Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и
аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

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»**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель
доктор геол.-мин. наук, профессор,

Гаранин Виктор Константинович

Москва 2023

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| Глава 1. Геологическая характеристика Якутской алмазоносной провинции | 10 |
| 1.2. Геологическая характеристика исследуемых объектов | 13 |
| 1.2.1. Возраст, состав и геологическое строение кимберлитовой трубки Мир | 13 |
| 1.2.2. Возраст, состав и геологическое строение кимберлитовой трубки Обнаженная | 16 |
| Глава 2. Краткий очерк метасоматических процессов, протекающих в литосферной мантии | 19 |
| Глава 3. Аналитические методы исследований | 25 |
| Глава 4. Петрографическое описание образцов исследуемых ксенолитов | 28 |
| 4.1. Описание по группам пород мантийных ксенолитов из трубки Мир и Обнаженная | 31 |
| 4.1.1. Перидотитовый тип парагенезиса..... | 31 |
| 4.1.2. Пироксенитовый тип парагенезиса..... | 34 |
| 4.1.3. Эклогитовый тип парагенезиса..... | 38 |
| Глава 5. Структуры распада в породообразующих минералах | 42 |
| 5. 1. Краткий литературный обзор структур распада в породообразующих минералах | 42 |
| 5.1. Структуры распада в породообразующих минералах ксенолитов..... | 44 |
| 5.1.1. Структуры распада в зернах граната..... | 44 |
| 5.1.2. Структуры распада в зернах клинопироксена..... | 47 |
| 5.1.3. Тонкие (зачаточные) структуры распада в гранатах и клинопироксенах..... | 51 |
| 5.1.4. Структуры распада в зернах ортопироксена..... | 52 |
| Глава 6. Процесс келифитизации минералов | 55 |
| 6. 1. Краткий литературный обзор изученности келифитовых кайм..... | 55 |
| 6.2. Процесс формирования келифитовых кайм в перидотитах, пироксенитах и эклогитах из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная..... | 59 |
| 6.2.1 Келифитовые каймы на минералах перидотитового парагенезиса..... | 60 |
| 6.3. Келифитовые каймы на минералах пироксенитового парагенезиса..... | 63 |
| 6.4. Келифитовые каймы на минералах эклогитового парагенезиса..... | 67 |

| | |
|---|-----|
| Глава 7. Природные включения редких K-Al-Ti-содержащих фаз в магнезиальном алюмохромите из ксенолита гранат-шпинелевого лерцолита, трубки Обнаженная | 75 |
| Глава 8. Синтез редких K-титанатов в системах шпинель-рутил/ильменит-флюид при 5 ГПа | 80 |
| 8.1.1. <i>Техника и методика исследований</i> | 80 |
| 8.1.2. <i>Фактический материал и аналитические методы исследования</i> | 85 |
| 8.2. <i>Экспериментальные исследования в приложении к природным данным</i> | 87 |
| 8.2.1. <i>Литературный обзор</i> | 87 |
| 8.2. 2. <i>Синтез прайдерита</i> | 89 |
| 8.2.3. <i>Синтез матиасита</i> | 91 |
| 8.2.4. <i>Синтез имэнгита</i> | 92 |
| 8.2.5. <i>О роли редких K-титанатов в процессе мантийного метасоматоза</i> | 93 |
| Глава 9. Генетические вопросы происхождения мантийных ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная | 100 |
| 9.1. <i>Геохимические данные</i> | 100 |
| 9.1.1. <i>Гранат</i> | 101 |
| 9.1.2. <i>Клинопироксен</i> | 105 |
| 9.2. <i>Оценки температур и давлений мантийных ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная</i> | 110 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 118 |
| Список сокращений и условных обозначений | 120 |
| Список литературы | 122 |
| Приложение А - Составы пород ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная | 143 |
| Приложение Б - Содержание редкоземельных элементов в минералах ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная | 189 |
| Приложение В – Оценки РТ – параметров мантийных ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная | 196 |

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

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) 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 Обнажённая (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 Обнажённая 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 Обнажённая;

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 Обнажённая;

4. определение P-T-условий кристаллизации мантийных ксенолитов;

5. исследование геохимических особенностей пород, а также распределения 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 Обнажённая. 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 К-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 К-титанатов в природном ксенолите трубки Обнаженная послужило основой для проведения экспериментов при 5 ГПа и 1200° С. В системе хромит + ильменит+H₂O-CO₂-K₂CO₃ (флюид) продемонстрирована совместная кристаллизация имэнгита и прайдерита, тогда как в системе хромит + рутил +H₂O-CO₂-K₂CO₃ (флюид) происходит образование матиасита и К-Сг прайдерит, 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 К-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 RЗЭ в гранатах и клинопироксенах. Судя по отношению TiO₂-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 $H_2O-CO_2-K_2CO_3$ при 5 ГПа и $1200^{\circ}C$ 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 рисунка, 24 таблицы 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 K-Al-Ti-содержащих фаз в магнезиальном алюмохромите из природного образца гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная. **Восьмая глава** посвящена синтезу экзотических фаз и подтверждению их мантийного происхождения. **В девятой главе** рассмотрены геохимические характеристики мантийных ксенолитов, реконструкция этапов формирования и оценки P-T-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.

Глубокую признательность диссертант выражает д.г.-м.н. А.Б. Перепелову, к.г.-м.н. Т.В. Калашниковой, д.г.-м.н. С.И. Костровицкому, 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. Бычкову А.Ю.

Автор выражает свою глубокую признательность и благодарность за содействие, помощь на различных этапах написания диссертации, конструктивные замечания и ценные советы, а также получение новых навыков в работе к.г.-м.н. И.С. Шарыгину, к.г.-м.н. В.Г. Бутвиной, к.г.-м.н. А.М.Дымшиц, к.г.-м.н. Л.Н. Похиленко, профессору д.г.-м.н. А.Ф. Шацкому, к.г.-м.н. М.О. Булах, 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.

Особую благодарность автор выражает н.с. Д.А. Варламову, к.г.-м.н. Г.Ю. Криулиной, д.г.-м.н. Т.В.Посуховой, к.г.-м.н. А.М. Агашеву, к.г.-м.н. Т.А. Алифировой за обсуждение результатов исследования и ценные советы. За содействие в проведении аналитических работ автор выражает благодарность вед.инженеру Е.В.Гусевой, вед.инженеру Н.Н. Коротаевой, к.г.-м.н. Н.С. Карманову, Л.В. Усовой, с.н.с. В.Д. Щербакову, в.н.с. В.О.Япаскурту, к.г.-м.н. А.Л.Рогозину, инженеру исследователю А.А. Волкову.

Принятые обозначения минералов и принятых терминов в работе:
Породообразующие: Ol – оливин; Орх – ортопироксен; Срх – клинопироксен; Grt – гранат, Prp – пироп; Spl – шпинель; Пм – ильменит; Rt – рутил; Chr – хромит; Amp – амфиболы; Phl – флогопиты; Ap – апатит; Yim – имэнгит; Ma – матиасит; Pri – прайдерит; Lqt – линдквистит; Srp – серпентин, ТСП – тонкие (зачаточные) структуры распада.

Мантйный 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 элемент.

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 Якутской алмазоносной провинции

Якутская алмазоносная провинция (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.1.1). На севере и востоке границами служат Лено-Анабарский и Ангаро-Вилуйский прогибы, на юго-востоке – Вилуйская синеклиза и Ангаро-Вилуйский прогиб [Харькив и др., 1998; Pokhilenko et al., 1999]. На территории ЯАП выделяются крупные платформенные структуры: это Анабарский щит на северо-западе и Оленекское поднятие на северо-востоке.

Кратон – это крупный относительно устойчивый участок земной коры с фундаментом докембрийского возраста [Stille,1940]. В структуре кратона выделяются крупные геологические тела – тектонические провинции (или составные террейны). Террейн – это ограниченное разломами геологическое тело, которое характеризуется своими собственными стратиграфическими, магматическими, метаморфическими и структурными особенностями, определяющими специфическую тектоническую историю [Розен и др., 2002; 2006].

Промышленно-алмазоносные кимберлиты Якутии располагаются в междуречье р. Оленек и р. Вилуй и приурочены к Мархинскому гранит-зеленокаменному террейну.

Трубка Мир находится вблизи границы Маганского и Мархинского террейнов, трубка Обнаженная – близ Биректинского блока и Эекитского орогена [Розен, 2003; Розен и др., 2002; 2006]. Сибирский кратон с тектонической точки зрения представляет собой совокупность террейнов гранулит-гнейсовых и гранит-зеленокаменных. Современная структура кратона представляет собой результат аккреции и амальгамации разновозрастных микроконтинентов, которые первоначально возникли и развивались независимо друг от друга, а в процессе коллизии образовали единый кратон [Розен, 2003, Розен и др., 2006].

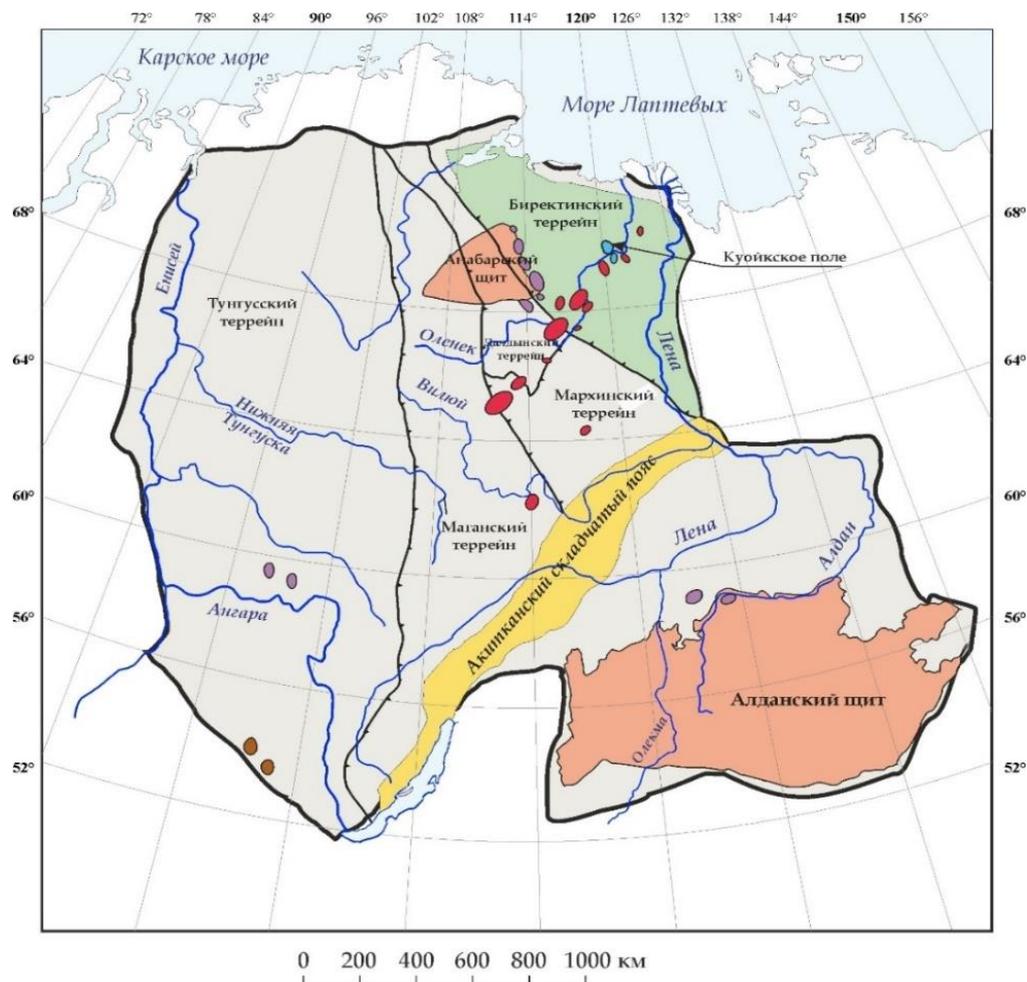
Структурно-тектонический фактор в образовании месторождений алмазов Сибирской платформы очень велик. В геологическом плане кимберлитовые поля обычно приурочены к зонам сопряжения крупных тектонических элементов Сибирской платформы [Бобриевич и др., 1959]. Анабарская провинция включает в себя Маганский и Далдынский гранулит-гнейсовые террейны, Мархинский зеленокаменный террейн [Розен, 2003]. Оленекская тектоническая провинция отделена от Анабарской провинции Билляхской разломной зоной и состоит из Хапчанского складчатого пояса и гранит-зеленокаменного Биректинского террейна (рис.1.1).

Формирование литосферной мантии и протокры центральных террейнов Сибирского кратона происходило, по разным оценкам, 3.4 – 2.6 млрд. лет назад. По данным Розена [2002] около 1.8-1.9 млрд. лет назад произошло становление Сибирского кратона в единую структуру, что сопровождалось коллизионно-аккреционным процессом, метаморфизмом гранулитовой фации и частичным плавлением. Северная часть кратона сформировалась несколько позже. Излияние Сибирских траппов считается самым крупным магматическим событием палеозоя и мезозоя (~250 млн. лет), которое связано с Сибирским суперплюмом [Брахфогель, 1978; Sun, McDonough et al., 1989; Медведев и др., 2003; Киселев и др., 2014 и другие]. Как раз в это время (в палеозое и мезозое) на Сибирском кратоне наблюдаются проявления кимберлитового магматизма, различный возраст которых свидетельствует о нескольких эпохах кимберлитообразования. На северо-восточной окраине Сибири продолжают процессы коллизии и субдукции [Савостин и др., 1993].

В истории ЯАП выделяется четыре этапа проявления процессов активизации кимберлитового магматизма: силурийско-раннедевонский (около 420-400 млн. лет), позднедевонский (около 360 млн. лет), триасовый (около 235 млн. лет) и юрский (приблизительно 150 млн. лет) [Агашев и др., 2004; Дэвис и др., 1980; Griffin et al., 1999; Sun, Kostrovitsky et al., 2014]. Алмазоносные кимберлитовые тела относятся к позднедевонскому эпизоду внедрения (около 360 млн лет), с которым связана значительная часть кимберлитопроявлений Мирнинского, Накынского, Далдынского, Алакит-Мархинского полей и, в частности, все промышленно алмазоносные тела.

Все исследуемые кимберлитовые трубки находятся в относительной близости к крупным шовным зонам земной коры, разделяющим различные блоки соответствующих террейнов. Кимберлитовые поля приурочены преимущественно к Анабарской и Оленекской тектоническим провинциям.

Оценки возраста формирования литосферной мантии Сибирского кратона проводились различными методами. Одни из первых датировок были получены Розеном с соавторами. По данным Sm-Nd изотопных определений и U-Pb методом по цирконам авторами наблюдались три основных пика: 3.4-2.8 млрд. лет; 2.5-2.3 млрд. лет; 2.0-1.8 млрд. лет. Последний этап соответствует возрасту гранулитового метаморфизма и образованию разломных зон (1.76-1.9 млрд. лет) [Розен и др., 2006].



- 1 — Граница Сибирского кратона
- 2 — Главные разломные зоны, разделяющие террейны
- 3 — Архейские кристаллические щиты
- 4 — Складчатый пояс
- 5 — Территория Биректинского террейна

Кимберлитовые поля:

- PR₃
- PZ₂
- T₁
- J₂-K₁

Рис.1.1. Схема расположения древних террейнов и кимберлитовых полей на Сибирском кратоне. Из работы [Solov'eva L.V et al., 2015] по [О. М. Розен с соавторами, 2006]. Контуры кратона и кимберлитовые поля - по [Харькив и др., 1998]. Террейны Сибирского кратона и Анабарский кристаллический щит - по [Розен, 2003]. Алданский кристаллический щит - по [Парфенов и др., 2001].

- 1 – граница Сибирского кратона
- 2 – главные разломные зоны.
- 3 – обнаженный кристаллический фундамент;
- 4 - складчатые пояса палеозойско-мезозойского возраста.

1.2. Геологическая характеристика исследуемых объектов

1.2.1. Возраст, состав и геологическое строение кимберлитовой трубки Мир

Кимберлитовая алмазоносная трубка **Мир** располагается в *Мало-Ботубинском* районе (рис.1.2), в долине р. Ирэлях. Самыми древними породами, развитыми в районе месторождения, являются отложения усть-кутского яруса (нижний ордовик), представленные в основном карбонатными породами с прослоями мергеля и мергелистых известняков. Эти отложения непосредственно примыкают к кимберлитовой трубке и слагают оба борта р. Ирэлях [Соболев и др., 1964; Соболев, 1974; Соболев и др., 1976]. Возраст трубки Мир соответствует 362 млн. лет по U-Pb методу по цирконам [Дэвис и др., 1980]. Трубка прорывает карбонатно-терригенные и галогенно-карбонатные породы ордовика и кембрия, силлы и дайки долеритов позднедевонского возраста [Харькив и др., 1998]. Терригенно-карбонатные породы представлены известняками, доломитами, мергелями, алевролитами и их переходными разновидностями. Пласты и линзы каменной соли мощностью до первых десятков метров занимают значительный объем в разрезе, встречаются также прослои и линзы гипса, ангидрита.



Рис.1.2. Схема расположения кимберлитовых тел в Мирнинском поле:
1- коренные месторождения алмазов; 2- кимберлитовые трубки; 3- контур кимберлитового поля
[Костровицкий и др., 2015].

Трубка представляет собой субвертикальное воронкообразное рудное тело (рис.1.3),

овальное в поперечных горизонтальных сечениях с максимальной площадью – 123 тыс.м² – на поверхности и минимальной – 43 тыс.м² – на глубине 1250 м. В плане длинная ось трубки вытянута в северо-западном направлении. Уменьшение площадей горизонтальных сечений отмечалось на первых 300 метрах глубины, по мере перехода от кратерной части трубки к ее жерловому столбу. В интервале глубин 600 – 1000 м форма тела трубки еще более усложняется, а на глубине 1000 – 1200 м рудное тело переходит в дайкообразную форму. Южный и юго-западные контакты трубки имеют пологие углы падения [Милашев, 1959; Трофимов, 1961].

Кимберлитовые брекчии содержат мантийные ксенолиты пород, траппов и вмещающих трубку осадочных горных пород. Содержание ксенолитов осадочных пород изменяется от 1,3 до 31,2%, а траппов – от 0,6 до 14,8% [Милашев, 1959]. Ксенолиты пород фундамента встречаются редко, при частых находках ксенолитов глубинных пород верхней мантии (лерцолитов, дунит-гарцбургитов). Обломочный материал сцементирован серпентин-карбонатной массой с зёрнами флогопита, пироба, пикроильменита, хромшпинелидов и хромдиопсида. Ассоциация минералов-спутников алмаза *пироп-пикроильменитовая* [Соболев и др., 1976]. Приконтактные зоны трубки в значительной степени карбонатизированы и осветлены. С удалением от контакта, а особенно с глубиной карбонатизация постепенно уступает место серпентинизации [Бобриевич и др., 1959].

По химическому составу кимберлиты, выполняющие трубку Мир, относятся к магнезиально-железистому петрохимическому типу с относительно высоким содержанием FeO_{tot}, TiO₂ и низким CaCO₃ [Гаранин и др., 1983; Бобров, 2009].

Ксенолиты глубинных пород трубки Мир изучены детально [Sobolev et al., 1973; 1983; Гаранин и др., 1991; Spetsius et al., 1992; Taylor et al. 1996; Kinny et al., 1997; Sobolev et al., 1997; Sobolev et al., 1998; Taylor et al. 1998; Griffin et al., 1999a; Spetsius et al., 2002; Pearson et al., 2003; Bulanova et al., 2002; Shatsky et al., 2008; Wiggers de Vries et al., 2013]. Их исследование началось сразу же после открытия этого коренного месторождения алмазов в 1955 г., а первые публикации, посвященные петрографии и петрохимии ксенолитов, появились в конце пятидесятых годов [Бобриевич и др., 1959].

В трубке Мир относительно распространены ксенолиты пород верхней мантии, которые образовались в широком интервале РТ-условий: от области стабильности кристаллизации алмаза (алмазсодержащие ультрабазиты и эклогиты - глубины 150-200 км) – до верхних горизонтов мантии (к ним относятся шпинелевые и бесшпинелевые ультрабазиты, пироксениты и другие породы - глубины 50-60 км) [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; Bulanova et al., 2014]. Найдены и изучены

многочисленные алмазоносные ксенолиты [Пономаренко и др., 1980; Гаранин и др., 1983; Spezius и др., 1990; 2006]. Резко преобладающим типом ксенолитов являются лерцолиты, содержащие высокомагнезиальный и относительно низкохромистый гранат; по всему разрезу тела установлено повышенное количество гранатовых пироксенитов, к которым относятся гранатовые вебстериты магнезиально-железистого типа [Уханов и др., 1989]. Интенсивность замещения ксенолитов вторичными минералами полностью зависит от степени изменения кимберлитов, вмещающих эти ксенолиты [Харькив и др., 1998].

В алмазоносной трубке Мир был идентифицирован и изучен новый тип алмазоносной породы – гранатовый пироксенит [Пономаренко и др., 1980], а также осуществлена первая находка алмазоносного гранат-ильменитового перидотита [Пономаренко, 1977]. Следует отметить, что в трубке Мир впервые в нашей стране был найден и изучен алмазоносный эклогит, где алмаз является породообразующей фазой [Харькив 1998].

Ксенолиты эклогитов из трубки Мир были изучены в работах [Sobolev et al., 1972; 1973; 1974; Dawson 1980; Sobolev et al., 1990; Spetsius et al., 1992; Beard et al., 1996; Sobolev et al., 1998; Bulanova et al., 2002; Spetsius et al., 2002; Dawson; 2004; Sobolev et al., 2004].

Необычными образованиями в трубке Мир и других трубках Мирнинского поля являются впервые встреченные в кимберлитах желваки пироба зонального или блокового строения [Kharkiv, 1995], которые содержат многочисленные включения хромшпинелида, хромдиопсида, пикроильменита и некоторых других минералов.

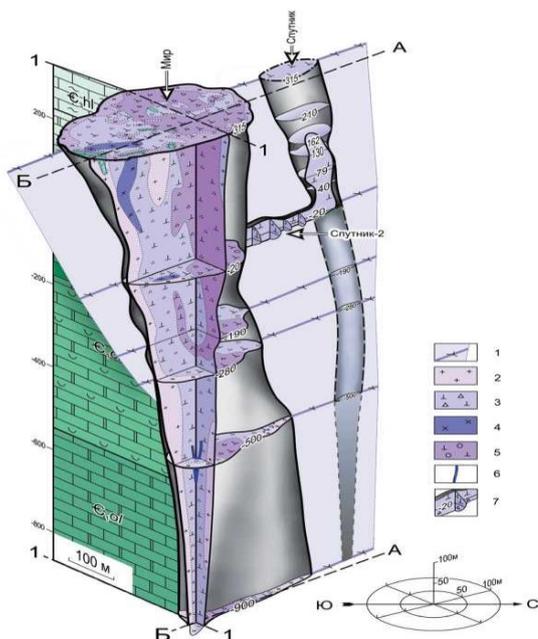


Рис. 1.3. Объемная модель месторождения трубки Мир (вид с востока).

1- порфировый кимберлит подводящей дайки; 2- кимберлитовая брекчия (фаза I); 3- кимберлитовая брекчия (фаза II); 4- кимберлитовая брекчия (фаза III); 5- автолит-кимберлитовая брекчия (фаза IV); 6 - внутритрубочная дайка мелкопорфирового кимберлита по данным Г.В. Зольникова и др., (1981); 7- продольное и поперечное сечения рудного тела Спутник-2 (по данным эксплуатационной разведки).

Из работы [Костровицкий и др., 2015]

1.2.2. Возраст, состав и геологическое строение кимберлитовой трубки Обнаженная

Трубка Обнаженная находится в пределах Куойкского рудного поля, Далдыно-Алакитского района, в правом борту долины р. Куойка в 12 км от ее устья. Трубка выходит на дневную поверхность, хорошо обнажена и поэтому является геологическим памятником и редким явлением для Сибирской платформы [Соболев, 1974, Уханов и др., 1988]. Сама трубка представляет собой открытый выход кимберлитовых пород высотой около 20 м на берегу реки Куойка, левом притоке реки Оленек (рис.1.4); размер составляет 60-70 м, общая площадь коренных выходов кимберлитов превышает 500 м². Открыта трубка в 1957 году, геологом Амакинской экспедиции Галкиным И.Н.

По U-Pb датировке цирконов, возраст трубки составляет 148±3 млн. лет, что относится к позднеюрскому [Дэвис и др., 1980; Харькив и др., 1998; Костровицкий и др., 1991; 2012]. Для трубок всего Куойкского поля значения находятся в пределах 150.9-145.6 млн. лет (поздняя юра) [Sun et al., 2014]. В трубке Обнаженная были обнаружены свежие кимберлиты с ксенолитами мантийных эклогитов, пироповых перидотитов, триасовых траппов, известняков и доломитов венда и кембрия с рострами юрских белемнитов [Костровицкий и др., 2008; Калашникова, 2017]. Ксеногенный материал трубки составляет до 20-25 % от объема брекчии, представлен обломками пород осадочного чехла, кристаллического фундамента платформы и мантийными ксенолитами. В пределах трубки присутствует участок, локально обогащенный глубинными ксенолитами, что может свидетельствовать об одноактном выносе глубинного материала [Соболев, 1974]. Среди комплекса ксенолитов глубинных пород распространены шпинелевые и гранат-шпинелевые лерцолиты, а также гранатовые и шпинелевые пироксениты с широкими вариациями содержания орто- и клинопироксена [Howarth et al., 2014; Sun et al., 2014; Ionov et al., 2015]. Для трубки типичны находки биминеральных, корундовых, кианитовых эклогитов; описаны эклогиты, в которых чередуются прослои хромсодержащих минералов с безхромистыми [Соболев, 1974; Sun et al., 1989; Бобров и др., 2003; Sun et al., 2014].

Большой интерес представляют обнаруженные в трубке Обнаженная амфиболитизированные ксенолиты пироповых лерцолитов. Высокое содержание кальция в клинопироксене и концентрация глинозема в ортопироксене из этих ксенолитов свидетельствует о том, что изначальная температура равновесия лерцолитов не превышала 900 °С, а давление было около 40 кбар [Милашев и др., 1959; Милашев, 1960; Мальков и др., 1976; Мальков, 2008].

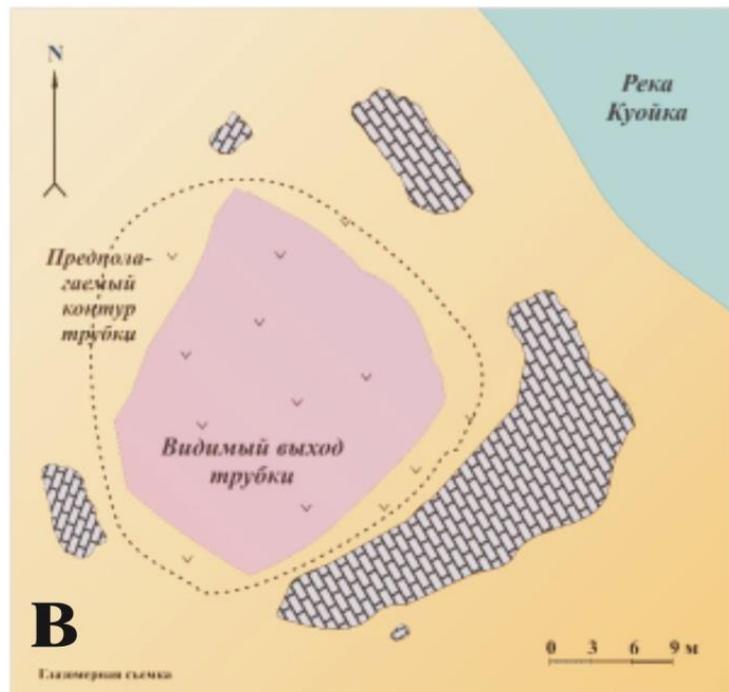
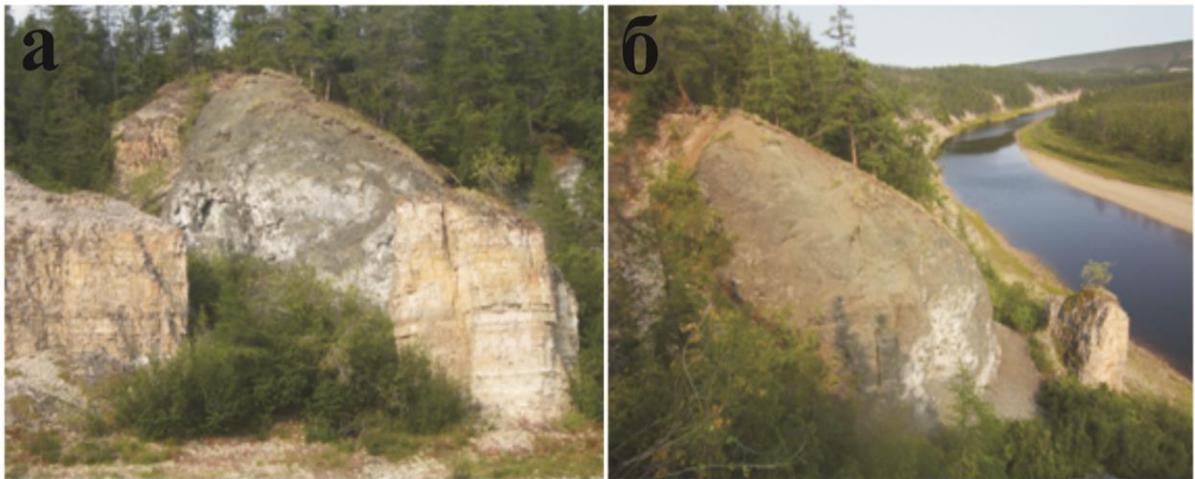


Рис.1.4. Кимберлитовая трубка Обнаженная, общий вид (а-б); схема (в) [из работы Калашниковой, 2017; фото С.И. Костровицкого].

Все ксенолиты эклогитов/вебстеритов содержат трещины, которые заполнены в разной степени кимберлитовым материалом и различными продуктами метасоматических изменений. Наиболее распространенными вторичными минералами является хлорит/серпентин и флогопит. Флогопит приурочен к кимберлиту часто наблюдается в келифитовых каймах граната. В зернах граната проявлен рост флогопита вдоль внутренних трещин. Наличие *амфибола паргаситового состава и флогопита* непосредственно подтверждает процесс модального мантийного метасоматоза внутри СКЛМ [Sun et al., 2014].

Особенно интересными и сложными на данный момент выступают проблемы, связанные с влиянием метасоматических процессов на разных этапах в двух кимберлитовых трубках Мир и Обнаженная.

Комплексное изучение минералого-геохимических особенностей глубинных ксенолитов из двух кимберлитовых трубок, контрастных не только по алмазности, но и расположению в пределах Сибирского кратона позволит проследить характер изменения глубинного материала для разных областей на территории ЯАП.

Глава 2. Краткий очерк метасоматических процессов, протекающих в литосферной мантии

Под термином «метасоматоз» Д.С. Коржинский предлагал понимать "всякое 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". 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].

При метасоматических процессах наблюдается образование зональности в минералах, которая проявляется в отношении распределения содержаний РЗЭ и наблюдается в мантийных ксенолитах [напр. Wilshire et al., 1980; Jones et al., 1982; Kovalenko et al., 1987; Гаранин 1989; Сафонов и др., 2016; Kargin et al., 2019]. Также одним из свойств метасоматических процессов является участие в них подвижных компонентов [например, Коржинский, 1973]. Одним из наиболее важных факторов мантийного метасоматоза обычно является присутствие H_2O и/или CO_2 .

Метасоматоз мантийный – процесс изменения химического состава горной породы под воздействием расплавов или флюидов, происходящий в условиях мантии (при высоких Р-Т параметрах). Было выделено несколько типов мантийного метасоматоза [O'Reilly & Griffin, 2013]: модальный («modal») метасоматоз (приводящий к образованию новых минералов), скрытый («cryptic») метасоматоз (изменяется состав уже существующих минералов без образования новых фаз), а также «невидимый» («stealth») метасоматоз (образуются новые минералы, неотличимые по составу от предшествующих).

Несомненно, что активные свойства в процессах динамики могут также проявлять такие компоненты, как К и Na, участие которых является неотъемлемой характеристикой «модального» мантийного метасоматоза [Harte, 1983; O'Reilly et al., 2013; Сафонов и др., 2016]. Наблюдаются флюидно-минеральные реакции с возникновением новых К и Na-содержащих минералов и закономерным изменением составов первичных минералов [см. обзор в Safonov et al., 2013; 2014; 2016]. Б. Харт [Harte, 1983] ввел понятие *модального мантийного метасоматоза*, под которым объединил процессы, связанные с образованием таких фаз, как амфиболы, флогопит, апатит, карбонаты, сульфиды, сфен (титанит), ильменит и другие. Модальный метасоматоз 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 [Haggerty, 1991]. Среди них особое место занимают минералы группы кричтонита, магнетоплюмбита и голландита [Jones et al., 2013; Сафонов, и др., 2016; Rezvukhin et al, 2018; 2019]. Это редкие титанаты, обогащенные крупноионными литофильными элементами, прежде всего, К и Ва, высокозарядными, легкими редкоземельными элементами (ЛРЗЭ), а также U и Th. Минералы этих групп присутствуют в метасоматизированных перидотитах мантийных ксенолитов в кимберлитах, лампроитах и щелочных лампрофирах, а также встречаются в виде включений в алмазах [Haggerty, 1991; O'Reilly, et al., 2013; Сафонов и др., 2016].

Наиболее распространенным минералом, образующимся в результате мантийного метасоматоза, считают флогопит [O'Reilly, Griffin, 2013]. К. Аоки совместно с И. Куширо [Kushiro et al., 1968; Aoki, 1975; Сафонов и др., 2016] провели многочисленные исследования, в результате которых они вывели реакции взаимодействия минералов глубинных пород с калиевыми водными флюидами. Например, подобные ксенолиты, в которых наблюдается переход гранатовых гарцбургитов и гранатовых лерцолитов во флогопитовые разновидности, наблюдаются в кимберлитовой трубке Летлокане, Ботсвана [Van Achterberg et al., 2001; Сафонов и др., 2016].

Метасоматоз, протекающий после захвата мантийных пород кимберлитовой магмой, называют кимберлитовым [Dawson, 1980; 1984; Harte, 1983; Соловьева и др., 1997; 2012]. Доусон [Dawson, 1984] впервые использовал термин *скрытый метасоматоз*, т.е. такой, при котором происходит обогащение несовместимыми элементами первичных минералов.

Среди наложенных минералов выделяют *первично-метасоматические* и *вторично-метасоматические*. *Первично-метасоматические* демонстрируют как структурное, так и химическое равновесие между собой; это всегда продукты мантийного метасоматоза. Среди *первично-метасоматических* распространенными являются флогопит, амфибол, клинопироксен и многие и другие минералы, они могут присутствовать в породе в виде рассеянных зерен или в виде формирующих жил. Среди *вторично-метасоматических* минералов выделяют серию наложенных, которые не демонстрируют структурного и химического равновесия, и часто представлены в виде реакционных кайм [Шарыгин, 2014].

Одним из важных показателей проявлений процессов глубинного метасоматоза является распределение спектров РЗЭ (редкоземельные элементы) в минералах, которые отражают непосредственно различия в масштабных событиях, которые происходили в процессе формирования СКЛМ (субконтинентальной литосферной мантии). После своего образования СКЛМ подвергалась многоэтапному метасоматическому преобразованию, в результате которого имеет сложное геохимическое строение [O'Reilly, Griffin, 2006, 2013].

Гранат является важным источником информации о процессах метасоматоза, которые протекают в пределах СКЛМ. Минеральный парагенезис граната может быть установлен на основе содержаний CaO и Cr₂O₃ [Соболев, 1974 ; Sobolev и др., 1973]. Следует разделять парагенезисы по минеральным ассоциациям, так в лерцолитовом выделяется ассоциация (оливин + ортопироксен + клинопироксен + гранат ± шпинель), в гарцбургитовом клинопироксен отсутствует. Деpletированные породы гарцбургит-дунитового ряда СКЛМ содержат гранат с низким содержанием кальция, тогда как для фертильных лерцолитов характерен насыщенный кальцием гранат; обогащение Ca достигается за счет равновесия с ассоциирующим клинопироксеном [Dawson, Stephens, 1975].

Особенности редкоэлементного состава граната точнее отражают тип парагенезиса, а также характер метасоматических преобразований. Низкокальциевые гранаты из деpletированных областей СКЛМ обычно имеют низкие содержания Y, Zr и Ti; однако метасоматические флюиды-расплавы сильно обогащены этими элементами, что приводит к обогащению Y, Zr и Ti гранатов в перидотитах, через которые проходит миграция метасоматического агента. Гранаты лерцолитового парагенезиса, напротив, обогащены Y, Zr, Ti, и имеют дугообразное (нормальное) распределение REE и обогащены HREE относительно гранатов гарцбургит-дунитового парагенезиса. Это обусловлено метасоматической модификацией граната и коррелирует с общей фертильностью лерцолита по сравнению с деpletированными перидотитами литосферной мантии. Поэтому редкоэлементный состав граната также несет информацию о типе метасоматоза [Agashev et al, 2013, Соловьёва и др., 2008; 2015].

По составу метасоматизирующих агентов обычно выделяется два основных геохимических типа мантийного метасоматоза — карбонатитовый и силикатный [Pokhilenko et al., 2015 и другие]. Карбонатитовый метасоматоз проявлен, прежде всего, в обогащении пород и минералов несовместимыми элементами без значительных изменений модального состава и наиболее часто наблюдается в деpletированных (в том числе алмазонасных) дунит-гарцбургитах средней части мантийного разреза. Силикатный, в свою очередь, приводит к значительному росту модальных содержаний граната и клинопироксена в перидотитах и приурочен к корневым частям литосферы [Agashev et al., 2013]

Метасоматоз, может происходить как *in situ* в мантии (*мантийный метасоматоз*), так и после того, как мантийные породы были захвачены кимберлитовой магмой (*кимберлитовый метасоматоз*). Процесс келифитизации многие авторы связывают как раз с

процессами воздействия кимберлитового магматизма [Вишнеvский и др., 1984; Соловьева и др., 1997; 2012; Шарыгин, 2014].

Термин «келифит» широко используется в литературе для описания периферических изменений в гранатах [Рид и др., 1972; Obata 1994]. В разное время келифитовыми оторочками занимались некоторые исследователи [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; Шарыгин, 2014; Юдин и др., 2016; Pokhilenko, 2021].

Харьков и Вишнеvский [1989] в своей работе выделили среди глубинных ксенолитов гранат-содержащие парагенезисы минералов, зерна граната которых окружены келифитовыми оболочками в кимберлитах, так и в ксенолитах. Основные минеральные ассоциации в келифитах: флогопит+шпинель; ортопироксен+клинопироксен+шпинель; флогопит+ортопироксен+клинопироксен+шпинель [Вишнеvский и др., 1984; Danchin, 1979; Delaney et al., 1980; Lock et al., 1980; Morimoto et al., 1981]. Возможно, что процессы появления некоторых флогопит-хромитовых оторочек могут свидетельствовать о более глубинных уровнях высокохромистого пироба, который попадает в неравновесные условия. В результате привноса K_2O , Na_2O и TiO_2 может происходить образование флогопит-хромитовых кайм, так как на пироб действует флюид, обогащенный водно-щелочной составляющей [Вишнеvский и др., 1984]. Многие исследователи допускают, что привнос и обогащение K_2O происходил еще в мантии [Соболев, 1972; Харьков и др., 1979; Вишнеvский и др., 1984]. Состав келифитовых кайм свидетельствует о структурных и вещественных преобразованиях при пониженных РТ-параметрах по сравнению с первичными процессами образования кимберлитов [Илупин и др., 1969; Харьков и др., 1973; Тронева и др., 1979; Харьков и др., 1989; Юдин и др., 2016].

Процессы формирования келифитовых кайм происходят в открытой системе при постоянно меняющихся Р-Т-Х условиях, что выражается в широком диапазоне вариаций химического состава минералов, а также в присутствии флогопита и амфибола, для образования которых необходим привнос К, Na и H_2O . Нахождение амфибола и флогопита свидетельствуют о том, что формирование келифита происходило в присутствии расплава или флюида [Соловьев и др., 2019].

Соловьева с соавторами (1997) отмечают, что продукты частичного плавления относятся к метасоматическим минералам позднего этапа, что обычно связывается с кимберлитовым метасоматозом [Franz et al., 1996; Соловьева и др., 1997; Франц и др., 1997].

Процесс келифитизации граната ксенолитов начинался до попадания вещества в кимберлитовый расплав, который под воздействием глубинного флюида, температура плавления граната понижалась на стыке его зерен с другими фазами и осуществлялось

плавление периферийных зон этого минерала. Состав кайм свидетельствует о том, что глубинный флюид приносил воду и щелочи (с преобладанием натрия). Внутренние участки зерен граната вдоль ослабленных зон подвергались плавлению. Минеральные агрегаты, которые слагают данные области зерен по составу и строению аналогичны келифитовым каймам гранатов [А.Д. Харьков и А.А. Вишневецкий, 1989].

Существует предположение, что каймы, которые широко развиты на гранатах могли иметь промежуточную камеру вблизи границы кора-мантия [Franz et al., 1996]. Исходя из литературных данных можно предположить несколько вариантов подъема кимберлитовых магм для различных трубок: 1) подъем без остановки; 2) подъем с остановкой в промежуточной камере [Franz et al., 1996; Nechaev, Khokhryakov, 2013; Шарыгин, 2014].

Кратонная мантия под северной частью содержит как древнюю, так и переработанную литосферную мантию. Таким образом, предполагается, что мантийная литосфера под трубкой Обнаженная первоначально сформировалась в мезоархейском возрасте, и была сильно изменена за счет просачивающихся между зернами карбонатитовыми расплавами, что могло значительно снизить прочность мантийной литосферы, которая привела к вторичной переработке силикатными расплавами, что в результате привело к утонению литосферной мантии в краевых частях ЯАП и исчезновению алмазоносного кила, с чем связано отсутствие алмазов в кимберлитовых трубках [Ionov et al., 2015; Калашникова, 2017].

Процессы мантийного и кимберлитового метасоматоза существенно разделяются по времени их образования в мантии. Признаки глубинного мантийного метасоматоза наблюдаются в спектрах распределения РЗЭ и редких элементов в гранатах и клинопироксенах, а низкотемпературный метасоматоз выражается в образовании реакционных кайм.

Основываясь на литературных данных о геологическом расположении, строении и составе мантийных ксенолитов из двух кимберлитовых трубок, которые находятся в разных частях ЯАП, можно сделать вывод, что ксенолиты непосредственно отражают состав литосферной мантии под Мирнинским и Куойкским кимберлитовым полем, их историю изменения в результате многоэтапной эволюции в мантийных условиях, которые были подвержены различным процессам метасоматоза и степени их интенсивности, что отражает различную минералого-петрографическую и геохимическую характеристику пород.

3. Аналитические методы исследований

Представительная коллекция глубинных ксенолитов из кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная изучалась комплексом минералого-петрографических методов. Исследование минералов, структур распада, келифитовых кайм, вторичных изменений и редких К-титанатов проводилось с использованием ряда локальных аналитических методов: это оптическая микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, рентгеноспектральный микроанализ с электронным зондом, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией. Ряд перечисленных методов позволил получить новые данные о минеральном составе структур распада, келифитовых кайм, вторичных изменений и редких К-титанатов и дать их комплексную характеристику в породообразующих минералах ксенолитов разнообразных мантийных пород. **Оптическая микроскопия** в проходящем и отраженном свете применялась для петрографического изучения минералов из ксенолитов, определения минерального состава породообразующего парагенезиса, выявления взаимоотношений минералов (в структурах распада, келифитовых каймах, прожилках и включениях). Исследования проводились на микроскопе Carl Zeiss (Германия) и Olympus BX51 (Япония), снабженном фотовидеокамерой высокого разрешения Axio Plan 2 Imaging и Olympus ColorView III. В работе использовались объективы с увеличениями 2×, 4×, 10×, 20×, 50×, 100×. С помощью оптического микроскопа проводилась подготовка образцов к другим видам исследования.

Метод **спектроскопии комбинационного рассеяния** (КР) осуществлялся с помощью спектроанализаторов комбинационного рассеяния U-1000 и LabRAM HR800 (Horiba Jobin Yvon). Возбуждение на спектроанализаторе U-1000 проводилось твердотельным лазером Spectra Physics с длиной волны 532 нм и мощностью 1.5 Вт. КР-спектроанализатор LabRAM HR800 с конфокальной оптической системой оснащен аргоновым лазером с длиной волны 514 нм в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. КР-спектроскопические исследования синтетических фаз, полученных в результате экспериментов (именгита, прайдерита и матиасита), проводились с помощью рамановского спектрометра Renishaw RM1000, оснащенного микроскопом Leica (ИЭМ РАН, г. Черноголовка). Использовался твердотельный лазер с диодной накачкой с длиной волны излучения 532 нм и мощностью 20 мВт. Спектры регистрировались при 50-кратном увеличении в течение 100 сек. Исследования методом КР-спектроскопии также были проведены в ЦКП МГУ им. М.В. Ломоносова на кафедре петрологии, которые были получены с помощью автоматического рамановского спектрометра XPloRA (Horiba Scientific) с многоканальным детектором, совмещенного с конфокальным микроскопом,

включающим соединительную и фильтрующую оптику. Фокусное расстояние спектрометра составляет 200 мм. Было использовано лазерное излучение с длиной волны 532 нм и номинальной мощностью 25 мВт. Для уменьшения влияния лазерного пучка на образец съемка производилась при закрытой диафрагме, уменьшающей мощность до 10% от номинальной. Съемка проводилась в диапазоне от 100 до 2000 см⁻¹ с использованием спектральной решетки 2400Г (2400 линий на мм). Время накопления каждого окна спектра составляло 90 сек (3 раза по 30 сек), в режиме автоматической склейки окон с перекрытием 100 линий. Первичная обработка спектров производилась в программе LabSpec. Техника КР-спектроскопии (Раман-спектроскопии) базируется на изучении спектров комбинационного рассеяния света, которые отражают взаимодействие лазерного излучения с колебательными уровнями молекул анализируемого объекта. С помощью КР-спектроскопии определяется качественный химический состав и структура исследуемого объекта.

Рентгеноспектральный микроанализ с электронным зондом использовался для определения химического состава минералов, слагающих структуры распада, келифитовых кайм, прожилков, заполненных вторичными минералами и включений редких К-титанатов. Анализы проводились в ЦКП МГУ им. М.В. Ломоносова на кафедре петрологии на растровом электронном микроскопе «Jeol JSM-6480L», в который входит комплекс комбинированной системы рентгено-спектрального микроанализа, объединяющий энерго-дисперсионный «INCA-Energy 350» и волновой дифракционный спектрометр «INCA-wave 500» (операторы Коротаева Н.Н, Гусева Е.В) Растровый электронный микроскоп «Jeol JSM-6480L» оснащен измерителем тока зонда, детекторами отраженных электронов. Ускоряющее напряжение от 25 кВ. Максимальное увеличение кратно 300 000. Энергодисперсионный спектрометр «INCA-Energy 350» дает возможность регистрировать рентгеновское излучение легких элементов.

Определение химического состава минералов из ксенолитов проводилось методом рентгеноспектрального микроанализа в ИЭМ РАН (г. Черноголовка) с применением растрового электронного микроскопа Tescan Vega-II XMU (режим EDS, ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 400 пА) и использованием системы регистрации рентгеновского излучения и расчёта состава образца программой и приставкой INCA Energy 450. Диаметр электронного пучка составил 157 – 180 нм (для анализа химического состава) и 60 нм (для получения изображений), оператор Варламов Д.А. Первичный состав минералов глубинных ксенолитов определялся в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, на микронзонде JEOL JXA-8100 (Япония). Параметры съемки минералов: I = 40-70 нА, V = 20 кВ, t = 10 с, размер пучка зонда – 2 μm. Для диагностики вторичных минералов в прожилках и трещинах

минералов, келифитовых каймах и структурах распада использовалась растровая электронная микроскопия (SEM) совместно с энергодисперсионной спектроскопией (EDS) Исследования проведены на электронных сканирующих микроскопах JEOL 6380LA, LEO 1430VP, JEOL JSM-6510LV, и Tescan MYRA 3 LMU, которые совмещены с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments), оператор Усова Л.В.

Анализ содержания редких элементов в минералах выполнялся методом **масс-спектрометрии с лазерной абляцией** (LA ICP-MS). Измерения проводились в аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на масс-спектрометре Finnigan Element-2 с приставкой для лазерной абляции. Прибор состоит из квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой - XSERIES2 ICP-MS компании Thermo Scientific. Диапазон измеряемых масс 2–255 а.е.м. Источник индуктивно-связанной плазмы снабжен генератором максимальной мощностью 1,6 кВт и частотой 27,12 МГц. В качестве активной среды в лазере используется алюмо-иттриевый гранат (YAG) с добавками неодима (около 3 вес. % Nd₂O₃). Диаметр лазерного пучка составлял 60 мкм для U-Pb датирования и 30 мкм для определения редкоэлементного состава гранатов, частота лазера 10 Гц, оператор Денисенко А.А.

Расшифровка кристаллической структуры минерала, изоструктурного линдквиститу проводилась в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск (оператор Ращенко С.В.) на базе **дифракционных данных**, полученных при съёмке монокристалла размером ~0.1*0.1*0.05 мм на дифрактометре STOE IPDS-2T (молибденовое излучение, монохроматизированное графитовым монохроматором, детектор типа image plate). Данные съёмки обрабатывались в программе CrysAlisPro (Rigaku) для извлечения массива интенсивностей дифракционных отражений от кристаллографических плоскостей структуры. Полученный массив использовался для расшифровки и уточнения структуры в программах Superflip и Jana2006.

Экспериментальные работы проводились в ИЭМ РАН, г. Черноголовка, на установке «наковальня с лункой» НЛ-13Т с тороидальным уплотнением ячеек, изготовленных из литографского камня, оснащенных графитовыми трубчатыми нагревателями и вставками из прессованной смеси MgO:BN=3:1 в качестве передающей давление среды. Давление в опытах задавалось с точностью 0.2 ГПа по калибровке на основе стандартных переходов в Bi, Ba и PbSe, а температура контролировалась по кривой зависимости температуры от мощности тока нагрева, построенной по показаниям термопары Pt₇₀Rh₃₀/Pt₉₄Rh₆. Использовались платиновые капсулы линзообразной формы толщиной 0.2 мм, вмещающие примерно 20 мг стартового вещества.

Глава 4. Петрографическое описание образцов исследуемых ксенолитов

Нами была изучена коллекция из 45 образцов мантийных ксенолитов трубок Мир (24 образца) и Обнаженная (21 образец). Среди образцов в соответствии с минералогическими особенностями были выделены следующие типы парагенезисов: 1 - перidotитовый - Sp, Sp-Grt - и Grt - лерцолиты (рис.4.2); 2 - пироксенитовый - Grt вебстериты (рис.4.1); 3 - эклогитовый (отмечен только в трубке Мир) (рис.4.3). Описание образцов исследуемой коллекции приведено в **Таблице 4.1**. Наблюдаются вторичные метасоматические изменения, которые проявлены в виде кайм на минералах; их подробное описание приведено в главе 5.

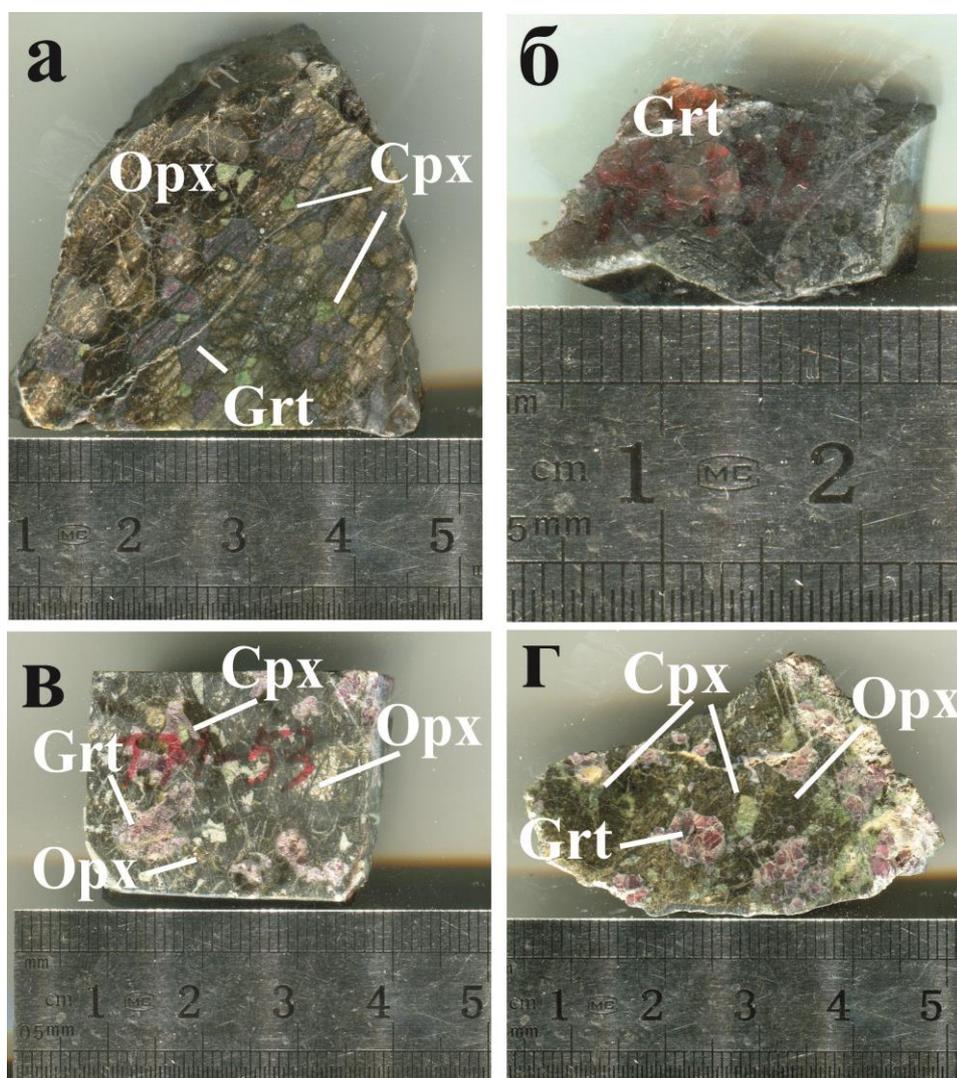


Рис.4.1. Фото полированных пластинок. А) – гранатовый вебстерит (обр. ТО–42, трубка Обнаженная); Б) – гранатовый вебстерит (обр. ТО–138, трубка Обнаженная); В) – гранатовый вебстерит (обр. ТМ–53, трубка Мир); Г) – гранатовый перidotит (ТМ–90, трубка Мир).

Таблица 4.1 Обобщенная минералого-петрографическая характеристика изученной коллекции мантийных ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная

| № | Образец | Трубка | Парагенезис | Порода | Породообразующие минералы со структурами распада | | | Минеральный состав келифитовый кайм |
|----|---------|------------|-------------|----------------------------|--|----------------------|-----------|-------------------------------------|
| | | | | | Срх | Орх | Grt | |
| 1 | ТМ-38 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | |
| 2 | ТМ-34 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 3 | ТМ-31 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 4 | ТМ-90 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | по периферии Grt (Орх+Spl+Amp) |
| 5 | ТМ-100 | Мир | П | Верлит | Орх, Spl, Rt | | | по периферии Срх (Срх1+Phl+Pct) |
| 6 | ТМ-132 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | Rt | Ilm | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 7 | ТМ-61 | Мир | П | гранатовый лерцолит | | | | по периферии Grt (Phl+Spl+Ap) |
| 8 | ТМ-73 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | по периферии Grt (Amp+Spl+Phl) |
| 9 | ТМ-44 | Мир | П | Гранатовый дунит | | | MgIlm, Rt | по периферии Grt (Amp+Spl) |
| 10 | ТМ-12 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | |
| 11 | ТМ-74 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 12 | ТО-78 | Обнаженная | П | Верлит | Rt,Орх,Spl, Grt, Ilm | | | |
| 13 | ТО-125 | Обнаженная | П | Гранат-шпинелевый лерцолит | Орх | Срх, Spl, Grt | | |
| 14 | ТО-212 | Обнаженная | П | Гранат-шпинелевый лерцолит | Орх,Sp | Срх,Spl,Grt | | |
| 15 | ТО-281 | Обнаженная | П | Гранатовый лерцолит | Rt,Ilm | Срх,Spl,Rt, Ilm, Grt | Ilm, Rt | по периферии Grt (Phl 1+Phl2) |
| 16 | ТО-254 | Обнаженная | П | Шпинелевый лерцолит | Орх | | | |
| 17 | ТО-91 | Обнаженная | П | Шпинелевый лерцолит | Rt,Ilm,Орх, Spl | Срх,Spl | | на границе Ol со Spl (Phl1+Phl2) |
| 18 | ТО-171 | Обнаженная | ВП | Оливиновый ортопироксенит | | Spl | | |
| 19 | ТО-175 | Обнаженная | П | Гранатовый лерцолит | Орх,Spl | Срх, Spl | | по периферии Срх (Amp+CrSpl+Grt) |

| | | | | | | | | |
|----|--------|------------|----|----------------------|----------|----------|---------|---|
| 20 | ТО-258 | Обнаженная | П | Шпинелевый лерцолит | Орх, Spl | | | |
| 21 | ТО-266 | Обнаженная | П | Шпинелевый лерцолит | Spl | Spl | | на границе Ol со Spl (Phl+Phl1+Ilm) |
| 22 | ТО-69 | Обнаженная | П | Гранатовый лерцолит | Орх | Срх, Spl | | |
| 23 | ТМ-126 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Phl+Phl1+Срх+Spl+CrSp) |
| 24 | ТМ-147 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 25 | ТМ-53 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 26 | ТМ-68 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | Rt, Ilm | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 27 | ТМ-56 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | Ilm | | | |
| 28 | ТМ-182 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 29 | ТМ-116 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 30 | ТМ-74 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 31 | ТМ-91 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | Ilm | | Rt, Ilm | |
| 32 | ТМ-137 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | |
| 33 | ТМ-128 | Мир | ВП | гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Spl) |
| 34 | ТО-22 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | по периферии Grt (Amp+Phl+Ilm) |
| 35 | ТО-29 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | Срх, Spl | | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 36 | ТО-138 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | Rt | по периферии Grt (Amp+Phl+Spl) |
| 37 | ТО-131 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | Rt, Орх, | | | |
| 38 | ТО-16 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | |
| 39 | ТО-42 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | Rt, Ilm | по периферии Grt (TiMt+Phl) |
| 40 | ТО-242 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | |
| 41 | ТО-33 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | |
| 42 | ТМ-33 | Мир | Э | Эклогит | | | | по периферии Grt (Phl+Phl1+Ap) |
| 43 | ТМ-109 | Мир | Э | Эклогит | Rt, Ilm | | Rt, Ilm | по периферии Grt (Amp) |
| 44 | ТМ-156 | Мир | Э | Эклогит | | | | по периферии Grt (Phl) |
| 45 | ТМ-124 | Мир | Э | Эклогит | | | | по периферии Grt (Phl+Phl1+Srp) |

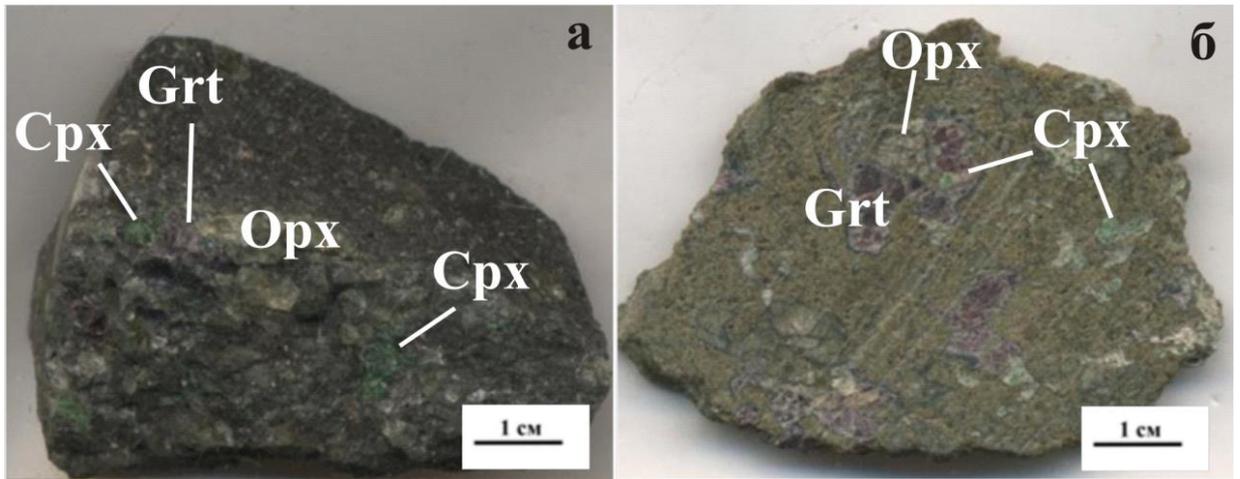


Рис. 4.2. Фото мантийных ксенолитов из перидотитового парагенезиса, алмазоносная трубка Мир: А) – гранатовый перидотит, обр. ТМ-100; Б) – гранатовый перидотит, сильно измененный, обр. ТМ-107.)
Зернистая структура, массивная текстура.

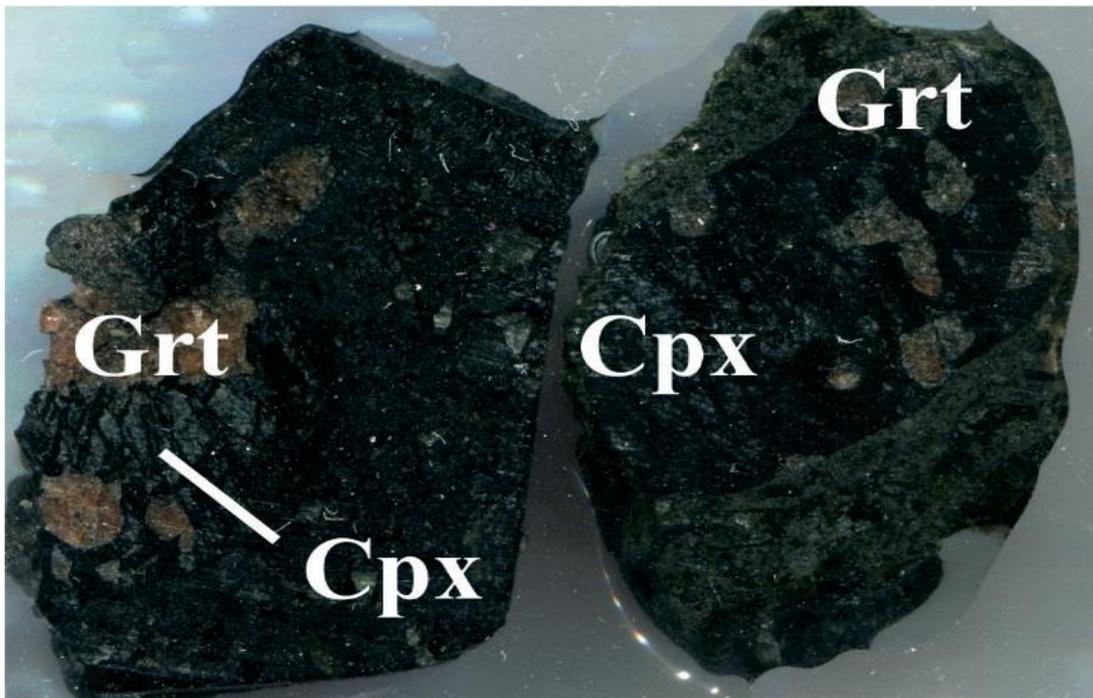


Рис. 4.3. Фото мантийных ксенолитов эклогитового парагенезиса, трубка Мир.

4.1. Описание по группам пород мантийных ксенолитов из трубки Мир и Обнаженная

4.1.1. Перидотитовый тип парагенезиса

Зернистые лерцолиты

Всего описано 11 ксенолитов из трубки Мир (рис.4.2), которые относятся к гранатовым лерцолитам. В трубке Обнаженная изучено 11 образцов, среди них выделены *гранатовые (5), гранат-шпинелевые (2) и шпинелевые лерцолиты (4)*. Структура изученных пород варьируется от средне- до крупнозернистой. Чаще всего наблюдается панидиморфная, реже гипидиоморфнозернистая структура.

В изученных лерцолитах содержится от 40 до 55 % оливина, 25-30 % клинопироксена, 20-30% ортопироксена, 10-15 % граната. Содержание шпинели около – 2-5%.

Состав оливина из двух кимберлитовых трубок соответствует форстериту $Fe_{90-95}Fa_{10-5}$ (**Приложение А - Таблица 4.1**). В породах оливин наблюдается в виде крупных идиоморфных зерен бледно-зеленого цвета, размером (до 5 мм). Внутри зерен отмечаются многочисленные трещины, которые заполнены вторичными минералами серпентином и кальцитом (рис.4.4 а;в).

Клинопироксен по составу главных оксидов соответствуют диопсидовому миналу с разным соотношением компонентов $Di_{64-90}Ur_{2-8}Jd_{0-14}Aeg_{0-7}Fs_{0-6}Cln_{0-12}$ (**Таблица 4.3, Приложение А**). Минерал образует призматические выделения размером 0,5-4,5 мм. Внутри зерен идентифицированы структуры распада ортопироксена и прожилки вторичных минералов серпентин-хлорит-карбонатного состава. Цвет клинопироксена в породе варьирует от бутылочно - зеленого до изумрудно-зеленого (рис.4.3 а; рис.4.4 в).

Состав ортопироксена соответствует энстатиту $En_{89-93}Fs_{6-8}$ с содержанием кальциевого (волластонитового) компонента Wo_{0-3} . Значение $Mg\#$ для ортопироксена варьируется в пределах от 91,99 до 97,32 (**Приложение А - Таблица 4.2**). Клинопироксен образует ксеноморфные, округлые и вытянутые зерна размером до 2-3 мм. В минерале часто наблюдаются структуры распада клинопироксена шириной 0,01-0,02 мм, цвет в породе медово-желтый (рис.4.1 а, в, г), кристаллы ортопироксена по трещинам замещаются серпентином.

Состав граната демонстрирует вариации в составе с преобладанием пиропового и альмандинового компонентов ($Prp_{66-77}Alm_{11-20}$ мол.%) (**Таблица 4.4, Приложение А**). Состав других миналов в гранате представлен ($Grs_{1-11}Uv_{1-12}Adr_{0-3}$ мол.%). Содержание Cr_2O_3 в гранатах на дискриминационной диаграмме $CaO-Cr_2O_3$ по Соболеву [1974] соответствует среднехромистому составу, что соответствует лерцолитовому парагенезису (рис.4.4). В зернах граната часто встречается клинопироксен в виде вытянутых овальных включений (рис.4.5; рис.4.6 б-г). *Цвет граната в породе* различается от светло-розового до малиново-лилового (рис.4.2), форма зерен округлая, размер до 10 мм. Внутри зерен граната отмечаются тонкие структуры распада (рис.4.5 б) и келифитовые каймы мощностью которых находится в пределах от 5 до 300 мкм. Иногда в гранате наблюдаются выделения неправильных зерен шпинели (например, обр. ТО-125, трубка Обнаженная), что может свидетельствовать о развитии граната по шпинели.

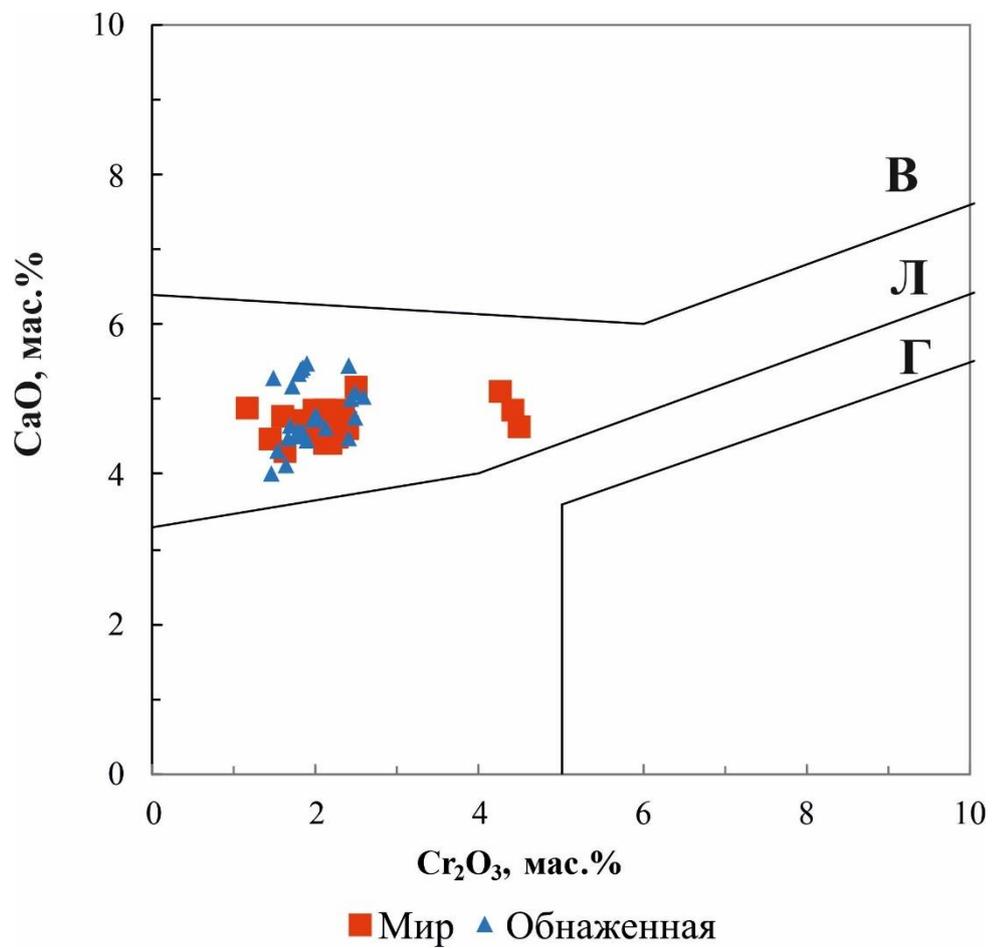


Рис.4.4. Дискриминационная диаграмма CaO-Cr₂O₃ (по Соболеву, 1974) для гранатов из ксенолитов перидотитового и пироксенитового парагенезисов. Поля нанесены по [Соболев, 1974]. Буквами Г, Л, В обозначены поля соответственно гарцбургитового, лерцолитового и верлитового типа парагенезисов.

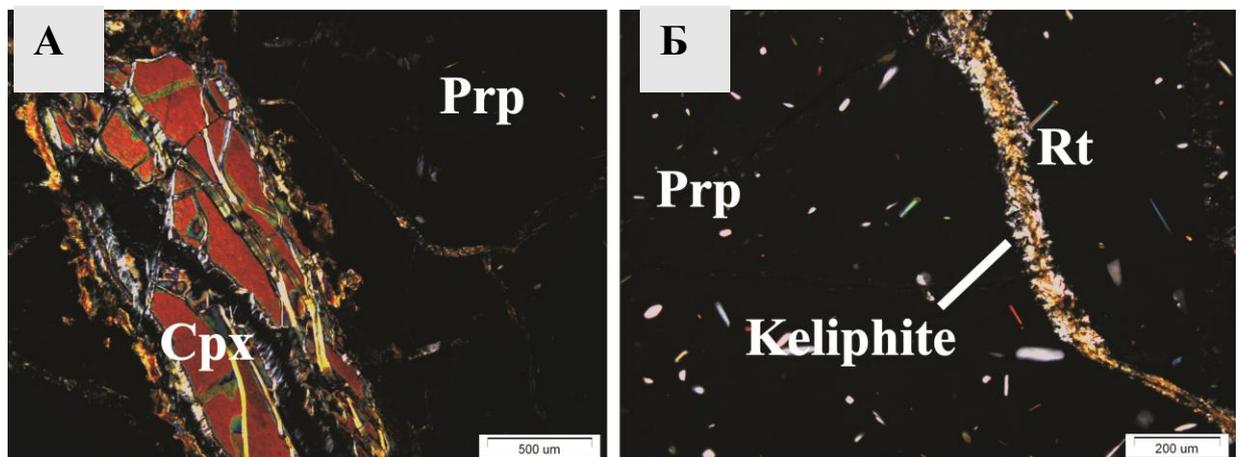


Рис. 4.5. А) – включение измененного клинопироксена в крупном зерне граната; Б) – гранат со структурами распада ильменита и рутила. Гранатовый лерцолит (обр. ТМ-90, трубка Мир), перидотитовый парагенезис. Скрещенные николи, проходящий свет

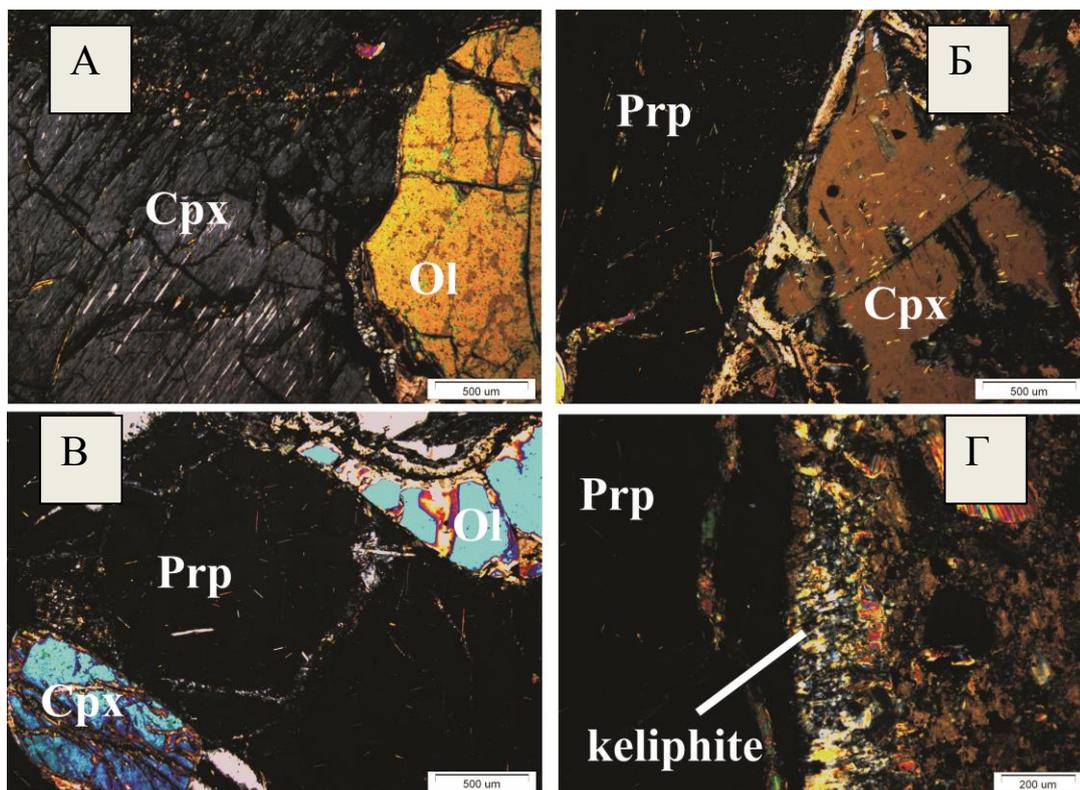


Рис. 4.6. Взаимоотношения минералов: А) – контакт оливина с клинопироксеном (гранат-шпинельный лерцолит, обр. ТО–212, трубка Обнаженная); Б) –клинопироксен со структурами распада на контакте с гранатом (гранат-шпинельный лерцолит, обр. ТО–212, трубка Обнаженная); В) – включения клинопироксена внутри граната (гранатовый лерцолит, обр. ТО–281, трубка Обнаженная); Г) – мощная келифитовая кайма на границе ксенолита с кимберлитом (гранатовый лерцолит, обр. ТО–281, трубка Обнаженная). Скращенные николи, проходящий свет.

Амфибол наблюдается в келифитовых каймах и в прожилках главных породообразующих минералов. По составу амфибол соответствует группам кальциевого (эденита и паргасита) и кальциево-натриевых (рихтеритов) (Таблица 4.9, Приложение А). Содержание TiO_2 находится в пределах от 0,03 до 1,64 мас.%, Na_2O от 0,25 до 6,63 мас.%, K_2O от 0,11 до 1,49 мас.%, Cr_2O_3 (0,29-1,98 мас.%).

В межзерновом пространстве оливина отмечаются зерна *джерфшишерита*, либо минерал формирует каймы по периферии пентландита и аваруита. Состав джерфшишерита в мас. %: FeO 43,13; Ni 15,67; Co 0,51; Cu 1,03; K 7,88; S 34,21 (Таблица 4.12, Приложение А).

4.1.2. Пироксенитовый тип парагенезиса

Вебстериты представлены гранатовыми разновидностями (рис 4.8), из которых в трубке Мир было изучено 11 образцов, а из трубки Обнаженная 9 образцов. Структуры породы при макроскопическом описании наблюдаются от мелкозернистых до крупнозернистых.

По составу *гранат* относится к пиропу ($Prp_{48-74}Alm_{14-37}$); Содержания Са-компонента

присутствует ($\text{Grs}_{0-14}\text{Uv}_{0-14}\text{Adr}_{0-5}$ мол.%) (**Приложение А - Таблица 4.4**). Цвет минерала светло-розовый, форма зерен преимущественно округлая, размером от 5 до 10-12 мм. Внутри наблюдаются структуры распада в виде тонких игл рутила и ильменита, а по периферии развиты келифитовые каймы, которые варьируют по мощности и минеральному составу (рис.4.8 а;в). Содержание Cr_2O_3 в гранатах на дискриминационной диаграмме $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ по Соболеву [1974] соответствует низкохромистому составу (рис.4.6).

Клинопироксен относится к диопсиду $\text{Di}_{47-87}\text{Ur}_{0-4}\text{Jd}_{0-28}\text{Aeg}_{0-10}\text{Fs}_{0-16}\text{Cl}_{0-30}$ (**Приложение А - Таблица 4.6**). По форме выделяются вытянутые и призматические кристаллы, микроскопически от гип- до идиоморфной формы. Цвет минерала в породах отмечается от светло-зеленого, бутылочно-зеленого до изумрудно-зеленого, размером от 3 до 6 мм. Внутри клинопироксена идентифицированы структуры распада ортопироксена (рис.4.6 б). Встречаются зерна, которые сильно замещены по прожилкам и трещинам вторичными минералами серпентином, хлоритом, реже карбонатами (рис.4.8 в-г; рис.4.9).

Ортопироксен по составу соответствует энстатиту $\text{En}_{79-93}\text{Fs}_{6-21}$ с содержанием кальциево (воластонитового) компонента Wo_{0-2} . Магнезиальность ортопироксена в данном типе пород ($\text{Mg}\#$) варьирует от 79,244 до 95,01 (**Приложение А - Таблица 4.2**). В ксенолитах ортопироксен медово-желтого цвета, размером от 1 до 6 мм. Внутри ортопироксена идентифицированы структуры распада клинопироксена, ильменита, шпинели, а также отмечаются вторичные изменения по прожилкам и трещинам (серпентин-хлорит-карбонатного состава, рис.4.10).

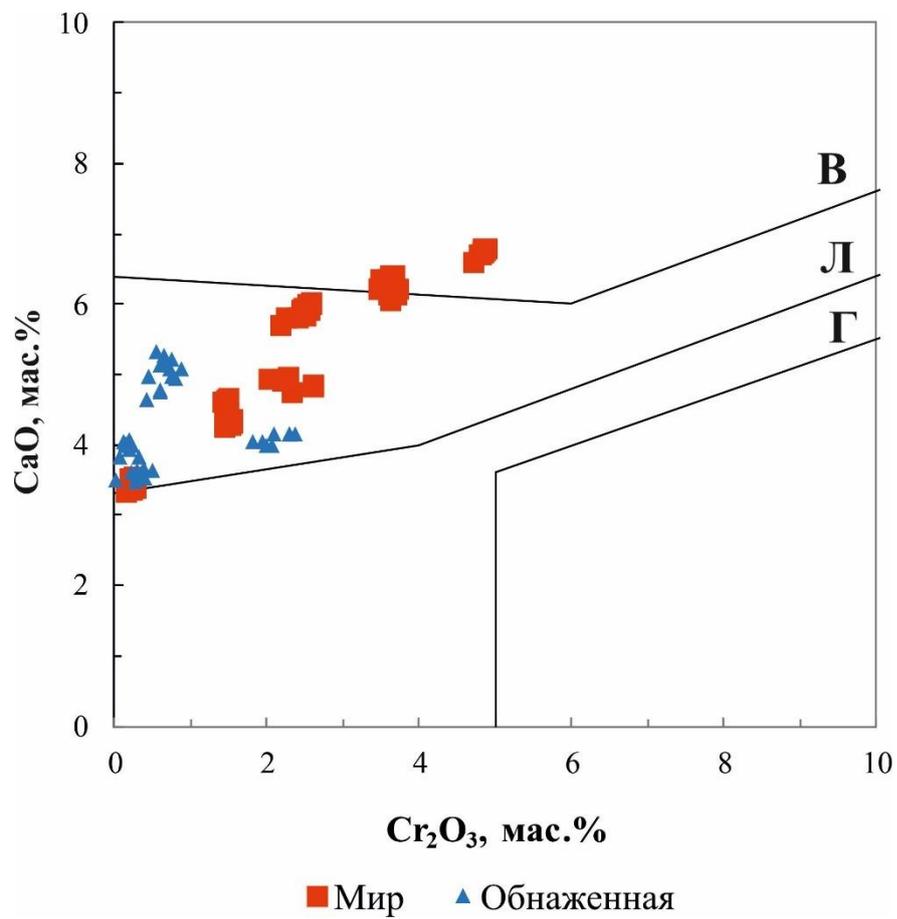


Рис.4.7. Дискриминационная диаграмма CaO-Cr₂O₃ (по Соболеву, 1974) для гранатов из ксенолитов перidotитового и пироксенитового парагенезисов. Поля нанесены по Соболеву (1974). Буквами Г, Л, В обозначены поля гарцбургитового, лерцолитового и верлитового типа парагенезисов

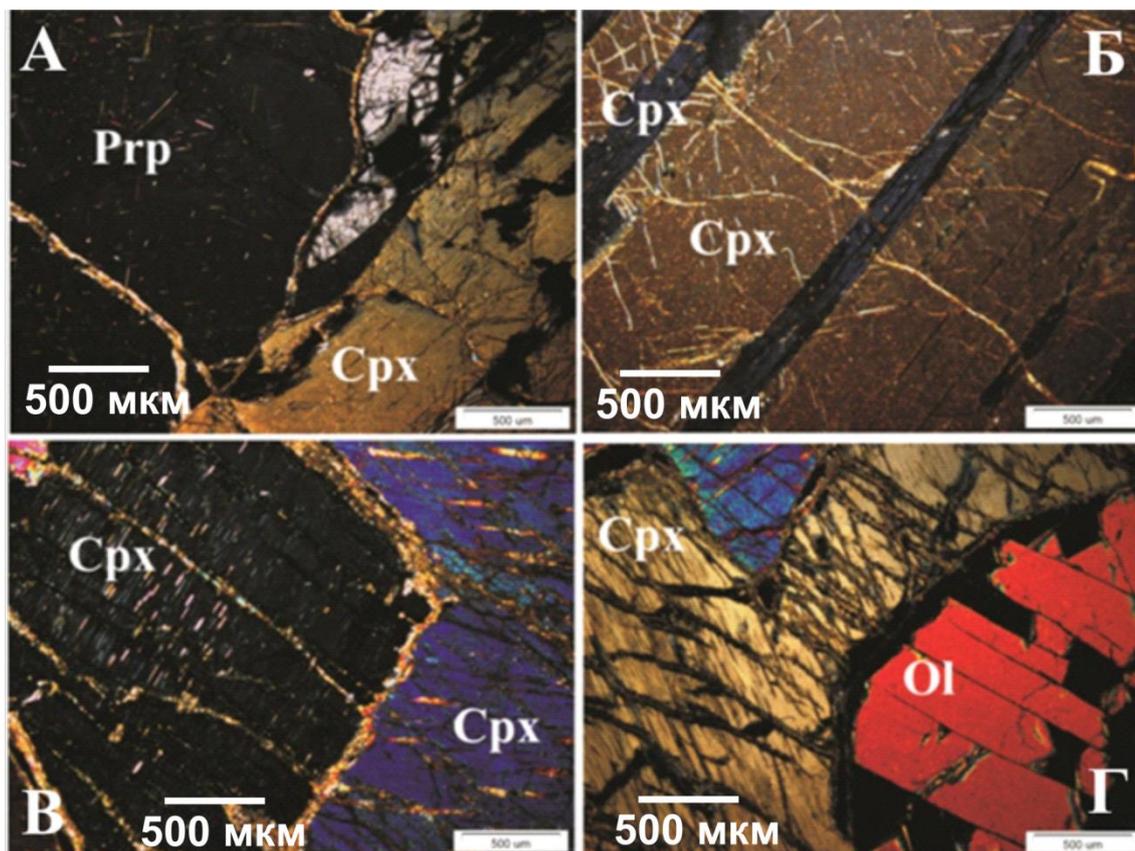


Рис.4.8. Крупнозернистые гипидиоморфные структуры: А) – гранат с хаотично расположенными внутри структурами распада (гранатовый лерцолит, обр. ТО–69, трубка Обнаженная); Б) – вытянутые структуры распада клинопироксена в клинопироксене (гранатовый лерцолит, обр. ТО–69, трубка Обнаженная); В) – контакт двух зерен клинопироксена со структурами распада и келифитовой каймой (гранатовый лерцолит, обр. ТО–175, трубка Обнаженная); Г) – включение зерна оливина в крупном зерне клинопироксена (гранатовый лерцолит, обр. ТО–175, трубка Обнаженная). Скрещенные николи, проходящий свет.

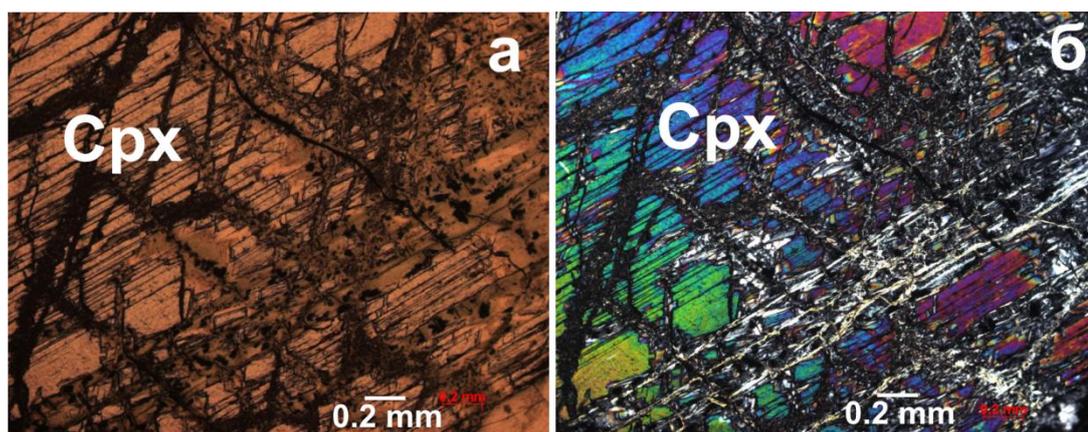


Рис. 4.9. Измененные и сильно трещиноватые зерна клинопироксена (гранатовый вебстерит, ТО–138, трубка Обнаженная). Справа – с анализатором. Слева – без анализатора Проходящий свет.

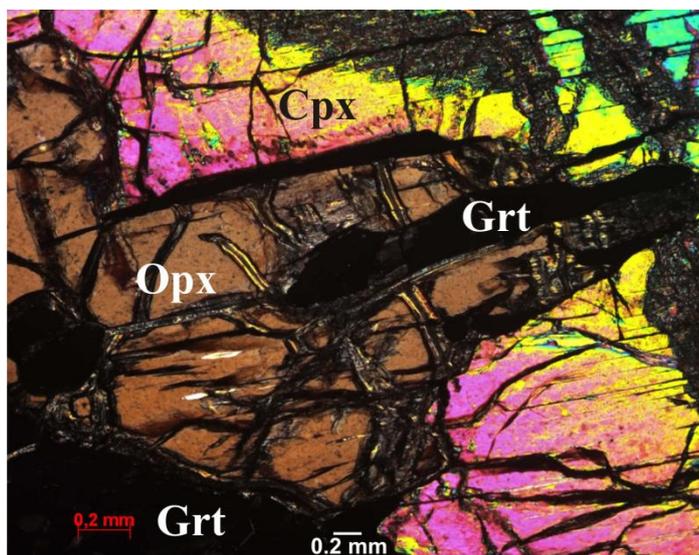


Рис. 4.10. Заливообразные и вытянутые зерна ортопироксена в клинопироксене (гранатовый вебстерит, ТО–138, трубка Обнаженная). Скращенные николи, проходящий свет.

Амфибол в ксенолитах пироксенитового типа пород наблюдается по периферии граната (в келифитовых каймах) и в зонах вторичных изменений минералов по прожилкам. По составу амфиболы соответствуют кальциевому (паргаситу), кальциево-натриевому рихтериту и магний-железо-марганцовым Mg-Fe-Mn-куммингтониту (**Таблица 4.10, Приложение А**). Содержания TiO_2 (0-2,24 мас. %), Na_2O (0,34-7,40 мас.%) и K_2O (0,09- 4,57 мас. %). Состав Cr_2O_3 (0,07 - 3,46 мас.%) в амфиболе пироксенитового типа более высокие, чем в перидотитовом.

Зерна джерфшерита находятся в интерстициях и в каймах минералов из ксенолитов кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная, состав главных оксидов соответствует в мас. %: FeO 33,22-43,33; Ni 6,32-17,06; Co 0,13-0,98; Cu 1-6,63; K 8,19-9,45; S 29,38-34,56 (**Таблица 4.12, Приложение А**).

Апатит наблюдается в каймах минералов в виде единичных включений и имеет следующий состав (мас. %): CaO 48,86-53,94; P_2O_5 35,61-40,03 ; FeO 0,33-0,64; F 2,34-2,58; Cl 0,15-5,44.

Монтичеллит идентифицирован в виде вытянутой пластинки в гранатовом вебстерите кимберлитовой трубки Мир (обр. ТМ-68) с составом главных оксидов: SiO_2 (37,25), TiO_2 (0,57), FeO (18,85), MgO (19), CaO (19,43), Cl (0,55), Al_2O_3 (1,11) (**Таблица 4.13, Приложение А**).

4.1.3. Эклогитовый тип парагенезиса

В изученной коллекции присутствуют ксенолиты эклогитов (рис.4.11) только из высокоалмазоносной трубки Мир в количестве 4 образцов. Структура этой породы меняется от средне- до крупнозернистой. Для данного типа пород характерен особый состав

клинопироксена и граната (низкие содержания Cr_2O_3 от 0 до 0,1 мас.% в изученных образцах). Ортопироксен в приведенных образцах отсутствует.

Гранат наблюдается в виде крупных изометричных зерен размером до 10 мм. Вариации составов граната из ксенолитов эклогитов показаны на диаграмме Prp – Alm (+Sps) – Grs (Рис. 4.12). По классификации Колмена с соавторами (Coleman et al., 1965) гранаты преимущественно из образцов ТМ-109 и ТМ-156 лежат в области эклогитов группы В с близкими соотношением пиропового и (альмандин+спессартинового) миналов. Другие составы гранатов из ксенолитов ТМ -33; ТМ-109 и ТМ-156 по составу принадлежит полю эклогитов группы А с преобладающей долей пиропового компонента в составе (рис.4.12).

Такое широкое разнообразие химизма гранатов характерно для эклогитов, слагающих мантийные ксенолиты [Aulbach et al., 2007; Caporuscio, Smyth, 1990; Hills, Haggerty, 1989; Shervais et al., 1988; Соболев, 1974; Taylor et al., 2003]. По химическому составу зерна граната однородны (**Приложение А - Таблица 4.7**) и соответствуют пиропу, содержащему альмандиновый компонент. Магнезиальность (#Mg) граната изменяется в диапазоне от 59 до 68 мас.%: например, ТМ-33 #Mg (65,81-68,44), ТМ-109 (66,16-66,92), а в ксенолите ТМ-156 самые низкие содержания (58,56-59,31).

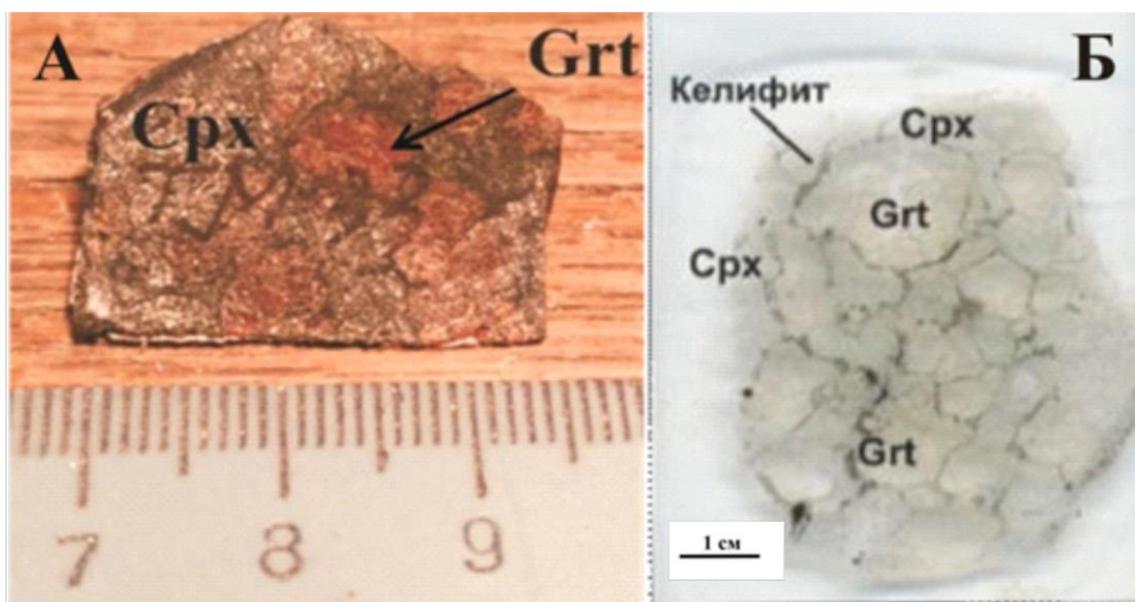


Рис. 4.11. Зернистый ксенолит эклогита: А) – ксенолит эклогита; Б) – ярко выраженные келифитовые каймы вокруг граната, шлиф плоскополированный (обр. ТМ-33, трубка Мир)

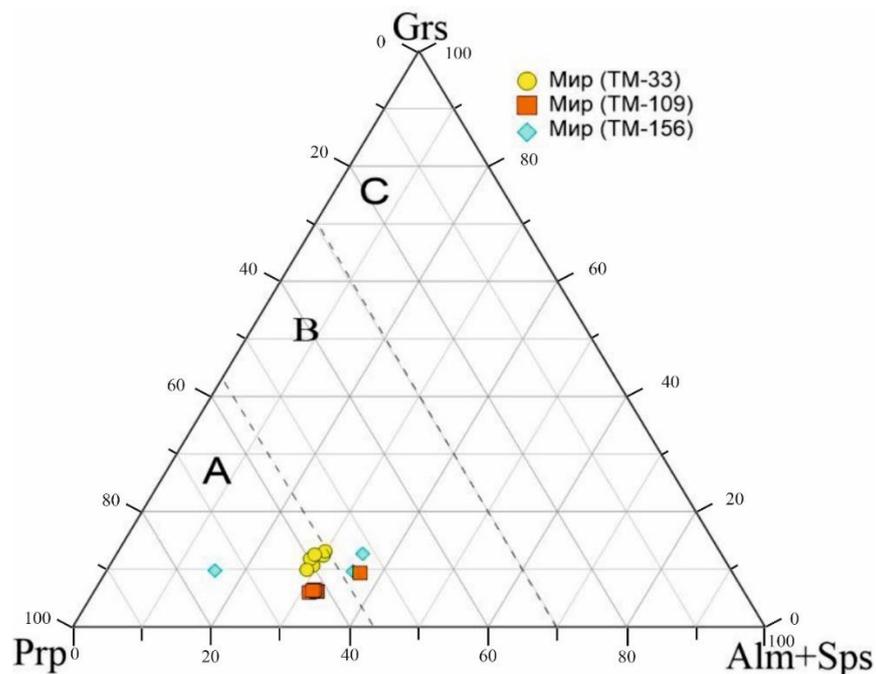


Рис.4.12. Треугольная диаграмма составов гранатов эклогитового парагенезиса. Поле составов гранатов эклогитов и гроспидитов из кимберлитовых трубок Якутии построено по литературным данным [Sobolev et al., 1968; Соболев, 1974; Sobolev et al., 1994; Beard et al., 1996; Snyder et al., 1997; Taylor et al., 2003; Spetsius, 2004].

Состав *клинопироксена* в эклогитовых ксенолитах варьирует по содержанию жадеитового и диопсидового компонентов $Di_{55-60}Jd_{32-53}Aeg_{0-6}$ (**Приложение А - Таблица 4.8**). Клинопироксен образует вытянутые зерна, внутри минерала отмечаются структуры распада, которые сложены ильменитом и рутилом (рис.4.13 б). По периферии и внутри зерен клинопироксена наблюдаются сильно замещенные участки, которые сложены вторичными минералами (преимущественно карбонатом, серпентином и хлоритом). В межзерновых пространствах граната и клинопироксена встречаются сульфиды (*джерфшиерит* и *пентландит*), которые представлены зернами размером до 1 мм (рис.4.14).

Амфибол в ксенолитах данного типа пород наблюдается по периферии (в келифитовых каймах) и в зонах вторичных изменений минералов. По составу амфиболы соответствуют кальциевому (эдениту и паргаситу), натриево-кальциевым (катофориту) и Mg-Fe-Mn (куммингтониту) (**Таблица 4.11, Приложение А**). Содержания TiO_2 (0,23-2,39 мас.%), Na_2O (3,17-5,36 мас.%) и K_2O (0,34- 1,02 мас.%). В отличие от других типов пород в ксенолитах эклогитового парагенезиса в составе амфибола содержание Cr_2O_3 близко к нулю, за исключением одного образца (обр. ТМ-109), где Cr_2O_3 достигает (0,25 мас.%).

Джерфшиерит отмечается в интерстициях минералов, с составом главных оксидов в мас. %: FeO 33,22-43,33; Ni 6,32-17,06; Co 0,13-0,98; Cu 1-6,63; K 8,19-9,45; S 29,38-34,56 (**Таблица 4.12, Приложение А**).

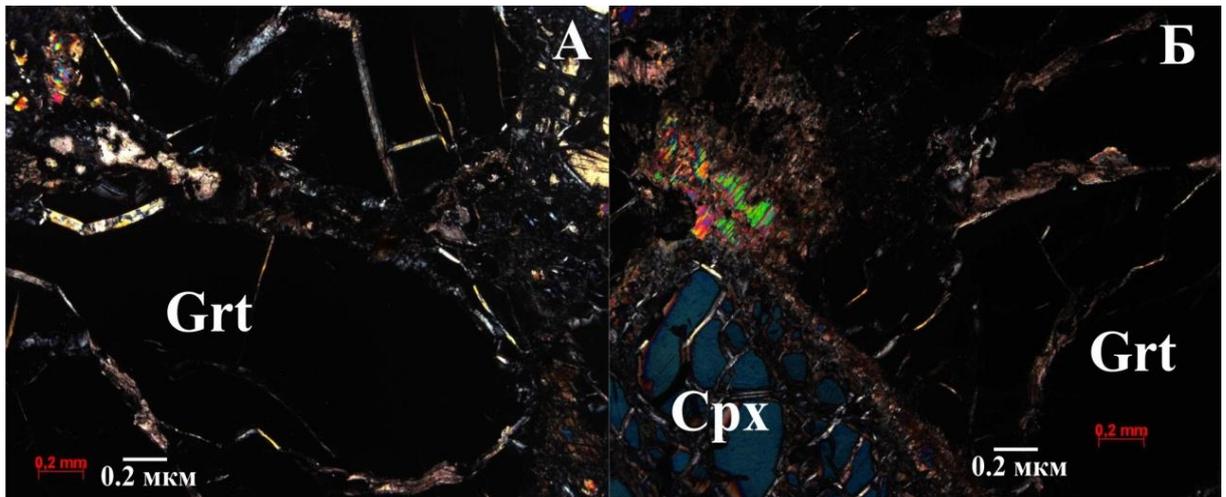


Рис. 4.13. Наложенные вторичные изменения в зернах граната и клинопироксена: А) –трещины вторичных минералов внутри зерен граната ; Б) – сильно измененные зерна клинопироксена на контакте с гранатом. Ксенолит эклогита (обр. ТМ–33, трубка Мир). Скращенные николи, проходящий свет.

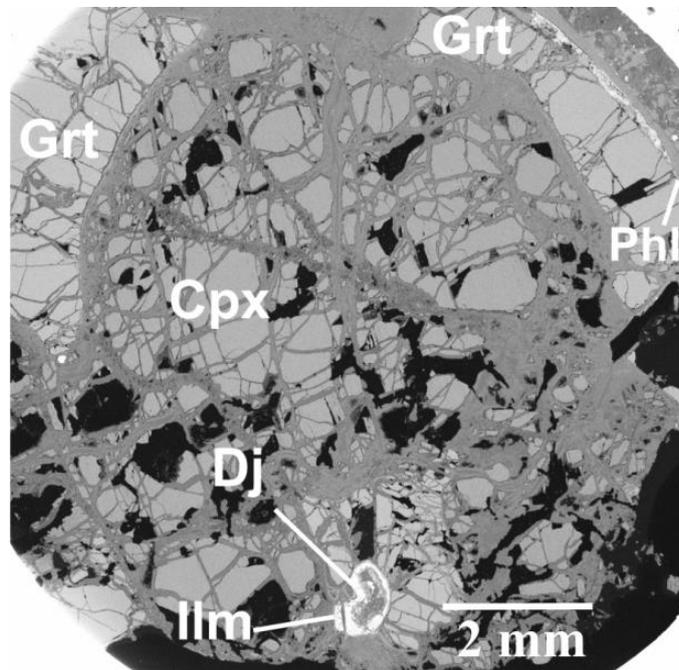


Рис. 4.14. Каймы флогопитового состава по периферии граната. Отдельные включения джерфишера и ильменита в межзерновом пространстве зерен клинопироксена и граната. Ксенолит эклогита (ТМ-156, трубка мир). Изображение в обратно рассеянных электронах.

Глава 5. Структуры распада в породообразующих минералах

5. Краткий литературный обзор структур распада в породообразующих минералах

Состав, условия образования и стадийность формирования структур распада были хорошо изучены и исследованы в мантийных ксенолитах ЯАП [Лазько, 1983; Jerde et al., 1993; Соловьева и др., 1994; Taylor et al., 2003; Roden et al., 2006; Гаранин и др., 2011; Бобров и др., 2012; Alifirova et al., 2012; Alifirova et al., 2015; Spengler et al., 2019]. Морфология минералов, образовавшихся в результате распада твердых растворов на ранних стадиях, определяется кристаллической структурой минерала-хозяина [Хисина, 1987; Boudeulle, 1994].

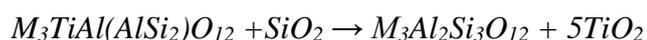
Например, в пироксенах минералы кубической сингонии (гранат, шпинелиды), минералы средней категории (рутил, ильменит) имеют удлиненную и/или пластинчатую морфологию. Однако в результате процесса перекристаллизации эти минералы могут преобразовываться в изометричные или вытянутые зерна. Ильменит в пироксенах способен длительное время находиться в виде тонких пластинок. При выпадении пироксенов преобразование структур распада происходит быстрее в результате сходства кристаллических структур орто- и клинопироксена [Champness, Lorimer, 1973; Патнис, МакКоннелл, 1983].

Ориентирование структур распада в гранатах обусловлено пространственным расположением катионов Ti^{4+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , Si^{4+} , занимающих октаэдрические позиции. При рассмотрении структур распада в зернах граната видно, что их содержание (как правило), значительно ниже по сравнению с орто- и клинопироксеном, что может быть обусловлено более низким составом в них изоморфных примесей, участвующих в реакциях распада. Взаимоотношения минералов указывают, что продукты распада в исследованных ксенолитах, обычно проявляются в последовательном укрупнении тонких ламелей до пластинок [Ried et al., 1986; Соловьева и др., 1994; Spengler et al., 2006; 2019; Alifirova et al., 2012; Alifirova et al., 2015].

Минералы, найденные в продуктах распада граната, отличаются по своей кристаллической структуре от самого граната, их выпадение обусловлено реакциями распада с участием определенных изоморфных компонентов, что подтверждено экспериментально [Boudeulle, 1994]. Находки указанных минералов в структурах распада не противоречат кристаллографическим и термодинамическим принципам теории образования твердых растворов [Boudeulle, 1994; Alifirova et al., 2015].

Наблюдаемые в гранатах тонкие структуры распада, вероятнее всего, представляют собой продукты распада, сохранившиеся на начальных стадиях образования [Афанасьев и др., 1998; Alifirova et al., 2012; Alifirova et al., 2015]. Наличие дефектов определяет ход распада исходного граната [van Roermund et al., 2000; Алифирова, 2015].

Наличие ламелей рутила и ильменита в гранате может быть результатом распада граната, обогащенного Ti [Бобриевич и др., 1959; Соболев, 1974], в ходе реакции:



В работе Алифировой с соавторами [Alifirova et al., 2015, Spengler et al., 2019] исследованы ксенолиты эклогитового парагенезиса из центральной части Сибирского кратона (кимберлитовые трубки Удачная и Зарница), а также перидотиты, пироксениты и эклогиты северо-восточной окраины (трубка Обнаженная).

Гранат и клинопироксен демонстрируют явные эксоллюзионные структуры распада, в которых зерна граната содержат ориентированные включения игл рутила, ильменита, апатита и кварца/коэсита. Из клинопироксена выпадает рутил (\pm ильменит) и апатит.

В статье [Соловьевой и др., 1994] были изучены пироксенитовые серии из трех трубок ЯАП (Мир, Удачная и Обнаженная) и установлены стадии последовательной перекристаллизации. После формирования мегакристаллов наблюдались выделение структур распада и их дальнейшее укрупнение. Последней стадией формирования эксоллюзионных структур является процесс их перекристаллизации [Huang et al., 2007]. Также Соловьевой Л.В. с соавторами [Соловьева и др., 1994] эмпирически была выделена последовательность распада первичных пироксеновых мегакристаллов. Высокотемпературный гомогенный пироксен имел пижонитовый состав (Ca при высоких температурах входит в структуру ортопироксена и приводит к понижению сингонии кристаллической решетки до моноклинной), затем при охлаждении он распадался на два пироксена (ортопироксен и клинопироксен), после чего выделялись гранат \pm шпинель \pm ильменит \pm рутил. Соотношение пластинок распада двух пироксенов варьируется в мегакристаллах клинопироксена от 95 до 45% Crx (Orx, соответственно, от 5–55% и до 10% Crx).

При дальнейших исследованиях мантийных пород и развитии методов исследования минералов было установлено более широкое распространение пироксенов

и гранатов со структурами распада твердых растворов в различных парагенезисах. В частности, структуры распада твердых растворов в слагающих их минералах были отмечены в эклогитах [Lappin, 1973; Sautter et al., 1988, 1990; Haggerty et al., 1990; Shatsky et al., 2008], перидотитах [Van Roermund, Drury, 1998; Dawson, 2004], в пироксенитах и вебстеритах [Griffin et al., 1984; Sen et al., 1988; Zhang et al., 2003], а также в мегакристаллах [Aoki et al., 1980; Wang et al., 1999] и во включениях в алмазах [Moore et al., 1985; Sobolev et al., 2000; Harte et al., 2007; Зедгенизов и др., 2015].

Рамановские спектроскопические исследования выпадения кварца и коэсита в порфиробластах граната подтверждают гипотезу о происхождении распада в процессе снижения температуры и давления. На основании минералогических данных авторы предполагают, что породы подвергались ступенчатой декомпрессии и охлаждению внутри мантийного резервуара [Alifirova et al., 2015]. Мантийные ксенолиты, минералы которых содержат структуры распада, являются наиболее ценным источником информации о составе и стабильности предшествующих фаз и о их преобразовании в зависимости от окружающей среды (температуры, давления и фугитивности кислорода) [Alifirova et al., 2015].

В связи с особо проявленным интересом к *эклогитовому типу пород*, как потенциальным носителям алмазов, были изучены многочисленные ксенолиты со структурами распада в гранате и клинопироксене из кимберлитов Якутии [Jerde et al., 1993; Taylor et al., 2003], Южной Африки [Harte and Gurney, 1975; Sautter and Harte, 1990; Schmickler et al., 2004]. Гранаты из мантии сверхвысоких метаморфических эклогитов, обычно содержат ориентированные включения рутила и/или клинопироксена, которые рассматриваются как результат выпадения *высоко-Ti-граната* [Griffin et al., 1971].

Следует отметить, что ламели граната в клинопироксене являются, вероятно, наиболее распространенным типом структур распада, обнаруженным в ксенолитах эклогитового парагенезиса в мантии [например, Smyth et al., 1984; Jerde et al., 1993].

5.1. Структуры распада в породообразующих минералах ксенолитов

Структуры распада в гранатах и пироксенах были исследованы в ксенолитах перидотитового (3 образца из трубки Мир и 11 из трубки Обнаженная), пироксенитового (3 образца из трубки Мир и 4 из трубки Обнаженная) и эклогитового (2 образца из трубки Мир) парагенезисов.

5.1.1. Структуры распада в зернах граната

В крупных зернах граната продукты распада распределены как хаотично, так и равномерно по всему объему зерна, и обычно содержат до 1 об.% экссолюционных продуктов (ЭП), которые преимущественно представлены рутилом и ильменитом. Редко распределение продуктов распада приурочено к центральным частям, в большинстве случаев иглы минералов наблюдаются по всему объему, при этом следует отметить различные вариации размерности и морфологии телец распада. Выделяются области одновременно с длинными и короткими иглами. Несмотря на то, что в трубке Мир и Обнаженная минеральные ассоциации в структурах распада представлены практически идентичными фазами – рутилом и ильменитом, интенсивность проявления распада различна.

В минералах из ксенолитов алмазоносной трубки Мир структуры распада чаще представлены тонкими (зачаточными) иглами толщиной менее 1 мкм и длиной от 3 до 5 мкм. В кимберлитовой трубке Обнаженная интенсивность образования в минералах структур распада значительно шире, и наблюдаются укрупнения в размере от 1 до 5 мкм и до 100-800 мкм в длине (рис. 5.1).

В гранатах присутствуют моно- и полиминеральные продукты распада. Минеральный состав структур распада в зернах граната из ксенолитов двух трубок представлен в **Таблице № 5.1.**

Таблица 5.1. Минералы структур распада в зернах граната из ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов, трубок Мир и Обнаженная

| Минерал-хозяин | Перидотитовый парагенезис | Пироксенитовый парагенезис пород | Эклогитовый парагенезис пород |
|----------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Гранат | Rt Ilm | Rt Ilm Cpx | Rt Ilm |

Рутил и ильменит являются наиболее распространенными минералами в структурах распада граната (рис.5.1). Рутил наблюдается в виде игл от бледно-зеленых до желто-буроватых цветов. Объемная доля рутила в структурах распада граната составляет до 1 об.%. Рутил и ильменит присутствуют в зернах граната лерцолитового,

вебстеритового и эклогитового парагенезисов (рис.5.1), где они образуют обособленные друг от друга иглы, срастания между собой (рис.5.1 б; г), продолжения зерен друг друга. Нередким является нахождение игл ильменита в более крупных ламелях рутила, а также включение игл рутила в клинопироксене (рис. 5.1 е). В проходящем свете рутил имеет косое погасание (скрещенные николи).

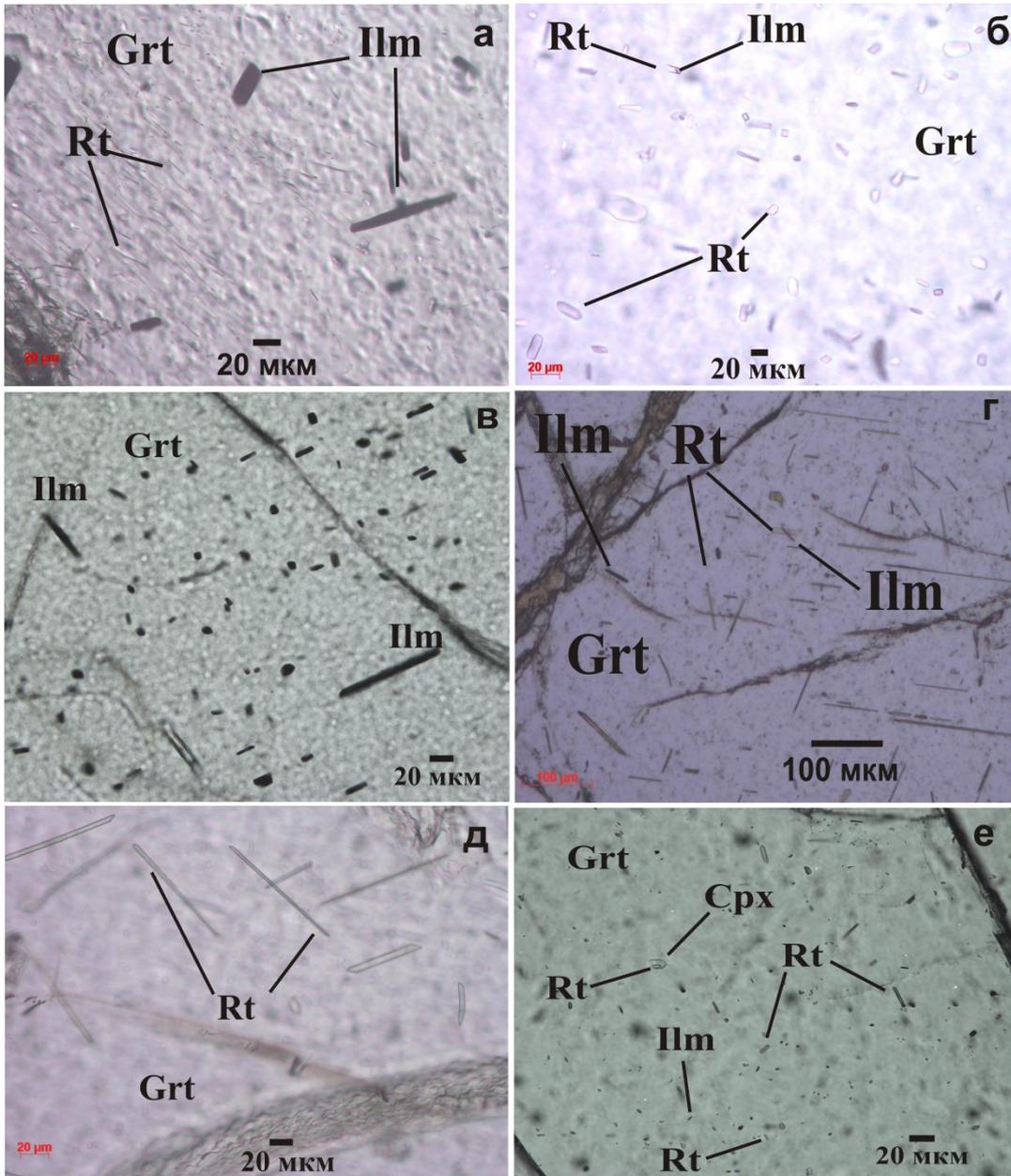


Рис.5.1. Продукты распада в гранатах (проходящий свет): А) – зачаточные (тонкие) иглы рутила и ильменита (гранатовый перидотит, обр. ТМ-44, трубка Мир); Б) – зачаточные (тонкие) иглы рутила (гранатовый вебстерит, обр. ТМ-126, трубка Мир); В) – хорошо выраженные иглы ильменита (гранатовый вебстерит, обр. 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).

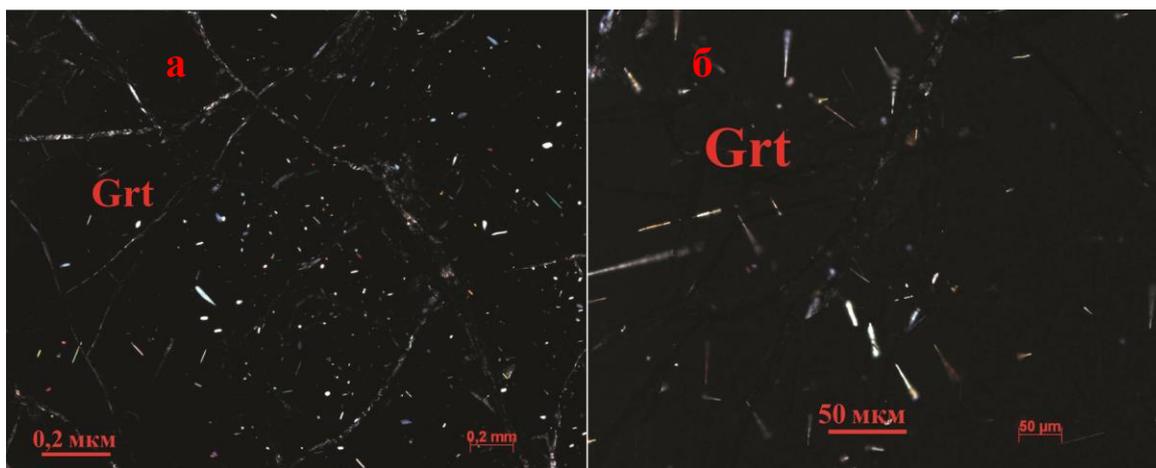


Рис. 5.2. Структуры распада рутила в гранате: А)- гранатовый лерцолит, обр. ТМ–90, трубка Мир; Б)- гранатовый лерцолит, обр. ТО–281, трубка Обнаженная. Скращенные николи, проходящий свет.

Рутил формирует иглы толщиной от 0,8 до 5 мкм и длиной до 100 мкм. В структурах распада минерал образует составные продукты с клинопироксеном и ильменитом. Рутил наблюдается в форме: а) игл (рис.5.1; рис. 5.2); б) пластинок; в) срастаний нескольких игл; д) срастания с другими минералами.

Следующим по распространенности в структурах распада является ильменит, который образует совместные срастания с рутилом (рис.5.1). Ильменит отмечается в виде: а) длинных и коротких игл; б) реже – крупных пластинок.

5.1.2. Структуры распада в зернах клинопироксена

Основными минералами в структурах распада клинопироксена (рис.5.3) являются рутил, ильменит. Наблюдались также включения единичных бочонковидных зерен апатита, округлых зерен граната и шпинелида. Объемное содержание структур распада составляет от 1 до 3 об. %. Морфология структур распада в клинопироксене более разнообразна, чем в зернах граната и представлена в виде: а) очень тонких (зачаточных) игл (толщиной менее 1 мкм, длиной 3–10 мкм); б) тонких игл (толщиной 2–5 мкм и длиной 10–100 мкм); в) крупных пластинок и/или линз (толщиной до 150 мкм и длиной до 250 мкм).

В минералах из ксенолитов высокоалмазонасной трубки Мир структуры распада встречаются редко, преимущественно представлены иглами рутила и ильменита (рис.5.4 а), либо отмечаются в виде слабо проявленных (зачаточных) игл рутила (рис.5.4 б).

сравнению со структурами распада в минералах из трубки Обнаженная, где преобладают хорошо выраженные иглы рутила, ильменита и апатита (рис.5.4 в–г).

Одним из главных минералов, который встречается в структурах распада клинопироксена, являются ортопироксен (рис.5.3). Его ламели занимают от 1 до 2 об.% в минерале-хозяине, они идентифицированы в клинопироксенах из ксенолитов перидотитового и пироксенитового парагенезиса, где образуют совместные сростания с игольчатым рутилом, ильменитом и хромитом.

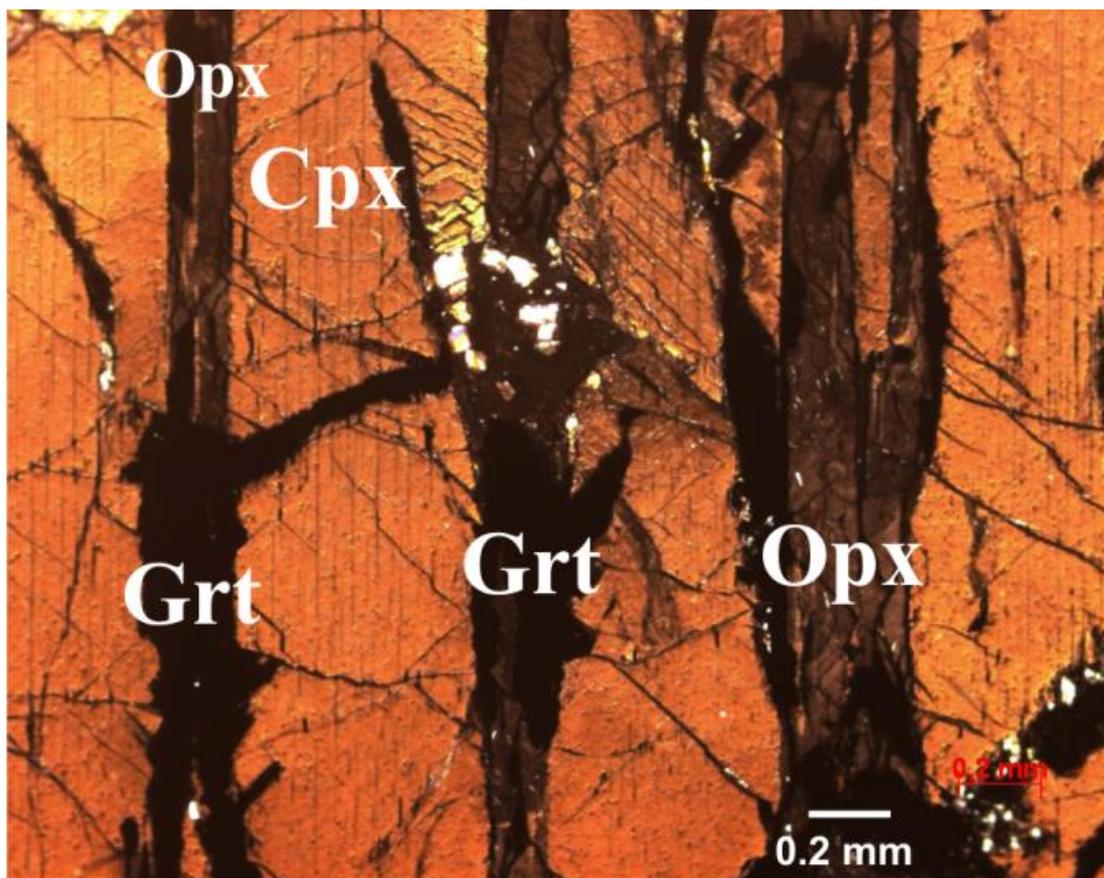


Рис. 5.3. Структуры распада граната и ортопироксена в клинопироксене. Гранатовый лерцолит, обр. ТО-69, трубка Обнаженная. Скрещенные николи, проходящий свет.

Иглы и пластинки рутила найдены в продуктах распада клинопироксена в 8 образцах из пород перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов. Рутил не наблюдается в структурах распада, где идентифицирован хромит, чаще всего он встречается совместно с ильменитом или ортопироксеном. По объемному содержанию, рутил в структурах распада клинопироксена занимает около 1-2 об.%. Иглы рутила широко проявлены в минералах из ксенолитов неалмазоносной трубки Обнаженная, редко отмечаются в трубке Мир.

Цвет рутила изменяется от светлого до желто-коричневого. По морфологии выделяются: а) зачаточные иглы шириной менее 1 мкм и длиной 10–100 мкм; б) пластинки неправильной формы в сростаниях с другими минералами, чаще всего с ильменитом, где ширина их достигает 10–30 мкм, длина - 250 мкм. Наиболее часто, внутри крупных пластинок рутила отмечается ильменит.

Ильменит в структурах распада клинопироксена выявлен в 7 ксенолитах (преимущественно из трубки Обнаженная) перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов, где его количество достигает 2 об.%. По морфологии выделяются: а) тонкие иглы длиной от 10–30 мкм и не более 1 мкм толщиной; б) вытянутые пластинки длиной не более 100 мкм, толщиной до 15 мкм. В отличие от перидотитового и пироксенитового парагенезисов пород, ильменит в клинопироксене эклогитов присутствует в виде тонких игл, чаще всего образует сростания с рутилом.

Апатит в структурах распада клинопироксена встречается в виде единичных включений в ксенолитах перидотитового парагенезиса (рис.5.4 г).

Шпинелиды в структурах распада породообразующих минералов представлены короткопризматическими и вытянутыми иглами от 2–50 мкм длиной и от 1–3 мкм толщиной, а также в виде самостоятельных ламелей, перпендикулярных направлению спайности. Минералы из структур распада клинопироксена представлены в **Таблице 5.2.**

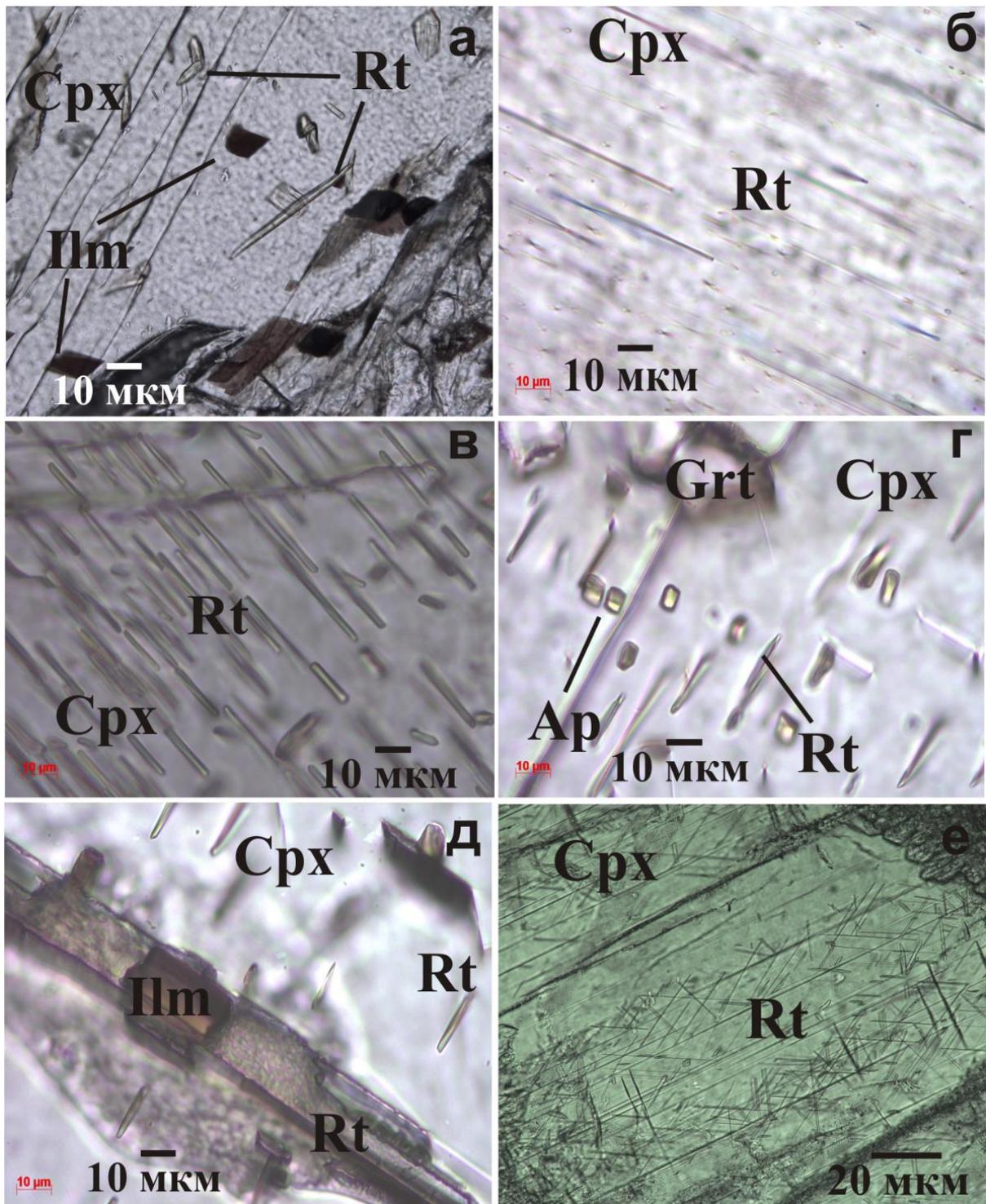


Рис. 5.4. Продукты распада в клинопироксене (проходящий свет): А) – структуры распада ильменита и рутила (эжюлит, обр. ТМ-109, трубка Мир); Б) – ориентированные тонкие иглы рутила (гранат-шпинелевый лерцолит, обр. ТО-212, трубка Обнаженная); В) – ориентированные иглы рутила (шпинелевый лерцолит ТО-91, 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).

5.1.3. Тонкие (зачаточные) структуры распада в гранатах и клинопироксенах

Интересно отметить в образцах наличие тонких (зачаточных) структур распада размером менее 1 мкм в гранатах и клинопироксенах. Длина мелких включений не превышает 5 мкм. Тонкие (зачаточные) структуры распада отмечены в гранатах (рис.5.1 а) и клинопироксенах из трубки Мир (рис.5.4 а), и не характерны для минералов из трубки Обнаженная. Ксенолиты, содержащие гранат и клинопироксен с подобными структурами, представлены перидотитовыми и пироксенитовыми типами пород. В изученных образцах зачаточные структуры не приурочены к зонам роста или отдельным участкам вмещающих гранатов и равномерно распределены по зерну. Зачаточные структуры распада чаще всего наблюдаются обособленно, без дополнительных развитых структур распада.

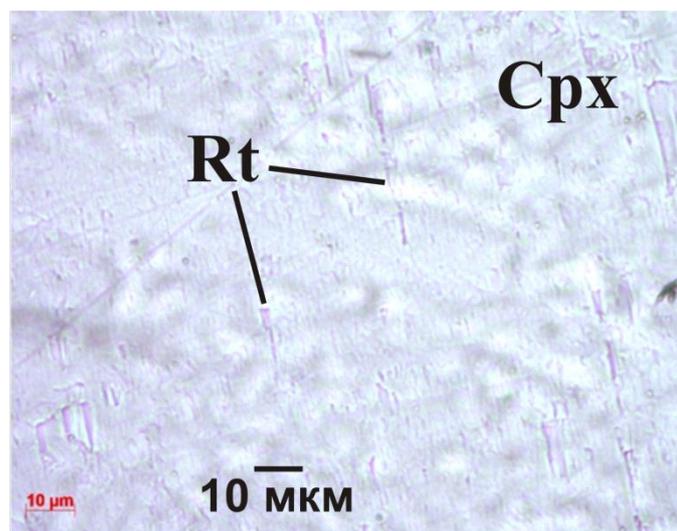


Рис. 5.5. Продукты распада в клинопироксене (проходящий свет). Тонкие (зачаточные) структуры распада рутила, гранатовый лерцолит, (обр. ТМ–132, трубка Мир)

В большинстве образцов, которые изучены в настоящей работе, *не удается* идентифицировать фазы в тонких структурах распада с помощью доступных методов исследований.

Таблица 5.2. Минералы в структурах распада пироксена из ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезиса.

| Минерал-хозяин | Перидотитовый тип парагенезиса | Пироксенитовый тип парагенезиса | Эклогитовый тип парагенезиса |
|----------------------|--|---------------------------------|------------------------------|
| Клинопироксен | TCP (Rt) Opx Spl Grt Ilm Rt Ap | Rt Ilm Opx Spl | Rt Ilm |
| Ортопироксен | Cpx Ilm Grt Spl Rt | Rt Ilm Spl Cpx | |

ТСР- тонкие структуры распада

5.1.4. Структуры распада в зернах ортопироксена

Структуры распада в ортопироксене из ксенолитов трубки Мир отсутствуют, тогда как в ортопироксене из трубки Обнаженная были обнаружены многочисленные продукты распада, которые сложены ламелями клинопироксена, шпинелидов и ильменита (рис.5.6). Объемная доля выпадения структур распада составляет от 1 до 5 об. %.

Структуры распада в ортопироксене развиты преимущественно в перидотитовом (рис.5.6 а; рис. 5.7) и пироксенитовом парагенезисах пород (рис.5.6 б). По морфологии выделяют: 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 клинопироксена (толщиной от 1–5 мкм и длиной до 100 мкм). В структурах распада ортопироксена отмечаются ламели клинопироксена, которые находятся в срастаниях с рутилом, ильменитом и шпинелидом.

Клинопироксен в структурах распада наблюдается в виде крупных ламелей длиной от 5 до 300 мкм и толщиной от 1 до 20 мкм. Ламели *рутила* обнаружены в одном образце из ксенолита гранатового лерцолита. По морфологии это тонкие иглы длиной до 1–5 мкм. Состав рутила в структурах распада минералов был определен качественно.

Ильменит образует срастания с клинопироксеном и редко самостоятельные иглы. По морфологии выделяют а) иглы толщиной от 1 до 2 мкм и до 150 мкм длиной; б) вытянутые и крупные пластинки толщиной до 5–10 мкм и длиной до 200–250 мкм.

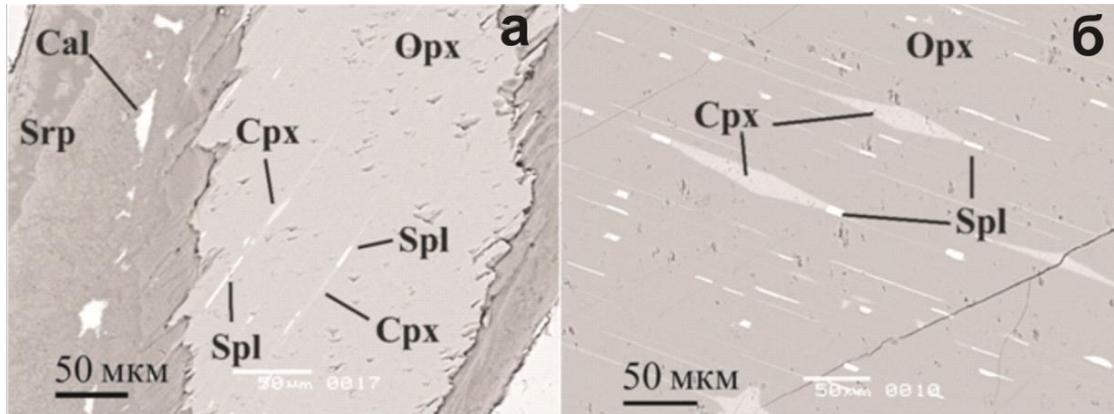


Рис. 5.6. Ориентированные структуры распада в ортопироксене: А) – составные ламели из клинопироксена и шпинели в ортопироксене (гранатовый лерцолит, обр. ТО–281, трубка Обнаженная); Б) – ламели клинопироксена и шпинели в ортопироксене (гранатовый вебстерит, обр. ТО–69, трубка Обнаженная). Изображение в обратно рассеянных электронах.

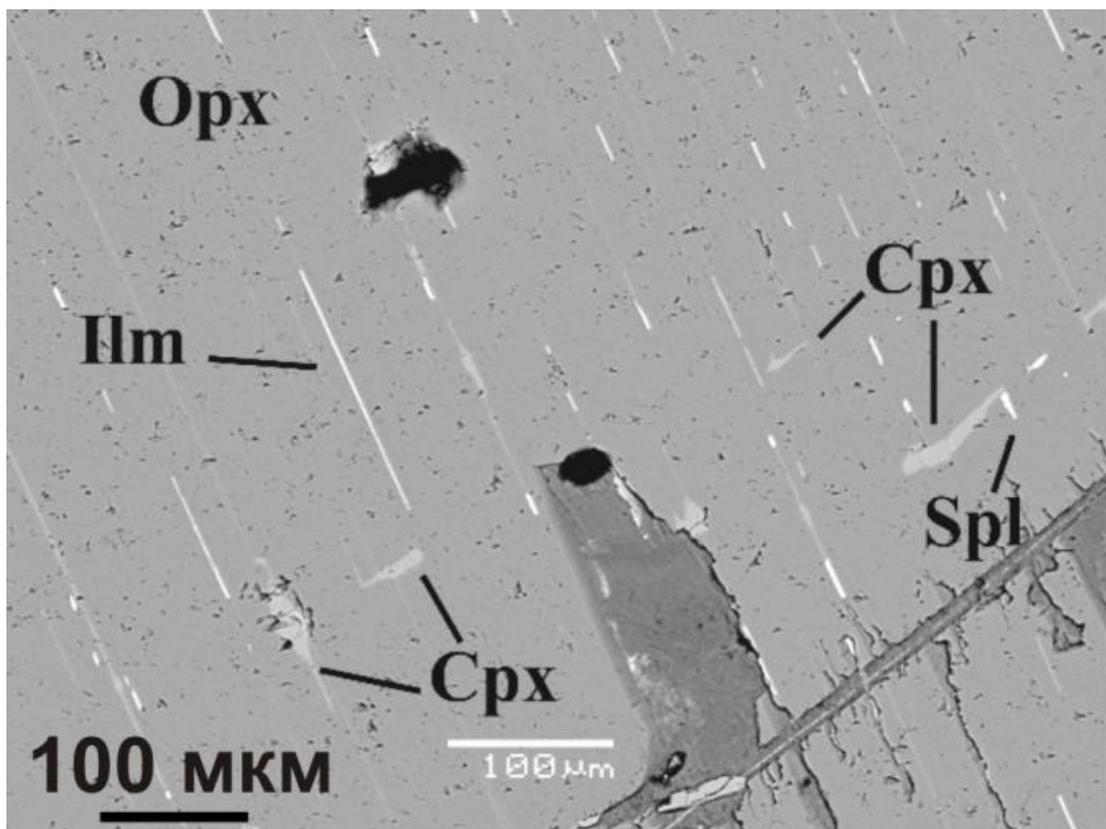


Рис.5.7. Ориентированные структуры распада клинопироксена, шпинели и ильменита в ортопироксене (гранатовый лерцолит, обр. ТО–281, трубка Обнаженная). Фото в обратно рассеянных электронах

Вытянутые иглы шпинелида наблюдались в 7 ксенолитах из гранатовых, гранат-шпинелевых лерцолитов и в одном образце гранатового вебстерита. По морфологии выделяются: а) короткопризматические иглы длиной от 2–20 мкм, толщиной до 2 мкм; б) иглы длиной до 100 мкм, толщиной не более 1 мкм; в) пластинки длиной до 500 мкм, толщиной не более 20 мкм.

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, что подтверждает различную природу этих структур. В трубке Мир идентифицированы преимущественно тонкие (либо зачаточные) структуры распада рутила и ильменита, тогда как в трубке Обнаженная в зернах граната и пироксенов преобладают большие хорошо выраженные иглы, представленные рутилом, ильменитом, шпинелью, апатитом, орто- и клинопироксеном. Можно предположить, что процесс выпадения структур распада в минералах из двух трубок отличался по длительности. Сохранение в трубке Мир тонких экссолюционных структур, возможно свидетельствует о сравнительно быстрых процессах кристаллизации в минералах мантийных ксенолитов. В трубке Обнаженная иглы более развиты по морфологии и минеральному составу.

Исходя из описанных в настоящей работе структур распада можно выделить последующую схему выпадения структур распада: сначала образовались тонкие ламели, потом появляются более крупные, что приводит к увеличению объема продуктов распада. По результатам минералого-петрографических исследований ксенолитов, в которых были идентифицированы структуры распада можно прийти к выводу, что они формируются на начальных стадиях и принадлежат глубинным процессам, которые были переуравновешены в верхней мантии.

Глава 6. Процесс келифитизации минералов

6. 1. Краткий литературный обзор изученности келифитовых кайм

Помимо идентифицированных структур распада, в изученных образцах вокруг зерен граната отмечаются келифитовые каймы, которые являются свидетельством процесса проявления *кимберлитового метасоматоза*. В наибольшей степени каймы проявлены в местах интенсивного развития интерстиционных обособлений и микрожил [Шарыгин, 2014].

Процесс келифитизации широко отмечается на минералах из ксенолитов различных регионов, а также на территории ЯАП (например, Новинка, Комсомольская, Зимняя, Удачная, Мир, Обнаженная и другие). Вторичные изменения минералов из ксенолитов трубок Мир и Обнаженная связаны с воздействием кимберлитового расплава и выражаются серпентинизацией и карбонатизацией, которые проявлены в межзерновом пространстве и трещинах. Изучением процесса образования келифитовых кайм на минералах из ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов занимались многочисленные исследователи [Соболев и др., 1969; 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; Pokhilenko, 2021]. Первые упоминания о каймах на гранатах из перидотитов, появились в середине XIX в. [Delesse, 1850; Hochstetter, 1854]. Термин «келифит» впервые был использован Шрауфом [Schrauf, 1882], который считал это образование отдельной минеральной фазой. Этот же термин применял Хецнер [Hezner, 1903] для описания *венчатой структуры, развитой по периферии гранатов из эклогитов*. История изучения келифитовых кайм подробно описана Годардом и Мартином [Godard, Martin, 2000].

В статье Обата [Obata, 2011] келифитовая кайма характеризуется как мелкозернистое волокнистое *срастание пироксена, шпинели и амфибола*, окружающее зерна граната. Большинство изученных келифитовых кайм, развивающихся по периферии граната из метаморфических блоков пород [Godard, Martin, 2000; Obata, 2011], является результатом реакции между гранатом и соседними минералами (оливин, кварц, пироксен) в результате декомпрессии.

Следует отметить, что некоторые исследователи келифитовых кайм на гранатах из гранулитов вулкана Бакони-Балатонского [Degi et al., 2010] и щелочных базальтов провинции Ляонин и Шаньдун (Китай) [Zang et al., 1993] пришли к выводу, что процесс преобразования граната представляет собой *изохимическое разрушение*, вызванное резким повышением температуры и понижением давления. Келифитовые каймы на

гранатах также отмечались в перидотит-пироксенитовых интрузиях Богемского массива [Sobolev et al., 1962; Kharkiv et al., 1989] и в мантийных ксенолитах щелочно-ультраосновных интрузий, кимберлитах и кимберлит-содержащих гранатах из различных регионов мира [Kharkiv et al., 1989; Dawson et al., 1975]. Используя данные представительной коллекции образцов из кимберлитовых районов центральной и краевых частей Сибирской платформы, Харьков и Вишневский [Kharkiv et al., 1989] сделали вывод о том, что в каймах возникают в результате изохимической реакции, которые окружают гранатовые перидотиты.

Поздний метасоматический парагенезис проявлен в виде сложных реакционных кайм, которые образованы полиминеральными включениями в первичном гранате и пироксенах. Карсвелл с соавторами детально изучали в глубинных ксенолитах Лесото из трубки 200 [Carswell et al., 1977] реакционные каймы на гранате, которые в своем составе имеют мелкие зерна флогопита, шпинели и клинопирокена. Также, в кимберлитовой трубке Удачная обнаруживаются признаки химически неравновесного процесса [Соловьева и др., 1984б, 1985].

Существует определенная предрасположенность в проявлении и интенсивности позднего метасоматизма к более глубинным парагенезисам, а также непосредственная связь между развитием этого процесса и процессами плавления, что свидетельствует об этапе переработки блоков в мантии под влиянием метасоматизирующих агентов еще до попадания породы в виде ксенолита в кимберлитовый расплав [Соловьева и др., 1985, 1989].

Состав келифитовых кайм свидетельствует о структурных и вещественных преобразованиях при пониженных РТ-параметрах по сравнению с первичными процессами образования кимберлитов [Илупин и др., 1969; Харьков и др., 1973; Тронева и др., 1979; Харьков и др., 1989]. Реакционные каймы на пирропах и других минералах образуются как в ксенолитах, так и в кимберлитах, что объясняется существенным понижением температуры плавления на границе зерен двух минеральных фаз, поэтому можно предположить, что проникновение в ксенолит флюидов было вызвано перемещением ксенолитов магмой.

Присутствие *флогопит-хромшпинелевых* оторочек свидетельствует о более глубинных условиях попадания высокохромистого пирропа в неравновесные условия. В результате реакций при формировании кайм происходит привнос K_2O , Na_2O и TiO_2 , сопровождающийся выносом CaO и SiO_2 , что связывается напрямую с воздействием на гранат флюидов, которые обогащены водно-щелочными компонентами. Многие

исследователи предполагают, что обогащение К возникает уже в мантии и приводит к появлению флогопитовых перидотитов с ильменитом [Соболев 1972; Харьков и др., 1979; Вишневский и др., 1984].

В менее глубинных условиях сохраняется водно-щелочной характер флюидов, которые воздействуют на гранат, при этом появляются $Orx+Cpx+Spl$ ассоциации в каймах. Возможно, что данный процесс продолжает эволюционировать в направлении обогащения СаО, кроме того, в остаточной магме накапливается К, который способствует формированию флогопита поздних генераций.

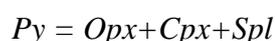
Процесс келифитизации носит *замкнутый характер*, классический пример – реакция между $Py+Ol$ с образованием $Crx+Orx+Spl$ каймы, которая подробно описана в работе [Lock et al., 1980; Вишневский и др., 1984]. Оригинальные данные, которые были получены по процессам келифитизации на пиробазах, позволили выделить устойчиво повторяющиеся высокотемпературные ассоциации [Вишневский и др., 1984]:



Было выделено два типа реакций келифитообразования. В первом случае процесс *носит замкнутый характер* и в зону привносятся Na_2O , K_2O , TiO_2 , H_2O [Вишневский и др., 1984]:



Другой процесс является следствием более глубокого химического взаимодействия пиробаз со средой, в которой находятся в достаточно подвижном состоянии такие компоненты как SiO_2 , TiO_2 , MnO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O :



В результате исследований келифитовых оторочек авторами была предложена модель двухэтапного изменения РТ- условий в процессе подъема кимберлита к поверхности: *I этап*: процесс подъема до относительно небольших глубин, где сначала на пиробазах формируются $Phl+CrSpl$ каймы, в дальнейшем, при относительно небольшом давлении продолжается процесс замещения граната, но только уже $Orx+Crx+Spl$ ассоциацией; *II этап*: понижение температуры кимберлитов на относительно небольших глубинах, в результате чего образуются *серпентин-карбонатные прожилки* [Вишневский и др., 1984; Харьков и др., 1989].

Сравнение минерального и химического состава, а также строения келифитовых кайм, позволяет выявить их специфические особенности и общие для всех парагенезов тенденции, приводящие к формированию различных типов кайм на минералах. Флогопит занимает важное место и присутствует практически во всех типах исследуемых кайм из ксенолитов.

Существует несколько точек зрения относительно механизма образования келифитовых кайм по периферии граната. В соответствии с этими точками зрения их формирование могло происходить: 1) в результате декомпрессии во время подъема кимберлитовой магмы в промежуточной камере [Franz et al., 1996; Barton et al., 2003]; 2) в процессе кимберлитового метасоматоза при реакции граната с кимберлитовым расплавом, проникавшим в ксенолиты [Шарыгин, 2014; Соловьев и др., 2019]; 3) в процессе мантийного метасоматоза в результате плавления периферийных зон граната, по которым распространялись глубинные флюиды [Илупина и др., 1969; Вишневецкий и др., 1984; Dawson, 1984; Харьков и др., 1988; 1989].

Исследователи, которые изучали образования келифитовых кайм на гранатах, считают, что сам процесс протекает в открытой системе с постоянно меняющимися РТ-параметрами [Шарыгин, 2014; Соловьев и др., 2019]. Присутствие в системе *флогопита* и *амфибола*, для кристаллизации которых необходимо наличие К, Na и H₂O, свидетельствует о том, что образование келифита происходило в расплаве или флюиде в результате декомпрессии граната при подъеме к поверхности. Поэтому наиболее реалистичной моделью на данный момент является модель келифитизации при реакции граната с кимберлитовым расплавом, проникавшим в перидотит во время подъема к поверхности.

Особенности позднего мантийного метасоматоза в глубинных ксенолитах из кимберлитов позволяют прийти к определенным выводам о природных процессах. Преимущественно поздние минералы развиваются по первичным в виде сложных кайм. В первичных минералах в зоне реакции устанавливаются признаки деструкции, также к зонам келифитовых оторочек приурочены участки плавления. Все эти факты указывают на неравновесный характер метасоматических реакций [Соловьев и др., 1989 б; Шарыгин, 2014].

Краткий литературный обзор дает представление о процессах, которые протекают в верхней мантии под воздействием мантийного и кимберлитового метасоматоза, а также о метасоматических агентах, который влияют на интенсивность изменений минералов и

пород в разных частях ЯАП на примере изученных ксенолитов из высокоалмазоносной трубки Мир и неалмазоносной трубки Обнаженная.

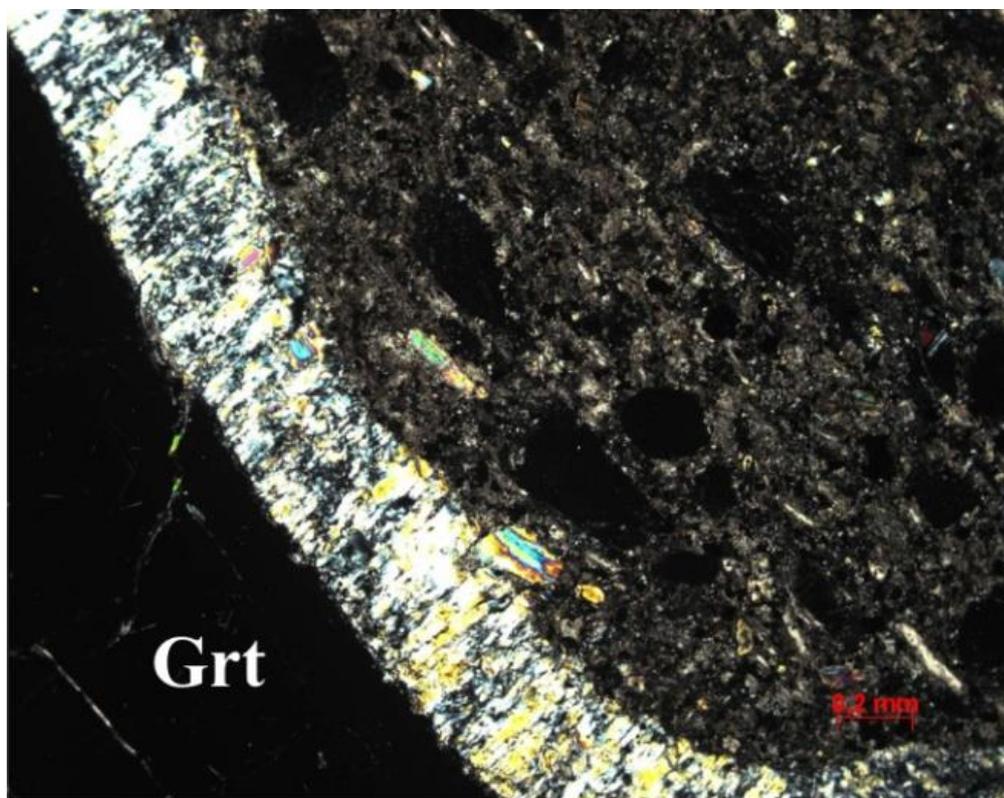


Рис.6.1 Мощная келифитовая кайма на контакте ксенолита с кимберлитом. Гранатовый лерцолит (обр. ТО-281, трубка Обнаженная). В скрещенных николях, проходящий свет.

6.2. Процесс формирования келифитовых кайм в перидотитах, пироксенитах и эклогитах из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная

На границе минеральных фаз отмечаются келифитовые каймы мощностью от 0.1 мкм до 250 мкм. В изученной коллекции мантийных ксенолитов наблюдаются преимущественно гранатсодержащие парагенезисы, по периферии которых, активно формируются келифитовые каймы. (Рис. 6.1)

Внутри зерен граната, оливина, клино- и ортопироксена развиты серпентиновые, серпентин-хлоритовые и серпентин-хлорит-карбонатные прожилки от мало- до крупных по мощности, которые образовались в результате воздействия близповерхностного кимберлитового расплава.

Полученные нами результаты в процессе исследования позволяют существенно дополнить и расширить знания о минеральном составе, строении и мощности келифитовых кайм, химических реакциях, при которых происходит их образование. В

заклучение описания и изучения келифитовых кайм на гранатах из различных типов пород двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная можно выделить признаки метасоматического воздействия.

Условные обозначения, принятые в данной главе: Prp – пироп; Di – диопсид; Crx – клинопироксен; Crx1 – реакционный клинопироксен; Орх – ортопироксен; Ol – оливин; Amph – амфибол; Spl – шпинель; Chr – хромит; Phl – флогопит; Ap – апатит; Cr-Mag – хром-магнетит; Pm – ильменит; Dj – джерфишерит; Mg-Pm – пикроильменит; Cal – кальцит; Srp – серпентин, Dol – доломит.

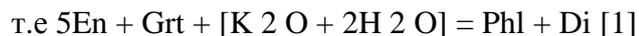
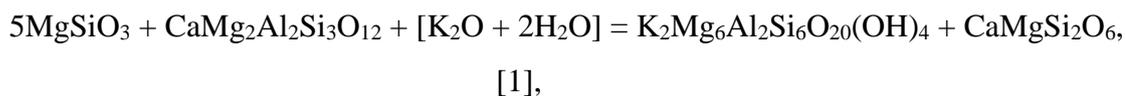
6.2.1 Келифитовые каймы на минералах перидотитового парагенезиса

Келифитовые каймы на гранатах были исследованы в ксенолитах перидотитового (9 образцов из трубки Мир и 8 из трубки Обнаженная), пироксенитового (8 образцов из трубки Мир и 5 из трубки Обнаженная) и эклогитового (4 образца из трубки Мир) парагенезисов.

В трубке Мир мощность кайм редко достигает 150 мкм, а сами каймы имеют агрегатное строение (без четко выраженных зон), которые сложены преимущественно флогопитом, амфиболом, неоднородными по составу зернами шпинелидов и редкими включениями зерен ортопироксена. Амфибол в каймах из перидотитового парагенезиса имеет состав кальциевого паргасита – эденита. Составы амфибола из кайм приводятся в **Приложение А - Таблица 4.9**. Флогопит в каймах из трубки Мир редко представлен хорошо выраженными чешуйками, преимущественно наблюдается агрегатное строение (Рис. 6.2).

Отличительной особенностью келифитовых кайм на минералах из трубки Мир перидотитового парагенезиса является включения неоднородных по составу зерен шпинелидов, например, образец ТМ-73 и ТМ-74 (рис.6.2), где центр более высокохромистый, а кайма высокоглиноземистая. Для наглядности была построена бинарная диаграмма соотношений $Al_2O_3-Cr_2O_3$ (рис.6.3), где хорошо прослеживаются отличия. Составы минеральных фаз из келифитовых кайм приведены в **Таблице 4**.

Процесс образования флогопита в мантийных породах происходит в результате взаимодействия обогащенного калием флюида. Формирование минеральных фаз в каймах объясняется следующими реакциями, которые были предложены [Kushiro, Aoki, 1968; Aoki, 1975]:



Перспективной для образования шпинели в каймах может быть следующая реакция:



где Spl – MgAl_2O_4 , Chr – MgCr_2O_4 , это объясняет не только образование шпинели, но и увеличение хромитовой составляющей в ней.

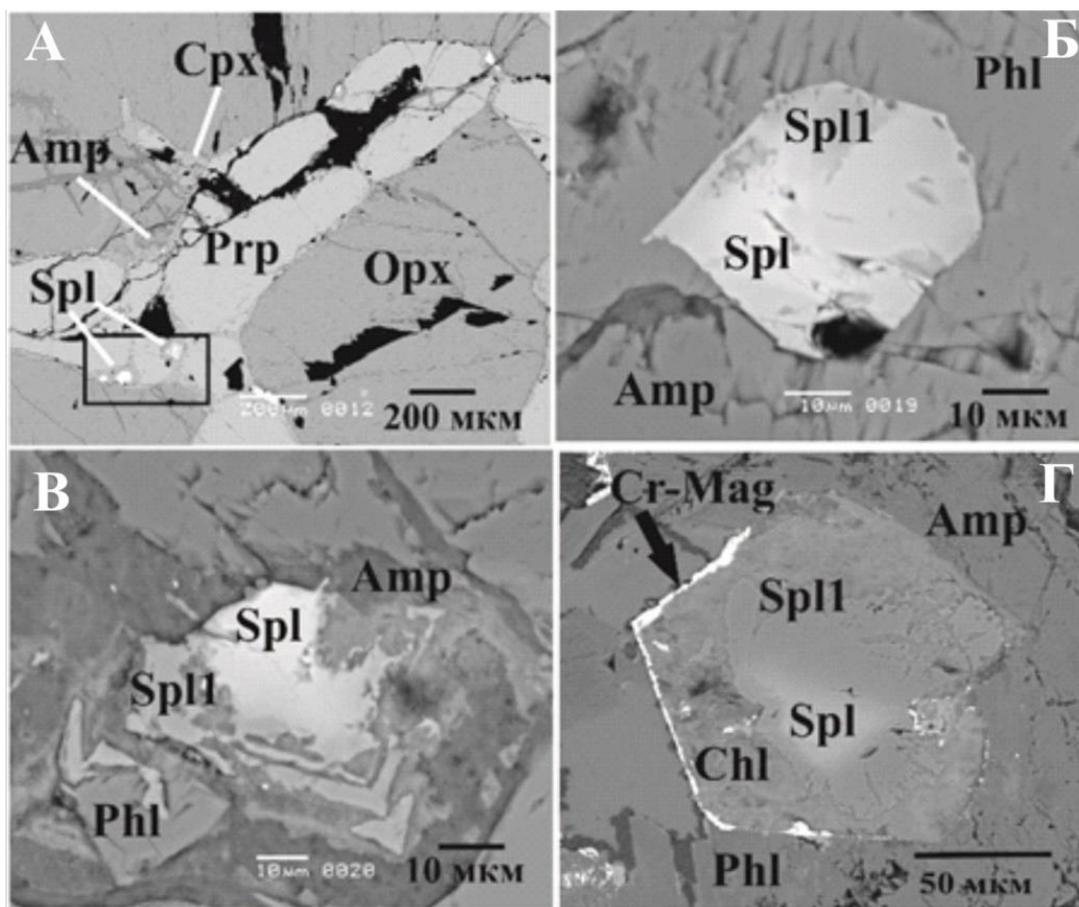


Рис.6.2. Келифитовые каймы с включениями неоднородных зерен шпинелидов: А)- общий вид келифитовой каймы вокруг граната, гранатовый лерцолит (обр. ТМ-74, трубка Мир); Б-В)- неоднородное зерно шпинелида в кайме, гранатовый лерцолит (обр. ТМ-74, трубка Мир); Г)- зональные зерна шпинелидов в амфибол-флогопитовых каймах, гранатовый лерцолит (обр. ТМ-73, трубка Мир).

Изображения в обратно рассеянных электронах.

В образце *гранатового лерцолита* (обр. ТМ-90, трубка Мир) наблюдается гранат, который погружен в серпентиновую матрицу. С одной стороны он находится на контакте с крупной пластинкой флогопита, в которой содержание TiO_2 составляет 1,48 мас. %. С другой стороны, зерно граната окружено тонкой от 0,1 до 0,5 мкм каймой

амфибола (кальциевого эденита) (рис.6.4 а), который образовался в результате реакции, предложенной в работе [Сафонов и др., Misra et al., 2004]:

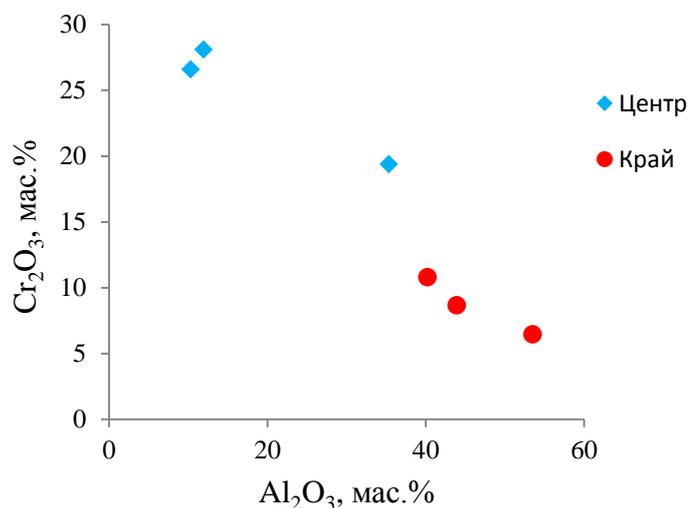
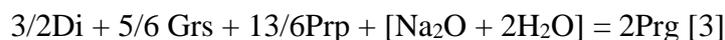


Рис.6.3. Бинарная диаграмма соотношений Al₂O₃–Cr₂O₃ в составах шпинелидов из кайм граната перидотитового парагенезиса в трубке Мир.

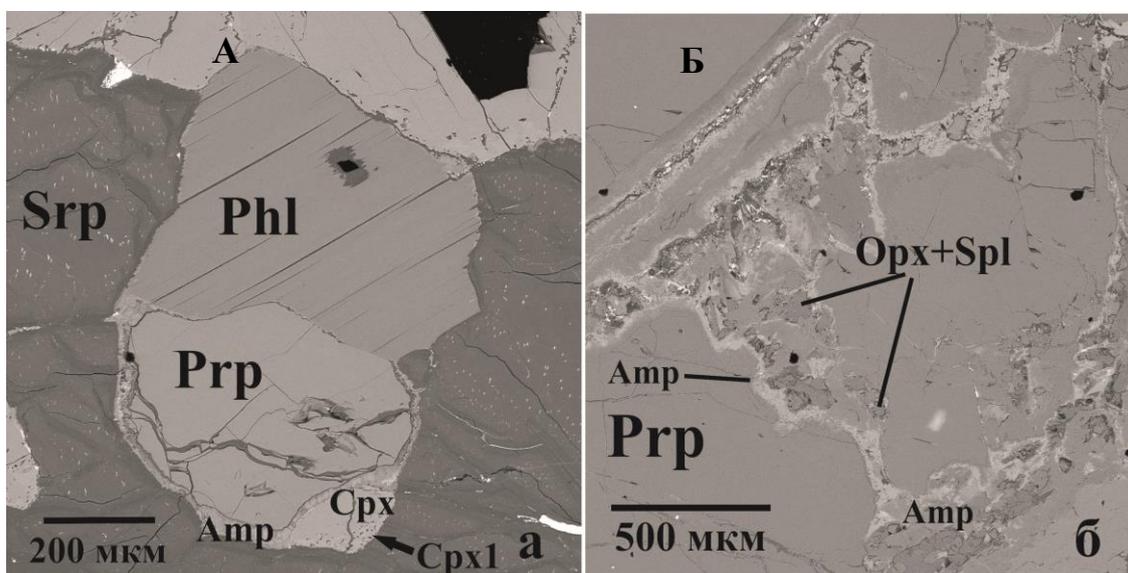


Рис. 6.4. Келифитовые каймы вокруг граната: А) – сростание крупной пластинки флогопита с гранатом; Б) – келифитовая кайма амфибол-ортопироксен-шпинелевого состава. Гранатовый зерцолит (обр. ТМ–90, трубка Мир). Изображения в обратно рассеянных электронах.

В этом же ксенолите (обр. ТМ–90, трубка Мир) был описан другой тип келифитовой каймы вокруг граната, которая состоит из амфибола (кальциевого паргасита и эденита), ортопироксена и включений шпинелида (рис.6.3 б). Минеральные фазы в каймах образуются в ходе следующей реакции [Kushiro and Aoki, 1968]:



Каймы на гранатах из трубки Обнаженная существенно отличаются от кайм, что были описаны в трубке Мир. В изученной коллекции мантийных ксенолитов из трубки Обнаженная имеется 4 ксенолита шпинелевых, 2 образца гранат-шпинелевых и 3 ксенолита гранатовых лерцолита.

Интересно, что в образце шпинелевого лерцолита (обр. ТО–91) и гранатового лерцолита (обр. ТО–281) наблюдаются идентичные минеральные фазы в составе келифитовых кайм (рис.6.5), но отмечаются отличия в составе непосредственно самого флогопита. Например, в образце шпинелевого лерцолита (обр. ТО–91) на контакте шпинелида с оливином более высокие содержания TiO_2 , но низкие Cr_2O_3 и Na_2O , тогда как состав флогопита, который развивается по периферии граната (обр. ТО–281) наоборот, отличается высоким концентрациями в нем Cr_2O_3 и Na_2O , но более низким TiO_2 (рис.6.6). Для наглядности были построены бинарные диаграммы соотношений $\text{TiO}_2\text{--Cr}_2\text{O}_3$ и $\text{Na}_2\text{O--K}_2\text{O}$. Процесс формирования в каймах флогопита, амфибола и вторичного кальцита соответствует реакции [Kushiro, Aoki, 1968]:

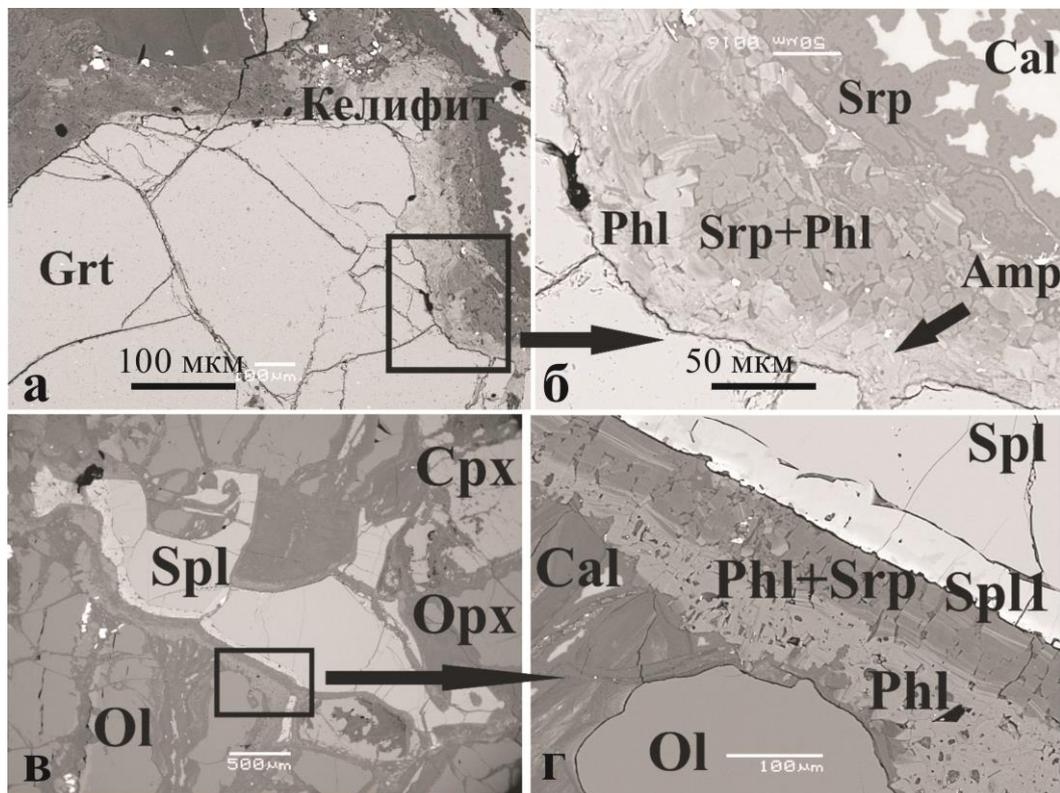


Рис. 6.5. Келифитовые каймы вокруг граната и неоднородного шпинелида: А–Б) – мощная и многослойная кайма флогопитового состава, гранатовый лерцолит (обр. ТО–281, трубка Обнаженная); В–

Г) — мощная кайма вокруг шпинелида, шпинелевый лерцолит (обр. ТО–91, трубка Обнаженная).
Изображения в обратно рассеянных электронах.

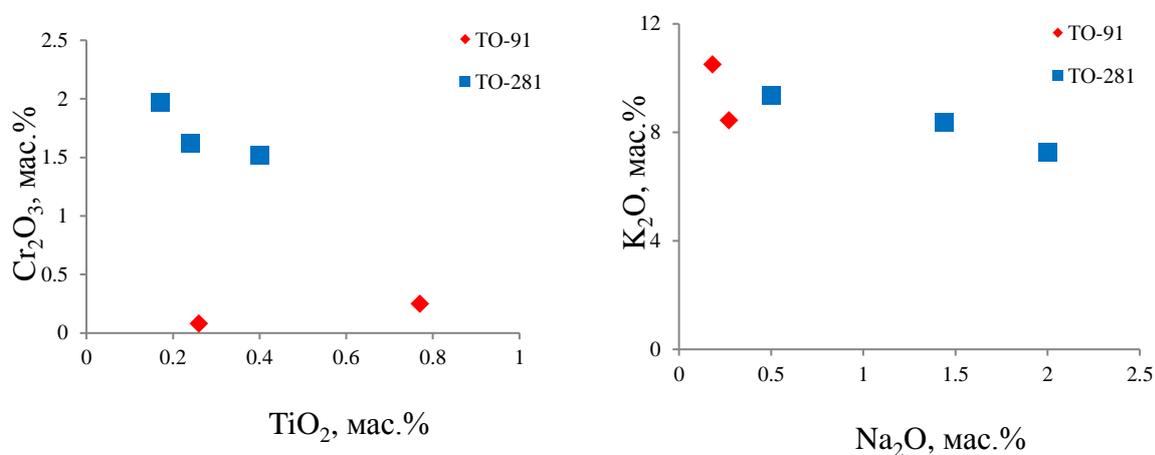


Рис.6.6. Бинарная диаграмма соотношений TiO₂–Cr₂O₃ и K₂O–Na₂O во флогопитах. Вариации состава (в мас. %) флогопита из кайм шпинелевого лерцолита (обр. ТО–91) и гранатового лерцолита (обр. ТО–281), трубка Обнаженная.

Минеральный состав келифитовых кайм, которые развиты на минералах перидотитового парагенезиса из двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная представлены различным фазами. В неалмазоносной трубки Обнаженная каймы преимущественно мощные, многослойные и преобладающий минерал в них, флогопит. С другой стороны каймы на минералах из трубки Мир маломощные, агрегатного строения и представлены неоднородными зернами шпинелидов, флогопита и амфибола.

6.3. Келифитовые каймы на минералах пироксенитового парагенезиса

Келифитовые каймы по периферии гранатов из ксенолитов пироксенитового парагенезиса трубок Мир и Обнаженной отличаются по минеральному составу от кайм, что описаны выше в перидотитовом типе пород.

Каймы на минералах из трубки Мир (рис.6.7 б) сложены клинопироксеном, флогопитом, шпинелью, реже встречаются амфиболы, в трубке Обнаженная в составе кайм присутствует преимущественно амфибол и флогопит (рис.6.7 а). Состав амфибола из кайм приводится в **Таблице 4.10, Приложение А**.

Рассмотрим отличия в составе кайм из трубок Мир и Обнаженная. В образце гранатового вебстерита (обр. ТМ–126) трубки Мир, зерна граната сильно трещиноваты и заполнены различными минеральными фазами, которые аналогичны составу келифитовых кайм (клинопироксен, флогопит, хромистая шпинель, в которой Al₂O₃,

Cr_2O_3 и TiO_2 составляют 5,87, 45,71 и 4,28 мас. %, соответственно). Флогопит в составе келифитовых кайм можно разделить на два типа: *I* – во внутренней части каймы (ближе к гранату-Phl1), обогащен Cr_2O_3 (2,32 мас. %) и FeO (9,22 мас. %), не содержит TiO_2 , содержание K_2O и Na_2O 5,42 и 1,13 мас. %, соответственно; флогопит *II типа* (Phl2) располагается во внешней части каймы и в нем отмечаются высокие концентрации K_2O (7,18–8,45 мас. %) и TiO_2 (до 1,45 мас. %), но с меньшими концентрациями Cr_2O_3 (1,33–1,43 мас. %) и FeO (4,93–5,76 мас. %). По морфологии флогопит в каймах выделяется в виде чешуек (от мелких до крупных) и бесформенных агрегатов (рис.6.7 б).

Келифитовые каймы на минералах из ксенолитов гранатовых вебстеритов трубки Обнаженная идентичны минеральному составу, что отмечалось в перидотитовом парагенезисе. Яркий пример - образец гранатового вебстерита (обр. ТО–42), в котором представлена мощная многослойная флогопитовая кайма (рис.6.6 а):

Внутренняя часть каймы (*I слой*) сложена I генерацией чешуйчатого флогопита (Phl1) мощностью слоя от 5 до 40 мкм и отличается повышенным содержанием Al_2O_3 (18,82 мас. %) и FeO (17,64 мас. %) и низкими концентрациями TiO_2 (0,18 мас. %) и MgO (13,73 мас. %); флогопит II генерации (Phl2) наблюдается во *2 слое* мощностью до 50 мкм с высокими концентрациями TiO_2 (1,81 мас. %) и MgO (19,52 мас. %), средним содержанием Al_2O_3 (16,09 мас. %) и низким FeO (8,7 мас. %). в *3 слое* выделяется крупная пластинка флогопита III генерации (Phl3), мощностью до 200 мкм, состав соответствует высоким значениям TiO_2 (2,43 мас. %) и MgO (20,9 мас. %) и низким содержаниям FeO (7,23 мас. %) и Al_2O_3 (13,12 мас.5).

Данный образец (обр. ТО–42) в изученной коллекции является уникальным с выделенными генерациям флогопита в одной кайме, где также отмечается постепенное увеличение в составе TiO_2 от внутренней части каймы, что свидетельствует о проявленных процессах метасоматоза, о чем написано в работе Карсвелла с соавторами [Carswell, 1973 и другие].

Для наглядности в отличиях состава флогопита из кайм были построены бинарные диаграммы $\text{TiO}_2\text{--Cr}_2\text{O}_3$ и $\text{K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$. В трубке Мир флогопит *обогащен Cr_2O_3 и Na_2O* , а во флогопитах из трубки Обнаженная отмечаются *высокие содержания TiO_2 и K_2O* (рис.6.8). На основании литературных [Carswell, 1973] и полученных нами данных флогопит изученных образцов из двух кимберлитовых трубок можно разделить на первичный и вторичный метасоматический. Первый обогащен высокими содержаниями Cr_2O_3 и TiO_2 , что соответствует более глубинному мантийному метасоматозу, флогопиты

с низкими концентрациями в составе Cr_2O_3 и TiO_2 сформировались уже ближе к поверхности за счет влияния кимберлитового расплава.

В работе Карсвелла [Carswell, 1973] первичные и вторичные метасоматические флогопиты выделены по особенностям концентраций TiO_2 и Cr_2O_3 , которые, в свою очередь, связаны с влиянием кимберлитовой магмы. Таблитчатые флогопиты первой группы — первичные метасоматические флогопиты, которые могут являться ранней генерацией этого минерала [Carswell, 1973].

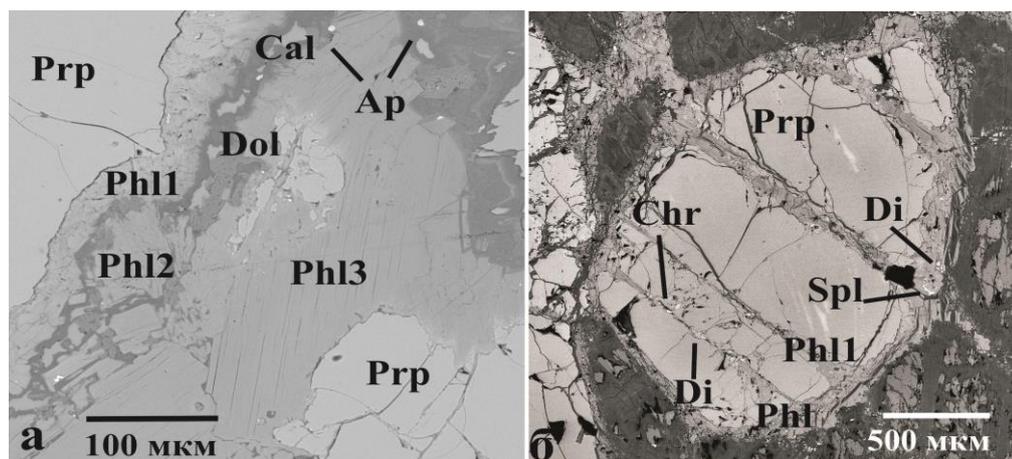


Рис.6.7. Каймы вокруг граната: А) – фрагмент келифитовой каймы с разными генерациями флогопита, гранатовый вебстерит (обр. ТО – 42, трубка Обнаженная); Б) – смесь флогопит-клинопироксен-шпинелевого состава, гранатовый вебстерит (обр.ТМ –126, трубка Мир). Изображения в обратно рассеянных электронах.

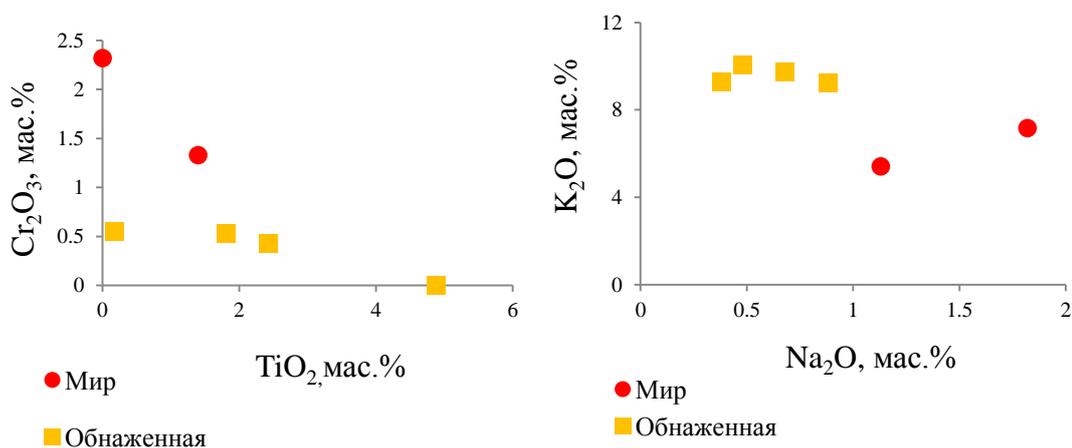


Рис.6.8. Бинарная диаграмма соотношений TiO_2 – Cr_2O_3 и K_2O – Na_2O во флогопитах. Вариации состава (в мас. %) флогопита из кайм на минералах ксенолитов гранатовых вебстеритов трубок Мир и Обнаженная.

Дополнительно в разделе приводится описание ксенолитов гранатовых вебстеритов, которые подтверждают наличие флогопит-амфиболовых или амфиболовых кайм в трубке Обнаженная (рис.6.9). Например, образец ТО–22, где вокруг граната

отмечается флогопит-амфиболовая кайма с включениями в чешуйке флогопита пикроильменита (рис.6.9 б). Состав TiO_2 во флогопитовой кайме достигает (до 4,88 мас. %), а содержание Cr_2O_3 – находится ниже предела обнаружения. Процесс образования келифитовых кайм в этих образцах соответствуют реакциям, написанным выше.

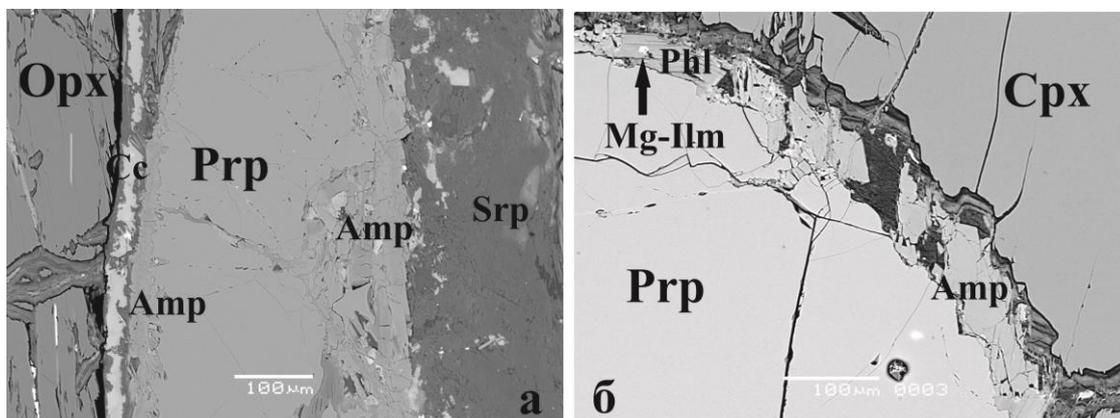


Рис. 6.9. Келифитовые каймы на гранатах: А) – амфиболовая кайма, гранатовый вебстерит (обр. ТО–29, трубка Обнаженная); Б) – амфибол-флогопитовые каймы с включениями пикроильменита, гранатовый вебстерит (обр. ТО–22, трубка Обнаженная). Изображения в обратно рассеянных электронах.

6.4. Келифитовые каймы на минералах эклогитового парагенезиса

Келифитовые каймы в *эклогитовом типе пород* были изучены по периферии гранатов из трубки Мир, которые сложены преимущественно мелким скоплением чешуйчатого флогопита с мощностью кайм от 5 до 10 мкм (рис.6.10). Гранат в эклогитовом парагенезисе низкохромистый (Cr_2O_3 до 0,1 мас. %), реакция образования флогопита в кайме соответствует [5]. Иногда, в межзерновом пространстве отмечаются включения джерфишера (рис.6.11).



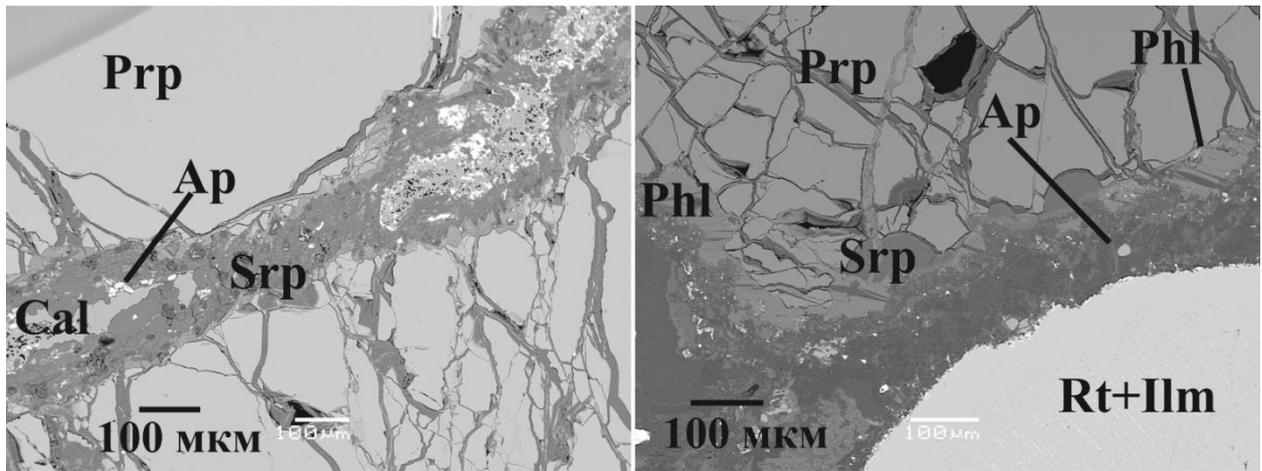


Рис.6.10. Келифитовые каймы на гранатах в эклогитовом парагенезисе: А) — флогопитовые каймы на гранатах с включениями зерен апатита, эклогит (обр. ТМ–33, трубка Мир); Б) — флогопитовые каймы, эклогит, (обр. ТМ–156, трубка Мир). Изображения в обратно рассеянных электронах.

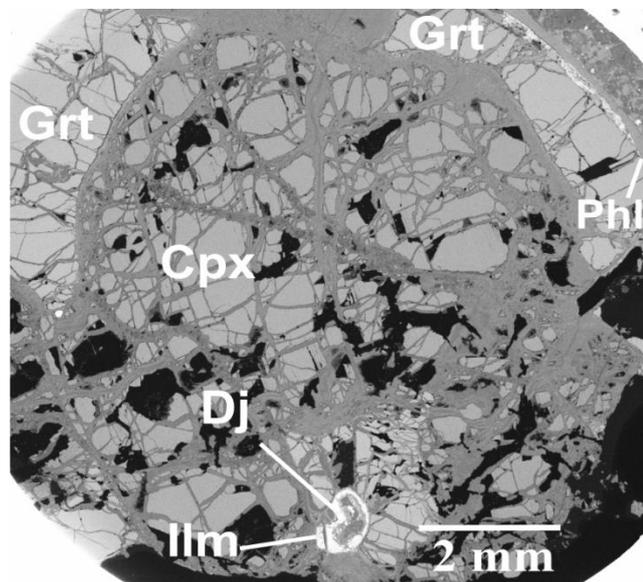


Рис. 6.11. Тонкая келифитовая кайма флогопитового состава вокруг граната, единичные включения джерфшерита в межзерновом пространстве граната и клинопироксена (эклогит, обр. ТМ–156, трубка Мир). Изображения в обратно рассеянных электронах.

В результате изучения состава флогопита из кайм перidotитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов на общую бинарную диаграмму TiO_2 - Cr_2O_3 были нанесены соответствующие значения (в мас. %). Как видно на рисунке 6.12, по значениям данного соотношения на диаграмме выделяются первичный флогопит (менее 1 мас. % по содержаниям TiO_2 и Cr_2O_3) и вторичный метасоматический флогопит (более 2 мас. % этих компонентов) [Carswell, 1973] (рис.6.12).

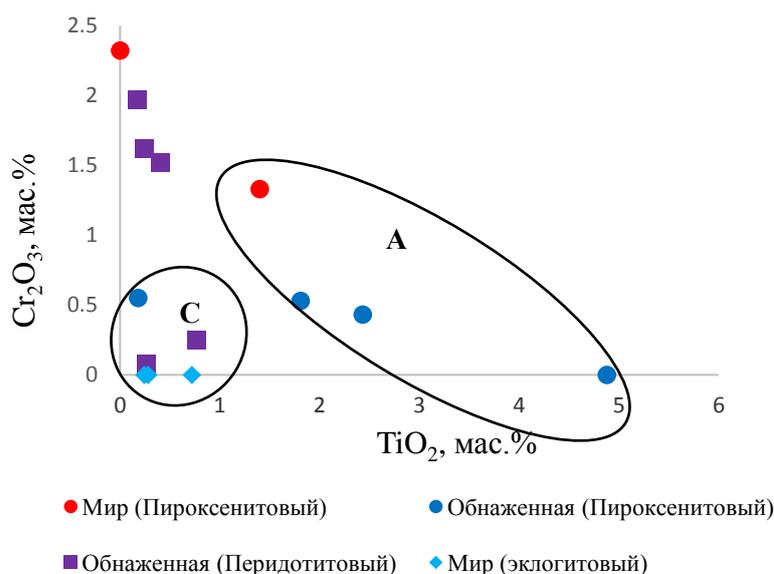


Рис.6.12. Обобщенная бинарная диаграмма соотношений TiO_2 - Cr_2O_3 состава флогопита в каймах для всех типов пород из трубок Мир и Обнаженная.

Составы флогопитов, которые попадают в область *A* скорее всего связаны с воздействием кимберлитового или протокимберлитового расплава [Соловьева и др., 1997]. Флогопиты из наших ксенолитов, что представлены на (рис.6.12-6.13) очень похожи по составу с флогопитами, которые приводятся в работе [Соловьевой и др., 2012], где авторы выделяют флогопиты из равновесных *метасоматитов A*, которые содержат существенно больше TiO_2 , Cr_2O_3 , BaO и F по сравнению с флогопитом из реакционных *метасоматитов группы C*.

По содержанию TiO_2 флогопитам из области *C* близки флогопиты *H + U* (дунит-гарцбургитового и нерасчлененного ультраосновного парагенезиса) из микровключений в алмазах трубок Якутии и Архангельской провинции [Соболев и др., 2009]. В настоящей работе, флогопиты, которые попадают в поле *C* принадлежат эклогитовому парагенезису из трубки Мир и небольшой группе составов флогопита из перидотитового и пироксенитового парагенезиса трубки Обнаженная, чаще всего это бесформенная форма флогопитов (рис.6.11; рис.6.12).

Более крупные пластинки (рис.6.13) идентичны *метасоматитам A* [по литературным данным Соловьева и др., 2012; настоящая работа]. В изученных ксенолитах такой флогопит встречается в пироксенитовом парагенезисе из трубок Мир и Обнаженная.

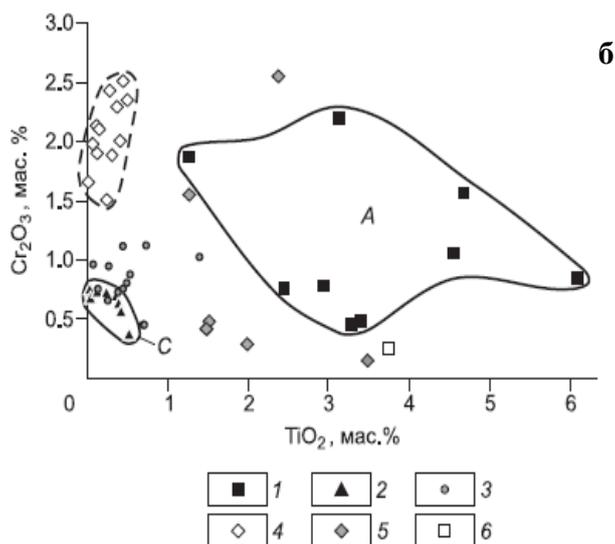
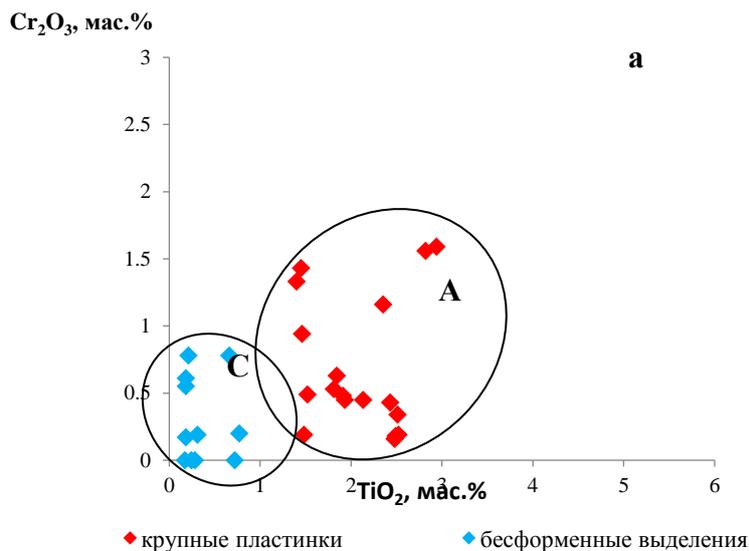


Рисунок 6.13. А) – Химический состав флогопита из перидотитов, пироксенитов и эклогитов, кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная. Б) – Соотношения Cr₂O₃—TiO₂ во флогопитах из метасоматитов А и С по литературным данным [Соловьева и др., 2012]: где 1 — метасоматиты А; 2 — метасоматиты С; 3 — флогопитовые и гранат-флогопитовые перидотиты из кимберлитовых трубок Южной Африки [Gregoire et al., 2002, 2003]; 4, 5 — включения дунит-гарцбургитового и ультраосновного — Н + U (4) и лерцолитового — L (5) парагенезисов в алмазах из кимберлитовых трубок Якутской и Архангельской кимберлитовых провинций [Соболев и др., 2009]; 6 — ксенолит MARID из тр. Удачная (67/83)

Помимо широко развитого флогопита в келифитовых каймах наблюдается также амфибол, который распространен в оторочках граната из ксенолитов трубки Мир. Составы амфибола из келифитовых кайм перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезисов алмазоносной трубки Мир и неалмазоносной трубки Обнаженная представлены в (Таблице б), где хорошо видно, что более высокохромистые

амфиболы наблюдаются в келифитовых каймах пироксенитового парагенезиса кимберлитовой трубки Мир.

Амфибол в келифитовых каймах на гранатах из *перидотитового парагенезиса* кимберлитовой трубки Мир представлен *эденитом и паргаситом*. В ксенолитах трубки Обнаженная преобладает амфибол *паргаситового состава*. В каймах ксенолитов *пироксенитового типа пород* кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная амфибол представлен *паргаситовым* составом, встречается амфибол *куммингтонитового и эденитового* состава в каймах трубки Мир. В ксенолитах *эклогитового парагенезиса трубки Мир* амфиболы в келифитовых каймах сложены *разнообразным составом: это куммингтонит, эденит, катофорит и паргасит*.

Таблица 6. Составы амфиболов изученных нами ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового парагенезиса пород кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная

| Тип парагенезиса | Трубка | Минерал | Содержание max Cr ₂ O ₃ , мас.% в Amf |
|-----------------------------------|-------------------|---|---|
| <i>Перидотитовый парагенезис</i> | <i>Мир</i> | Amf (Ca-Prg) Amf (Ca-Ed) Amf (Na-Ca-rich) реже | до 1,02 |
| | <i>Обнаженная</i> | Amf (Na-Ca-rich) преимущественно Amf (Ca-Prg) Amf (Ca-Ed) | до 1,45 |
| <i>Пироксенитовый парагенезис</i> | <i>Мир</i> | Amf (Ca-Prg) Amf (Ca-Ed) Amf (Na-Ca-rich) реже Amf (Mg-Fe-Mn-cum) реже | до 3,46 |
| | <i>Обнаженная</i> | Amf (Ca-Prg) Amf (Mg-Fe-Mn-cum) реже | до 1,46 |
| <i>Эклогитовый парагенезис</i> | <i>Мир</i> | Amf (Na-Ca-katoph) Amf (Mg-Fe-Mn-cum) реже | Cr ₂ O ₃ <0,25 |

Пояснение сокращений: Amf- амфибол; Amf (Ca-Prg)- кальциевый паргасит; Amf (Ca-Ed)- кальциевый эденит; Amf (Na-Ca-rich) – натрово-кальциевый амфибол рихтерит; Amf (Na-Ca-katoph) - натрово-кальциевый амфибол катофорит; Amf (Mg-Fe-Mn cum) –амфибол куммингтонитового состава

Флогопит и амфибол в каймах находятся в подчиненных количествах. По изученным литературным данным, структурно–текстурным особенностям кайм из различных типов пород особых отличий не наблюдается; это свидетельствует о том, что во всех ксенолитах келифитовые каймы на гранатах образовались в результате идентичных процессов [Харьков и др.,1989].

Деетальное изучение келифитовых кайм из высокоалмазоносной трубки Мир и неалмазоносной трубки Обнаженная подтверждают процесс образования этих кайм в результате реакции граната с *кимберлитовым/протокимберлитовым* расплавом и/или флюидом, что согласуется с данными более ранних и поздних исследований [Илупин и др., 1969; Харьков и др., 1973; Тронева и др., 1979; Dawson, 1984; Харьков и др., 1989; Егоров и др., 2004; Шарыгин, 2014; Соловьев и др., 2019, Похиленко, 2020].

Расположение двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная на разных участках ЯАП (*раздел 1.2 и 1.3*) может напрямую свидетельствовать о том, что в этих трубках происходили отличные друг от друга глубинные процессы метасоматоза, которые отличаются по степени интенсивности, составе мантийного флюида/расплава и длительности воздействия и просачивание в минералы разных типов пород. Например, 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. Иногда, в межзерновом пространстве встречаются различные сульфидные минералы: джерфшерит, пентландит, хизливудит, миллерит, и другие минералы.

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. В межзерновом пространстве также отмечаются сульфидные минералы: миллерит, пирит, редко встречаются включения джерфшерита.

Отличительные особенности в составе и мощности келифитовых кайм еще раз подтверждают вывод о том, что воздействие метасоматических флюидов/расплавов на минералы из ксенолитов двух кимберлитовых трубок были различны. Наиболее вероятной моделью образования келифитовых кайм по литературным данным является реакция граната с кимберлитовым/протокимберлитовым расплавом и/или флюидом, связанным с кимберлитовой магмой [Харьков и др., 1989, Шарыгин, 2014]. Изменчивость состава минералов кайм является отражением как смещения равновесия вследствие изменения *PT* условий, так и эволюции химизма расплава и/или флюида [Шарыгин, 2014]. Также, процесс образования флогопита, который широко распространен в каймах, *происходит при низких давлениях согласно экспериментальным данным из работы*

[Шарыгин, 2014]. Это еще раз подтверждает, что келифитовые каймы формировались во время подъема кимберлитовой магмы.

Присутствие в системе флогопита и амфибола, для которых необходимо наличие К, Na и H₂O свидетельствует о том, что образование келифита происходило в расплаве или флюиде в результате декомпрессии граната при подъеме к поверхности. Поэтому наиболее реалистичной моделью на данный момент образования келифитизации является реакция граната с кимберлитовым расплавом, проникавшим в перидотит во время подъема к поверхности. Формирование келифита могло возникать при температурах в диапазоне 1100-1200 и 2-4 ГПа, а процесс самой келифитизации происходил в условиях верхней мантии [Franz et al., 1995; Griffin et al., 2002; Специус, 2004; Mandler et al., 2016; Шарыгин, 2014; Соловьев 2019].

В диссертационной работе 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 трубок Мир и Обнаженная. 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.

Таким образом, в мантийной литосфере Сибирского кратона проявлены два крупных этапа метасоматизма, которые явно наблюдаются в изученных нами минералах из ксенолитов двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная.

В результате изучения состава флогопита изученных в настоящей работе и литературных данных можно выделить древний метасоматизм, который представлен в виде метасоматитов группы А (рис.6.12) и привел к существенному изменению химизма пород и минералов, что проявляется в виде обогащения пород и минералов редкими элементами. Скорее всего данный процесс носил равновесный характер и был связан с областью образования графита и алмаза, а источником углерода выступали силикат-карбонатные флюиды/расплавы, которые могли служить интенсивному воздействию метасоматизма в мантийной литосфере кратона, что близко с процессами кратонизации мантийной литосферы. На ранней стадии среднепалеозойского кимберлитового цикла происходил второй важный для алмазообразования Сибирского кратона метасоматический процесс. В этот период из астеносферных расплавов происходит развитие глубинного термохимического Якутского плюма. С данным процессом связано развитие мантийных метасоматитов С, в которых присутствует графит [Соловьева и др., 2012].

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 акцессорных компонентов в разных типах горных пород (в основном метасоматического генезиса), так и с тем, что синтетические аналоги некоторых из МГМ нашли широкое применение в качестве ферромагнитных материалов с высокой коэрцитивной силой [Stäblien, 1982].

Ксенолит гранат-шпинелевого лерцолита (обр.ГО-125) (размером 2.6×1.4 см) был отобран из кимберлитовой трубки Обнаженная (Куойское поле, Якутская кимберлитовая провинция). Данная порода характеризуется гипидиоморфнозернистой структурой и массивной текстурой (рис. 7.1).

Породообразующие минералы в ксенолите – гранат (30–35 об. %), ортопироксен (15–35 об. %), клинопироксен (10–30 об. %) и оливин (10–20 об. %); в качестве главной акцессорной фазы присутствует высокохромистая шпинель (до об.5%).

Гранат изотропный в скрещенных николях, образует изометричные округлые индивиды (до 10 мм) малинового цвета и имеет интенсивную трещиноватость. В данном минерале были идентифицированы многочисленные игольчатые включения рутила (до 0.5 мм), лишенные закономерной кристаллографической ориентировки. Химический состав граната характеризуется преобладанием пиропового минала: соотношение пиропового, альмандинового, гроссулярового и кноррингитового компонентов составляет 66:16:12:6 (содержание Cr_2O_3 2.3 мас. %). По периферии зерен граната развивается тонкая келифитовая кайма мощностью от 0.01 до 1 мм.

Зерна оливина имеют неправильную форму и размер от 2 до 3.5 мм; они сильно серпентинизированы. По составу *оливин преимущественно форстеритовый* ($Fe_{0.93}$).

Ортопироксен образует призматические кристаллы длиной до 10 мм, частично замещенные (с периферии и по трещинам) серпентином и карбонатами. По химическому составу ортопироксен соответствует энстатиту, содержит около 4 мас. % FeO и около 2 мас. % Al_2O_3 . В кристаллах ортопироксена наблюдаются ориентированные вдоль направления спайности вростки *клинопироксена* (структуры распада). Также клинопироксен был идентифицирован в виде округлых или призматических индивидов (размером от 4 до 6 мм) содержащих вростки ортопироксена (структуры распада) и замещенных серпентином в периферийных частях. По составу в клинопироксене

преобладает диопсидовый минал, также в нем присутствует 15% жадеитового компонента и 5% космохлорового минала).

Высокохромистая *шпинель* образует изотропные в скрещенных николях зёрна неправильной формы, размеры которых варьируют от 0.5 до 10 мм. Пределы содержаний различных компонентов в шпинели описываются формулой $(Mg_{0.70}Fe_{0.29-0.30}Mn_{0.01})(Al_{0.97-1.12}Cr_{0.82-0.97}Fe_{0.05}Ti_{0.01})O_4$. В виде включений в зёрнах шпинели наблюдаются кальцит, серпентин, флогопит, матиасит, имэнгит и минерал, *изоструктурный линдквиститу*. Образование матиасита и К- доминантных МГМ с высокими содержаниями алюминия и хрома предположительно связано с метасоматическим изменением породы в мантийных условиях [Чуканов, Воробей и др., 2018].

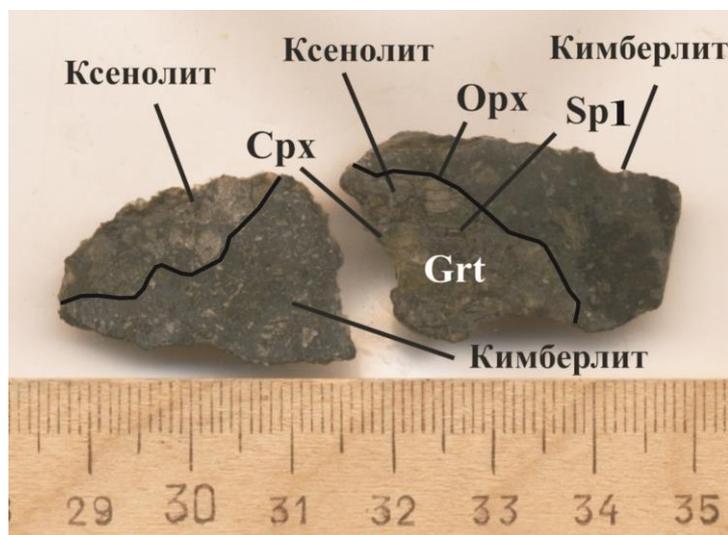


Рис. 7.1. Ксенолит гранат-шпинелевого лерцолита (обр. ТО-125), кимберлитовая трубка Обнаженная. Условные обозначения: Grt- гранат; Срх- клинопироксен; Орх- ортопироксен

Из исследуемого ксенолита (обр. ТО-125) были сделаны пять шлифов, в *одном* из которых, в центральной части ксеноморфных выделений магнезиального алюмохромита (35.8 мас.% Cr_2O_3 ; 32.8 мас.% Al_2O_3 ; 16.2 мас.% MgO) обнаружены включения размером до 150 мкм, состоящие из минерала (*изоструктурного линдквиститу*), флогопита и рутила (рис.7.2).

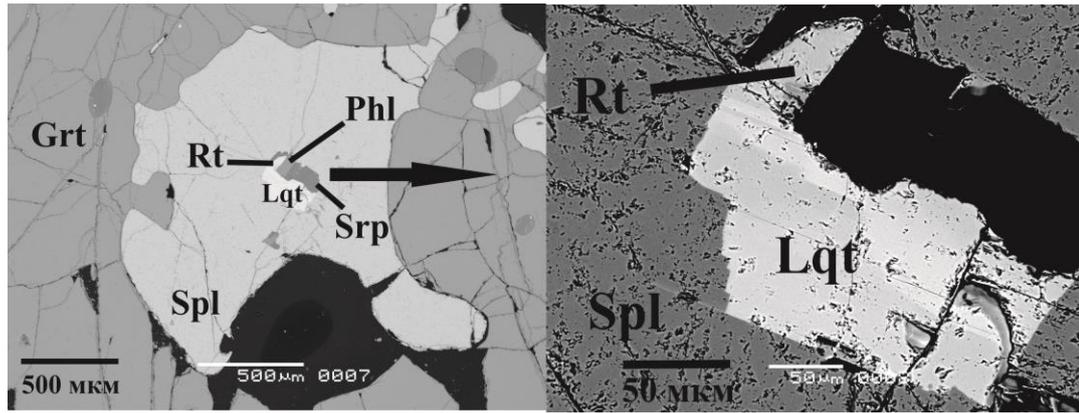


Рис. 7.2. Ксенолит гранат-шпинелевого лерцолита, неалмазоносная трубка Обнаженная, а) Общий вид с включениями; б)- полиминеральные срastания минеральной фазы, изоструктурной линдквиститу, флогопита, серпентина и рутила. Изображение в обратно-рассеянных электронах

Во втором шлифе, в крупном зерне магнезиального алюмохромита (35.7-36.7 мас.% Cr_2O_3 ; 31-32.8 мас.% Al_2O_3 ; 15.9-16.2 мас.% MgO) были обнаружены три включения, которые представлены срastаниями минерала (изоструктурного линдквиститу), имэнгита, матиасита, кальцита, доломита, серпентина и флогопита (рис.7.3).

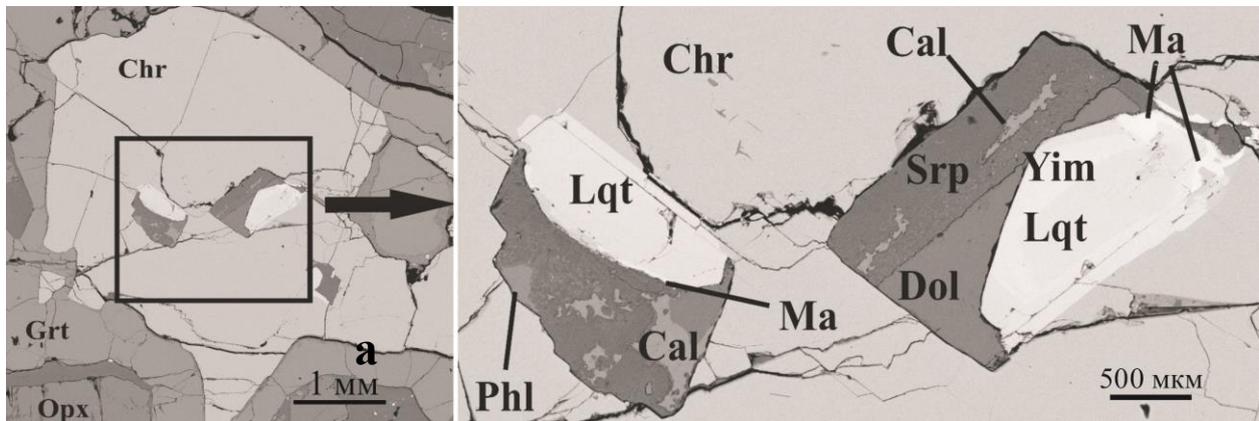


Рис.7.3. Ксенолит гранат-шпинелевого лерцолита, неалмазоносная трубка Обнаженная, а) Общий вид включений; б)- полиминеральные срastания, содержащие редкие К-Аl-Тi-содержащие фазы. Изображение в обратно-рассеянных электронах

Для подтверждения минеральной фазы, изоструктурной линдквиститу была расшифрована кристаллическая структура этого минерала гексагональной сингонии (рис.7.4), имеющего следующую эмпирическую формулу $X(\text{K}_{0.89}\text{Ba}_{0.11})\Sigma_{1.00} \text{A}^{\text{Fe}^{3+}_{0.99}} \text{T}(\text{Mg}_{2.82}\text{Fe}^{2+}_{1.18})\Sigma_{4.00} \text{M}(\text{Al}_{5.05}\text{Cr}_{4.80}\text{Ti}_{3.28}\text{V}_{0.08})\Sigma_{13.21} \text{O}_{27}$. В структуре этой фазы в 12-координационной позиции X могут располагаться большие катионы K и Ba, в тетраэдрической позиции находится Mg^{2+} и Fe^{2+} , в октаэдрической позиции M – Al^{3+} , Cr^{3+} и Ti^{3+} .

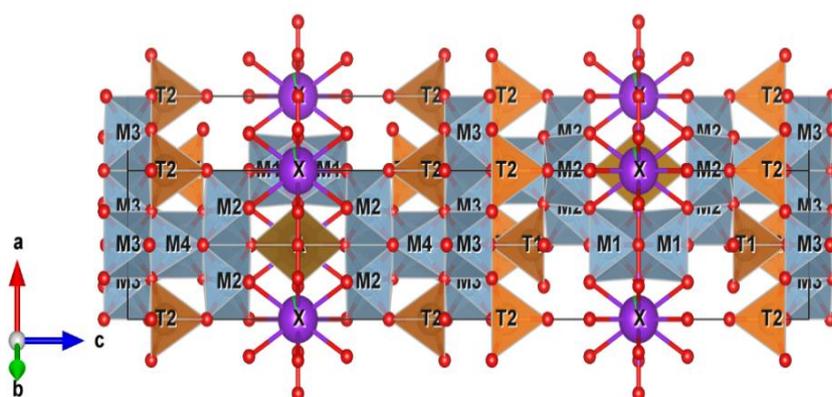


Рис. 7.4. Кристаллическая структура минерала, изоструктурного линдквиститу

Линдквистит – минерал, открытый в образцах из шахты Якобсберг (район Филипстад, Швеция) [Holtstam et al., 1993]. Линдквистит там находится в ассоциации с гематитом, якобситом, плюмбоферритом, флогопитом, андрадитом, кальцитом, баритом, самородной медью, купритом, малахитом и азуритом. Общая формула минерала $Pb[Fe_{16}Pb(Mn,Mg)]O_{27}$. В мантийных породах его можно перепутать с другими минералами, богатыми K, Ba, Cr, V, Ti – имэнгитом, матиаситом, никсонитом, бариоферритом (K-, Ba- и K-Ba- ферриты), генримейеритом [Holtstam et al., 1993].

Имэнгит К $(Cr, Ti, Fe, Mg, Al)_{12}O_{19}$ – это еще один редкий минерал из группы МГМ, который обнаружен в настоящей работе в сростаниях с новой фазой, изоструктурной линдквиститу, а также с матиаситом, флогопитом, серпентином, кальцитом и доломитом. Состав исследуемого нами имэнгита отличается более высоким содержанием Al_2O_3 (19.82-22.68 мас. %) и пониженным Cr_2O_3 (29.18-31.93 мас. %) относительно имэнгита из перечисленных выше геологических объектов. Так, имэнгит из кимберлитовых даек Китая содержит 1.3-1.6 мас. % Al_2O_3 и 36.9-37.1 мас. % Cr_2O_3 , а из кимберлитовых силлов Венесуэлы – 3.6-3.9 мас. % Al_2O_3 и 39.1-39.0 мас. % Cr_2O_3 .

Матиасит в изученных полиминеральных включениях отвечает формуле $(K_{0,68}Ca_{0,24}Ba_{0,08}Sr_{0,06})(Ti_{14,01}Cr_{2,60}Mg_{1,88}Fe_{1,64}Al_{0,82}Mn_{0,05})O_{38}$. Флогопит содержит примеси TiO_2 (1.34 мас.%) и Cr_2O_3 (1.45 мас. %). Состав рутила: TiO_2 - 99.44 мас. %, Cr_2O_3 - 0.24 мас. %, FeO - 0.21 мас. %.

Составы редких включений из природного ксенолита трубки Обнаженная приведены в **Таблице 7.2**.

Наличие включений К-Al-Ti-содержащих фаз в магнезиальном алюмохромице является весьма актуальным для дальнейшего проведения экспериментальных работ, которые могут объяснить природные условия образования фаз. Считается, что эти фазы образуются при мантийном метасоматозе, в результате реакций хромшпинели с высококалийевыми водно-солевыми флюидами.

С целью реконструкции реакций образования редких титанатов в процессе метасоматического изменения основных пород при мантийных РТ-условиях, нами были поставлены эксперименты в системе *хромит + ильменит/рутил, с участием H₂O-CO₂-K₂CO₃ флюида, при 5 ГПа и 1200⁰С* [Бутвина, Воробей и др., 2019; Бутвина и др., 2021].

Таблица 7.2. Типичные химические составы (мас. %) МГМ и матиасита из кимберлитовой трубки Обнаженная

| | Имэнгит | Имэнгит | Минерал, <i>изоструктурный линдквиститу</i> | Минерал, <i>изоструктурный линдквиститу</i> | Матиасит |
|--------------------------------|---------------|---------------|--|--|-------------|
| Na ₂ O | 0.16 | н.п.о. | н.п.о. | 0.07 | нпо |
| K ₂ O | 3.87 | 3.44 | 3.72 | 3.54 | 2.00 |
| CaO | 0.22 | 0.13 | 0.32 | 0.17 | 0.81 |
| SrO | 0.01 | 0.55 | 0.58 | 0.29 | 0.42 |
| BaO | 0.10 | 0.22 | 0.30 | 0.56 | 0.69 |
| MgO | 9.19 | 9.46 | 9.40 | 9.19 | 4.76 |
| MnO | 0.13 | 0.37 | 0.07 | 0.25 | 0.24 |
| FeO | 12.59 | 12.90 | 12.46 | 12.73 | 7.38 |
| Al ₂ O ₃ | 19.23 | 19.82 | 21.41 | 20.92 | 2.61 |
| Cr ₂ O ₃ | 31.57 | 30.11 | 29.91 | 29.18 | 12.38 |
| TiO ₂ | 22.83 | 23.62 | 21.42 | 22.86 | 70.15 |
| Сумма | 99.90 | 100.62 | 99.59 | 99.76 | 101.44 |
| Формульные коэффициенты | | | | | |
| Na | 0.05 | 0 | 0 | 0.02 | 0 |
| K | 0.67 | 0.58 | 0.64 | 0.60 | 0.68 |
| Ca | 0.03 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 0.24 |
| Sr | - | 0.04 | 0.05 | 0.02 | 0.06 |
| Ba | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.08 |
| Mg | 1.85 | 1.88 | 1.88 | 1.84 | 1.88 |
| Mn | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.05 |
| Fe | 1.42 | 1.44 | 1.40 | 1.42 | 1.64 |
| Al | 3.05 | 3.11 | 3.38 | 3.31 | 0.82 |
| Cr | 3.36 | 3.17 | 3.17 | 3.09 | 2.60 |
| Ti | 2.31 | 2.36 | 2.16 | 2.31 | 14.01 |
| Базис расчёта | 12 М-катионов | 12 М-катионов | 12 М-катионов | 12 М-катионов | 21 М-катион |

н.п.о. – ниже предела обнаружения при заданных параметрах съемки

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

Обнаруженные и подробно исследованные необычные включения К-титанатов в магнезиальном алюмохромите из гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная являются неопровержимым доказательством проявления модального мантийного метасоматоза. Это обуславливает актуальность их экспериментального синтеза.

8.1.1. Техника и методика исследований

Эксперименты проводились в ИЭМ РАН на установке «наковальня с лункой» НЛ-13Т, основанной на прессе с усилием 500 тонн, с тороидальным уплотнением ячеек. Данный аппарат позволяет получить давления до 14.0 ГПа.

Установка типа «наковальня с лункой» включает в себя следующие блоки: аппарат НЛ с фасонными силовыми матрицами из твердого сплава карбида вольфрама; ячейку с внутренним нагревателем электросопротивления; гидравлический пресс с гидроприводом; систему измерения давления, а также автоматического регулирования и измерения температуры (рис. 8.1, рис.8.2) [Литвин, 1991].

Ячейки из литографского камня, используемые на этой установке, оснащены графитовыми трубчатыми нагревателями высотой 8 мм и толщиной стенки 0.75 мм, а также вставками из прессованной смеси $MgO : BN=3:1$ в качестве передающей давление среды. Давление в опытах задавалось с точностью ± 0.1 ГПа по калибровке на основе стандартных переходов в Bi , а температура контролировалась по кривой зависимости температуры от мощности тока нагрева, построенной по показаниям термопары $Pt_{70}Rh_{30}/Pt_{94}Rh_6$ толщиной 0.5 мм. Использовались капсулы линзообразной формы, изготовленные из платинового листа толщиной 0.2 мм и вмещающие примерно 20 мг стартового вещества. Капсулы сваривались с помощью электродуговой аргоновой импульсной сварки РУК-04.

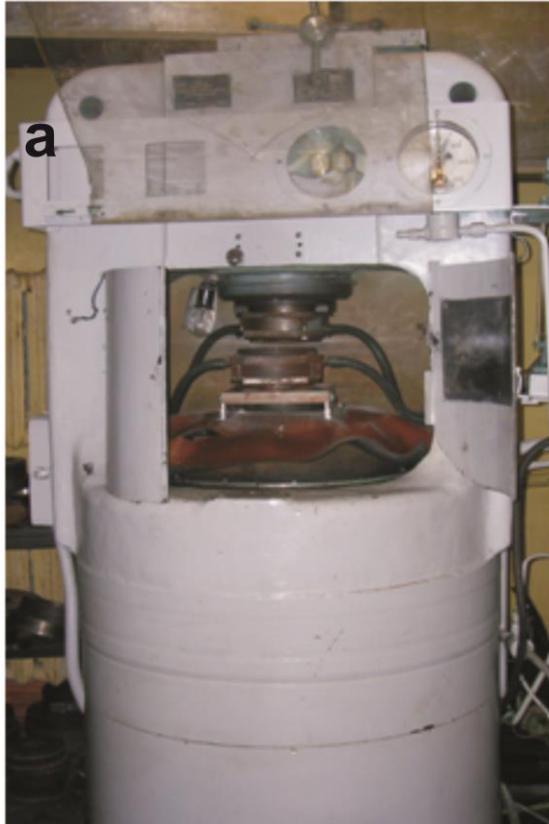


Рис. 8.1. Общий вид (а) установки «наковальня с лункой-тороид» и (б) рабочих наковален

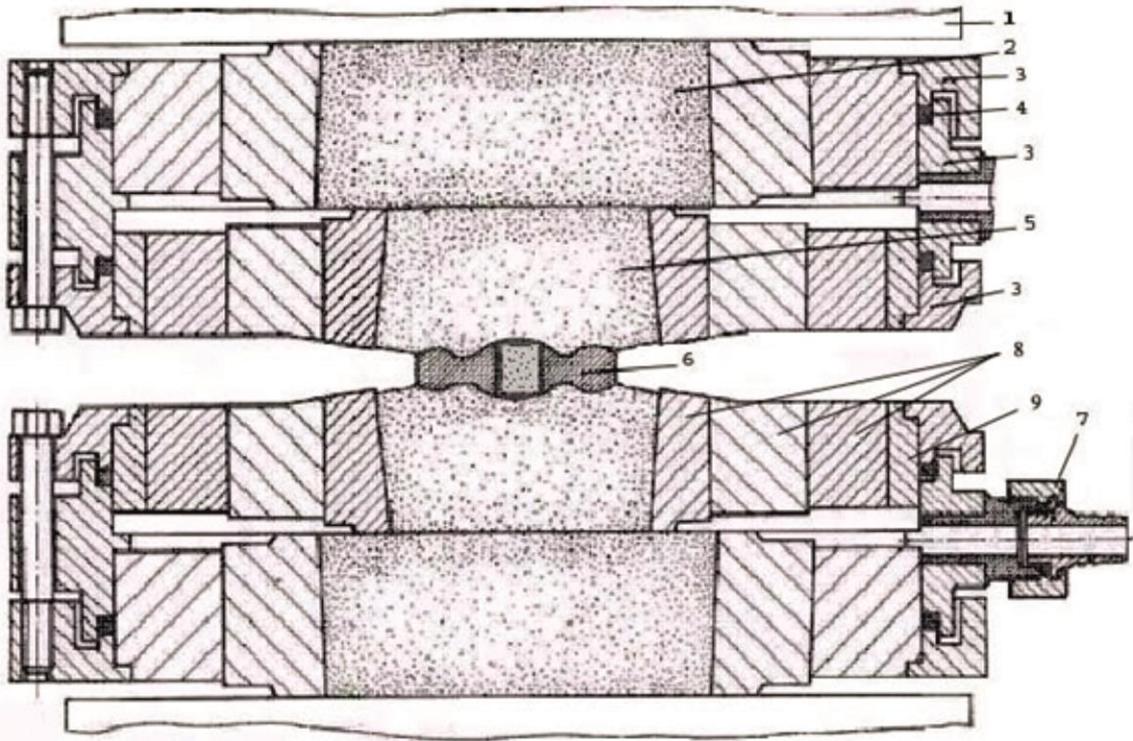


Рис. 8.2. Схема твердофазового аппарата типа наковальня с лункой-тороид, из работы [Литвина, 1991]

- 1 – поршень прессы;
- 2 – опорная плита из твердого сплава ВК-15 (металлокерамический сплав на основе карбида вольфрама: WC-85, Co – 15 мас. %);
- 3 – детали корпуса водяного охлаждения;
- 4 – герметизирующая прокладка корпуса охлаждения;
- 5 – рабочая матрица высокого давления из твердого сплава ВК-6 (WC-94, Co – 6 мас. %);
- 6 – твердофазовая ячейка с высокотемпературным реактором;
- 7 – штуцер для подачи потока охлаждающей воды в зазор между блоками поддержки рабочей матрицы и опорной плиты;
- 8 – кольца поддержки рабочей матрицы (сталь 35ХГСА или 45ХМНФА);
- 9 – кольцо безопасности (сталь 3).

8.1.2. Фактический материал и аналитические методы исследования

В качестве флюидной составляющей использовались K_2CO_3 и щавелевая кислота в разных соотношениях. Природные К-Ва-титанаты, обогащенные хромом, тесно связаны с хромитом. Поэтому для реконструкции процессов образования любой из этих фаз при непосредственном взаимодействии хромита с калиевой жидкостью были проведены эксперименты со смесью *хромит*+ K_2CO_3 (опыт Sp1; Таблица. 8.1). Однако никаких калийсодержащих фаз в продуктах данного эксперимента обнаружено не было. Из этого следует, что для постановки эксперимента необходимо присутствие дополнительных Ti-содержащих фаз, связанных с хромитом, чтобы образовались редкие титанаты.

При взаимодействии хромита с флюидом $K_2CO_3-H_2O-CO_2$ в присутствии рутила (опыты Sp2, A1, A2; Таблица 8.1) образовался редкий К-титанат- *прайдерит*, который не был идентифицирован в магнезиальном алюмохромите из природного гранат-шпинелевого лерцолита трубки *Обнаженная*, но образовался в результате эксперимента, что свидетельствует об активных проявлениях мантийного метасоматоза. Формирование прайдерита приводит к изменению химического состава хромита, который становится беднее $FeO + Fe_2O_3$ и Cr_2O_3 , но обогащается TiO_2 по сравнению с исходным составом хромита. В результате экспериментов для появления прайдерита предлагается следующая реакция:



При этом химический состав хромита значительно варьирует. Небольшое окисление необходимо для вхождения Fe^{3+} в кристаллическую структуру новообразованного прайдерита. Некоторое превышение содержания Cr_2O_3 свидетельствует либо о нестехиометричности прайдерита, либо об образовании дополнительных оксидов в продуктах распада. Действительно, в продуктах опыта было обнаружено несколько зерен оксидов Cr и Ti.

При любых соотношениях хромит/рутил нами не были обнаружены другие титанаты, кроме прайдерита, что может объясняться недостаточным количеством Fe, прежде всего Fe^{3+} . Это предположение подтверждается экспериментами в системе *хромит-ильменит*- $K_2CO_3-H_2O-CO_2$ (опыты B1, B1-1, B1-2, B1-3, B1-4, B2; Таблица 8.1). Продукты этих экспериментов представлены имэнгитом и прайдеритом, при этом соотношение хромит/ильменит в экспериментальной системе не влияет на их кристаллизацию. Титанаты образуют сростания с хромитом, ильменитом, а также с новообразованным рутилом. Зерна

прайдерита размером 10-100 мкм содержат включения хромита и ильменита. Имэнгит также встречается в виде включений в прайдерите (рис. 8.3 д), который образует сростания с хромитом, которые очень напоминают сростания, идентифицированные ранее в природных образцах из работы [Nixon, Condliffe, 1989] (рис. 8.3).

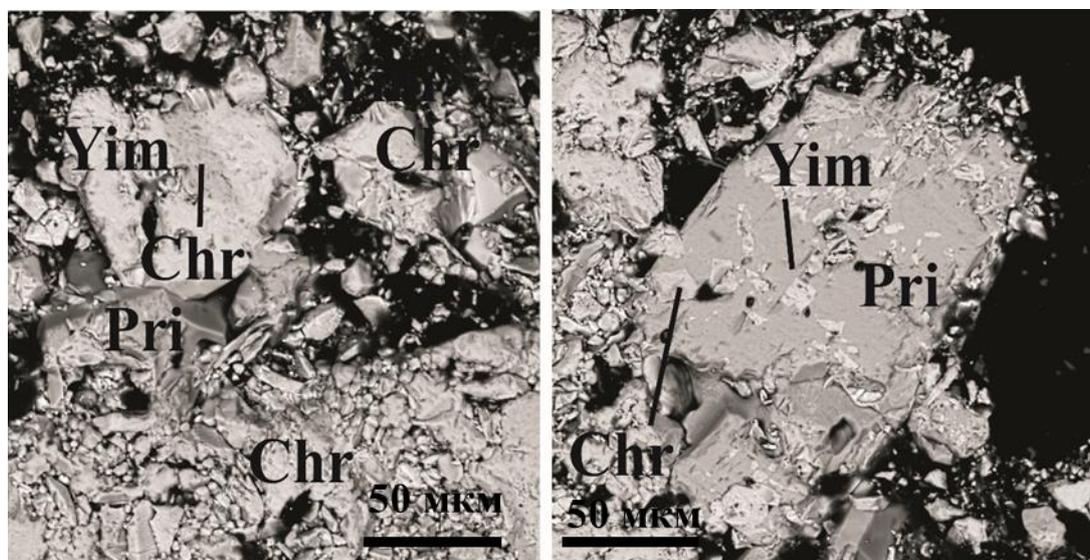


Рис. 8.3. Продукты эксперимента (опыт В1, табл.7.1) в системе хромит-рутил/ ильменит - K_2CO_3 - H_2O - CO_2 при 5 ГПа и 1200°C.(а,б) эксперименты А1 and А2(таб.7.1): прайдерит, хромит, рутил (в,д) эксперимент В1(таб.7.1): хромит, ильменит, прайдерит, имэнгит; (д) сростание имэнгита и хромита из кимберлитового силла Проспект 039, Гуаньямо, провинция Боливар, Венесуэла (Nixon, Condliffe, 1989). Изображения в обратно рассеянных электронах

Стоит отметить, что на образование редких титанатов существенно влияет соотношение $K_2CO_3/(H_2O+CO_2)$ в исходной жидкой смеси, при постоянном содержании жидкости в системе. Опыты серий В1, В1-1, В1-2, В1-3, В1-4 (табл.8.1) проводили с использованием исходных смесей с переменной массой. Соотношения $K_2CO_3/(H_2O+CO_2)$ позволили определить зависимость последовательности кристаллизации различных К-Сг-титанатов и их агрегатов от состава флюида (табл.7.1).

Ассоциация *прайдерит+имэнгит* образуется при соотношении $K_2CO_3/(H_2O+CO_2) = 9/1$ (табл.8.1). Предложена следующая реакция образования данной ассоциации:



Равновесие демонстрирует образование прайдерита и имэнгита, при этом химический состав ильменита варьирует.

Уменьшение отношения $K_2CO_3/(H_2O+CO_2)$ до $7/3$ приводит к исчезновению прайдерита, при этом имэнгит активно образуется в виде субгексагональных кристаллов размером 10-100 мкм (рис. 8.4).

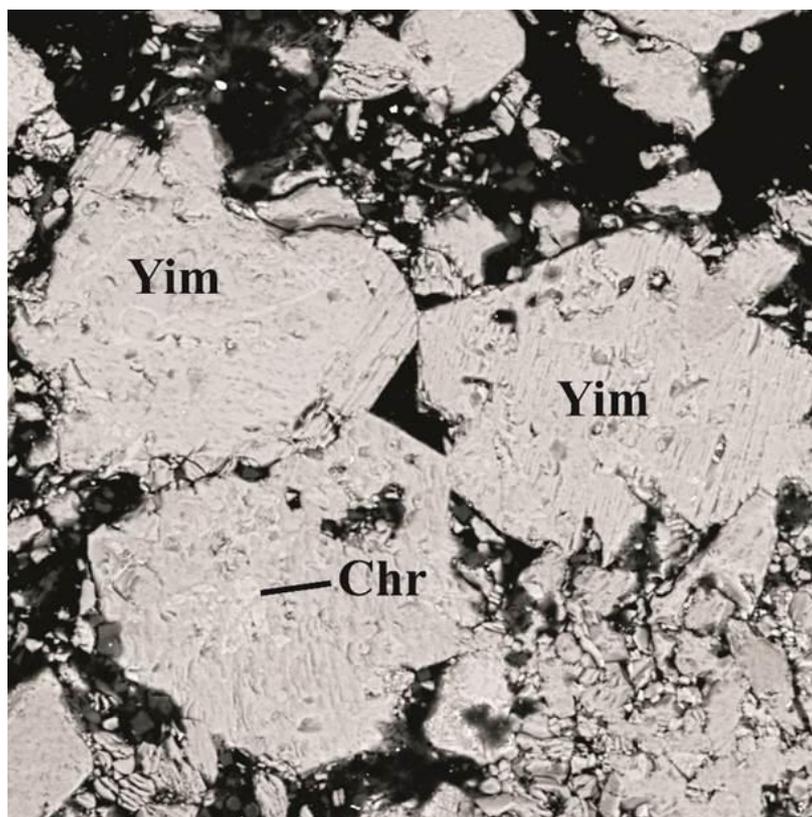
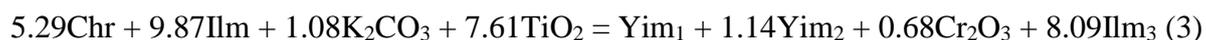


Рис.8.4. Продукты эксперимента В1-1 и В1-2 (таб.8.1) в системе хромит-ильменит- K_2CO_3 - H_2O - CO_2 при 5 ГПа и 1200°C: гексагональные кристаллы имэнгита.Изображения в обратно рассеянных электронах

Матиасит, появляется вместе с имэнгитом, где имэнгит образуется только при соотношении $K_2CO_3/(H_2O+CO_2) = 5/5$. Использование составов полученных фаз позволяет предположить следующую реакцию образования титанатов:



Равновесие демонстрирует образование имэнгита, при этом химический состав ильменита значительно варьирует: он становится более магнезиальным. Избыток Cr_2O_3 и TiO_2 в экспериментах свидетельствует о возможной нестехиометрии титанатов или образовании дополнительных фаз, которые не поддаются обнаружению в данных продуктах опытов.

Образование титанатов не происходит при более низких соотношениях $K_2CO_3/(H_2O+CO_2)$ (Таблица 8.1).

Продукты всех опытов содержат флогопит, который, вероятно, образовался из-за наличия различных силикатных фаз-включений в исходном ильмените и хромите. Обычно флогопит образует агрегаты, тесно связанные с К-титанатами и находящиеся между зёрнами исходной и новообразованной фазы. Однако флогопит был идентифицирован нами

даже в тех продуктах опытов, которые не содержат титанатов (опыты Sp1, B1-3 и B1-4; табл.8.1).

Состав полученных фаз определялся методом *рентгеноспектрального микроанализа* на растровом электронном микроскопе Tescan Vega-II XMU, (ИЭМ, г. Черноголовка), оснащенный системой регистрации рентгеновского излучения и расчёта состава образца INCA Energy 450, в режиме EDS при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе 400 нА и диаметре электронного пучка 157 – 180 нм (для анализа химического состава минеральных фаз) или 60 нм.

КР-спектры синтетических прайдерита (рис.8.5), имэнгита и матиасита получены с помощью КР-спектрометра Renishaw RM1000 (ИЭМ, г. Черноголовка), оснащенного микроскопом Leica. Использовался твердотельный лазер ($\lambda=532$ нм) мощностью 20 мВт с диодной накачкой. Спектры получены при 50-кратном увеличении, время накопления спектра составляло 100 с.

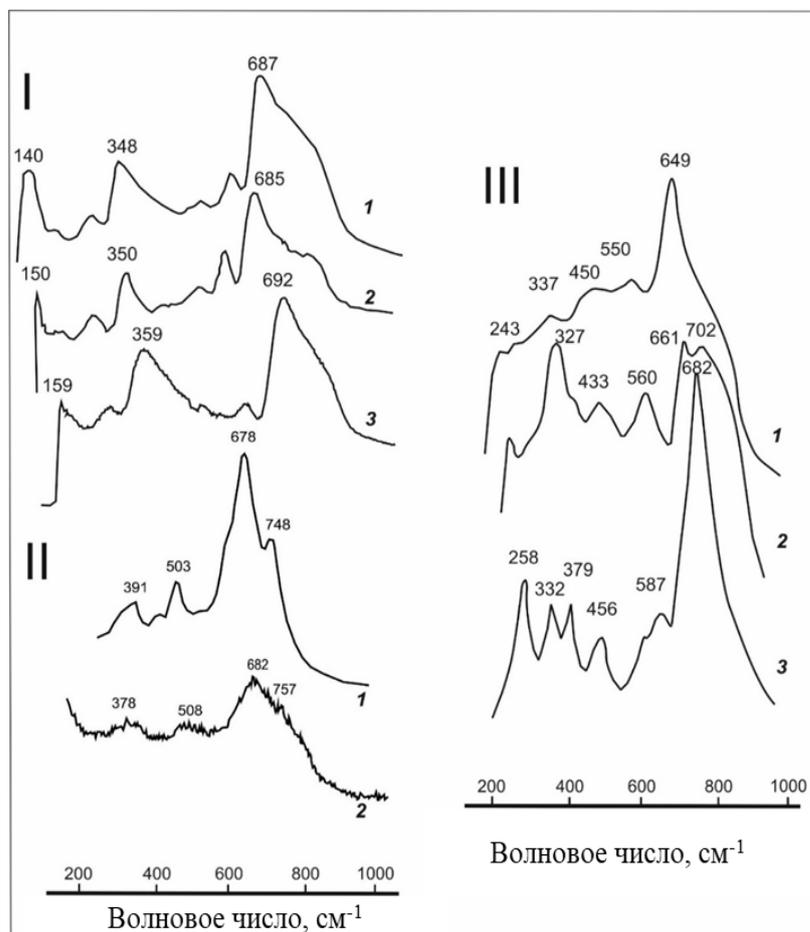


Рис.8.5. Рамановские спектры синтезированных фаз: **I-1** К-Сг прайдерит из метасоматизированных перидотитов из кимберлитов Южной Африки (Konzett et al., 2013); **I-2** К-Ва-Сг прайдерит из включений в хромитах гранатовых перидотитов Богемского Массива, гранатовые перидотиты (Naemura et al., 2015); **I-3** экспериментально полученный К-Сг прайдерит (данная работа); (анализ Sp-4, Table 4); **II-1** твердый раствор хоторнеит-имэнгит, синтезированный из окислов при 12 ГПа и 1400°C (ex. JKW88, see Konzett et al., 2005); **II-2** синтезированный имэнгит (наша работа B1-12, Table 4); **III-1** матиасит синтезированный из

окислов при 7 ГПа и 1300°C (ex. JKW43, see Konzett et al., 2005); **III-2**) линдсейит синтезированный из окислов при 7 ГПа и 1300°C (ex. JKW43, see Konzett et al., 2005); **III-3**) синтезированный магтасит (наша работа)

8.2. Экспериментальные исследования в приложении к природным данным

8.2.1. Литературный обзор

Модальный метасоматоз является важнейшим процессом в верхней мантии, определяющим не только многообразие парагенезисов самих мантийных пород, но и отвечать за появление специфических по составу магм [Haggerty, 1991].

Имэнгит $K(\text{Cr, Ti, Mg, Fe, Al})_{12}\text{O}_{19}$ – это редкий минерал группы магнетоплюмбита $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ [напр. Haggerty, 1991] с общей формулой $\text{AM}_{12}\text{O}_{19}$. Позиция *A* с координацией 12 в слоистой структуре типа бариевого феррита ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) этого минерала расположена в перовскитоподобных слоях (AMO_3) и содержит крупные катионы (K, Ba и другие LILE) тогда как мелкие катионы *M* (Ti, Cr, Fe, Mg, Zr, Nb, V, Zn) расположены в полиэдрах с координацией 4 и 6 в шпинелеподобных слоях [Grey et al., 1987]. Имэнгит образует ограниченный твердый раствор с хауторнеитом $\text{Ba}(\text{Cr, Ti, Mg, Fe, Al})_{12}\text{O}_{19}$ [Haggerty et al., 1989]. Природные минералы ряда имэнгит-хауторнеит обычно не соответствуют идеальной формуле, проявляя значительные вариации содержания компонентов в обеих позициях, обладая также значительной концентрацией вакансий в структуре.

Имэнгит был впервые обнаружен в кимберлитовых дайках провинции Шаньдун, Китай [Dong et al., 1983] в ассоциации с оливином, пиропом, магнезиальным хромитом, флогопитом, ильменитом, хромдиопсидом, апатитом, цирконом и муассонитом. Как продукт изменения ксенокристаллов магнезиального хромита имэнгит описан в тяжелом концентрате из кимберлитового силла в районе Гуаниамо, Венесуэла [Nixon, Condcliffe, 1989] и в кимберлитах Тёрки-Уэлл, Австралия [Kiviets et al., 1998]. Во всех случаях имэнгит содержит BaO (до 3.4 мас. % в имэнгите из Венесуэлы), указывая на твердый раствор с хауторнеитом [Peng, Lu, 1985; Grey et al., 1987; Haggerty et al., 1989]. Согласно композиционным характеристикам, хромиты, по которым развивается имэнгит, принадлежат к ассоциации алмазоносных гранатовых гарцбургитов [Nixon, Condcliffe, 1989]. Известны находки включений имэнгита в алмазах [Sobolev et al., 1988; Bulanova et al., 2004], где он также ассоциирует с типоморфными минералами гарцбургитовой ассоциации: хромитом, субкальциевым хромистым гранатом, энстатитом. Включения имэнгита, описанные в работе Г. П. Булановой и др. [Bulanova et al., 2004], содержат повышенные концентрации Rb, Cs, Sr. По мнению некоторых авторов, имэнгит является продуктом реакций алмазоносных гарцбургитов, слагающих основание литосферной

континентальной мантии на глубинах порядка 150 км, с флюидами, обогащенными К, HFSE, LREE. Подтверждением тому является находка имэнгита и хауторнеита в метасоматической жиле, секущей гарцбургитовый ксенолит из кимберлитов трубки Буллфонтейн (ЮАР), совместно с флогопитом, калиевым рихтеритом, минералами группы линдслеит-матиасит, армалколитом, рутилом, ильменитом [Haggerty et al., 1989].

Матиасит – титанат группы кричтонита с формулой $AM_{21}O_{38}$, где в позиции *A* присутствует изоморфизм $Ba \leftrightarrow K$ (линдслеит-матиасит). Линдслеит был впервые обнаружен [Haggerty, 1975] в кимберлитовой трубке Де Бирс (ЮАР). Затем этот минерал был описан в ксенолитах метасоматизированных перидотитов из кимберлитов Южной Африки [Erlank, Rickard, 1977; Smyth et al., 1978; Jones et al., 1982]. В метасоматизированных перидотитах встречаются как крайние члены ряда линдслеит-матиасит, так и промежуточные члены этого твердого раствора. Характерными минералами, сопутствующими линдслеиту и матиаситу, являются флогопит, диопсид, К-рихтерит, Nb-Cr-рутил и Mg-Cr-Nb-ильменит [Haggerty et al., 1983]. Синтетические аналоги линдслеита и матиасита в системе $TiO_2-ZrO_2-Cr_2O_3-Fe_2O_3-MgO-BaO-K_2O$ стабильны до 11 ГПа и 1400-1600 °С [Konzett et al., 2005], образуя ограниченные твердые растворы.

Прайдерит – титанат группы голландита, являющийся твердым раствором в системе $A^{2+}B^{2+}Ti_7O_{16} - A^{+}B^{2+}Ti_7O_{16} - A^{2+}B^{3+}Ti_6O_{16} - A^{+}B^{3+}Ti_6O_{16}$, где позиция *A* занята Ba и K, а также Na, Pb, Sr, Ca и REE; позиция *B* вмещает Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al, Cr, замещающие Ti. Прайдерит описан как типоморфный минерал лейцитовых лампроитов, известен в метасоматизированных перидотитовых ксенолитах из кимберлитов, а также в виде включений в алмазах. Стоит отметить, что хромистая разновидность прайдерита встречается исключительно в метасоматизированных перидотитах [Haggerty, 1987; Folley et al., 1994; Konzett et al., 2013; Naemura et al., 2015].

Несмотря на то, что впервые прайдерит был упомянут еще в 1939 году в лейцитовых лампроитах на западе Кимберли (Западная Австралия [Prider, 1939], данный минерал остается малоизученным. Первые КР-спектры прайдерита были приведены в работе К. Norrish (1951). Прайдерит встречается в основном в перидотитах и является промежуточным членом твердого раствора между $BaCr_2Ti_6O_{16}$ и $KCr_2Ti_6O_{16}$. Прайдерит из гипербазитовых ксенолитов детально описан в работе Haggerty, [1987].

Экспериментальные данные по стабильности К-Ва-титанатов опубликованы лишь в нескольких работах. Стабильность прайдерита и его Fe^{3+} , Fe^{2+} -содержащих разновидностей, а также минералов групп кричтонита (LIMA) исследовалась экспериментально в системе при давлениях 3.5, 4.3 и 5 ГПа [Foley et al., 1994]. При этих

давлениях прайдерит стабилен до температур порядка 1500°C, минералы группы LIMA стабильны при 3.5 ГПа и 1300 °C, а также при 5 ГПа и 1200-1350 °C [Foley et al., 1994].

При этих давлениях прайдерит стабилен до температур порядка 1500°C. Синтез хромсодержащего прайдерита, характерного для метасоматизированных перидотитов, ранее не проводился. Эксперименты [Konzett et al., 2005] показали, что имэнгит стабилен при 7, 10 и 15 ГПа до температур 1400-1500°C, где он начинает разлагаться с образованием ряда Ti-Cr-оксидов. Все эти данные указывают на очень широкую P-T-область существования прайдерита и имэнгита, подтверждая возможность сосуществования этих фаз с алмазом в условиях субконтинентальной верхней мантии, а, возможно, и до глубин переходной зоны [Konzett et al., 2005]. Экспериментальные исследования [Foley et al., 1994; Konzett et al., 2005] показывают, что стабильность прайдерита и имэнгита в мантийных парагенезисах контролируется не столько температурой и давлением, сколько составом среды, прежде всего, активностью калия – компонента, поставляемого метасоматизирующими флюидами или расплавами. Возможность образования этих минералов в результате взаимодействия минералов перидотитов с калиевыми флюидами различного состава ранее экспериментально не изучалась.

В данной работе впервые приведены результаты экспериментов по кристаллизации хромистого прайдерита и имэнгита в ходе взаимодействия ассоциации хромит+ильменит/рутил с флюидом H₂O-CO₂-K₂CO₃ при 5 ГПа и 1200°C. Полученные нами экспериментальные данные указывают на очень широкую область стабильности K-Ва-титанатов, подтверждая возможность сосуществования этих фаз с алмазом в субконтинентальной верхней мантии в областях генерации лампроитов, а также кимберлитов I и II групп. Данные минералы могут быть основными концентраторами LILE и HFSE не только в литосферной мантии, но и в астеносфере, возможно, и до глубин переходной зоны [напр. Konzett et al., 2005].

8.2. 2. Синтез прайдерита

Нами были проведены эксперименты по синтезу хромистого прайдерита в системах высокохромистая шпинель – рутил - K₂CO₃ – щавелевая кислота и высокохромистая шпинель – ильменит - K₂CO₃ – щавелевая кислота.

Система шпинель – рутил - K₂CO₃ – щавелевая кислота (рис.8.6). В качестве стартовых веществ выступали: (1) смесь природной высокохромистой шпинели (из кимберлитовой трубки Пионерская, Архангельск) и синтетического порошка TiO₂ (1:1); (2)

смесь порошков K_2CO_3 и щавелевой кислоты (9:1). Смесь (1) и смесь (2) перемешивались в соотношениях 4:1 по массе (Таблица 8.1).

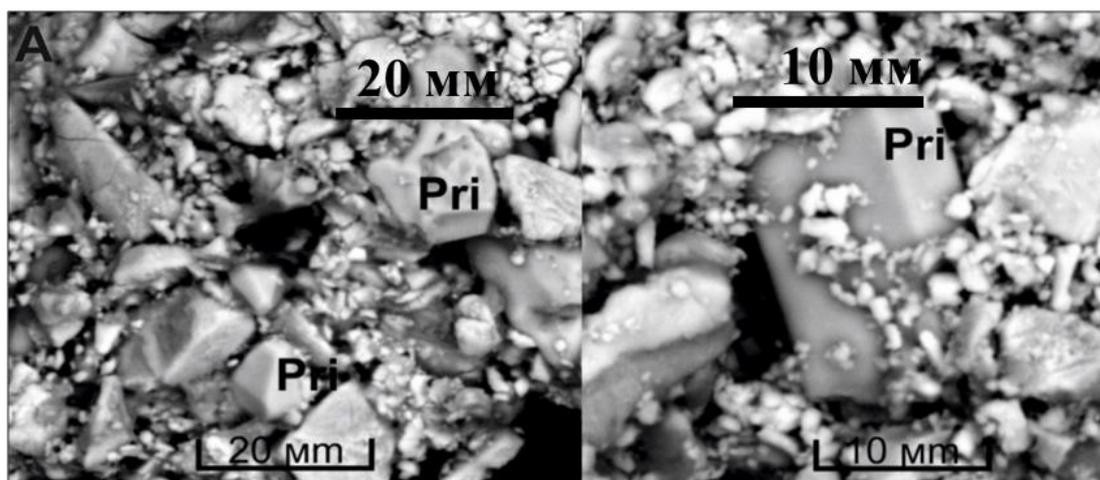


Рис.8.6. Продукты эксперимента в системе хромит-рутил- K_2CO_3 - H_2O - CO_2 при 5 ГПа и 1200°C: Вытянутые кристаллы прайдерита. Изображения в обратно рассеянных электронах

В результате поставленных экспериментов были получены 4 фазы: хромистая шпинель, рутил, К-Сг прайдерит и кварц. Кристаллы прайдерита размером от нескольких до 40 мкм обладают как ксеноморфной, так и гипидиоморфной вытянутой формой (искаженный октаэдр) с соотношением граней 1 к 3. Встречаются как отдельные кристаллы прайдерита, так и его включения в рутиле, что согласуется с природными данными о сонахождении прайдерита с титанитом в гранатовых перидотитах Богемского Массива, Чехия [Naemura et al.,2015]. Представительные составы полученных фаз представлены в **Таблице 8.2**.

Синтез К-Сг прайдерита осуществлён впервые, и проведенные эксперименты показали возможность кристаллизации прайдерита в результате метасоматической реакции высокохромистой шпинели и рутила с калиевым водно-щелочным флюидом в поле термодинамической стабильности самого минерала.

Система шпинель – ильменит - K_2CO_3 – щавелевая кислота. Приведены результаты первых экспериментов по кристаллизации хромистого прайдерита и имэнгита.

В качестве стартовых веществ для экспериментов использовались природный хромит, синтетический порошок TiO_2 и природный ильменит, которые смешивались в соотношениях 1:1 или 2:1 по массе. Хромит состава $(Mg_{0.49-0.54}Fe_{0.50-0.54}Mn_{0.01-0.02}Zn_{0.01-0.02})(Al_{0.17-0.20}Cr_{1.55-1.61}Fe_{0.10-0.22}Ti_{0.03-0.07})O_4$ был отобран из кимберлитовой трубки Пионерская, Архангельск. Ильменит состава $Fe_{0.98}Mg_{0.01}Mn_{0.06}Ti_{0.93}Al_{0.01}Nb_{0.01}O_3$ представляет ксенокристалл из кимберлитовой трубки Удачная, Якутия. В качестве флюидной составляющей использовалась смесь K_2CO_3 и щавелевой кислоты в соотношении 9:1 по массе. Смеси хромит + TiO_2 смешивалась с «флюидной» смесью в

соотношениях 4:1 и 9:1, а хромит + ильменит - в соотношении 9:1 по массе. Эксперименты проводились в ИЭМ РАН на установке «наковальня с лункой» НЛ-13Т.

В процессе экспериментов впервые был синтезирован хромистый прайдерит, не содержащий Ва.

8.2.3. Синтез матиасита

Приведены результаты первых экспериментов по совместному синтезу матиасита и хромистого прайдерита в системе хромит – рутил - $K_2CO_3 - H_2O-CO_2$ при 5 ГПа и 1200⁰С. Показана возможность кристаллизации матиасита без участия ильменита, т.е. для образования матиасита в результате метасоматоза наличие ильменита не является обязательным условием, как предполагают исследователи [Almeida et al., 2014]. Нами показано, что достаточными минералами-донорами являются железистый хромит и рутил.

Синтетические аналоги линдслеита и матиасита в системе $TiO_2-ZrO_2-Cr_2O_3-Fe_2O_3-MgO-BaO-K_2O$ стабильны до 11 ГПа и 1400-1600 ⁰С [Konzett et al., 2005], образуя ограниченные твердые растворы.

В качестве стартовых веществ использовались смеси природного хромита и синтетического порошка TiO_2 (2:1). Был использован хромит из ксенолита гранатового лерцолита кимберлитовой трубки Пионерская, Архангельск [Бутвина и др., 2019]. Смесь хромит+ TiO_2 смешивалась со смесью K_2CO_3 и щавелевой кислотой (9:1). В продуктах опытов со смесью хромит + TiO_2 (1:1) с флюидом (4:1 по массе), в ассоциации с хромитом и рутилом появляется только К-Сг прайдерит [см. Бутвина и др., 2019]. В данной работе ассоциация соотношение хромит+рутил: флюид составляло 9:1 по массе. В результате поставленных опытов произошла совместная кристаллизация матиасита и К-Сг прайдерита. Матиасит образует субидиоморфные вытянутые призматические зерна размером до 200 мкм. Прайдерит образует ксеноморфные зерна размером до 40 мкм (рис.8.7), представительные анализы химического состава матиасита представлены в (табл.8.3).

Проведенные эксперименты впервые показали возможность совместной кристаллизации матиасита и К-Сг прайдерита в результате реакции высокохромистой шпинели и рутила с калиевым водно-карбонатным флюидом (расплавом) в условиях верхней мантии. Была показана возможность кристаллизации матиасита без участия ильменита, т.е. для образования матиасита в результате метасоматического метасоматоза наличие ильменита не является обязательным условием, как предполагают исследователи [Almeida et al., 2014], а достаточными минералами-донорами являются железистый хромит и рутил.

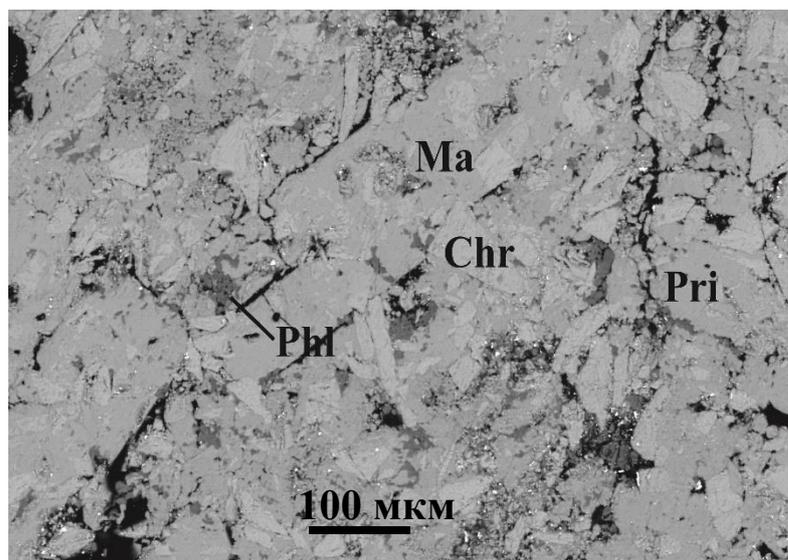


Рис 8.7. Продукты эксперимента в системе хромит-рутил-К-водно-карбонатный флюид при 5 ГПа и 1200°C: хромит, магиасит, прайдерит, флогопит. Условные обозначения: Chr-хромит; Pri- прайдерит; Ma-магиасит; Phl-флогопит Изображение в обратно рассеянных электронах

8.2.4. Синтез имэнгита

Эксперименты показали, что имэнгит стабилен при 7, 10 и 15 ГПа до температур 1400-1500°C, где он начинает разлагаться с образованием ряда Ti-Cr-оксидов. В данной работе приведены результаты синтеза имэнгита в системах: при реакциях ассоциации хромит + ильменит/рутил с флюидом $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{K}_2\text{CO}_3$ при 5 ГПа и 1200°C.

Система хромит-рутил-флюид

Смесь хромит + TiO_2 смешивалась с «флюидной» смесью в соотношениях 4:1 и 9:1. В продуктах опыта с хромитом в отсутствие Ti-содержащих фаз (опыт Sp1; табл. 8.1) калийсодержащие оксидные фазы не были обнаружены. Прайдерит в ассоциации с хромитом и рутилом появляется в продуктах опытов со смесью хромит + TiO_2 (опыты Sp2, A1, A2 в табл. 8.1). Он образует ксеноморфные или субидиоморфные зерна размером до 40 мкм. Встречаются как отдельные зерна прайдерита, так и его включения в рутиле.

Система хромит-ильменит-флюид. В продуктах опытов с участием ильменита (опыты B1, B2 в табл.8.1) наряду с прайдеритом был идентифицирован имэнгит, который ассоциирует также с хромитом, ильменитом и небольшим количеством флогопита (образовавшегося, вероятно, благодаря присутствию силикатных фаз – включений в стартовом ильмените). Здесь ксеноморфные или субидиоморфные зерна прайдерита размером 10 - 100 мкм местами содержат включения хромита, ильменита и имэнгита. Помимо включений в прайдерите, имэнгит образует сростания с хромитом, схожие со сростаниями, известными в природных образцах.

Экспериментально продемонстрирована возможность совместной кристаллизации имэнгита и прайдерита в результате реакции хромита и ильменита с калиевым водно-карбонатным флюидом. Это подтверждает возможность совместного образования титанатов в результате метасоматоза верхнемантийных перидотитов с участием карбонатных флюидов или расплавов в условиях высокой активности калия [Konzett et al., 2005].

Химические составы имэнгита, полученного при реакции хромита и ильменита с флюидом, образуют тренд, отражающий изоморфизм $(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}) + \text{Ti} \leftrightarrow \text{Cr}$ при постоянстве соотношения $(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})/\text{Ti}$. Имэнгит характеризуется относительно низким содержанием Al_2O_3 и MgO . Он содержит до 3.5 мас. % Nb_2O_5 , при том, что сосуществующий с ним прайдерит не содержит этот компонент (Таблица 8.3).

Важно отметить, что в проведенных экспериментах нам не удалось получить имэнгит в результате реакции флюида с хромитом, что наблюдается в природных ассоциациях [Nixon et al., 1989; Haggerty, 1991; Sobolev et al., 1998; Bulanova et al., 2004]. Синтезированные имэнгиты отличаются от природных большим содержанием Ti, Fe и Nb (Таблица 7.3; Рис. 7.8). Природные имэнгиты обычно несут признаки наследования композиционных характеристик шпинели [Dong et al., 1983]. Так, авторы работ [Dong et al., 1983; Bulanova et al., 2004] отмечают повышенное содержание TiO_2 в шпинели, ассоциирующей с имэнгитом, приписывая эту особенность взаимодействию зерна шпинели с метасоматизирующими флюидами/расплавами. В наших экспериментах также не воспроизведены некоторые другие характерные особенности природных имэнгитов. Например, для последних характерны повышенные концентрации SiO_2 (до 1 мас. %), что указывает на важную роль силикатов в образовании этого минерала. Все эти данные указывают на специфические условия образования имэнгита.

8.2.5. О роли редких K-титанатов в процессе мантийного метасоматоза

Преобразования мантийных пород под воздействием внешних флюидов и расплавов вне зависимости от их происхождения и состава – это мантийный метасоматоз [Lloyd and Bailey, 1975; Harte and Gurney, 1975; Bailey, 1982, 1987; Menzies and Hawkesworth, 1987, Сафонов, Бутвина, 2016].

Мантийный метасоматоз подразделяется на два вида: модальный — образование новых минеральных фаз (флогопит, амфибол и др.) и скрытый — обогащение пород несовместимыми элементами [Harte, 1983; Dawson, 1984, Щукина и др., 2015] без формирования новых минералов. Прямым доказательством воздействия метасоматических

расплавов на породы литосферной мантии может являться наличие флогопита в мантийных перидотитах [Carswell, 1973; Harte, 1983; Erlank et al., 1987; Щукина и др., 2015].

Модальный мантийный метасоматоз выражается в образовании нехарактерных для перидотитов и эклогитов фаз [O'Reilly et al., 2013]. Помимо широко распространенных амфиболов, флогопита, апатита, карбонатов, сульфидов, титанита, ильменита, рутила, в ходе этого процесса появляются уникальные минеральные фазы. Среди них особое место занимают минералы групп кричтонита, магнетоплюмбита и голландита - редкие титанаты, обогащенные LILE, прежде всего, K и Ba, HFSE, LREE, 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 K-Ba-титанатов характеризует, по-видимому, наивысшие степени метасоматических преобразований в условиях высоких активностей калия, заметно больших, чем необходимо для образования флогопита и калиевого рихтерита [Сафонов, Бутвина, 2016].

Хромит и ильменит являются наиболее типичными минералами перидотитов, ассоциирующими с K-Ba-титанатами, и, поэтому образование этих фаз обычно связывают с реакциями, прежде всего, с хромита с богатыми щелочами флюидами (расплавами) с низкой активностью SiO₂.

Очевидно, что за стабильность минералов группы хауторнеит-имэнгит (так же, как и минералов группы кричтонита – линдслеита и матиасита) отвечают не только температура и давление, но и специфические химические условия. Эти минералы формируются тогда, когда способность концентрирования K и LILE во флогопите и калиевом рихтерите исчерпана. Иначе говоря, образование минералов групп хауторнеит-имэнгит и линдслеит-матиасит в ассоциациях с флогопитом и/или калиевым рихтеритом отвечает наивысшим степеням мантийного метасоматоза, которые обычно определяются высокими концентрациями (активностями) щелочных компонентов, прежде всего калия, во флюидах. Флюиды с высокими концентрациями щелочных солевых компонентов хорошо известны в виде включений в алмазах из кимберлитов [Konzett et al., 2014] – наиболее близким к тем ассоциациям, для которых стабильны минералы групп хауторнеит-имэнгит и линдслеит-матиасит. Эти минералы могут рассматриваться как индикаторы активности высокощелочных водных или водно-углекислых флюидов в верхней мантии.

Активности H₂O и/или CO₂ рассматриваются как наиболее важные факторы мантийного метасоматоза [O'Reilly and Griffin, 2013; Сафонов, Бутвина, 2016]. Однако, другие компоненты, такие как K, также могут проявлять свойства вполне подвижных в этом

процессе, и их участие является очень важным в процессе “модального” мантийного метасоматоза [Harte, 1983; O'Reilly and Griffin, 2013, Сафонов, Бутвина, 2016].

Взаимодействие обогащенных солями К флюидов с мантийными породами выражается в “модальном” метасоматозе, который сопровождается возникновением новых К-содержащих минералов [Сафонов, Бутвина, 2016].

Также, как и для коровых процессов, реакции, протекающие в породах могут быть использованы для оценок вариаций активностей К в процессах мантийного метасоматоза [Сафонов, Бутвина, 2016].

Выводы

Проведенные эксперименты в системе: *хромит-рутил-К-водно-карбонатный флюид при 5 ГПа и 1200⁰С* впервые показали возможность совместной кристаллизации матиасита и К-Сг прайдерита в результате реакции высокохромистой шпинели и рутила с калиевым водно-карбонатным флюидом (расплавом) в условиях верхней мантии. Была показана возможность кристаллизации матиасита без участия ильменита, т.е. для образования матиасита в результате метасоматоза наличие ильменита не является обязательным условием, как предполагают исследователи [Almeida et al., 2014], а достаточными минералами-донорами являются железистый хромит и рутил.

В процессе экспериментов при реакции: *хромит + ильменит/рутил с флюидом H₂O-CO₂-K₂CO₃ при 5 ГПа и 1200⁰С* впервые был синтезирован хромистый прайдерит, не содержащий Ва. Соотношения Fe, Сг и Тi в синтезированных прайдеритах аналогичны соотношениям этих катионов в природных Сг-содержащих прайдеритах из метасоматизированных перидотитов. Это указывает на то, что состав Сг-содержащего прайдерита, по-видимому, не зависит как от условий образования этого минерала, так и от ассоциации, в которой он образуется. Тем не менее, даже богатый хромом прайдерит не образуется по хромиту напрямую, а требует присутствия каких-либо Тi-содержащих фаз.

Также, при этих же РТ-параметрах, экспериментально продемонстрирована совместная кристаллизация имэнгита и прайдерита, в результате реакции хромита и ильменита с калиевым водно-карбонатным флюидом, что подтверждает возможность совместного образования титанатов в результате метасоматоза верхнемантийных перидотитов с участием карбонатных флюидов или расплавов в условиях высокой активности калия. Природные имэнгиты обычно несут признаки наследования композиционных характеристик шпинели [Nixon et al., 1989; Vulanova et al., 2004]. Авторы в своих работах [Nixon et al., 1989; Vulanova et al., 2004] отмечают повышенное содержание TiO₂ в шпинелях, ассоциирующихся с имэнгитом, приписывая эту особенность

взаимодействию шпинелей с метасоматизирующими флюидами/расплавами. В наших экспериментах также не воспроизведены и другие характерные особенности природных имэнгитов. Например, для них характерны повышенные концентрации SiO_2 (до 1 мас. %; [Bulanova et al., 2004]), что указывает на важную роль силикатов в образовании этого минерала. Все эти данные указывают на специфические условия образования имэнгит, выявление которых - задача дальнейших экспериментальных исследований.

Эксперименты по взаимодействию ассоциаций хромит+рутил и хромит+ильменит в присутствии небольшого количества силикатного материала с жидкостями $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{K}_2\text{CO}_3$ при давлении 5 ГПа выявляются следующие особенности кристаллизации этих фаз, что дали возможность проинтерпретировать ассоциации титанатов в метасоматизированных мантийных перидотитах:

1) Подтверждена принципиальная возможность образования МГК (минералов группы кричтонита) и МГМ, а также прайдерита в результате реакций хромита со щелочными водно-углекислыми жидкостями и расплавами. Такие вещества считаются основными агентами калиевого метасоматоза, которые приводят к образованию титанатов в верхней мантии [Konzett et al., 2013; Резвухин и др., 2018].

(2) Образование редких К-титанатов (имэнгита, матиасита и прайдерита) не происходит непосредственно напрямую по хромиту [например, Haggerty et al. 1983; Haggerty, 1983; Nixon, Condliffe, 1989], а требует дополнительного источника титана. В качестве таких источников выступают рутил и ильменит, которые сами по себе обычно являются продуктами модального метасоматоза перидотитов. Данные эксперименты демонстрируют, что образование титанатов, вероятно связано с повторяющимися стадиями метасоматоза в мантийных перидотитах.

(3) Это подтверждается отношениями титанатов с флогопитом. Образование ассоциации титанатов с флогопитом требует более высокой активности калия, нежели образование одного флогопита. Такие условия могут вновь сформироваться на наиболее прогрессивных стадиях мантийного метасоматоза.

(4) Отношение между титанатами также является функцией активности калиевого компонента в системе жидкость/расплав. Прайдерит является показателем наибольшей активности калия в минералообразующей среде. Приведенные примеры природных ассоциаций [Zhou, 1986; Konzett et al., 2013; Алмейда и др., 2014] Хорошо подтверждают полученные нами результаты

Таблица 8.1. Условия и результаты экспериментов

| № Опыта | Изначальная смесь, (мас. соотношение) | Флюид, (мас. соотношение) | Содержание флюида в системе, % | Выдержка, час | Синтез прайдерита, имэнгита, матиасита, флогопита |
|---------|---------------------------------------|--|--------------------------------|---------------|---|
| Sp1 | Хромит | K ₂ CO ₃ | 30 | 21 | -, -, -, флогопит |
| Sp2 | Хромит: рутил (1:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (9:1) | 20 | 23 | +, -, -, флогопит |
| A1 | Хромит: рутил (1:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (9:1) | 10 | 20 | +, -, -, флогопит |
| A2 | Хромит: рутил (2:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (9:1) | 10 | 24 | +, -, -, флогопит |
| B1 | Хромит: ильменит:(1:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (9:1) | 10 | 22 | +, +, -, флогопит |
| B1-1 | Хромит: ильменит: (1:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (7:3) | 10 | 22 | -, +, +, флогопит |
| B1-2 | Хромит: ильменит: (1:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (5:5) | 10 | 22 | -, +, -, флогопит |
| B1-3 | Хромит: ильменит: (1:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (3:7) | 10 | 22 | -, -, -, флогопит |
| B1-4 | Хромит: ильменит: (1:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. 1:9) | 10 | 22 | -, -, -, флогопит |
| B2 | Хромит: ильменит: (2:1) | K ₂ CO ₃ : щ.к. (9:1) | 10 | 20 | +, +, -, флогопит |

Таблица 8.2. Представительные анализы экспериментально полученного К-Сг прайдерита в результате реакции высокохромистая шпинель+рутил+водно-щелочной флюид при 5 ГПа и 1200⁰С.

| №№ | 4 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 13 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Минерал | Прайдерит |
| TiO ₂ | 69,45 | 69,03 | 71,6 | 69,77 | 69,41 | 69,96 | 70,54 | 70,94 |
| Cr ₂ O ₃ | 15,62 | 16,45 | 15,2 | 16,76 | 16,27 | 17,1 | 17,19 | 16,21 |
| FeO | 0,83 | 0,5 | 0,26 | 0,84 | 0,85 | 0,33 | 0,72 | 0,48 |
| Al ₂ O ₃ | 0,91 | 0,89 | 0,98 | 0,67 | 0,49 | 0,33 | 0,77 | 0,47 |
| K ₂ O | 11,26 | 11,39 | 11,21 | 11,29 | 11,37 | 11,29 | 11,53 | 10,59 |
| MnO | 0,37 | 0,03 | 0,13 | 0,18 | 0 | 0,13 | 0,21 | 0,01 |
| MgO | 0,68 | 0,51 | 0,56 | 0,67 | 0,63 | 0,72 | 0,78 | 0,73 |
| Total | 99,12 | 98,8 | 99,94 | 100,18 | 99,02 | 99,86 | 101,74 | 99,43 |
| | | | | | | | | |
| Ti | 6,23 | 6,22 | 6,34 | 6,20 | 6,25 | 6,24 | 6,18 | 6,32 |
| Cr | 1,47 | 1,56 | 1,42 | 1,57 | 1,54 | 1,60 | 1,58 | 1,52 |
| Fe ³⁺ | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0,07 | 0,08 | 0,03 | 0,06 | 0,04 |
| Al | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,11 | 0,07 |
| K | 1,71 | 1,74 | 1,68 | 1,70 | 1,74 | 1,71 | 1,71 | 1,60 |
| Mn | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| Mg | 0,12 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,13 |

Таблица 8.3. Представительные анализы прайдерита, имэнгита и матиасита.

| №№ | B1-12 | B1-3 | B1-1-2 | B1-1-12 |
|--------------------------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Минерал | Yim | Yim | Yim | Ma |
| TiO ₂ | 34,29 | 38,34 | 36,11 | 51,16 |
| Cr ₂ O ₃ | 25,31 | 21,9 | 23,14 | 2,29 |
| FeO* | 23,09 | 26,3 | 24,4 | 32,42 |
| Al ₂ O ₃ | 1,97 | 1,68 | 1,56 | 0,39 |
| K ₂ O | 4,78 | 4,88 | 5,15 | 1,89 |
| MnO | 1,79 | 1,80 | 1,68 | 2,82 |
| MgO | 2,20 | 1,82 | 2,27 | 5,36 |
| Nb ₂ O ₅ | 2,94 | 3,44 | 2,35 | 2,00 |
| Сумма | 96,37 | 100,16 | 96,66 | 98,33 |
| | Per 19 O | | | Per 38 O |
| Ti | 4,04 | 4,34 | 4,23 | 12,05 |
| Cr | 3,14 | 2,60 | 2,85 | 0,57 |
| Fe ³⁺ | 2,24 | 2,41 | 2,47 | 8,48 |
| Fe ²⁺ | 0,48 | 0,57 | 0,39 | - |
| Al | 0,36 | 0,30 | 0,29 | 0,14 |
| K | 0,96 | 0,94 | 1,02 | 0,75 |
| Mn | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,75 |
| Mg | 0,51 | 0,41 | 0,53 | 2,50 |
| Nb ⁵⁺ | 0,24 | 0,27 | 0,19 | 0,28 |

*FeO=FeO+Fe₂O₃

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

9.1. Геохимические данные

Для 25 образцов ксенолитов перидотитового, пироксенитового и эклогитового типов в гранатах и клинопироксенах были измерены содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) (**Приложение В**). Измерения осуществлялись методом масс-спектрометрии ICP-MS с лазерной абляцией, диаметр лазерного пучка составлял 30 мкм. Данные исследования проводились в аналитическом центре НГУ (г. Новосибирск, оператор Денисенко А.А.). Всего было выполнено более 120 аналитических определений. В случае наблюдаемой зональности анализировались центры и края зерен. Приборы и параметры съемки указаны в разделе **3**. В приложении приведены данные по составам граната и клинопироксена (**Таблица 9.1. и Таблица 9.2, Приложение В**).

Основными метасоматизирующими агентами являются расплавы или флюиды, среди которых по химическому составу были выделены два типа: силикатный и карбонатитовый [Agashev et al., 2013; Похиленко и др., 2015]. Для силикатного метасоматоза характерно обогащение несовместимыми высокозарядными элементами, такими как (HFSE – Zr, Hf, Ta, Nb, Y), а также повышенное отношение Ti/Eu и пониженное La_n/Yb_n .

Продукты карбонатитового метасоматоза характеризуются аномально повышенным содержанием Sr и легких редких земель (LREE), а также пониженным тяжелых редких земель (HFSE) относительно других несовместимых элементов [Ionov et al., 1993; Rudnick et al., 1993; Coltorti et al., 1999; 2000; Wang et al., 2001; Bodinier et al., 2004].

Литосферная мантия в различных геодинамических обстановках может сильно отличаться по степени деплетированности, мощности, и геотермическим градиентам. Она имеет преимущественно перидотитовый состав, который может варьировать от наиболее деплетированных дунитов ($Ol \pm Sp$) и гарцбургитов ($Ol + Opx \pm Sp$) до фертильных лерцолитов ($Ol + Opx + Cpx \pm Grt \pm Sp$) [Griffin et al., 1998; 1999a; 2007; O'Reilly et al., 2001].

Содержание Ti, Zr и Y в гранате является хорошим геохимическим индикатором, который отражает степень метасоматического воздействия на протолит, в котором находился изначальный гранат, и более полно отражают тип парагенезиса. В гранатах с низким содержанием кальция чаще всего наблюдаются пониженные концентрации Y, Zr и Ti из деплетированных областей СКЛМ (субконтинентальная литосферная мантия); с другой стороны, воздействие на перидотиты метасоматических флюидов-расплавов,

насыщенных Y, Zr и Ti, приводит к обогащению содержащихся в перидотитах гранатов этими элементами [Dawson, Stephens, 1975a].

Низкокальциевые гранаты из деплетированной СКЛМ демонстрируют «синусоидальный» тип распределения РЗЭ и сравнительно высокие содержания средних РЗЭ (от Nd до Eu), с небольшими концентрациями в области легких и тяжелых. Такой тип распределения может быть результатом метасоматического воздействия на существовавший ранее, еще более деплетированный, гранат в результате просачивания флюида-расплава через сильно деплетированный безгранатовый гарцбургит-дунитовый протолит [Griffin et al., 1989; Smith et al., 1993; O'Reilly, Griffin, 2013].

Для гранатов лерцолитового парагенезиса, которые обогащены Y, Zr, Ti, отмечается рост в области тяжелых РЗЭ; они имеют «нормальный» спектр распределения по сравнению с гранатами гарцбургит-дунитового парагенезиса.

Содержания редких элементов в минералах из эклогитов несколько ниже, в некоторых образцах наблюдаются Eu аномалии, а также повышенные содержания в области средних редкоземельных элементов (MREE).

Фреем и Грином [Frey et al., 1974] была предложена двухстадийная модель образования, согласно которой на начальной стадии происходило частичное плавление мантийного субстрата, сопровождающееся общим истощением составов, а затем – метасоматическое обогащение силикатным расплавом/флюидом [Coltorti et al., 1999].

9.1. Геохимические особенности минералов ксенолитов

9.1.1. Гранат

Спектры РЗЭ в зернах граната из ксенолитов перидотитового парагенезиса показывают обеднение в области ЛРЗЭ (легких редкоземельных элементов) и обогащение в области ТРЗЭ (тяжелых редкоземельных элементов) для трубки Мир (рис.9.1). Для гранатов из трубки Обнаженная (рис.9.2) спектры РЗЭ выражены более интенсивно в области распределения ЛРЗЭ, что может быть признаком явно проявленных процессов метасоматоза. [Carswell, 1973; Griffin et al., 1999; Coltorti et al., 1999; Griffin et al., 2009; Агашев и др., 2010; Щукина и др., 2015; Agashev et al., 2013].

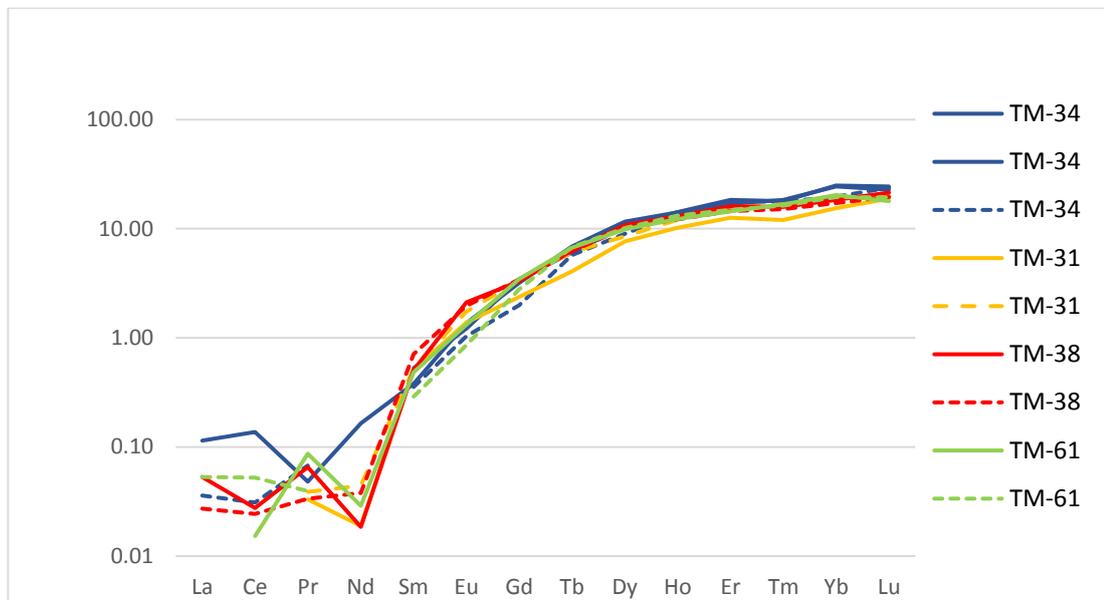


Рис 9.1 Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов в зернах граната (центральные части сплошная линия, краевые участки пунктирная линия) из перidotитового парагенезиса трубки Мир. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough Sun, 1995)

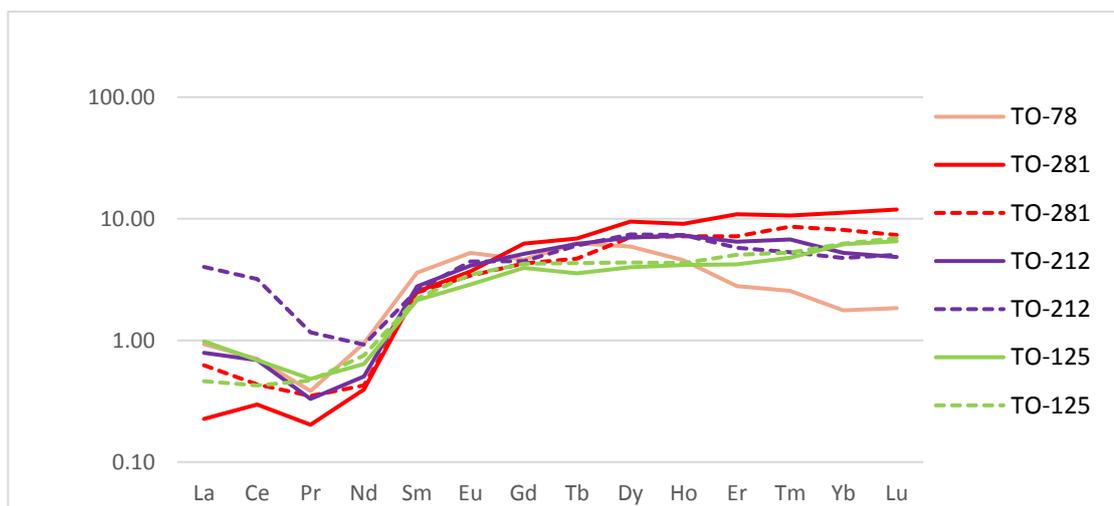


Рис 9.2. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов в зернах граната из перidotитового парагенезиса трубки Обнаженная. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

С другой стороны, распределение РЗЭ в гранатах из ксенолитов пироксенитового парагенезиса трубки Мир демонстрируют обеднение в области ЛРЗЭ и обогащение в области ТРЗЭ. Следует отметить, что в области ЛРЗЭ наблюдается 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 перidotитового парагенезиса, что можно считать признаком процессов метасоматоза (рис.9.3).

Для трубки Обнаженная также отмечаются более интенсивные спектры распределений РЗЭ в зернах граната по сравнению с проанализированными составами минерала из перидотитового парагенезиса. В области распределений ЛРЗЭ отмечаются отрицательные пики Pr и Nd, а в области СРЗЭ Eu-аномалия (рис.9.4).

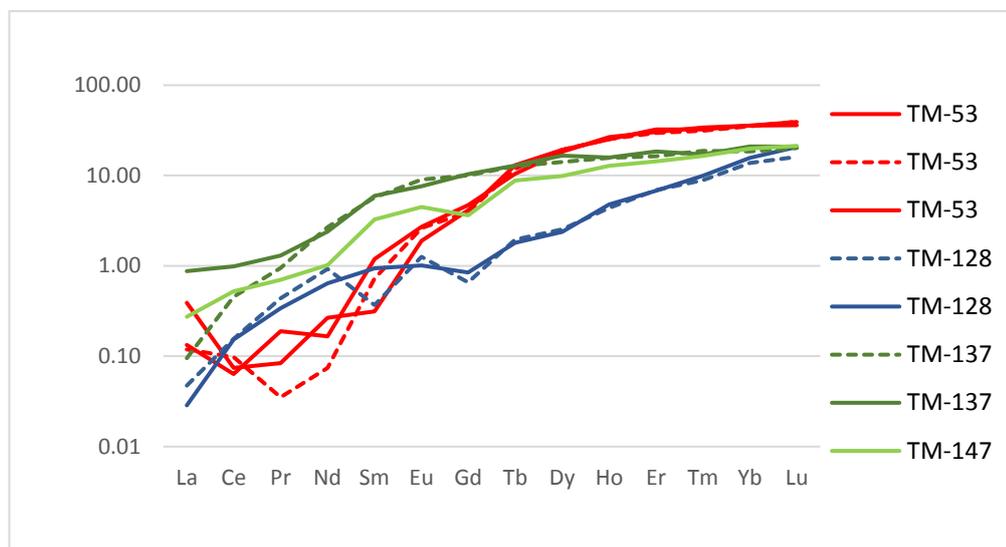


Рис 9.3. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов в зернах граната (центральные и краевые части) из пироксенитов кимберлитовой трубки Мир. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

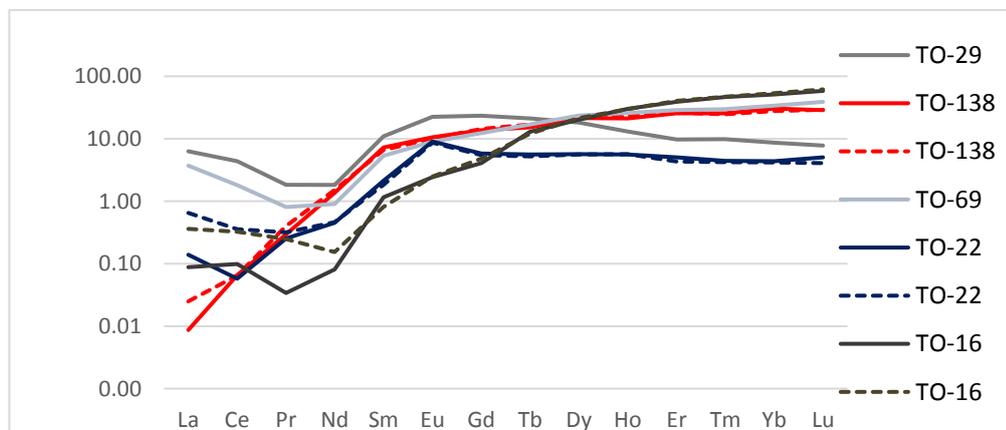


Рис 9.4. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов в зернах граната (центральные и краевые части) из пироксенитов кимберлитовой трубки Обнаженная. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

В эклогитовом парагенезисе в зернах граната распределение РЗЭ имеет типичный вид (рис.9.5). Узкие вариации составов могут быть связаны с процессами перекристаллизации.

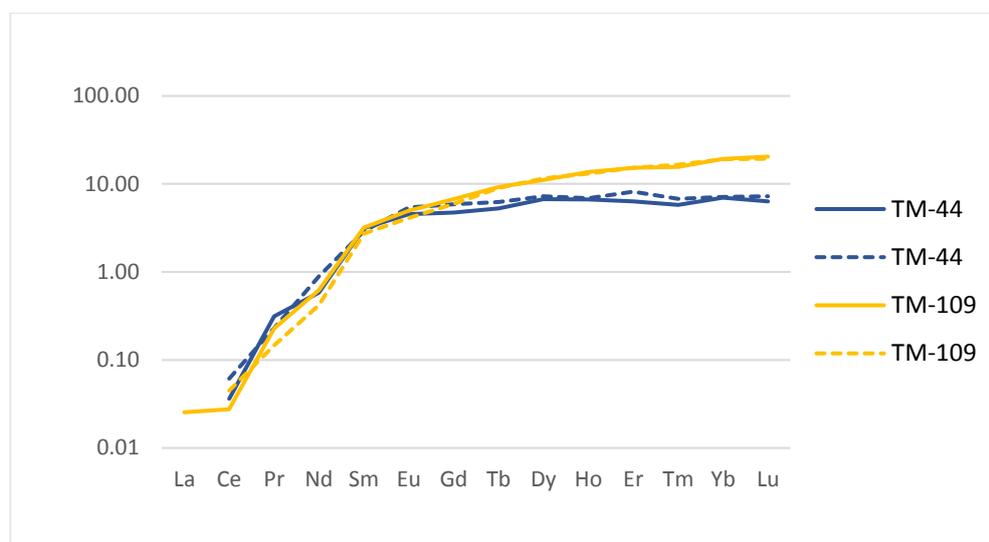


Рис 9.5. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов в зернах граната из эклогитового парагенезиса трубки Мир. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

Вариации составов граната из различных парагенезисов пород кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная представлены на рисунке 9.6.

На графике Zr / Y Рис.9.6 (а) видно, что составы зерен граната имеют широкий разброс [по Griffin, Ryan et al., 1999a]. Анализы зерен граната из перидотитового парагенезиса двух кимберлитовых трубок попадают в область деплетированных гранатов; гранаты из пироксенитового парагенезиса относятся к области фертильных лерцолитов и частично располагаются в поле расплавленного метасоматоза. Интересно, что некоторая часть состава гранатов (преимущественно это пироксенитовый парагенезис трубок Мир и Обнаженная и два анализа эклогитового парагенезиса) экстремально обогащена Y (41,36-54,17 ppm). Точки такого состава попадают за пределы полей составов крупных выборок метасоматических гранатов, выделенных в работах [Griffin, Ryan et al., 1999a].

На Рис. 9.6, (б) показано изменение содержаний TiO₂ и Zr (ppm) в изученных гранатах из трех типов пород с выделенными полями деплетированных гранатов и гранатов, испытавших воздействие высокотемпературного расплава (проявлено в составах зерен из эклогитового парагенезиса трубки Мир). Анализы гранатов из ксенолитов пироксенитового парагенезиса трубки Обнаженная демонстрируют обогащение Ti и Zr в поле флогопитового метасоматоза [по Griffin, Ryan et al., 1999a].

- Перидотиты, трубка Обнаженная
- Перидотиты, трубка Мир
- ◆ Пироксениты, трубка Обнаженная
- ◆ Пироксениты, трубка Мир
- Эклогиты, трубка Мир

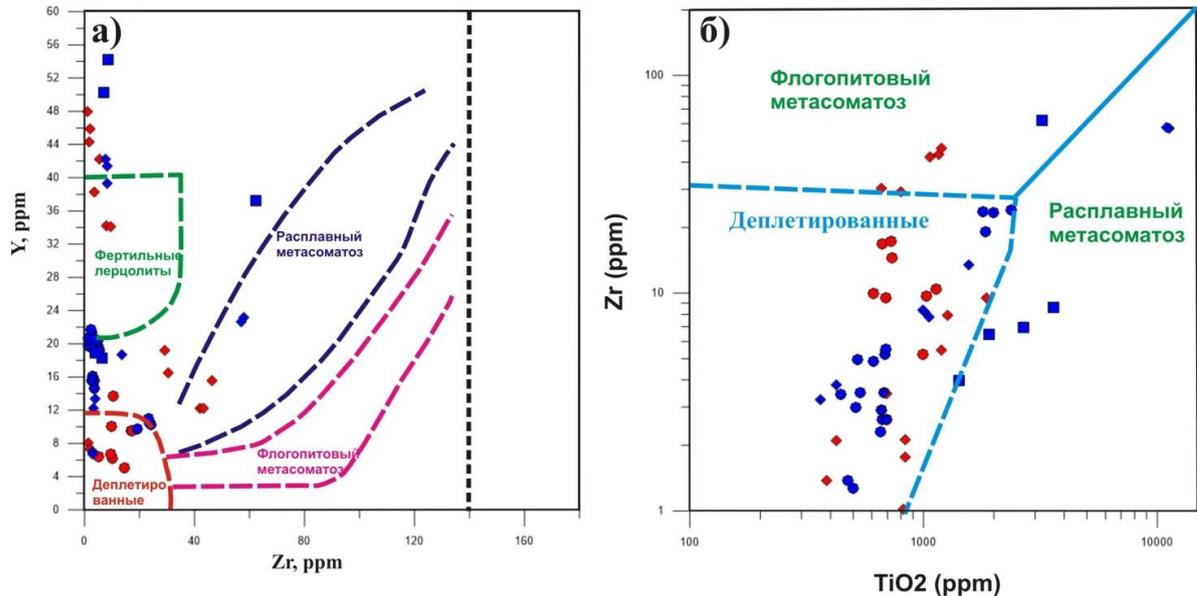


Рис. 9.6. Диаграммы в координатах (а) TiO_2 - Zr (ppm) [Griffin, Ryan et al., 1999a], (б) Y (ppm) – Zr (ppm) [Griffin, Ryan et al., 1999a] для гранатов. Условные обозначения: красные кружки –перидотитовый парагенезис, трубка Обнаженная, красные ромбики – пироксенитовый парагенезис, трубка Обнаженная; синие кружки – перидотитовый парагенезис, трубка Мир, синие ромбики –пироксенитовый парагенезис, трубка Мир, синие квадратики –эклогитовый парагенезис, трубка Мир.

9.1.2. Клинопироксен

Для зерен клинопироксена из ксенолитов перидотитового парагенезиса характерно обогащение в области ЛРЗЭ и обеднение в области СРЗЭ и ТРЗЭ (рис. 9.7-9.8)

По соотношению $[\text{La}/\text{Yb}]_n - \text{Ti}/\text{Eu}$ для клинопироксена выделяется две области проявления глубинного мантийного метасоматоза: карбонатитовый и силикатный. Зерна клинопироксена из перидотитового парагенезиса кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная (рис.9.9) попадают преимущественно в поле воздействия силикатного метасоматоза, тогда как две точки состава из трубки Обнаженная лежат в области карбонатно-силикатного метасоматоза [Coltorti et al., 1999].

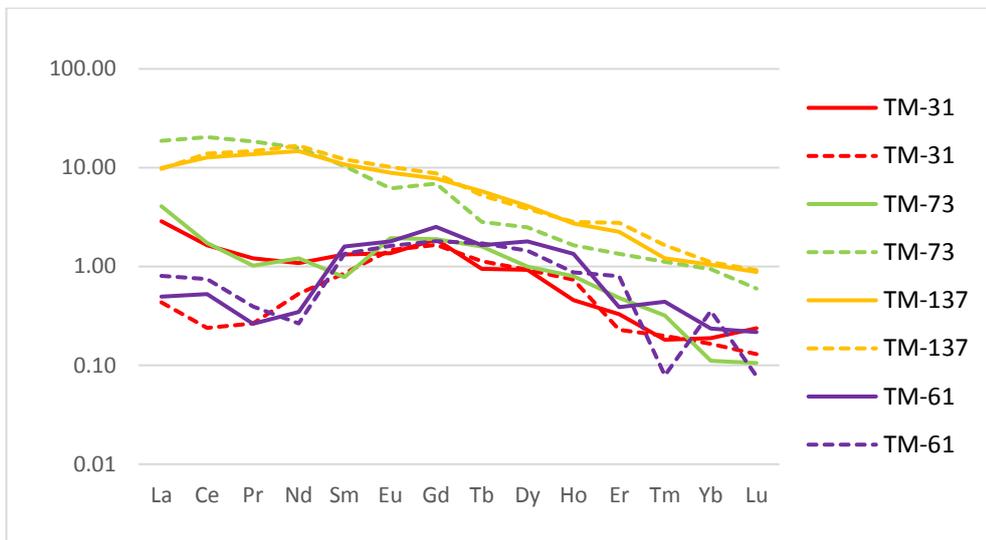


Рис.9.7. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов клинопироксена, перидотитового парагенезиса из ксенолитов трубки Мир. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

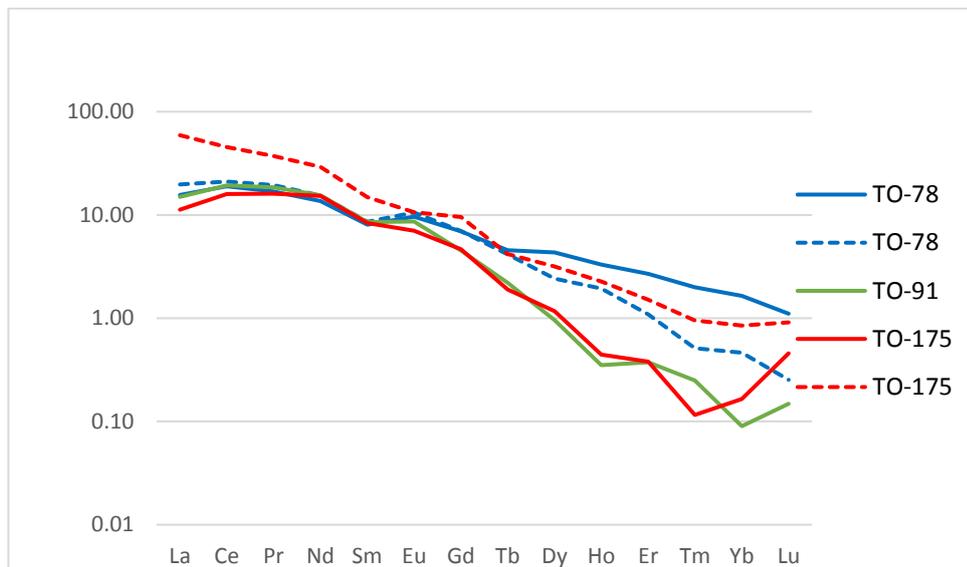


Рис. 9.8. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов клинопироксена, перидотитового парагенезиса из ксенолитов трубки Обнаженная. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

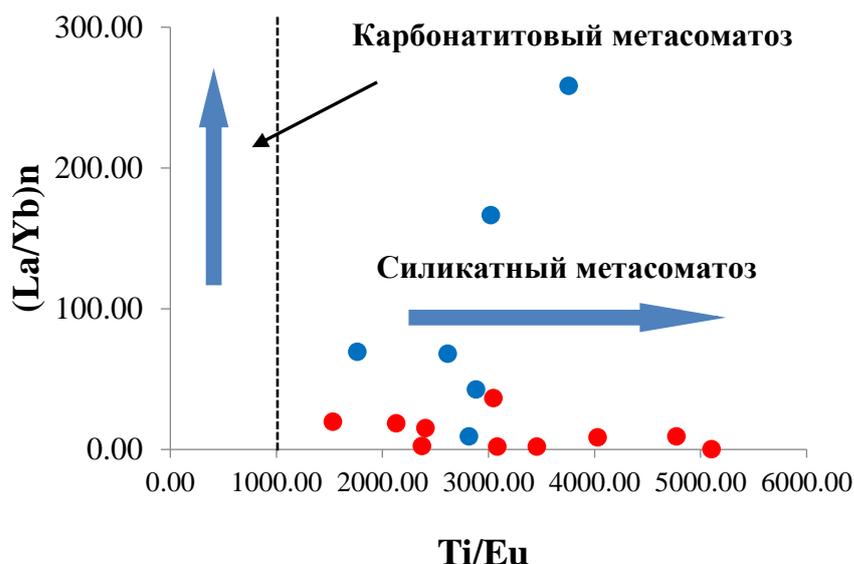


Рис.9.9. Положение точек составов клинопироксена в породах перидотитового типа парагенезиса пород на диаграмме $[La/Yb]_n - Ti/Eu$ из работы Coltorti et al., (1999). Трубка Мир (красные кружки), трубка Обнаженная (синие кружки)

В пироксенитовом парагенезисе распределение РЗЭ в клинопироксенах сильно отличается от перидотитового типа пород. Как для трубки Мир, так и для трубки Обнаженная явно выделяется два тренда (рис.9.10 - 9.11) в распределении РЗЭ с положительной Eu-аномалией. По соотношению же $[La/Yb]_n - Ti/Eu$ вклинопироксене из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная выделяется две области проявления глубинного мантийного метасоматоза (рис.9.12): I - карбонатитовый; II – силикатный [Coltorti et al., 1999].

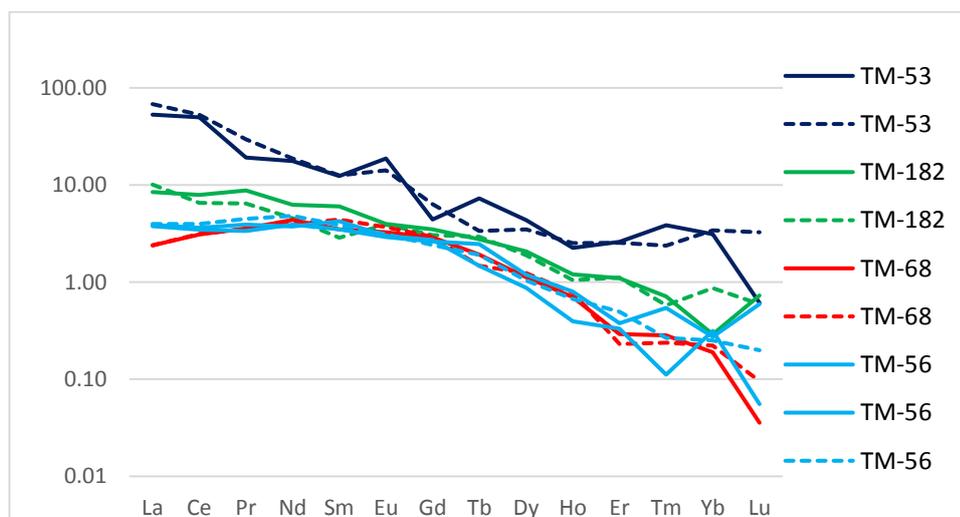


Рис 9.10. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов клинопироксена (центральные и краевые части), пироксенитового парагенезиса из ксенолитов трубки Мир. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995).

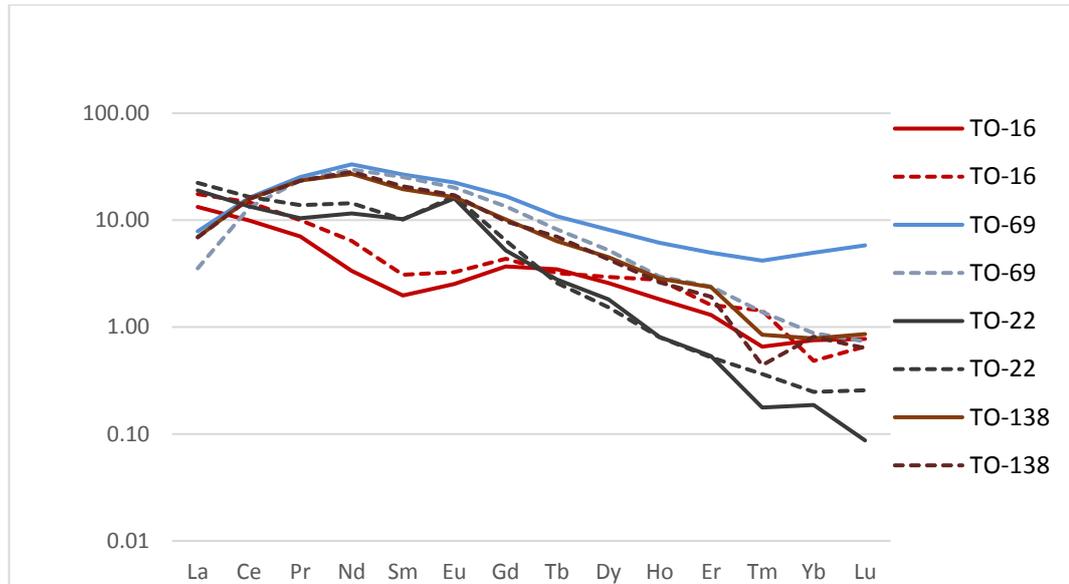


Рис. 9.11. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов клинопироксена (центральные и краевые части), пироксенитового парагенезиса из ксенолитов трубки Обнаженная. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995).

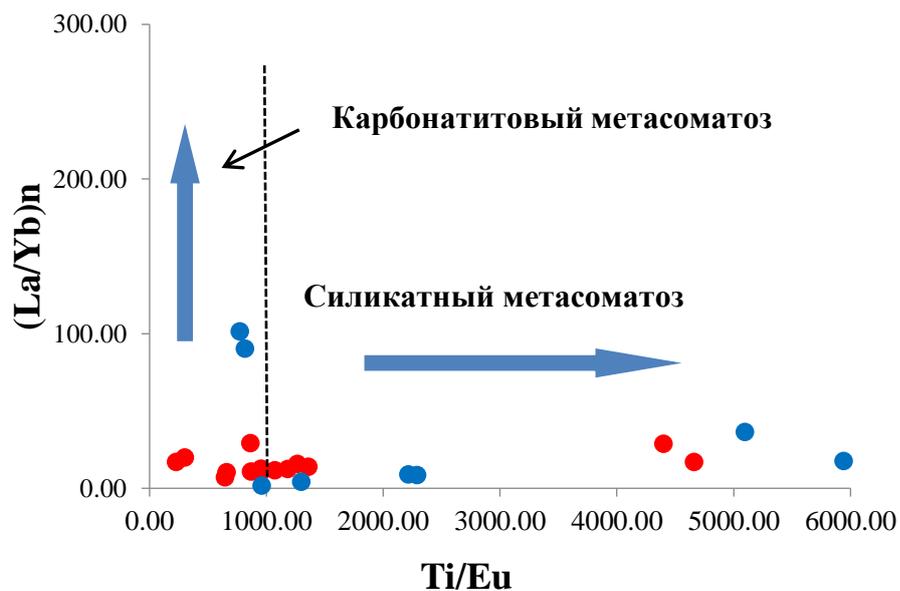


Рис 9.12. Положение точек составов клинопироксена в породах пироксенитового типа парагенезиса пород на диаграмме $[La/Yb]_n - Ti/Eu$ (Coltorti et al., 1999). Трубка Мир (красные кружки) и Обнаженная (синие кружки)

Распределение РЗЭ в зернах клинопироксена из трубки Мир (рис.9.13) характеризуется повышением в области легких - средних РЗЭ и понижением в области тяжелых, что соответствует типичному спектру распределений РЗЭ.

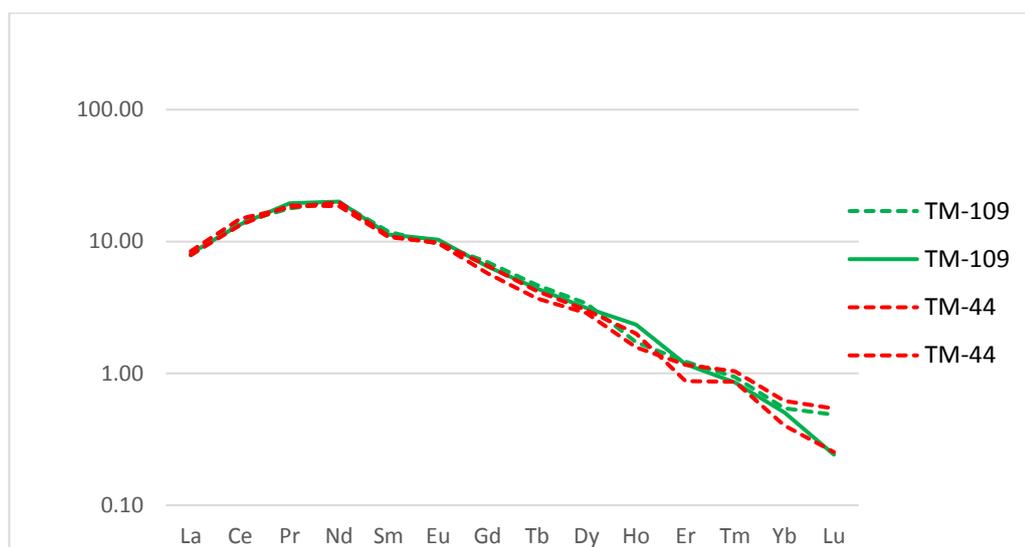


Рис.9.13. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов клинопироксена, эклогитового парагенезиса из ксенолитов трубки Мир. Содержания элементов нормированы на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995)

На основе изучений спектров распределения РЗЭ в гранатах и клинопироксенах из различных типов пород двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная стоит отметить широкие вариации состава в зернах клинопироксена. В зернах граната из перидотитов трубки Обнаженная некоторые линии приближаются к «синусоидальному» распределению с обеднением в области ТРЗЭ, что является признаком метасоматических изменений. Синусоидальные профили распределения РЗЭ также могут являться продуктом более раннего метасоматического преобразования, на что указывает обогащение в области легких - средних редкоземельных элементов.

Процессы метасоматоза в пироксенитовом парагенезисе проявлены более интенсивно, что показывает распределение РЗЭ. Пик Eu- аномалии свидетельствует о наличии плагиоклаза в первоначальном протолите. Распределение РЗЭ в эклогитах характеризуется узкими вариациями составов, что может быть связано с процессами перекристаллизации.

Соотношения $[La/Yb]_n - Ti/Eu$ в клинопироксенах из различных типов пород двух трубок позволяют выделить два геохимических типа высокотемпературного мантийного метасоматоза: карбонатитовый и силикатный, что подтверждает активное воздействие (влияние) на ксенолиты флюидов/расплавов, которые происходят в глубинах мантии.

9.2. Оценки температур и давлений мантийных ксенолитов из трубок Мир и Обнаженная

По результатам изучения и описания минералого-петрографических характеристик пород из двух трубок можно прийти к выводу, что под литосферной мантией в районах Мирнинского и Куойкского кимберлитового поля выделяется три группы пород: перидотитовые, пироксенитовые и эклогитовые, которые были образованы при различных термодинамических условиях и вынесены с различных глубин кимберлитовыми расплавами (**Таблица 9.1, Приложение Г**).

В большинстве ксенолитов обнаружены пироксены, что позволяет применить разработанные литературные пироксеновые геотермометры и геобарометры, а наличие граната дает возможность использовать равновесие гранат-пироксен. В многочисленных работах используются пары геотермометр-геобарометр: «термометр Са в ортопироксене» [Brey, Kohler, 1990] и гранат-ортопироксеновый барометр [Brey, Kohler, 1990]; двупироксеновый термометр [Taylor, 1998] и гранат-ортопироксеновый барометр [Nickel, Green, 1985].

Оценки температур и давлений в эклогитовом парагенезисе пород проводились на основе состава двух равновесных минералов - граната (Grt) и клинопироксена (Cpx) [Ellis, Green, 1979; Krogh, 1988; Nakamura, 2009; Beyer et al., 2015]. В процессе исследований оценок РТ-параметров авторы отметили, что перидотиты, отнесенные к деформированным, находятся в зоне стабильности алмаза, а гранатовые зернистые перидотиты тяготеют к границе перехода графит-алмаз [по Boyd, 1997 и другие; Кусков и др., 2011]. Впервые оценки температур и давлений для трубки Обнаженная были определены Ухановым [Уханов, 1976]. Оценки РТ параметров ксенолитов перидотитового типа пород, полученные по разным геотермам показывают, что глубина литосферной мантии на северо-востоке Сибирского кратона значительно меньше (на 70-120 км), чем в районе трубки Мир (210-240 км).

Геотерма под трубкой Обнаженная близка линии теплового потока 40 мВ/м^2 , под трубкой Мир близка к 35 мВ/м^2 [Ashchepkov, Vladykin et.al,2003]. Под неалмазоносной трубкой Обнаженная отмечается более разогретая геотерма; это объясняется тем, что на севере Сибирского кратона литосферная мантия была разогрета пермь-триасовым плюмом [Похиленко, 1999, Калашникова,2017].

Для гранат-содержащих образцов из трубки Мир и Обнаженная был проведен расчет РТ- условий кристаллизации, результаты которого представлены на рис. 9.14. Для расчетов использовались 2-Рх термометр Taylor [1998] и Орх - Grt барометр Nickel, Green [1985],

которые принимались для ксенолитов из трубки Мир и Обнаженная в работе [Howarth et al., 2014].

Оценки температур равновесия эклогитов для трубки Мир проводились по термометрам, основанным на обменных реакциях между гранатом и клинопироксеном по Mg и Fe. Расчеты выполнены по нескольким калибровкам [Ai, 1994; Ellis, Green, 1979; Krogh, 1988; Krogh Ravna et al., 2000; 2003].

В результате расчетов в изученной работе и сравнений их с литературными данными из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная была составлена сводная таблица, в которой видно, что полученные ранее оценки PT параметров совпадают с нашими данными по трем типам пород (**Таблица 9.2**).

Таблица 9.2. Сводная таблица значений оценок PT-параметров из кимберлитовых трубок ЯАП

| Трубка | Источник | Породы | T C | P kbar |
|-------------------|-------------------------|--|-----------------|----------------|
| Мир | настоящая работа | гранатовые лерцолиты | 581-906 | 22-56.0 |
| Мир | Алифирова,2015 | гранат-шпинелевыелерцолиты | 740 | 24 |
| Обнаженная | настоящая работа | гранат-шпинелевые и шпинелевыелерцолиты | 579-719 | 14-19 |
| Обнаженная | Калашникова Т.В.,2017 | гранатовые лерцолиты | 535-764 | 12-27 |
| Обнаженная | Howarthetal., 2014 | гранатовые лерцолиты | 620-731 | 13-25 |
| Обнаженная | Алифирова,2015 | гранат-шпинелевые и гранатовые лерцолиты | 682-709 | 19-20 |
| Мир | настоящая работа | гранатовые вебстериты | 687-1266 | 22-56 |
| Мир | Алифирова,2015 | гранатовые вебстериты | 690 | 20 |
| Обнаженная | настоящая работа | гранатовые вебстериты | 585-923 | 15-29 |
| Обнаженная | Алифирова,2015 | гранатовые вебстериты | 672-830 | 15-34 |
| Мир | настоящая работа | Эклогиты | 840-988 | 20-28 |
| Обнаженная | Алифирова,2015 | Эклогиты | 813 | 32 |

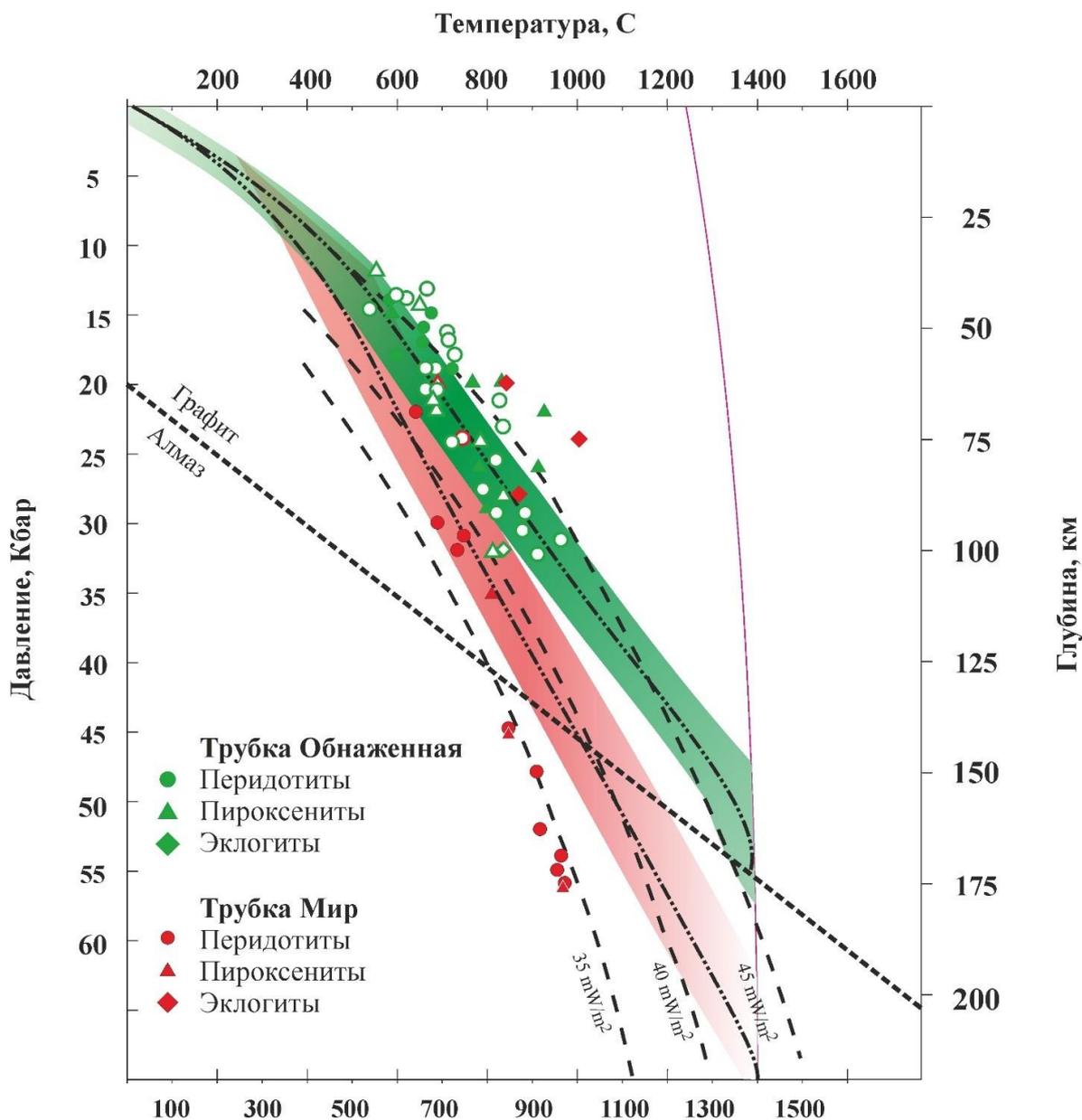


Рис.9.14. Оценки P-T условий формирования для ксенолитов из трубок Мир (красные значки) и Обнаженная (зеленые значки).

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].

В результате расчета оценок температур и давлений ксенолитов из кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная был сделан вывод, что более глубинные условия образования и высокие P-T- параметры соответствуют минералам из ксенолитов перидотитового и пироксенитового парагенезиса ($T = 581-1266$ °C; $P = 20-56$ кбар) из высокоалмазоносной трубки Мир, где выявлены преимущественно тонкие структуры распада ильменит-рутилового состава и маломощные келифитовые каймы до 150 мкм.

На **Рис. 9.14** видно, что большая часть составов ксенолитов перидотитового и пироксенитового парагенезисов из трубки Мир попадают в область с более высокими РТ-параметрами и соответствуют линии теплового потока самой трубки 35 мВ/м², а также частично породы в поле с тепловым потоком 40 мВ/м² и 45 мВ/м².

В неалмазоносной трубке Обнаженная породы образовались при более низких режимах РТ-условий, поэтому все мантийные ксенолиты лежат в поле с тепловым потоком 45 мВ/м². Породы из различных типов пород трубки Обнаженная демонстрируют относительно низкие Р-Т параметры: $T = 579-923^{\circ}\text{C}$; $P = 14-29$ кбар. Литературные оценки Р-Т параметров кристаллизации для пород из трубки Обнаженная [Howarth et al., 2014; Алифирова, 2015; Калашникова, 2017] в целом близки к нашим оценкам температур и давлений: $T = 535-830^{\circ}\text{C}$; $P = 12-34$ кбар. Как видно на рис. 9.14 все образцы из трубки Обнаженная находятся в области устойчивости графита. Следует отметить, что все породы перекрываются и четких различий нет (Рис.9.14).

Полученные результаты в ходе проведенных исследований дают ценную информацию о многоэтапном характере в мантийных условиях, которым были подвержены минералы из различных типов пород двух кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная. Во-первых, можно выделить несколько этапов: *мантийный метасоматоз*, (который выразился в обогащении РЗЭ граната и клинопироксена, а также кристаллизации флогопита, обогащенного хромом и натрием), и *кимберлитовый метасоматоз*, что подтверждает наличие келифитовых кайм на гранатах.

Петрографическим признаком мантийного метасоматоза является кристаллизация флогопита [O'Reilly, Griffin, 2013, Сафонов и др.,2016], который широко распространен в келифитовых каймах исследованных нами ксенолитов и литературных данных. По мнению авторов [например, Aoki, 1975; van Achtebergh et al., 2001, Сафонов и др.,2016] содержания Na_2O во флогопитах метасоматизированных перидотитов составляет 0.1–0.5 мас. %, но в некоторых случаях эти значения могут достигать 1.5 мас. %, что связано с метасоматическими процессами, вызванными влиянием богатых Na флюидов [Francis, 1976; Yaxley et al., 1998; Сафонов и др.,2016].

В изученных нами ксенолитах из трубок Мир и Обнаженная в составе келифитовых кайм флогопит можно разделить по содержанию Na_2O : 1) в которых менее 0,5 мас. %, 2) от 0,5 до 2 мас. %, что подтверждает их глубинную природу образования (более подробно описано в гл.6).

Широкие вариации составов Na–Ca-амфиболов позволяют оценивать активность H_2O и фугитивность кислорода в метасоматизирующих флюидах (Bonadiman et al., 2014; Сафонов и др.,2016).

В целом, можно сделать вывод, что ксенолиты из трубки Мир и Обнаженная отражают сложную и многоэтапную эволюцию литосферной мантии под Мирнинским и Куойкским кимберлитовыми полями и характеризуют различные этапы в глубинах мантии. Первоначальным породам соответствуют гарцбургиты и дуниты, которые затем испытали воздействие метасоматизирующих силикатных/карбонатных расплавов. В изученных нами породах геохимические признаки метасоматических процессов надежно устанавливаются в мантийных ксенолитах на основании распределения РЗЭ в гранатах и клинопироксенах. Судя по отношению Zr/Y , зерна граната из ксенолитов двух кимберлитовых трубок были подвержены расплавному (глубинному) и флогопитовому (низкотемпературному) метасоматозу.

Обычно выделяются два основных геохимических типа мантийного метасоматоза — карбонатитовый и силикатный по соотношению $[La/Yb]_n - [Ti/Eu]$. Основываясь на литературных данных *карбонатитовый метасоматоз* проявлен прежде всего в обогащении пород и минералов несовместимыми элементами (Rb, Sr, Ba, Nd, Ta, U Th и легкие РЗЭ) без значительных изменений модалного состава и наиболее часто наблюдается в деплетированных (в том числе алмазоносных) дунит-гарцбургитах средней части мантийного разреза. Геохимические признаки карбонатитового метасоматоза фиксируются, прежде всего, в валовом составе ксенолитов зернистых перидотитов, содержащих мало граната и клинопироксена. В результате подъема из мантии расплавов, сформированных при высокой степени частичного плавления, образовались истощенные кратонные породы гарцбургит-дунитового ряда. Далее происходит метасоматическое обогащение пород основания литосферной мантии расплавом/флюидом с высоким содержанием несовместимых элементов, которые близки по составу к карбонатитам. При повышении La/Yb в породах продолжается этап карбонатитового метасоматоза в результате просачивания остаточных высокофракционированных расплавов/флюидов по системе трещин и границам зерен через истощенные зернистые перидотиты.

Как известно из литературных данных и наблюдаемых в наших образцах большая часть несовместимых элементов сосредоточена в редких субмикронных фазах (карбонат, апатит, флогопит, паргасит), расположенных в интерстициях между зернами породообразующих минералов, что еще раз подтверждает воздействие *карбонатитового метасоматоза*. Следующим этапом эволюции был силикатный метасоматоз, который приводит к значительному росту модалных содержаний граната и клинопироксена в перидотитах и приурочен к корневым частям литосферы [Agashev et al., 2013], либо к верхним слоям разреза литосферной мантии [Тычков и др., 2014]. Последним этапом был низкотемпературный кимберлитовый метасоматоз.

В перидотитом парагенезисе трубки Мир составы попадают в область силикатного метасоматоза, а в пироксенитовом типе пород отмечается воздействие как карбонатитового, так и силикатного метасоматоза, тогда как в составах клинопироксена в перидотитовом и пироксенитовом парагенезисах трубки Обнаженная преимущественно проявлен силикатный метасоматоз.

Воздействие карбонатитового метасоматоза в трубке Мир свидетельствует о большем распространении карбонатных минералов, что приводятся выше, чем это наблюдается в трубке Обнаженная.

Помимо полученных спектров распределения РЗЭ в гранатах и клинопироксенах еще одним важным минералогическим свидетельством метасоматоза мантийных пород является появление в магнезиальном алюмохромите из ксенолита гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная включений редких К-титанатов (фазы, изоструктурной линдквиститу $Pb_2MnFe_{16}O_{27}$, имэнгита и матиасита), сформировавшихся под влиянием флюида, обогащенного Ti и K в результате воздействия мантийного метасоматоза. Для подтверждения и образования редких и экзотических фаз по составу были поставлены экспериментальные исследования по синтезу К-титанатов (из группы магнетоплюмбита и кричтонита) при реакции хромит + ильменит/рутил с флюидом $H_2O-CO_2-K_2CO_3$ при 5 ГПа и $1200^{\circ}C$. Эксперименты показали, что в системе хромит-рутил-флюид происходит кристаллизация прайдерита и матиасита, а в системе хромит-ильменит-флюид образуются имэнгит и прайдерит. Совместное формирование К-титанатов, а также впервые синтезированного К-Ст прайдерита, не содержащего Ва, происходит в результате метасоматоза верхнемантийных перидотитов с участием карбонатных флюидов или расплавов в условиях высокой активности калия. Последовательное влияние метасоматических процессов и протокимберлитовых расплавов на мантийные породы приводит к деформации пород, формированию структур распада в породообразующих минералах, келифитовых кайм и тонких прожилков в минералах. В мантийных ксенолитах из высокоалмазоносной трубки Мир редко отмечаются тонкие структуры распада в гранатах и пироксенах, маломощные келифитовые каймы (до 100-150 мкм) и трещины с наложенными вторичными минералами (серпентин-хлорит-карбонатного или серпентинового состава) по сравнению с ксенолитами из неалмазоносной трубки Обнаженная, в которых процесс изменения был более продолжительным по времени, в результате чего, в этих породах сформировались хорошо выраженные и широко проявленные структуры распада, многослойные каймы (до 250 мкм) и интенсивные изменения в минералах по трещинам в виде серпентин-хлоритовых и серпентиновых прожилков.

В результате обобщения данных об особенностях химического состава минералов, минералого-петрографических и геохимических характеристик мантийных ксенолитов, а также полученным и идентифицированным в минералах структур распада, келифитовых кайм, вторичных минералов в прожилках 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. 9.15).

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, который встречен в крупном зерне граната в ксенолите гранат-шпинелевого лерцолита трубки Обнаженная, что соответствует глубинам около 200 км до уровня 130-150 км, находящегося вблизи равновесия графит-алмаз (Kennedy, Kennedy, 1976). По мере продвижения к поверхности на *III стадии* при T около 1000-1200 °C и P = 3 ГПа, как свидетельствуют литературные данные (Алифирова, 2015), начинают образовываться структуры распада в некоторых минералах (преимущественно в гранате и пироксене). На *IV стадии*, на глубинах приблизительно 50-70 км, по периферии зерен минералов формируются келифитовые каймы различного минерального состава (Рис. 9.15). На *V стадии* в первичных минералах образуются многочисленные хлорит-серпентин-карбонатные и серпентиновые прожилки, иногда полностью замещающие исходные зерна. На рисунке также изображены предполагаемые пути поэтапного изменения в глубинных и приповерхностных условиях. Имеющиеся заключения по P-T истории изученных пород показывают, что вертикальное перемещение пород с глубин ~200-250 км не было мгновенным; оно происходило в ходе многоэтапных изменений в глубинных условиях.

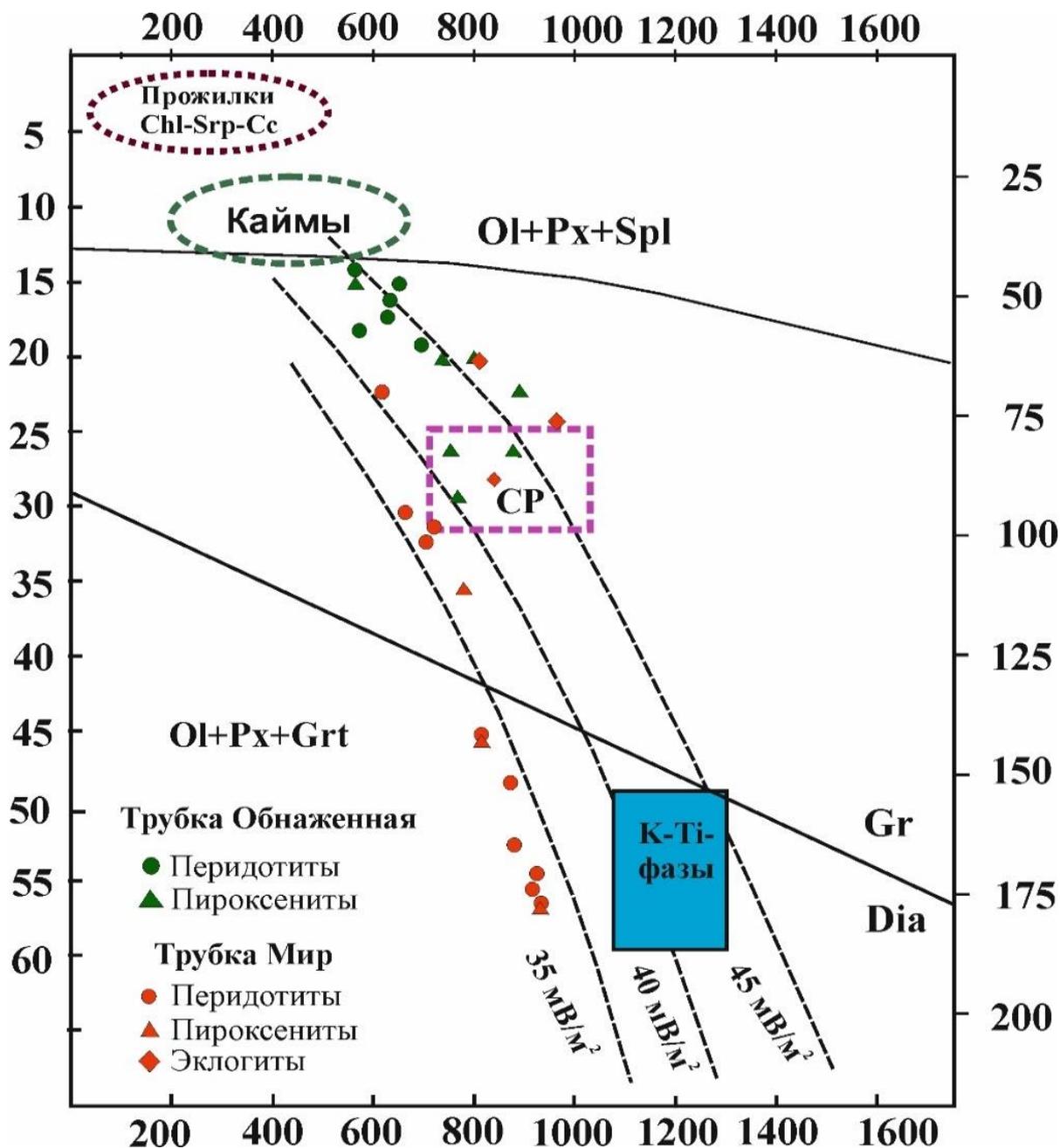


Рис. 9.15. Реконструкция этапов формирования мантийных ксенолитов в районе трубки Мир и Обнаженная (ЯАП). Условные обозначения: CP – структуры распада по литературным данным (Алифирова, 2015); Ol – оливин; Px – пироксены; Grt – гранат; Spl – шпинель; Chl – хлорит; Srp – серпентин; Cc – кальцит.

Основные научные результаты:

- 1) На основе изучений 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, 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 интенсивны с выраженными пиками Nd и Eu по сравнению со спектрами распределения из перидотитового парагенезиса, что свидетельствует о присутствии проявлений процессов метасоматоза. Тогда как, в трубке Обнаженная спектры распределения РЗЭ в гранате выражены еще более интенсивно по сравнению со спектрами 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 модальных 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 срастания с кальцитом, доломитом, флогопитом, рутилом и серпентином, сформировавшихся под влиянием флюида, обогащенного Ti и K в результате воздействия мантийного метасоматоза. В результате обнаруженных в виде включений редких K- титанатов были поставлены эксперименты при 5 ГПа и 1200⁰С, при которых продемонстрирована полистадийность и совместная кристаллизация имэнгита и прайдерита в системе хромит + ильменит +H₂O-CO₂-K₂CO₃ флюид, матиасита и K-Cr прайдерита, не содержащего Ba в системе хромит + рутил +H₂O-CO₂-K₂CO₃ 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 высокоалмазоносной трубки Мир и неалмазоносной трубки Обнаженная показано широкое многообразие состава оксидных и силикатных фаз в структурах распада граната и пироксена, развитых келифитовых кайм и мощных прожилков внутри. Наличие явно проявленных игл и пластинок в структурах распада, а также развитых мощных (до 250 мкм) келифитовых кайм вокруг минералов неалмазоносной трубки Обнаженная подтверждает более интенсивные и длительные по времени процессы, обусловленные влиянием кимберлитового расплава-флюида. В высокоалмазоносной 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.

Список сокращений и условных обозначений

мас.% – массовые проценты

мол.% – мольные проценты

об.% – объемные проценты

$Mg\# = 100 \times Mg / (Mg + Fe)$ – магнезиальность

КР – комбинационное рассеяние (спектроскопия комбинационного рассеяния или рамановская спектроскопия)

РЗЭ – редкоземельные элементы

СКЛМ – субконтинентальная литосферная мантия

ЯАП – Якутская алмазоносная провинция

LA ICP-MS – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией

Сокращения минералов, миналов (согласно Whitney, Evans, 2010):

Alm – алемандин

Amp – амфиболы

Ap – апатит

Dol – доломит

Cal – кальцит

Chr – хромит

Cpx – клинопироксен

Cpx-1 – породообразующий клинопироксен

Di – диопсид

Ed – эденит

En – энстатит

Fa – фаялит

Fo – форстерит

Fs – ферросилит

Grs – гроссуляр

Grt – гранат

Ilm – ильменит

Lqt – линдквистит

Ma – матиасит

Oi – оливин

Opx – ортопироксен

Phl – флогопит

Prg – паргасит

Prp – пироп

Pri – прайдерит

Rt – рутил

Wo – волластонит

Srp – серпентин

Sp – шпинель

Rt – рутил

Yim – имэнгит

HFSE – High field strange elements, высокозарядные элементы

LILE – Large ion lithophile elements, крупноионные литофильные элементы

REE (РЗЭ) – Rare earth elements, редкоземельные элементы

МГМ – минералы группы магнетоплюмбита

МГК – минералы группы кричтонита

LIMA – минералы группы кричтонита, члены ряда твердых растворов линдсейит-матиасит

LREE – Light rare earth elements, лёгкие редкоземельные элементы (La, Ce, Pr, Nd, Sm)

HREE - Heavy rare earth elements, тяжёлые редкоземельные элементы (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y)
T – температура,
P – давление

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных источников россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 1998. Т. 361, № 3. С. 366–369.

Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н. Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41, № 3. С. 281–288.

Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399, № 1. С. 95–99.

Агашев А.М., Похиленко Н.П., Черепанова Ю.В., Головин А.В. Геохимическая эволюция пород основания литосферной мантии по результатам изучения ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Удачная // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 432, № 4. С. 510–513

Алифирова Т.А. Продукты распада твердых растворов в гранатах и пироксенах (на материале мантийных ксенолитов из кимберлитов): дисс. канд. геол.-мин. наук: 25.00.09/ Алифирова Таисия Александровна – Новосибирск, 2015 – 244 с.

Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А., Фон-Дер-Флаасс Г.С., Суворова Л.Ф., Богуш И.Н. // Науч.-исслед. геологоразведочное предприятие (НИГП), ФАНО Ин-т геохимии СО РАН. Мирный : МГТ. 2015. – С. 480.

Бобриевич А. П., Бондаренко М. Н., Гневушев М. А., Красов Л. М., Смирнов Г. И., Юркевич Р. К Алмазные месторождения Якутии // Под ред. Соболева В. С. — Москва: Госгеолтехиздат, 1959. – 527 с.

Бобров А. В., Гаранин В. К., Никифорова А. Ю. Мантийные породы кимберлитовой трубки Обнаженной. Статья 2. Условия образования и эволюция минеральных парагенезисов // МОИП. 2003. Т. 78, №. 4. С. 78–85.

Бобров А.В., Литвин Ю.А. Перидотит-эклогит-карбонатитовые системы при 7.0-8.5 ГПа: концентрационный барьер нуклеации алмаза и сингенезис его силикатных и карбонатных включений. // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. С. 1571–1587.

Бобров А.В., Сироткина Е.А., Гаранин В.К., Бовкун А.В., Корост Д.В., Шкурский Б.Б. Мэйджоритовые гранаты со структурами распада из кимберлитовой трубки Мир (Якутия) // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444, № 1. С. 56–60.

Брахфогель Ф.Ф., Ковальский В.В. О возрасте кимберлитовых тел Сибирской платформы. // Советская геология. 1978. № 4. С. 133–139.

Вишневецкий А.А., Колесник Ю.Н., Харькив А.Д. О генезисе келифитовых кайм на пиробазах из кимберлитов // Минералогический журнал, 1984. № 4. С. 55–66.

Варламов Д.А., Гаранин В.К., Костровицкий С.И. Необычная ассоциация рудных минералов во включении в гранате из трубки «Интернациональная» // Доклады Академии наук. 1993. Т. 328, № 5. С. 596–600.

Варламов Д.А., Гаранин В.К., Костровицкий С.И. Экзотические высокотитанистые минералы, как включения в гранатах из нижнекоровых и мантийных ксенолитов // Доклады Академии наук. 1995. Т. 345, № 3. С.346–366.

Владимиров Б.М., Волянюк Н.Я., Пономаренко А.И. Глубинные включения из кимберлитов, базальтов и кимберлитоподобных пород. – Москва: Наука. 1976. – 284 с.

Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Серенко В.П., Сошнина Л.Т. Минералогия ильменитовых гипербазитов кимберлитовой трубки Мир // Известия Академии наук СССР. Серия: геология, 1983. – №2. – С. 84–95.

Ильменит из кимберлитов. / Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Сошкина Л. Т. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 240 с.

Гаранин В.К., Кудрявцев Г.П., Минеева Ю.М. Состав и образование келифитовых кайм на пиробазах из диатремы Архангельской кимберлитовой провинции // Вестник МГУ. 1991. Т.46, №6. С.58–68.

Гаранин В. К, Кудрявцева Г. П., Марфунин А. С., Михайличенко О. А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. М.: Изд-во МГУ. 1991. – 240 с.

Галимов Э. М. 13С/12С алмазов. Вертикальная зональность алмазообразования в литосфере // Труды. 1984. – 11 с.

Духовский А.А. Региональные закономерности пространственного размещения кимберлитового магматизма Восточной Сибири по геофизическим данным // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т.275. №5. С. 1136–1141.

Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харьков А.Д. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные по соотношению изотопов свинца и урана в цирконах // Доклады Академии наук. 1980. Т. 254. № 1. С. 175–179.

Добрецов Н.Л. Введение в глобальную петрологию. – Новосибирск: Наука, 1980. –200 с.

Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Панин А.В., Евтушенко О.В., Рагозин А.Л., Каги Х. Свидетельства фазовых переходов минеральных включений в сверхглубинных алмазах из месторождения Сао-Луис (Бразилия) // Геология и геофизика. 2015. № 1-2. С. 384–396.

Зинчук Н.Н. О минеральном составе келифитовых кайм на гранатах из кимберлитов // ЗВМО. 1981. Т.1. С.70–76.

Илупин И. П., Левшов П. П., Ровша В. С. О составе и генезисе келифитовых оболочек на гранате—пиропе в кимберлитах Якутии // Уч. зап. НИИГА. Региональная геология. 1969. №. 16. С. 45–52.

Костровицкий С. И., Адмакин Л.А. Находка ксенолита древесины в кимберлитовой трубке Обнаженная // Геология и геофизика. 1991. №11. С. 82–84.

Костровицкий С.И., Гаранин В.К., Варламов Д.А. Шриланкит-вторая находка в мире// Доклады Академии наук. 1993. Т.328, № 5. С. 601–604.

Костровицкий С. И., Алымова Н. В., Яковлев Д. А. и др. Особенности типохимизма пикроильменита из алмазоносных полей Якутской провинции // Доклады РАН. 2006. Т. 406, № 3. С. 350–354.

Костровицкий С. И., Алымова Н.В., Яковлев Д.А., Соловьева Л.В., Горнова М.А. О происхождении мегакристов граната из кимберлитов// Доклады Академии наук. 2008. Т.420. №2. С. 225–230.

Костровицкий С.И. Соловьева Л.В., Горнова М.А., Алымова Н.В., Яковлев Д.А., Игнатъев А.В., Веливецкая Т.А., Суворова Л.Ф. Изотопный состав в минералах мантийных парагенезисов из кимберлитов Якутии// Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. №1. С. 61–66.

Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука. 1973. – 288 с.

Кимберлиты и кимберлитоподобные породы: вещество верхней мантии под древними платформами. / Соловьева Л. В., Егоров К. Н., Маркова М. Е., Харьков А. Д., Пополитов К. Э., Баранкевич В. Г. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская группа. 1994. – 256 с.

Киселев А.Н., Ярмолюк В.В., Томшин М.Д., Никифоров А.В., Егоров К.Н. Пермо-триасовые траппы востока Сибирского кратона: к проблеме оценки источников фанерозойского внутриплитного магматизма// Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 2. С. 192–198.

Калашникова Т.В. Геохимические характеристики и петрогенезис мантийных ксенолитов из кимберлитовой трубки Обнаженная (Якутская кимберлитовая провинция): дисс. канд. геол-мин. наук: 25.00.09/ Калашникова Татьяна Владимировна. – Иркутск, 2017 – 254 с.

Кусков О.Л., Кронрод В.А., Прокофьев А.А. Термическая структура и мощность литосферной мантии Сибирского кратона по данным сверхдлинных сейсмических профилей Кратон и Кимберлит// Физика Земли. 2011. № 3. С. 3–23.

Лазько Е.Е., Серенко В.П., Муравицкая Г.Н. Катаклазированный перидотит с гранатом изменяющегося состава из кимберлитовой трубки «Удачная» (Якутия) // Доклады Академии наук СССР. 1983. Т. 286, № 6. С. 1458–1462.

Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. / Уханов А. В., Рябчиков И. Д., Харьков А. Д. – М.: Наука, 1988. – 288 с.

Литвин Ю.А. Физико-химические исследования плавления глубинного вещества Земли. М.: Наука. 1991. – 312 с.

Мальков Б.А., Густомесов В.А. Юрская фауна в кимберлитах Оленекского поднятия и возраст кимберлитового вулканизма на северо-востоке Сибирской платформы // Доклады Академии наук СССР. 1976. Т. 229, № 2. С. 435–438.

Мальков Б.А. Белемниты и эклогиты в кимберлитах трубки Обнаженной на Оленекском поднятии (Якутия) // Вестник КГП. 2008. №. 6. С. 12–14.

Милашев В.А., Шульгина Н.И. Новые данные о возрасте кимберлитов Сибирской платформы // Доклады Академии наук СССР. 1959. Т. 126, № 6. С. 1320–1322.

Милашев В.А. Родственные включения в кимберлитовой трубке «Обнаженная» (бассейн р. Оленек) // ЗВМО. 1960. Ч. 89. Т. 3. С. 284–298.

Маракушев А.А., Бобров А.В. Проблемы первичных магм и глубины зарождения алмазоносного магматизма. // Доклады Академии наук. 2005. Т. 403, № 4. С. 1–5.

Медведев А. Я., Альмухамедов А. И., Кирда Н. П. Геохимия пермотриасовых вулканитов Западной Сибири // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 1-2. С. 86–100.

Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Боуд Ф.Р., Пирсон Г.Ф., ДНимизу Н. Метакристаллические пироповые перидотиты в литосфере Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1993. № 1. С. 71-84

Похиленко Н.П., Агашев А.М., Литасов К.Д., Похиленко Л.Н. Взаимоотношения карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатит-кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. С. 361–383.

Пономаренко А.И. Первая находка гранат-ильменитового перидотита с алмазами из кимберлитовой трубки Мир // Доклады Академии наук СССР. 1977. Т. 235, № 6. С. 1416–1418.

Пономаренко А.И., Специус З.В., Соболев Н.В. Новый тип алмазоносных пород – гранатовые пироксениты // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 251, № 2. С. 438–441.

Резвухин Д. И., Мальковец В. Г., Шарыгин И. С., Кузьмин Д. В., Гибшер А. А., Литасов К. Д., Похиленко Н. П., Соболев Н. В. Включения минералов группы кричтонита в пиробазах из кимберлитовой трубки Интернациональная, Якутия // Доклады Академии Наук. 2016а. Т. 466, № 6. С. 714–717.

Резвухин Д. И., Мальковец В. Г., Шарыгин И. С., Кузьмин Д. В., Литасов К. Д., Гибшер А. А., Похиленко Н. П., Соболев Н. В. Включения хромистого и хром-ниобиевого рутила в пиробазах из кимберлитовой трубки Интернациональная, Якутия // Доклады Академии Наук. 2016. Т. 466, № 5. С. 587–591.

Розен О.М., Серенко В.П., Специус З.В., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Якутская кимберлитовая провинция: положение в структуре Сибирского кратона, особенности состава верхней и нижней коры // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 1. С. 3–26.

Розен О.М. Сибирский кратон: тектоническое районирование, этапы эволюции // Геотектоника. 2003. № 3. С. 3–21.

Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазоносность. - Москва: Научный мир. 2006. – С. 210.

Савостин Л.А., Павлов В.Е., Сафонов В.Г., Бондаренко Г.Е. Месторождения юрского возраста в западной зоне Омолонского блока: условия образования и палеомагнетизм // Доклады Академии наук. 1993. Т.333. С. 481–486.

Саблуков С.М., Саблукова Л.И., Шавырина М.В. Мантийные ксенолиты из кимберлитовых месторождений округлых алмазов Зимнебережного района, Архангельская алмазоносная провинция // Петрология. 2000. Т. 8, № 5. С. 518–548.

Сафонов О. Г., В. Г. Бутвина. Реакции- индикаторы активности К и Na в верхней мантии: природные и экспериментальные данные, термодинамическое моделирование//Геохимия. 2016. № 10. С. 893–908.

Соболев Н.В., Лодочников Н.В. к минералогии гранатовых перидотитов // Геология и геофизика. 1962. № 6. С. 58–65.

Соболев В.С., Соболев Н.В. Ксенолиты в кимберлитах Северной Якутии и строение мантии // Доклады Академии наук СССР. 1964. Т. 158. С. 22–26.

Соболев В.С., Харьков А.Д., Соболев Н.В. и др. Зональный гранат из кимберлита трубки « Мир» // Доклады Академии наук СССР. 1972. Т. 207, № 2. С. 421–424.

Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии - Новосибирск: Наука, 1974. – 264 с.

Соболев Н. В., Харьков А. Д. Глубинные включения в кимберлитах // Глубинные ксенолиты и верхняя мантия. Новосибирск: Наука, 1975. С. 26–47.

Соболев Н. В., Боткунов А. И., Лаврентьев Ю. Г., Усова Л. В. Новые данные о составе минералов, ассоциирующих с алмазами кимберлитовой трубки Мир // Геология и геофизика. 1976. № 12. С. 3–15.

Соболев Н. В., Похиленко Н. П., Ефимова Э. С. Ксенолиты алмазоносных перидотитов в кимберлитах и проблема происхождения алмазов // Геология и геофизика. 1984. № 12. С.63–80.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Ефимова Э.С. Сингенетические включения флогопита в алмазах кимберлитов: свидетельство роли летучих в образовании алмазов // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1588—1606.

Соловьева Л. В., Баранкевич В. Г., Завьялова Л. Л., Липская В. И. Метасоматические изменения в магнезиально-железистых эклогитах из трубки «Удачная» // Доклады Академии Наук СССР. 1988. Т. 303, № 6. С. 1450–1454.

Соловьева Л. В., Владимиров Б. М., Днепровская Л. В. и др. В кн.: Кимберлиты и кимберлитоподобные породы: Вещество верхней мантии под древними платформами. – Новосибирск: ВО Наука, 1994. – 256 с.

Соловьева Л.В., Егоров К.М., Маркова М.Е., Харьков А.Д., Пополитов К.Э., Воронкевич В.Г. Мантийный метасоматизм и плавление в глубинных ксенолитах из трубки Удачная, их возможная связь с алмазо- и кимберлитообразованием // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. С. 172–193.

Соловьева Л.В., Ясныгина Т.А., Егоров К.Н. Метасоматические парагенезисы в глубинных ксенолитах из трубок Удачная и Комсомольская-магнитная - индикаторы переноса флюидов через мантийную литосферу Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, №12. С. 1698–1721.

Соловьева Л.В., Калашникова Т.В., Костровицкий С.И., Иванов А.В., Мацюк С.С., Суворова Л.Ф. Метасоматические и магматические процессы в мантийной литосфере Биректинского террейна Сибирского кратона и их влияние на эволюцию литосферы. // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, №3. С. 311–344

Соловьев К.А., Шарыгин И.С., Головин А.В. Состав и генезис реакционных кайм вокруг гранатов в неизменном ксенолите деформированного перидотита из кимберлитовой трубки Удачная-Восточная (Якутия, Россия) // Девятая Российская молодежная научно-практическая Школа с международным участием, Москва, 25-29 ноября 2019 г. Сборник материалов. – М.: ИГЕМ РАН. 2019.

Состав континентальной верхней мантии и низов коры под Сибирской платформой. / Spezius З.В., Серенко В.П. Москва: Наука, 1990. – 272 с

Специус З.В., Иванов А.С., Митюхин С.И. Ксенолиты и мегакристы с алмазами из кимберлитовой трубки Нюрбинская (Накынское поле, Якутия) // Доклады Академии наук. 2006. Т. 408, №6. С. 810–814.

Тектоника, геодинамика и металлогения республики Саха (Якутия) Отв. Ред. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2001. – 571 с.

Тронева Н. В., Васильева Г. Л., Илупин И. П. Новые данные о гранатах и келифитовых каймах из кимберлитов Якутии // Доклады Академии наук СССР. 1979. Т. 247, № 6. С. 1471 – 1474.

Трофимов, В.С. Некоторые закономерности размещения алмазных месторождений на Сибирской платформе / В.С. Трофимов // Алмазы Якутии. 1961. № 6. С. 142–153.

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 // Записки РМО. 2018. Т. 147, №3. С. 44–58.

Харькив А.Д., Маковская Н.С. О содержании хрома и титана в гранатах из включений ультраосновных пород в кимберлитах Якутии // Геохимия. 1973. №2. С. 224–231.

Харькив А. Д., Вишневский А. А. Особенности келифитизации граната из ксенолитов глубинных пород в кимберлитах // Записки Всероссийского минералогического общества. 1989. Т.4.

Харькив А. Д., Богатых М. М., Вишневский А. А. Минеральный состав келифитовых кайм, развитых на гранатах из кимберлитов // ЗВМО. 1988. №6. С. 705.

Коренные месторождения алмазов мира. / Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. М.: Недра. 1998.

Францессон Е.В., Лутц Б.Г. Кимберлитовый магматизм древних платформ. – Москва: Нац. Геофизич. Комитет РАН. 1995. – С. 342 .

Уханов А. В. Реконструкция верхней мантии по ксенолитам в кимберлитовой трубке // Геохимия. 1976. №9. С. 1300-1307.

Уханов А. В., Рябчиков И. Д., Харьков А. Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. – М.: Наука. 1988. – 286 с.

Шарыгин И.С.. Акцессорные минералы ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Удачная-Восточная (Якутия): происхождение и петрогенетическое значение: дисс. канд. геол-мин. наук: 25.00.09/ Шарыгин Игорь Сергеевич – Новосибирск 2014. –244 с.

Щукина Е.В., Головин Н.Н., Мальковец В.Г., Похиленко Н.П. Минералогия и Р-Тпараметры равновесия минеральных парагенезисов перидотитов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444, № 6.С. 1–6.

Щукина Е.В., Агашев А.М., Костровицкий С.И., Похиленко Н.П. Метасоматические изменения литосферной мантии в районе кимберлитовой трубки им. В.Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 12. С. 2153–2172.

Юдин Д.С., Томиленко А.А., Алифирова Т.А., Травин А.В., Мурзинцев Н.Г., Похиленко Н.Н. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ - датирования флогопитов из келифитовых кайм гранатов (кимберлитовая трубка Удачная-Восточная). // Доклады Академии наук. 2016. Т. 469, № 2. С. 215–218.

Aoki K. Origin of phlogopite and potassic richterite bearing peridotite xenoliths from South Africa.//Contributions to Mineralogy and Petrology. 1975. V.53. P. 145–156.

Aoki K., Fujimaki H., Kitamura M. Exsolved garnet-bearing pyroxene megacrysts from some South African kimberlites // Lithos. 1980. V. 13, N.3. P. 269–279.

Agashev, A.M.; Pokhilenko, N.P.; Tolstov, A.V.; Polyanichko, V.V.; Mal'kovets, V.G.; Sobolev, N.V. New age data on kimberlites from the Yakutian diamondiferous province. // Doklady Earth Sciences. 2004. V. 399, N. 8. P. 1142–1145.

Agashev, A.M., Pokhilenko, N.P., Malkovetz, V.G., Sobolev, N.V. Sm–Nd isotopic system in garnet megacrysts from the Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia) and petrogenesis of kimberlites.// Doklady Earth Sciences. 2006. V. 407. P. 491–494.

Agashev, A.M.; Ionov, D.A.; Pokhilenko, N.P.; Golovin, A.V.; Cherepanova, Y.; Sharygin, I.S. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya.//Lithos. 2013. V. 160-161. P. 201–215.

Ai Y. A revision of the garnet–clinopyroxene Fe^{2+} – Mg exchange geothermometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1994. V. 115. P. 467–473.

Alifirova T.A., Pokhilenko L.N., Ovchinnikov Y.I., Donnelly C.L., Riches A.J.V., Taylor L.A. Petrologic origin of exsolution textures in mantle minerals: evidence in pyroxenitic xenoliths from Yakutia kimberlites// International Geology Review. 2012. V. 54, N.9. P. 1071–1092.

Alifirova T.A., Pokhilenko L.N., Korsakov A.V. Apatite, SiO₂, rutile and orthopyroxene precipitates in minerals of eclogite xenoliths from Yakutian kimberlites, Russia // *Lithos*. 2015. V. 226. P. 31–49.

Almeida, V., Janasi, V., Svisero, D., Nannini, F. Mathiasite-loveringite and priderite in mantle xenoliths from the Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil: genesis and constraints on mantle metasomatism // *Open Geosciences*. 2014. V.6, N.4. P. 614–632.

Ashchepkov I., Vladykin N., Pokhilenko N., Sobolev N., Malygina E., Kuligin S., Ovchinnikov Yu., Afanasiev N., Mkrtychan G., Rotman A., Pokhilenko L., Logvinova A., Khmel'nikova O., Kostrovitsky S., Tolstov A. Clinopyroxene geotherms for the mantle columns beneath kimberlite pipes from Siberian craton // 8 th International Kimberlite Conference Long Abstract. 2003.

Bailey D.K. Mantle metasomatism—continued chemical change within the Earth // *Nature*. 1982. V. 296. P. 525–580.

Bailey D.K. Mantle metasomatism—perspective and prospect. *Alkaline Igneous Rocks* // *Geol Soc Spec Publ*. 1987. V. 30. P.1–13.

Barton J. M., Gerya T. V. Mylonitization and decomposition of garnet: Evidence for rapid deformation and entrainment of mantle garnet-harzburgite by kimberlite magma, K1 Pipe, Venetia Mine, South Africa // *South African Journal of Geology*. 2003. V. 106, N. 2-3. P. 231–246.

Beard L.B., Fraracci K.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Clayton R.A., Mayeda T.K., Sobolev N.V. Petrography and geochemistry of eclogites from the Mi kimberlite, Yakutia, Russia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996. V. 125. P. 293–310.

Becker H. Petrological constraints on the cooling history of high-temperature garnet peridotite massifs in lower Austria // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1997. V. 128. P. 272–286.

Beyer C, Frost D J, Miyajima N. Experimental calibration of a garnet–clinopyroxene geobarometer for mantle eclogites // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. V. 169, N. 18.

Becker M., Le Roex A.P. Geochemistry of South African on- and off-craton, group I and group II kimberlites: petrogenesis and source region evolution // *Journal of Petrology*. 2006. V. 47. P. 673–703.

Brey G.P., Köhler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers // *Journal of Petrology*. 1990. V. 31. P. 1353–1378.

Boyd, F.R., Pokhilenko, N.P., Pearson, D.G., Mertzman, S.A., Sobolev, N.V., Finger, L.W., 1997. Composition of the Siberian cratonic mantle: evidence from Udachnaya peridotite xenoliths // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1997. V. 128. P. 228–246.

Boyd F.R., Nixon P.H. Origin of the ilmenite-silicate nodules in kimberlites from Lesotho and South Africa // *Lesotho kimberlites*. – Maseru. 1973. P. 254–268.

Boudeulle M. Disproportionation in mineral solid solutions: symmetry constraints on precipitate orientation and morphology. Implications for the study of oriented intergrowths // *Journal of Applied Crystallography*. 1994. V. 27. P. 567–573.

Bodinier J.L., Menzies M. A., Shimizu N., Frey F. A., McPherson E. Silicate, hydrous and carbonate metasomatism at Lherz, France: contemporaneous derivatives of silicate melt-harzburgite reaction // *Journal of Petrology*. 2004. V.45. P. 299– 320.

Bulanova G.P., Pearson D.G., Hauri E.H., Griffin B.J. Carbon and nitrogen isotope systematics within a sector-growth diamond from the Mir kimberlite, Yakutia // *Chemical Geology*. 2002. V. 188. P. 105–123.

Bulanova G., Muchemwa E., Pearson D., Griffin B., Kelley S., Klemme S., Smith C. Syngenetic inclusions of yimengite in diamond from Sese kimberlite (Zimbabwe)—evidence for metasomatic conditions of growth // *Lithos*. 2004. V. 77, № 1. P. 181–192.

Butvina V.G., Vorobey S.S., Safonov O.G., Bondarenko G.V. Formation of K-Cr titanates from reactions of chromite and ilmanite/rutile with potassic aqueous-carbonic fluid: experiment at 5 GPa and applications to the mantle metasomatism // *Springer Nature*. 2020. V. 9. P. 201–222.

Carswell D.A. Primary and secondary phlogopites and clinopyroxenes in garnet lherzolite xenoliths, Cape Town, South Africa // *International Conference on Kimberlites (extended abstracts)*. 1973. P. 417–429.

Champness P.E., Lorimer G.W. Precipitation (exsolution) in an orthopyroxene // *Journal of Materials Science*. 1973. V. 8. P. 467–474.

Coleman, R.G., Lee, D.E., Beatty, L.B., Brannock, W.W. Eclogites and eclogites: Their differences and similarities// *Geological Society of America Bulletin*. 1965. V.76. P. 483–508.

Coltorti M., Bonadiman C., Hinton R.W., Siena F., Upton B.G.J. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean // *Journal of Petrology*. 1999. V. 40, № 1. P. 133–165.

Coltorti M., Beccaluva L., Bonadiman C., Salvini L. Glasses in mantle xenoliths as geochemical indicators of metasomatic agents // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. V.183, № 1-2. P.303–320.

Danchin R.V. Mineral and bulk chemistry of garnet lherzolite and garnet harzburgite xenoliths from the Premier Mine, South Africa // In: *The Mantle Sample: Inclusions in kimberlites and other volcanics*. 1979. P. 104–126

Dawson J.B., Smith, I.V. Occurrence of diamond in a micagarnet-lherzolite xenoliths from kimberlite // *Nature*. 1975. V. 5501. P. 580–581

Dawson J. B., Stephens W. Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths // *The Journal of Geology*. 1975a. P. 589–607.

Dawson J. B. *Kimberlites and Their Xenoliths* //Springer-Verlag. 1980. – P. 252.

- Dawson J. B. Contrasting types of upper mantle metasomatism // *Kimberlites, II: The Mantle and Crust-Mantle Relationships* // Elsevier. 1984. P. 289–294.
- Dawson J. B. A fertile harzburgite – garnet lherzolite transition: possible inferences from the roles of strain and metasomatism in upper mantle peridotites // *Lithos*. 2004. V. 77. P. 553–569.
- Delaney I.S., Smith I.V., Carswell D.A., Dawson I.B. Chemistry of mica from kimberlites and xenolites // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1980. V. 44, N. 6. P. 857–872.
- Delesse, A. Mémoire sur la constitution minéralogique et chimique des roches des Vosges. Serpentine des Vosges. *Ann. Mines*. 1850. V. 18. P. 309–356
- Dégi, J.; Abart, R.; Kalman, T.; Bali, E.; Wirth, R.; Rhede, D. Symplectite formation during decompression induced garnet breakdown in lower crustal mafic granulite xenoliths: Mechanisms and rates. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2010. V.159. P. 293–314
- Dong Z., Zhou J., Lu Q., Peng Z. Yimengite, $K(Cr,Ti,Fe,Mg)_{12}O_{19}$, a new mineral from China. *Kexue Tongbao, Bull. Sci.* 1983. V. 15. P. 932–936.
- Dong Z., Zhou J., Lu Q., Peng Z. Yimengite, $K(Cr, Ti, Fe, Mg)_{12}O_{19}$ - a new mineral // *Kexue Tongbao*. 1984. V. 29, № 7. P. 920–923.
- Edgar A.D. and Arima M. Experimental studies on K-metasomatism of a model pyrolytic mantle and their bearing on the genesis of ultrapotassic magmas // *Proc. 27th Int. Geol. Congr. Petrol. (Igneous and Metamorphic Rocks)*. 1984. V.9. P. 509–541.
- Ellis D.J., Green D.H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1979. V. 71. P. 13–22.
- Erlank A. J., Rickard R. S. Potassicrichterite-bearing peridotites from kimberlite and the evidence they provide for upper mantle metasomatism. (abstr.) // *Second International Kimberlite Conference, Santa Fe, New Mexico*. 1977.
- Erlank A., Waters F., Hawkesworth C., Haggerty S., Allsopp H., Rickard R., Menzies M. Evidence for mantle metasomatism in peridotite nodules from the Kimberley pipes, South Africa // *Mantle metasomatism*. 1987. P. 221–311.
- Fermor L.L. Preliminary note on the origin of meteorites // *J. Proc. Asiat. Soc. Bengal*. 1912. V.8. P. 315–324
- Fediukova E. Kelyphitic reaction rims in garnet peridotites // *Acta univ. carol. Geol.* 1979. V. 3-4. P. 185–192
- Foley S., Hofer H., Brey G. High-pressure synthesis of priderite and members of lindsleyite-mathiasite and hawthorneite-yimengite series // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1994. V. 117. P. 164–174.
- Finnerty A.A, Boyd F. R. Evaluation of thermobarometers for garnet peridotites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. V. 48, №1. P. 15–27
- Franz L., Brey G.P., Okrusch M. Re-equilibration of ultramafic xenoliths from Namibia by metasomatic processes at the mantle boundary // *Journal of Geology*. 1996. V. 104. P. 599–615.

Frezzotti M.L., Touret J.L. CO₂, carbonate-rich melts, and brines in the mantle // *Geoscience Frontier*. 2014. V. 5. P. 697–710.

Frey F.A., Green D.H. The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1974. V.38. P.1023–1059.

Gasparik T., Lindsley D.H. Phase equilibria at high pressure of pyroxenes containing monovalent and trivalent ions // In: Prewitt C.T. (Ed.), *Pyroxenes. Reviews in Mineralogy 1*. – Washington DC: Mineralogical Society of America, 1980. P. 309–339.

Gasparik T. Phase relations in the transition zone // *Journal of Geophysical Research*. 1990. V. 95. P. 15751–15769.

Golovin, A.V., Sharygin, V.V., Pokhilenko, N.P. Melt inclusions in olivine phenocrysts in unaltered kimberlites from the Udachnaya-East pipe, Yakutia: some aspects of kimberlite magma evolution during late crystallization stages // *Petrology*. 2007. V. 15. P. 168–183.

Griffin W.L., Jensen B.B., Misra S.N. Anomalously elongated rutile in eclogite-facies pyroxene and garnet // *Norsk Geologisk Tidsskrift*. 1971. V. 51. P. 177–185.

Griffin, W.L., Smith, D., Boyd, F.R., Cousens, D.R., Ryan, C.G., Sie, S.H., Suter, G.F., 1989. Trace element zoning in garnets from sheared mantle xenoliths // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1989. V. 53. P. 561–567

Griffin W., Sobolev N., Ryan C., Pokhilenko N., Win T., Yefimova E. Trace elements in garnets and chromites: diamond formation in the Siberian lithosphere // *Lithos*. 1993. V. 29, N. 3. P. 235–256.

Griffin W. L., Smith D., Ryan C. G., O'Reilly S. Y., Win T. T. Trace-element zoning in mantle minerals: metasomatism and thermal events in the upper mantle // *The Canadian Mineralogist*. 1996. V. 34, N. 6. P. 1179–1193.

Griffin, W.L., Kaminsky F.V., Ryan C.G., O'Reilly S.Y., Win T.T., Ilupin I.P. Thermal state and composition of the lithospheric mantle beneath the Daldyn kimberlite field, Yakutia // *Tectonophysics*. 1996a. V. 262. P. 19–33.

Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Ryan, C.G., Gaul, O., Ionov, D. Secular variation in the composition of subcontinental lithospheric mantle // *American Geophysical Union, Washington, DC*. 1998. V. 26. P. 1–26.

Griffin, W. L., S. R. Shee, C. G. Ryan, T. T. Win, and B. A. Wyatt, Harzburgite to lherzolite and back again: Metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberley, South Africa // *Contrib. Mineral. Petrol*. 1999. V.134. P. 232–250.

Griffin W. L., Ryan C. G., Kaminsky F. V., O'Reilly S. Y., Natapov L. M., Win T. T., Kinny P. D., Ilupin I. P. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // *Tectonophysics*. 1999a. V. 310, № 1-4. P. 1–35.

Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Cratonic lithospheric mantle: is anything subducted // *Episodes*. 2007. V. 30. P. 43–53.

Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Afonso J.C., Bregg G.C. The composition and evolution of lithospheric mantle: a Re-evaluation and its tectonic implications // *Journal of Petrology*. 2009. V.50, N. 7. P. 1185–1204.

Gregoire M., Bell D.R., Le Roex A.P. Trace element geochemistry of phlogopite-rich mafic mantle xenoliths: their classification and their relationship to phlogopite-bearing peridotites and kimberlites revisited // *Contr. Miner. Petrol.*, 2002, v. 142 (5), p. 603—625.

Gregoire M., Bell D.R., Le Roex A.P. Garnet lherzolites from the Kaapvaal Craton (South Africa): trace element evidence for a metasomatic history // *J. Petrol.*, 2003, v. 44 (4), p. 629—657.

Girnis A.V., Bulatov V.K., Lahaye Y., Brey G.P. Partitioning of trace elements between carbonate-silicate melts and mantle minerals: experiment and petrological consequences // *Petrology*. 2006. V. 14, N. 5. P. 492–514.

Godard G.; Martin, S. Petrogenesis of kelyphites in garnet peridotites: A case study from the Ulten zone, Italian Alps // *Journal of Geodynamics*. 2000. V. 30. P. 117–145.

Grey I.E., Madsen I.C., Haggerty S.E. Structure of a new upper-mantle magnetoplumbite-type phase, $\text{Ba}(\text{Ti}_3\text{Cr}_4\text{Fe}_4\text{Mg})\text{O}_{19}$ // *American Mineralogist*. 1987. V. 72. P. 633 – 636.

Gregoire, M., Bell D.R., Le Roex, A.P. Garnet lherzolites from the Kaapvaal craton (South Africa): trace element evidence for a metasomatic history // *Journal Petrology*. 2003.V. 44, №4. P. 629–657.

Grütter H. S., Gurney J. J., Menzies A. H., Winter F. An updated classification scheme for mantle-derived garnet, for use by diamond explorers // *Lithos*. 2004. V. 77, N. 1. P. 841–857.

Ionov D.A., Carlson R. W., Doucet L.S. Golovin A.V., Oleinikov O.B. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re-Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite// *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 428. P.108–119.

Haggerty S.E The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlites. // *Phys and Chem of the Earth* 9. 1975. P. 295–307

Haggerty S. E. The mineral chemistry of new titanates from the Jagersfontein kimberlite, South Africa – implications for metasomatism in the upper mantle // *GeochimicaetCosmochimicaActa*. – 1983. V. 47, N. 11. P. 1833–1854.

Haggerty S. E., Smyth J. R., Erlank A. J., Rickard R.S., Danchin R. V. Lindsleyite (Ba) and mathiasite (K):two new chromium-titanates in the crichtonite seriesfrom the upper mantle. *American Mineralogist*. 1983a.V. 68. P. 494–505.

Haggerty S.E., Erlank A. J., Grey, I. E. Metasomatic mineral titanate complexing in the upper mantle // *Nature*. 1986. V. 319. P. 761–763.

Haggerty S.E. Metasomatic mineral titanates in upper mantle xenoliths. In *Mantle Xenoliths* (Eds. Nixon P. H.). J. Wiley and Sons Ltd. Chichester. 1987. P. 671–690.

Haggerty S. E., Grey I. E., Madsen I. C., Criddle A., Stanley C., Erlank A. Hawthorneite, Ba[Ti₃Cr₄Fe₄Mg]O₁₉; a new metasomatic magnetoplumbite-type mineral from the upper mantle // *American Mineralogist*. 1989. V. 74, N. (5-6). P. 668–675.

Haggerty S. E., Sautter V. Ultradeep (greater than 300 kilometers), ultramafic upper mantle xenoliths // *Science*. 1990. V. 248. P. 993–996.

Haggerty S. E. Oxide mineralogy of the upper mantle // *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance* // Lindsley D. H. 1991. P. 355–416.

Harte B., Gurney J.J. Evolution of clinopyroxene and garnet in an eclogite nodule from the Roberts Victor kimberlite pipe, South Africa // *Physics and Chemistry of the Earth*. 1975. V. 9. P. 367–387.

Harte B. Mantle peridotites and processes: the kimberlite sample // *Continental Basalts and Their Xenoliths* / Hawkesworth C. J., Norry, M. J. – Nantwich: Shiva. 1983. P. 49–61.

Harte B., Hunter R.H., Kinny P.D. Melt geometry, movement and crystallization in relation to mantle dykes, veins and metasomatism // *Philosophical transactions of the Royal Society of London*. 1993. V. 342. P. 1–21.

Harte B., Cayzer N. Decompression and unmixing of crystals included in diamonds from the mantle transition zone // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2007. V. 34. P. 647–656.

Helmstedt H.H., Gurney J.J. Geotectonic controls of primary diamond deposits: implications for area selection // *Journal of Geochemical Exploration*. 1995. V.53. P. 125–144.

Hess H.H. Pyroxenes of common mafic magmas. Part 1. // *The American Mineralogist*. 1941. V. 26, № 9. P. 515–535.

Howarth G.H., Barry P.H., Pernet-Fisher J.F., Baziotis I.P., Pokhilenko N.P., Pokhilenko L.N., Bodnar R.J., Taylor L.A., Agashev A.M. Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths // *Lithos*. 2014. V.184-185. P.209–224.

Hochstetter, F. Geognostische Studien aus dem Böhmerwalde. *Jahrb. K. K. Geol. Reichsanst.* 1854. V. 5. P.1–67

Holtstam D., Norrestam R. Lindvistite, Pb₂MeFe₁₆O₂₇, a novel hexagonal ferrite mineral from Jakobsberg, Filipstad, Sweden. // *American Mineralogist*. 1993. V. 78. P. 1304–1312.

Hunter, R.H., Taylor, L.A., 1982. Instability of garnet from the mantle: glass as evidence of metasomatic melting // *Geology*. 1982. V. 10, № 12. P. 617–620.

Huang X.L., Xu Y.G., Lo C.H., Wang R.C., Lin C.Y. Exsolution lamellae in a clinopyroxenemegacryst aggregate from Cenozoic basalt, Leizhou Peninsula, South China: petrography and chemical evolution // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2007. V. 154. P. 691–705.

Jacob D.E., Foley S.F. Evidence for Archean ocean crust with low high field strength element signature from diamondiferous eclogite xenoliths // *Lithos*. 1999. V. 48. P. 317–336.

- Jacob D.E. Nature and origin of eclogite xenoliths from kimberlites // *Lithos*. 2004. V. 77. P. 295–316.
- Jerde E.A., Taylor L.A., Crozaz G., Sobolev N.V. Exsolution of garnet within clinopyroxene of mantle eclogites: major and trace element chemistry // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1993. V. 114. P. 148–159.
- Jones A. P., Smith J., Dawson J. B. Mantle metasomatism in 14 veined peridotites from Bultfontein mine, South Africa // *The Journal of Geology*. 1982. P. 435–453.
- Ionov D. A., Carlson R. W., Doucet L. S., Golovin A. V. and Oleinikov O. B. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re–Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 428. P. 108–119.
- Ionov D.A., Ashchepkov I.V., Stosch H.-G., Witt-Eickschen G., Seck H.A. Garnet peridotite xenolith from the Vitim volcanic field, Baikal region: the nature of the garnet-spinel peridotite transition zone in the continental mantle // *Journal of Petrology*. 1993. V.34. P.1141–1175.
- Kargin A.V., Sazonova L.V., Nosova A.A., Lebedeva N.M., Kostitsyn Yu.A., Kovalchuk E.V., Tretyachenko V.V., Tikhomirova Ya.S., Phlogopite in mantle xenoliths and kimberlite from the Grib pipe, Arkhangelsk province, Russia: Evidence for multi-stage mantle metasomatism and origin of phlogopite in kimberlite // *Geoscience Frontiers*. 2019. V. 10, № 5. P. 1941–1959
- Kennedy C.S., Kennedy G.C. The equilibrium boundary between graphite and diamond. // *Journal of Geophysical Research*. 1976. V. 81. P. 2467–2470.
- Kelemen P.B., Hart S.R., Bernstein, S. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 164. P. 397–406
- Kharkiv, A.D.; Vishnevsky, A.A. Features of garnet kellyization from xenoliths of deep rocks in kimberlites // *Zap. Vsesoyuznogo Mineral. Obs.* 1989. V. 118. P. 27–37.
- Kinny P. D., Griffin B. J., Heaman L. M., Brakhfogel F. F., Spetsius Z. V. SHRIMP U-Pb ages of perovskite from Yakutian kimberlites // *Geologiya i Geofizika*. 1997. V. 38. № 1. P. 91–99
- Kiviets G. B., Phillips D., Shee S. R., Vercoe S. C., Barton E. S., Smith C. B., Fourie L. F. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of yimengite from Turkey Well kimberlite, Australia: the oldest and the rarest // *Ext. Abstr. In 7th International Kimberlite Conference*. 1998. 432–434.
- Kovalenko V.I., Solovova I.P., Ryabchikov I.D., Ionov D.A., Bogatikov O.A., Naumov V.B. Fluidized CO₂ – sulfide silicate media as agents of mantle metasomatism and megacrysts formation – evidence from a large druse in a spinel lherzolite xenolith. // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1987. V. 45. P. 280–293
- Konzett, J., Armstrong, R. A., & Günther, D. Modal metasomatism in the Kaapvaal craton lithosphere: constraints on timing and genesis from U–Pb zircon dating of metasomatized peridotites and MARID-type xenoliths // *Contrib Mineral Petrol.* 2000. V.139, №6. P. 704–719.
- Konzett J., Yang H., Frost D. J. Phase relations and stability of magnetoplumbite- and crichtonite-series phases under upper-mantle PT conditions: an experimental study to 15 GPa with implications for LILE metasomatism in the lithospheric mantle // *Journal of Petrology*. 2005. V. 46, № 4. P. 749–781.

Konzett J., Wirth R., Hauzenberger C., Whitehouse M. Two episodes of fluid migration in the Kaapvaal Craton lithospheric mantle associated with Cretaceous kimberlite activity: evidence from a harzburgite containing a unique assemblage of metasomatic zirconium-phases // *Lithos*. 2013. V. 182. P. 165–184.

Konzett J, Krenn K, Rubatto D, Hauzenberger C, and Stalder R (2014) The formation of saline mantle fluids by open-system crystallization of hydrous silicate-rich vein assemblages—Evidence from fluid inclusions and their host phases in MARID xenoliths from the central Kaapvaal Craton, South Africa // *Geochim Cosmochim Acta*. 2014. V. 147. P. 1–25

Krogh E.J. The garnet–clinopyroxene Fe-Mg geothermometer – a reinterpretation of existing experimental data // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1988. V. 99. P. 44–48.

Krogh Ravn E. The garnet–clinopyroxene Fe²⁺ – Mg geothermometer: an updated calibration // *Journal of Metamorphic Geology*. 2000. V. 18. P. 211–219.

Krogh Ravn E.J., Paquin J. Thermobarometric methodologies applicable to eclogites and garnet ultrabasites // *EMU Notes in Mineralogy*. 2003. V.5. P.229–259.

Kushiro I., Aoki K. Origin of some eclogite inclusions in kimberlite // *American Mineral*. 1968. V. 53. P. 1347-1367.

Laz'ko, E.E. Diamond Indicator Minerals and Genesis of Kimberlite // Nedra Publications. 1979. 192p.

Lindsley D.H., Dixon S.A. Diopside-enstatite equilibria at 850 degrees to 1400 degrees C, 5 to 35 kb // *American Journal of Science*. 1976. V. 276, № 10. P. 1285–1301.

Litasov K.D., Foley S.F., Litasov Yu.D. Magmatic modification and metasomatism of the subcontinental mantle beneath the Vitim volcanic field (East Siberia): evidence from trace element data on pyroxenite and peridotite xenoliths from Miocene microbasalt // *Lithos*. 2000. V.54, № 1-2. P.83–114.

Lloyd F., Bailey D. Light element metasomatism of the continental mantle: the evidence and the consequences // *Physics and Chemistry of the Earth*. 1975. V.9. P.389–416.

Lock N.P., Dawson J.B. Garnet-olivine reaction in the upper mantle: evidence from peridotite xenoliths in the Letseng-la-Terae kimberlites, Lesoto. *Trans. Roy. Soc. of Edinburg* // *Earth Sciences*. 1980. V. 71. P. 47–53.

Malkovets V., Rezvukhin D., Belousova E., Griffin W., Sharygin I., Tretiakova I., Gibsher A., O'Reilly S., Kuzmin D., Litasov K., Logvinova A., Pokhilenko N., Sobolev N. Cr-rich rutile: A powerful tool for diamond exploration // *Lithos*. 2016. V. 265. P. 304–311.

Meyer H.O.A., McCallister R.H. Two-pyroxene megacrysts from south African kimberlites // *Kimberlites II: the mantle and crust-mantle relationships* // Elsevier. 1984. V. 2. P. 133–144.

Menzies M.A., Hawkesworth C.J. *Mantle Metasomatism* // Academic Press: London. UK. 1987. P. 472

Metasomatism in oceanic and continental lithosphere mantle. Coltorti M., Grégoire M (Eds.). - Geological Society, London, Special Publications. 2008. V. 293. – 359 pp.

McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // *Chemical Geology*. 1995. V. 120. P. 223–253.

Misra K., Anand M., Taylor L.A., Sobolev N.V. Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2004. V. 146. P. 696–714.

Moore R.O., Gurney J.J. Pyroxene solid solution in garnets included in diamond // *Nature*. 1985. V.318. P. 553–555.

Nakamura D. A new formulation of garnet–clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set // *Journal of Metamorphic Geology*. 2009. V. 27, № 7. P. 495–508.

Naemura K., Shimizu I., Svojtka M., Hirajima T. (2015) Accessory priderite and burbanrite in multiphase solid inclusions in the orogenic garnet peridotite from the Bohemian Massif, Czech Republic // *Journal of Mineralogical and Petrological sciences*. 2015. V. 110, № 1. P. 20–28.

Nixon P.H., Boyd F.R. The discrete nodule association in kimberlites of northern Lesotho // In *Lesotho Kimberlites* (Nixon P.H., ed.). Maseru. 1973. P. 67–75.

Nixon P.H., Condliffe E. Yimengite of K–Ti metasomatic origin in kimberlitic rocks from Venezuela // *Mineralogical Magazine*. 1989. V. 53. P. 305–309.

Nickel K.G., Green D.H. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds // *Earth and Planetary Science Letters*. 1985. V. 73. P. 158–170.

Norrish K. Priderite, a new mineral from the leucite lamproites of the West Kimberley area, Western Australia // *Mineralogical Magazine*. 1951. V.73. P. 1007–1024.

O'Hara M.J., Yoder H.S. Formation and fractionation of basic magmas at high pressures // *Scottish Journal of Geology*. 1967. V.3, №1. P. 67–117.

O'Reilly S.Y., Griffin W., PoudjomDjomani Y., Morgan P. Are lithospheres forever // *Tracking changes in subcontinental lithospheric mantle through time: GSA Today*. 2001. V.11, №4. P. 4–10.

O'Reilly S.Y., Griffin W. Mantle metasomatism and the chemical transformation of rock // *Springer*. 2013. P. 471–533.

Obata, M. Material transfer and local equilibria in a zoned kelyphite from a garnet pyroxenite, Ronda, Spain // *Journal of Petrology*. 1994. V.35. P.271–287.

Obata M. Kelyphite and symplectite: textural and mineralogical diversities and universality, and a new dynamic view of their structural formation // *The book: In New Frontiers in Tectonic Research—General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs*. 2011.

- Pearson D. G., Shirey S. B., Carlson R. W., Boyd F. R., Pokhilenko N. P. and Shimizu N. Re–Os, Sm–Nd, and Rb–Sr isotope evidence for thick Archaean lithospheric mantle beneath the Siberian craton modified by multistage Metasomatism // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V.59. P. 959–977.
- Pearson D. G., Shirey S. B., Canil D. Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds // *Treatise on Geochemistry, Vol. 2: Geochemistry of the Mantle and Core* / Carlson R. W. et al. – Amsterdam: Elsevier. 2003. P. 171–275.
- Pernet-Fisher J.F., Howarth G.H., Pearson D.G., Woodland S., Barry P.H., Pokhilenko N.P., Pokhilenko L.N., Agashev A.M., Taylor L.A. Plume impingement on the Siberian SCLM: Evidence from Re–Os isotope systematics// *Lithos*. 2015. V.218–219. P. 141–154.
- Peng Zhizhong, Lu Qi (1985) The crystal structure of yimengite. // *Sci Sinica (Series B)*. 1985. V. 28. P. 882–7.
- Pollack H.N., Chapman D.A. On the regional variation of heat flow geotherms and lithospheric thickness // *Tectonophysics*. 1977. V. 38. P. 279–296.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Boyd F.R., Pearson D.G., Shimizu N. Megacrystalline pyrope peridotites in the lithosphere of the Siberian platform: mineralogy, geochemical peculiarities and the problem of their origin // *Russian Geology and Geophysics*. 1993. V. 34. P. 56–67.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N. Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnets in Yakutian kimberlites and some aspects of the evolution of the Siberian craton lithospheric mantle // In: Gurney J.J., Gurney J.L., Pascoe M.D., Richardson S.H. (Eds.), *Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference*. – Cape Town: Red Roof Design. 1999. V.2. P. 690–707.
- Pokhilenko L.N. Kelyphite rims on garnets of contrast parageneses in mantle xenoliths from the Udachnaya-East kimberlite pipe (Yakutia) // *Minerals*. 2021. V.11. –P. 615.
- Podpora, C., Lindsley, D. H. Lindsleyite and mathiasite: synthesis of chromium-titanates in the crichtonite ($AlM_{21}O_{38}$) series//In: *EOS Transactions, American Geophysical Union*. 1984.V. P. 65 –293.
- Prider R.T. Some minerals from the leucite-rich rocks of the west Kimberley area, Western Australia // *Min. Mag.* 1939. V.25. P. 373–387.
- Rezvukhin D.I., Malkovets V.G., Kuzmin D.V., Gibsher A.A., Litasov K.D. Inclusions of crichtonite series minerals in peridotiticpyropes from the Internationalnaya kimberlite pipe, Yakutia // *Crystallogenesi and mineralogy: Abstracts of the III International Conference "Crystallogenesi and mineralogy"* (Novosibirsk, 27 September - 1 October, 2013). 2013. P. 254–255.
- Rezvukhin D.I., Malkovets V.G., Sharygin I.S., Tretiakova I.G., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Inclusions of crichtonite-group minerals in Cr-pyropes from the Internatsionalnaya kimberlite pipe, Siberian Craton: Crystal chemistry, parageneses and relationships to mantle metasomatism // *Lithos*. 2018. V. 308–309. P. 181–195.
- Reid A.M., Dawson Y.B. Olivine granet reaction in peridotites from Tanzania // *Lithos*. 1972. V. 5, N. 2. P. 115–154.

Ried H., Fuess H. Lamellar exsolution systems in clinopyroxene. Transmission Electron Microscopy observations // *Physics and Chemistry of the Minerals*. 1986. V. 13. P. 113–118.

Ringwood A.E., Lovering J.F. Significance of pyroxene-ilmenite intergrowths among kimberlite xenoliths // *Earth and Planetary Science Letters*. 1970. V.7. P.371–375.

Roden M.F., Lazko E.E., Jagoutz E. The Role of Garnet Pyroxenites in the Siberian Lithosphere: Evidence from the Mir Kimberlite // In: Gurney J.J., Gurney J.L., Pascoe M.D., Richardson S.H. (Eds.), *Proceedings of 7th International Kimberlite Conference*. – Cape Town: Red Roof Design. 1999. V.2. P. 714–720.

Roden M.F., Patiño-Douce A.E., Jagoutz E., Laz'ko E.E. High pressure petrogenesis of Mg-rich garnet pyroxenites from Mir kimberlite, Russia // *Lithos*. 2006. V. 90. P. 77–91.

Rosen O.M., Condie K.C., Natapov L.M. and Nozhkin A.D. Archean and early Proterozoic evolution of the Siberian craton, a preliminary assessment // *Archean crustal evolution* (K.C. Condie, ed.). Amsterdam, Elsevier. 1994. P. 411–459.

Rosen O.M., Manakov A.V., Suvorov V.D. The collisional system in the northeastern Siberian Craton and a problem of diamond-bearing lithospheric keel // *Geotectonics (English Translation)*. 2005. V. 39. P. 456–479.

Rudnick R.L., McDonough W.F., Chappell B.W. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: petrographic and geochemical characteristics // *Earth and Planetary Science Letters*, 1993. V.114. P.463–475.

Safonov, O. G., Butvina, V. G. Interaction of model peridotite with H₂O-KCl fluid: Experiment at 1.9 GPa and its implications for upper mantle metasomatism // *Petrology*. 2013. V. 21, №6. P. 599–615.

Safonov O. G., Aranovich L.Y. Alkali control of high-grade metamorphism and granitization // *Geosc. Front*. 2014. V. 5. P. 711–727.

Safonov O.G., Butvina V.G. Indicator Reactions of K and Na Activities in the Upper Mantle: Natural Mineral Assemblages, Experimental Data, and Thermodynamic Modeling // *Geochemistry*. 2016. V. 54, № 10. P.858–872

Sautter V., Harte B. Diffusion gradients in an eclogite xenolith from the Roberts Victor kimberlite pipe: 1. Mechanism and evolution of garnet exsolution in Al₂O₃-rich clinopyroxene // *Journal of Petrology*. 1988. V. 29. P. 1325–1352.

Sautter V., Haggerty S.E., Field S. Ultradeep (>300 kilometers) ultramafic xenoliths: petrological evidence from the transition zone // *Science*. 1991. V. 252. P. 827-830.

Sen G., Jones R.E. Exsolved silicate and oxide phases from clinopyroxenes in a single Hawaiian xenolith: implications for oxidation state of the Hawaiian upper mantle // *Geology*. 1988. V. 16. P. 69–72.

Schmickler B., Jacob D.E., Foley S.F. Eclogite xenoliths from the Kuruman kimberlites, South Africa: geochemical fingerprinting of deep subduction and cumulate processes // *Lithos*. 2004. V. 75. P. 173–207.

- Schrauf, A. Beiträge zur Kenntniss des Associations Kreises der Magnesia Silicate. Z. Krist // Miner. 1882. V.6. P. 321–388
- Shatsky V., Ragozin A., Zedgenizov D., Mityukhin S. Evidence for multistage evolution in a xenolith of diamond-bearing eclogite from the Udachnaya kimberlite pipe // Lithos. 2008. V. 105. P. 289–300
- Smyth J.R., T.C., McCormick T.C., Caporuscio F.A., Petrology of a suite of eclogite inclusions from the Bobbejaan kimberlite, I. Two unusual corundum-bearing kyanite eclogites // in: Kimberlites II: the mantle and crust-mantle relationships // Amsterdam: Elsevier. 1984. P. 109–119.
- Smyth J.R., Erlank A.J., Rickard R.S. A new Ba-Sr-Cr-Fe titanate mineral from a kimberlite nodule // EOS American Geophysical Union. 1978. V. 59. –P. 394.
- Spetsius Z.V., Taylor L.A. Partial melting in mantle eclogite xenoliths: connections with diamond paragenesis // International Geology Review. 2002. V. 44. P. 973–987.
- Sobolev V.S., Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G. Inclusions in diamond from a diamond-bearing eclogites // Dokl Akad Nauk. 1972. V. 207. P.164–167
- Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1973. V. 40, N. 1. P. 39–52.
- Sobolev N.V., Yefimova E.S., Kaminsky F.V., Lavrentiev Y.G., Usova L.V. Titanate of complex composition and phlogopite in the diamond stability field // In: Composition and Processes of Deep Seated Zones of Continental Lithosphere (Eds Sobolev NV) Nauka, Novosibirsk. 1988. P. 185–186
- Sobolev N.V., Shatsky V.S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation // Nature. 1990. V. 343. P. 742–746.
- Sobolev V.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Sobolev N.V., Pokhilenko N.P., Kharkiv A.D. A unique metasomatized peridotite xenolith from the Mir kimberlite, Siberian Platform // Russian Geology and Geophysics. 1997. V. 38. P. 218–228.
- Sobolev, N.V., Taylor, L.A., Zuev, V.M., Bezborodov, S.M., Snyder, G.A., Sobolev, V.N., Yefimova, E.S.. The specific features of eclogitic paragenesis of diamonds from Mir and Udachnaya kimberlite pipes (Yakutia) // Geologiya and Geophysics. 1998. V. 39, N. 12. P. 1653–1663.
- Sobolev N. V., Snyder G. A., Taylor L. A., Keller R. A., Yefimova E. S., Sobolev V. N., Shimizu N. Extreme chemical diversity in the mantle during eclogitic diamond formation: Evidence from 35 garnet and 5 pyroxene inclusions in a single diamond // International Geology Review. 1998a. V. 40, N. 7. P. 567–578
- Sobolev V.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Jerde E.A., Neal C.R., Sobolev N.V. Quantifying the effects of metasomatism in mantle xenoliths: constraints from secondary chemistry and mineralogy in Udachnaya eclogites, Yakutia // International Geology Review. 1999. V. 41. P. 391–416.

Sobolev N. V., Yefimova E. S. Composition and petrogenesis of Ti-oxides associated with diamonds // *International Geology Review*. 2000. V. 42, N. 8. P. 758–767

Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Seryotkin Y.V., Yefimova E.S., Floss C., Taylor L.A. Mineral inclusions in microdiamonds and macrodiamonds from kimberlites of Yakutia: a comparative study // *Lithos*. 2004. V. 77. P. 225–242.

Solov'eva L. V., Kalashnikova T. V., Kostrovitsky S. I., Ivanov A. V., Matsuk S. S., Suvorova L. F. Metasomatic and magmatic processes in the mantle lithosphere of the Birekte terrain of the Siberian craton and their effect on the lithosphere evolution // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2015. V. 6, № 3. P. 311–344.

Spengler D., Alifirova T.A. Formation of Siberian cratonic mantle websterites from high-Mg magmas // *Lithos*. 2019. N. (326-327). P. 384–396

Spetsius Z.V., Bulanova G.P., Griffin W.L. Eclogite containing diamond with a garnet inclusion from the Mir pipe // *Dokl Ross Akad Nau*. 1992. V. 332. P. 134–137.

Stäblien H. Hard ferrites and plastiferrites. In: Wohlfarth E. P. (Ed.) // *Ferromagnetic Materials*. 1982. Vol. 3. P. 441–602.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ (eds) *Magmatism in the ocean basins* // *Geol. Soc. Sp. Pub*. 1989. V. 42. P. 313–345

Sun J., Liu C.Z., Tappe S., Kostrovitsky S. I., Wu F.Y., Yakovlev D., Yang Y.H., Yang J.H. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U–Pb and Sr–Nd perovskite isotope analysis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 404. P. 283–295.

Taylor L.A., Snyder G.A., Crozaz G., Sobolev V.N., Sobolev N.V. Eclogitic inclusions in diamonds: evidence of complex mantle processes over time. 1996 // *Earth Planet Sci Lett*. 1996. V. 142. P. 535–552

Taylor W.R. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolite and garnet websterite // *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen Band*. 1998. V. 172. P. 381–408.

Taylor L.A., Snyder G.A., Keller R., Remley D.A., Anand M., Wiesli R., Valley J., Sobolev N.V. Petrogenesis of group A eclogites and websterites: evidence from the Obnazhennaya kimberlite, Yakutia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2003. V. 145. P. 424–443.

Van Roermund H.L.M., Drury M.R. Ultra-high pressure ($P > 6$ GPa) garnet peridotites in Western Norway: exhumation of mantle rocks from > 185 km depth // *Terra Nova*. 1998. V. 10. P. 295–301.

van Achterbergh E., Griffin W.L., Stiefenhofer J. Metasomatism in mantle xenoliths from the Letlhakane kimberlites: estimation of element fluxes // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2001. V. 141. P. 397–414.

Wang L., Essene E.J., Zhang Y. Mineral inclusions in pyrope crystals from Garnet Ridge, Arizona, USA: implications for processes in the upper mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1999. V. 135. P. 164–178.

Wang W.Y., Gasparik T. Metasomatic clinopyroxene inclusions in diamonds from the Liaoning province, China // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V.65, N 4. P. 611–620.

Walter M.J. Melting residues of fertile peridotite and the origin of cratonic lithosphere. In: Fei, Y., Bertka, M., Mysen, B.O. (Eds.). *Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation* // The Geochemical Society, Spec. Publ. Houston: TX. 1999. P. 225–240.

Wiggers de Vries D. F., Pearson D. G., Bulanova G. P., Smelov A.P., Pavlushin A. D., Davies G. R. Re–Os dating of sulphide inclusions zonally distributed in single Yakutian diamonds: Evidence for multiple episodes of Proterozoic formation and protracted timescales of diamond growth // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2013. V.120. P. 363–394.

Wilshire H.G., Pike J.N., Meyer C.E., Schwarzman E.C. Amphibole-rich vein in lherzolite xenoliths. // Dish Hill and Deadman Lake, California // *American Journal Science*. 1980. V. 280. P. 576–593.

Yaxley G.M., Green D.H., Kamenetsky V.S. Carbonatite metasomatism in the southeastern Yaxley, G.M., Green, D.H., Kamenetsky, V. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere // *Journal of petrology*. 1998. V. 39. P.917–1930

Zedgenizov D.A., Ragozin A.L. Chloride-carbonate fluid in diamonds from the eclogite xenolith // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V.415, №6. P.961–964.

ZiberaL., NimisP., ZanettiA., MarzoliA.and Sobolev N.V. Metasomatic processes in the central Siberian cratonic mantle: evidence from garnet xenocrysts from the Zagadochnaya kimberlite // *Journal of petrology*. V.54, № 11. P. 2379–2409.

Zhang R.Y., Zhai S.M., Fei Y.W., Liou J.G. Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: the significance of exsolved rutile in garnet // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 216. P. 591–601.

Zang, Q.; Enami, M.; Suwa, K. Aluminian orthopyroxene in pyrometamorphosed garnet megacryst from Liaoning and Shandong provinces, northeast China. *Eur. J. Mineral.* 1993. V.5. P. 153–164

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 4.1. Состав породообразующего оливина из ксенолитов перидотитового парагенезиса кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная

| № Образца | Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | Формула рассчитана на 3 катиона | | | | | | | | Миналы, мол.% | | xMg# | | |
|-----------|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------------------|-------|------|-------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|------|-------|------|-------|
| | MgO | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | MnO | FeO | SiO ₂ | CaO | NiO | Total | Mg | Al | Ti | Cr | Mn | Fe | Si | Ca | Ni | Fo | | Fa | |
| ТО-171 | ц | 50,36 | 0,38 | 0,04 | 0,27 | 0 | 8,53 | 40,4 | 0 | 0,19 | 100,17 | 1,83 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,17 | 0,98 | 0,00 | 0,00 | 92,89 | 7,11 | 91,31 |
| ТО-171 | к | 50,31 | 0,02 | 0,02 | 0 | 0,14 | 8,23 | 40,84 | 0,01 | 0,54 | 100,11 | 1,83 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 91,80 | 8,2 | 91,58 |
| ТО-175 | ц | 51,75 | 0,12 | 0,03 | 0 | 0 | 7,27 | 41,27 | 0,2 | 0,45 | 101,09 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,01 | 0,01 | 93,44 | 6,56 | 92,69 |
| ТО-175 | ц | 51,41 | 0 | 0,07 | 0,22 | 0,06 | 6,57 | 41,31 | 0,09 | 0,33 | 100,06 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 93,31 | 6,69 | 93,30 |
| ТО-175 | к | 49,95 | 0,14 | 0,09 | 0,03 | 0 | 6,77 | 40,16 | 0,02 | 0,72 | 97,88 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 92,93 | 7,07 | 92,94 |
| ТО-254 | ц | 50,64 | 0 | 0 | 0 | 0,14 | 7,7 | 40,74 | 0 | 0,44 | 99,66 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 92,62 | 7,38 | 92,15 |
| ТО-254 | к | 50,83 | 0 | 0 | 0 | 0,14 | 7,39 | 40,64 | 0 | 0,37 | 99,37 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,20 | 6,8 | 92,46 |
| ТО-254 | к | 50,98 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 7,82 | 41,08 | 0 | 0,4 | 100,43 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 92,47 | 7,53 | 92,09 |
| ТО-254 | к | 50,97 | 0 | 0 | 0,22 | 0,09 | 7,44 | 40,82 | 0 | 0,37 | 99,91 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,05 | 6,95 | 92,45 |
| ТО-258 | ц | 49,21 | 0,21 | 0,06 | 0,14 | 0 | 7,6 | 40,13 | 0 | 0,32 | 97,67 | 1,82 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 92,02 | 7,98 | 92,03 |
| ТО-258 | пр | 50,33 | 0,07 | 0 | 0,13 | 0,12 | 7,53 | 40,09 | 0 | 0,5 | 98,77 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,55 | 6,45 | 92,27 |
| ТО-258 | к | 51,24 | 0,11 | 0 | 0 | 0,18 | 8,6 | 40,48 | 0,03 | 0,45 | 101,09 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,98 | 0,00 | 0,01 | 94,32 | 5,68 | 91,39 |
| ТО-258 | ц | 49,77 | 0 | 0 | 0,01 | 0,03 | 7,93 | 39,92 | 0 | 0,62 | 98,28 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 92,90 | 7,1 | 91,77 |
| ТО-258 | к | 49,91 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 8,06 | 40,88 | 0 | 0,73 | 99,88 | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 91,69 | 8,31 | 91,71 |
| ТО-258 | к | 51,39 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 7,8 | 40,44 | 0 | 0,49 | 100,32 | 1,86 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,98 | 0,00 | 0,01 | 94,69 | 5,31 | 92,17 |
| ТО-258 | ц | 51,03 | 0,27 | 0,33 | 0,08 | 0 | 8,21 | 40,92 | 0,09 | 0,54 | 101,47 | 1,83 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,98 | 0,00 | 0,01 | 92,93 | 7,07 | 91,73 |
| ТО-258 | к | 51,57 | 0,06 | 0 | 0 | 0 | 8,21 | 41,97 | 0,1 | 0,22 | 102,13 | 1,83 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 91,80 | 8,2 | 91,82 |
| TM-90 | ц | 54,11 | 0,14 | 0 | 0,02 | 0 | 5,72 | 43,17 | 0,03 | 0,52 | 103,71 | 1,87 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 94,40 | 5,6 | 94,40 |
| TM-90 | к | 52 | 0,23 | 0,13 | 0 | 0 | 6,35 | 41,96 | 0 | 0,1 | 100,77 | 1,85 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 93,59 | 6,41 | 93,58 |
| TM-90 | ц | 51,39 | 0,3 | 0,13 | 0,08 | 0,19 | 6,49 | 41,15 | 0,07 | 0,59 | 100,39 | 1,85 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,38 | 6,62 | 93,38 |
| TM-100 | к | 51,24 | 0,14 | 0,03 | 0,1 | 0 | 7,71 | 40,97 | 0,05 | 0,55 | 100,79 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,20 | 6,8 | 92,20 |
| TM-100 | к | 50,44 | 0,05 | 0,09 | 0 | 0,05 | 7,4 | 40,62 | 0,28 | 0,21 | 99,14 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 1,00 | 0,01 | 0,00 | 92,53 | 7,47 | 92,37 |

Продолжение таблицы 4.1.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| ТМ-100 | ц | 50,52 | 0,21 | 0 | 0,04 | 0,08 | 7,52 | 40,94 | 0,04 | 0,2 | 99,55 | 1,84 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 92,29 | 7,71 | 92,30 |
| ТМ-100 | ц | 50,5 | 0,33 | 0 | 0 | 0 | 7,19 | 40,71 | 0 | 0,25 | 98,98 | 1,84 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 92,60 | 7,4 | 92,61 |
| ТМ-100 | к | 50,08 | 0,23 | 0 | 0 | 0 | 7,05 | 39,79 | 0 | 0,32 | 97,47 | 1,86 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,79 | 6,21 | 92,66 |
| ТМ-100 | ц | 52,31 | 0,12 | 0,08 | 0,02 | 0,17 | 7,58 | 41,42 | 0 | 0,66 | 102,36 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 94,11 | 5,89 | 92,47 |
| ТО-69 | ц | 51,91 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 7,01 | 41,25 | 0 | 0,39 | 100,66 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,77 | 6,23 | 92,96 |
| ТО-69 | к | 51,35 | 0 | 0 | 0 | 0,12 | 7,87 | 41,33 | 0 | 0,38 | 101,05 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 92,58 | 7,42 | 92,10 |
| ТО-69 | ц | 46,73 | 0 | 0 | 0 | 0,27 | 12,52 | 39,72 | 0,11 | 0,13 | 99,48 | 1,74 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,26 | 0,99 | 0,00 | 0,00 | 87,67 | 12,33 | 86,92 |
| ТО-69 | к | 47,12 | 0,08 | 0 | 0,1 | 0,18 | 12,81 | 40,24 | 0,08 | 0,27 | 100,88 | 1,73 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,26 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 87,26 | 12,74 | 86,78 |
| ТО-78 | ц | 51,6 | 0 | 0 | 0 | 0,09 | 7,19 | 40,94 | 0 | 0,36 | 100,18 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,92 | 6,08 | 92,73 |
| ТО-78 | к | 52,16 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 7,15 | 41,53 | 0 | 0,46 | 101,4 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,59 | 6,41 | 92,86 |
| ТО-78 | к | 51,82 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 6,9 | 41,27 | 0 | 0,46 | 100,52 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 93,57 | 6,43 | 93,05 |
| ТО-78 | ц | 51,68 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 6,97 | 40,89 | 0 | 0,47 | 100,08 | 1,87 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 94,18 | 5,82 | 92,97 |
| ТО-78 | к | 50,59 | 0 | 0 | 0 | 0,09 | 7,1 | 40,18 | 0 | 0,4 | 98,36 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,82 | 6,18 | 92,68 |
| ТО-91 | ц | 51,59 | 0 | 0 | 0 | 0,11 | 7,58 | 41,21 | 0 | 0,45 | 100,94 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,29 | 6,71 | 92,37 |
| ТО-91 | ц | 51,16 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 7,55 | 40,98 | 0 | 0,37 | 100,16 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,03 | 6,97 | 92,36 |
| ТО-91 | пр | 51 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 7,49 | 40,85 | 0 | 0,37 | 99,86 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,03 | 6,97 | 92,40 |
| ТО-91 | ц | 51,65 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 7,59 | 41,12 | 0 | 0,46 | 100,9 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,60 | 6,4 | 92,38 |
| ТО-91 | к свет уч | 47,18 | 0 | 0 | 0 | 0,16 | 12,86 | 40,45 | 0,06 | 0,29 | 101 | 1,73 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,27 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 86,91 | 13,09 | 86,73 |
| ТО-91 | к свет уч | 47,54 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 11,87 | 39,92 | 0 | 0,35 | 99,83 | 1,76 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 88,74 | 11,26 | 87,69 |
| ТО-125 | ц | 51,2 | 0 | 0 | 0 | 0,09 | 7,35 | 40,76 | 0 | 0,41 | 99,81 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,60 | 6,4 | 92,53 |
| ТО-125 | к | 51,21 | 0 | 0 | 0 | 0,13 | 7,29 | 40,69 | 0 | 0,43 | 99,75 | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 93,78 | 6,22 | 92,63 |
| ТО-266 | ц | 50,87 | 0,33 | 0 | 0 | 0,14 | 7,78 | 41,35 | 0 | 0,58 | 101,05 | 1,83 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 92,10 | 7,9 | 92,08 |
| ТО-266 | к | 49,66 | 0,2 | 0 | 0 | 0,06 | 7,58 | 41,19 | 0,1 | 0,24 | 99,03 | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,01 | 0,00 | 0,01 | 92,11 | 7,89 | 92,12 |

Продолжение таблицы 4.1.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| ТО-266 | к | 48,57 | 0,16 | 0,09 | 0,13 | 0 | 9,22 | 41,4 | 0 | 0,36 | 99,93 | 1,77 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 1,01 | 0,00 | 0,01 | 90,37 | 9,63 | 90,39 |
| ТО-266 | ц | 49,52 | 0,1 | 0,11 | 0 | 0,14 | 8,32 | 40,08 | 0 | 0,57 | 98,84 | 1,82 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,99 | 0,00 | 0,01 | 92,07 | 7,93 | 91,38 |
| ТМ-31 | ц | 50,79 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 7,78 | 41,11 | 0,02 | | 99,77 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | | 92,10 | 7,8 | 92,10 |
| ТМ-31 | пр | 50,73 | 0 | 0 | 0,01 | 0,07 | 7,78 | 41,03 | 0,01 | | 99,63 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | | 92,10 | 7,9 | 92,14 |
| ТМ-31 | к | 50,69 | 0 | 0 | 0,01 | 0,08 | 7,76 | 40,93 | 0,02 | | 99,49 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 1,00 | 0,00 | | 92,30 | 7,7 | 92,26 |
| ТМ-31 | ц | 50,8 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 7,72 | 41,06 | 0,01 | | 99,67 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | | 92,20 | 7,8 | 92,21 |
| ТМ-31 | к | 50,8 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 7,81 | 41,11 | 0,01 | | 99,8 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | | 92,01 | 7,9 | 92,10 |
| ТМ-31 | ц | 50,69 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 7,79 | 40,91 | 0,01 | | 99,48 | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 1,00 | 0,00 | | 92,30 | 7,7 | 92,27 |
| ТМ-38 | ц | 50,51 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 8,02 | 41,03 | 0,01 | | 99,64 | 1,83 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | | 92,00 | 8 | 91,83 |
| ТМ-38 | к | 50,53 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 8,01 | 41,25 | 0,01 | 0,38 | 100,26 | 1,83 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | | 92,00 | 8,2 | 91,84 |
| ТМ-38 | к | 50,26 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 8 | 41,14 | 0,01 | 0,38 | 99,87 | 1,83 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,01 | 0,00 | | 92,00 | 8,2 | 91,81 |
| ТМ-38 | ц | 50,49 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 8,02 | 41,08 | 0,01 | 0,39 | 100,06 | 1,83 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | | 92,30 | 8,2 | 91,83 |
| ТМ-38 | ц | 49,39 | 0 | 0 | 0,01 | 0,14 | 9,48 | 40,92 | 0,06 | 0,34 | 100,34 | 1,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 1,00 | 0,00 | | 90,20 | 9,71 | 90,29 |

Условные обозначения: ц-центр; к-край; пр-промежуток; к.свет.уч- краевой светлый участок

Таблица 4.2. Состав породообразующего ортопироксена из ксенолитов перидотитового и пироксенитового парагенезиса кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная.

| Образец № | | Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | Миналы, мол.% | | | x Mg |
|-----------|---|---------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------------|--------|-------|--------|
| | | Na2O | SiO2 | K2O | Cr2O3 | FeO | MgO | Al2O3 | CaO | TiO2 | MnO | Total | En | Fs | Wo | |
| TM-68 | ц | 0.014 | 56.397 | 0.000 | 0.077 | 10.485 | 31.597 | 0.307 | 0.276 | 0.051 | 0.166 | 99.370 | 83,65 | 15,822 | 0,5 | 84,10 |
| TM-68 | к | 0.066 | 56.432 | 0.000 | 0.061 | 10.498 | 31.738 | 0.306 | 0.281 | 0.051 | 0.157 | 99.590 | 83,89 | 15,57 | 0,53 | 84,82 |
| TM-68 | к | 0.018 | 56.461 | 0.007 | 0.068 | 10.490 | 31.562 | 0.301 | 0.273 | 0.047 | 0.151 | 99.378 | 83,85 | 15,63 | 0,5 | 84,30 |
| TM-68 | ц | 0.010 | 56.314 | 0.002 | 0.059 | 10.457 | 31.617 | 0.318 | 0.286 | 0.059 | 0.147 | 99.269 | 83,89 | 15,56 | 0,55 | 84,35 |
| TM-68 | к | 0.040 | 56.603 | 0.001 | 0.064 | 10.428 | 31.349 | 0.307 | 0.288 | 0.063 | 0.161 | 99.304 | 83,81 | 15,64 | 0,55 | 84,27 |
| TM-68 | к | 0.005 | 56.489 | 0.000 | 0.067 | 10.469 | 31.596 | 0.295 | 0.290 | 0.055 | 0.160 | 99.426 | 83,86 | 15,59 | 0,553 | 84,33 |
| TM-68 | ц | 0.041 | 56.727 | 0.003 | 0.064 | 10.424 | 31.258 | 0.306 | 0.284 | 0.045 | 0.167 | 99.319 | 83,78 | 15,67 | 0,54 | 84,24 |
| TM-68 | к | 0.014 | 56.449 | 0.000 | 0.061 | 10.487 | 31.453 | 0.313 | 0.286 | 0.046 | 0.170 | 99.279 | 83,78 | 15,67 | 0,55 | 84,24 |
| TM-68 | к | 0.013 | 56.352 | 0.001 | 0.070 | 10.436 | 31.249 | 0.299 | 0.277 | 0.047 | 0.164 | 98.908 | 83,77 | 15,69 | 0,53 | 84,22 |
| TM-68 | ц | 0.002 | 56.502 | 0.003 | 0.079 | 10.504 | 31.493 | 0.303 | 0.298 | 0.034 | 0.168 | 99.386 | 83,76 | 15,67 | 0,57 | 84,24 |
| TM-56 | к | 0.013 | 56.689 | 0.006 | 0.090 | 9.518 | 32.016 | 0.312 | 0.266 | 0.046 | 0.154 | 99.110 | 85,27 | 14,22 | 0,5 | 85,706 |
| TM-56 | ц | 0.018 | 56.806 | 0.004 | 0.111 | 9.509 | 32.037 | 0.335 | 0.277 | 0.040 | 0.155 | 99.292 | 85,272 | 14,198 | 0,53 | 85,726 |
| TM-56 | к | 0.000 | 57.242 | 0.003 | 0.114 | 9.546 | 34.442 | 0.337 | 0.286 | 0.035 | 0.147 | 102.152 | 86,09 | 13,4 | 0,51 | 90,33 |
| TM-56 | ц | 0.000 | 56.807 | 0.000 | 0.109 | 9.544 | 32.285 | 0.326 | 0.275 | 0.047 | 0.166 | 99.559 | 85,33 | 14,15 | 0,52 | 85,78 |
| TM-56 | ц | 0.022 | 56.640 | 0.000 | 0.117 | 9.474 | 32.277 | 0.335 | 0.263 | 0.048 | 0.142 | 99.318 | 85,43 | 14,07 | 0,5 | 85,86 |
| TM-56 | к | 0.031 | 56.673 | 0.004 | 0.102 | 9.462 | 32.125 | 0.328 | 0.268 | 0.033 | 0.142 | 99.168 | 85,38 | 14,1 | 0,51 | 85,82 |
| TM-56 | к | 0.025 | 57.130 | 0.000 | 0.097 | 9.492 | 32.526 | 0.328 | 0.268 | 0.041 | 0.155 | 100.062 | 85,5 | 14 | 0,51 | 85,932 |
| TM-56 | ц | 0.026 | 56.901 | 0.004 | 0.117 | 9.511 | 32.312 | 0.317 | 0.277 | 0.048 | 0.146 | 99.659 | 85,376 | 14,097 | 0,53 | 85,83 |
| TM-56 | ц | 0.000 | 56.630 | 0.000 | 0.103 | 9.498 | 32.263 | 0.333 | 0.274 | 0.053 | 0.161 | 99.315 | 85,38 | 14,1 | 0,52 | 85,83 |
| TM-56 | к | 0.048 | 56.719 | 0.006 | 0.115 | 9.487 | 32.338 | 0.313 | 0.278 | 0.045 | 0.155 | 99.504 | 85,41 | 14,05 | 0,53 | 85,87 |
| TM-56 | ц | 0.022 | 56.635 | 0.000 | 0.109 | 9.511 | 32.160 | 0.322 | 0.276 | 0.055 | 0.155 | 99.245 | 85,319 | 14,15 | 0,53 | 85,77 |
| TM-56 | к | 0.026 | 56.813 | 0.000 | 0.097 | 9.473 | 32.145 | 0.327 | 0.277 | 0.040 | 0.156 | 99.354 | 85,36 | 14,11 | 0,53 | 85,8 |
| TM-56 | ц | 0.023 | 56.686 | 0.000 | 0.100 | 9.524 | 32.146 | 0.328 | 0.266 | 0.048 | 0.149 | 99.270 | 85,31 | 14,18 | 0,51 | 85,75 |
| TM-56 | ц | 0.009 | 56.698 | 0.059 | 0.103 | 9.485 | 32.119 | 0.327 | 0.275 | 0.044 | 0.147 | 99.266 | 85,34 | 14,14 | 0,53 | 85,79 |
| TM-56 | к | 0.038 | 56.905 | 0.000 | 0.090 | 9.494 | 32.320 | 0.328 | 0.263 | 0.038 | 0.150 | 99.626 | 85,42 | 14,077 | 0,5 | 85,85 |
| TM-182 | к | 0.023 | 56.380 | 0.007 | 0.075 | 10.059 | 31.750 | 0.291 | 0.284 | 0.045 | 0.162 | 99.076 | 84,44 | 15,01 | 0,54 | 84,91 |
| TM-182 | ц | 0.022 | 56.283 | 0.005 | 0.069 | 10.139 | 31.781 | 0.304 | 0.268 | 0.024 | 0.161 | 99.056 | 84,39 | 15,1 | 0,51 | 84,92 |
| TM-182 | к | 0.000 | 56.535 | 0.003 | 0.061 | 9.999 | 31.748 | 0.308 | 0.290 | 0.035 | 0.164 | 99.143 | 84,51 | 14,93 | 0,55 | 84,98 |
| TM-182 | ц | 0.000 | 56.722 | 0.001 | 0.076 | 10.047 | 31.557 | 0.307 | 0.291 | 0.056 | 0.157 | 99.214 | 84,37 | 15,1 | 0,6 | 84,85 |

Продолжение таблицы 4.2.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|--------|-------|--------|
| TM-31 | ц | 0.052 | 58.431 | 0.004 | 0.160 | 4.907 | 35.012 | 0.425 | 0.162 | 0.023 | 0.091 | 99.267 | 92,43 | 7,27 | 0,31 | 92,71 |
| TM-31 | ц | 0.041 | 58.232 | 0.000 | 0.176 | 4.967 | 34.611 | 0.450 | 0.202 | 0.014 | 0.104 | 98.797 | 92,19 | 7,42 | 0,39 | 92,55 |
| TM-31 | к | 0.042 | 58.375 | 0.008 | 0.162 | 4.899 | 34.601 | 0.443 | 0.167 | 0.030 | 0.095 | 98.822 | 92,35 | 7,33 | 0,32 | 92,64 |
| TM-31 | ц | 0.044 | 58.389 | 0.001 | 0.165 | 4.920 | 34.668 | 0.454 | 0.173 | 0.008 | 0.101 | 98.923 | 92,32 | 7,35 | 0,33 | 92,63 |
| TM-31 | к | 0.006 | 57.893 | 0.004 | 0.156 | 4.856 | 34.731 | 0.467 | 0.189 | 0.015 | 0.096 | 98.413 | 92,39 | 7,25 | 0,36 | 92,73 |
| TM-31 | ц | 0.049 | 57.955 | 0.001 | 0.178 | 4.938 | 34.337 | 0.484 | 0.179 | 0.019 | 0.088 | 98.228 | 92,22 | 7,44 | 0,35 | 92,53 |
| TM-31 | к | 0.039 | 58.149 | 0.000 | 0.152 | 4.931 | 34.922 | 0.448 | 0.161 | 0.012 | 0.095 | 98.909 | 92,38 | 7,32 | 0,31 | 92,66 |
| TM-53 | ц | 0.080 | 58.018 | 0.020 | 0.199 | 4.548 | 34.797 | 0.860 | 0.350 | 0.020 | 0.076 | 98.968 | 92,55 | 6,79 | 0,67 | 93,17 |
| TM-128 | ц | 0.043 | 58.132 | 0.002 | 0.243 | 4.548 | 35.650 | 0.519 | 0.167 | 0.002 | 0.086 | 99.392 | 93,03 | 6,66 | 0,31 | 93,32 |
| TM-128 | к | 0.029 | 58.009 | 0.000 | 0.238 | 4.563 | 35.885 | 0.526 | 0.176 | 0.005 | 0.085 | 99.516 | 93,04 | 6,64 | 0,33 | 93,34 |
| TM-128 | ц | 0.055 | 58.129 | 0.003 | 0.231 | 4.572 | 35.863 | 0.539 | 0.184 | 0.000 | 0.085 | 99.661 | 93,01 | 6,65 | 0,34 | 93,33 |
| TM-147 | ц | 0.015 | 57.141 | 0.010 | 0.120 | 8.832 | 33.350 | 0.342 | 0.258 | 0.043 | 0.153 | 100.264 | 86,646 | 12,872 | 0,482 | 87,670 |
| TM-147 | к | 0.015 | 57.136 | 0.013 | 0.135 | 8.808 | 33.038 | 0.329 | 0.260 | 0.047 | 0.152 | 99.933 | 86,564 | 12,946 | 0,490 | 86,990 |
| TM-147 | к | 0.000 | 57.707 | 0.011 | 0.124 | 8.808 | 33.249 | 0.330 | 0.266 | 0.049 | 0.136 | 100.680 | 86,628 | 12,874 | 0,498 | 87,062 |
| TM-147 | к | 0.016 | 56.812 | 0.011 | 0.121 | 8.769 | 33.080 | 0.338 | 0.260 | 0.050 | 0.150 | 99.607 | 86,628 | 12,882 | 0,489 | 87,465 |
| TM-147 | ц | 0.027 | 57.172 | 0.003 | 0.121 | 8.714 | 33.130 | 0.319 | 0.256 | 0.052 | 0.131 | 99.925 | 86,722 | 12,796 | 0,482 | 87,142 |
| TM-147 | ц | 0.023 | 57.171 | 0.011 | 0.115 | 8.780 | 33.208 | 0.320 | 0.257 | 0.039 | 0.137 | 100.061 | 86,664 | 12,854 | 0,482 | 87,280 |
| TM-147 | к | 0.042 | 57.295 | 0.004 | 0.111 | 8.787 | 33.171 | 0.321 | 0.243 | 0.034 | 0.142 | 100.150 | 86,665 | 12,879 | 0,456 | 87,095 |
| TM-147 | ц | 0.048 | 57.186 | 0.009 | 0.122 | 8.719 | 33.317 | 0.327 | 0.250 | 0.044 | 0.140 | 100.162 | 86,790 | 12,741 | 0,468 | 87,680 |
| TM-147 | к | 0.036 | 57.068 | 0.011 | 0.104 | 8.737 | 33.181 | 0.330 | 0.253 | 0.067 | 0.146 | 99.933 | 86,716 | 12,809 | 0,475 | 87,419 |
| TM-147 | ц | 0.054 | 56.837 | 0.024 | 0.113 | 8.765 | 33.145 | 0.323 | 0.265 | 0.053 | 0.127 | 99.706 | 86,648 | 12,854 | 0,498 | 87,802 |
| TM-147 | ц | 0.028 | 56.938 | 0.004 | 0.127 | 8.752 | 33.276 | 0.332 | 0.250 | 0.046 | 0.133 | 99.886 | 86,734 | 12,797 | 0,468 | 87,825 |
| TM-147 | ц | 0.031 | 57.086 | 0.012 | 0.122 | 8.750 | 33.211 | 0.335 | 0.253 | 0.039 | 0.143 | 99.982 | 86,710 | 12,816 | 0,475 | 87,468 |
| TM-147 | ц | 0.037 | 57.093 | 0.032 | 0.111 | 8.763 | 33.210 | 0.343 | 0.248 | 0.056 | 0.133 | 100.026 | 86,701 | 12,834 | 0,465 | 87,450 |
| TM-132 | ц | 0.006 | 56.777 | 0.014 | 0.075 | 10.204 | 32.411 | 0.307 | 0.277 | 0.034 | 0.141 | 100.246 | 84,55 | 14,93 | 0,52 | 85,72 |
| TM-132 | ц | 0.000 | 57.058 | 0.007 | 0.069 | 10.208 | 32.521 | 0.312 | 0.279 | 0.034 | 0.170 | 100.658 | 84,58 | 14,89 | 0,52 | 85,59 |
| TM-132 | к | 0.015 | 56.564 | 0.005 | 0.065 | 10.265 | 32.705 | 0.325 | 0.283 | 0.046 | 0.165 | 100.438 | 84,58 | 14,89 | 0,53 | 86,91 |
| TM-132 | ц | 0.043 | 56.443 | 0.020 | 0.075 | 10.173 | 32.513 | 0.316 | 0.282 | 0.050 | 0.161 | 100.076 | 84,62 | 14,85 | 0,53 | 86,75 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|--------|-------|--------|
| TM-132 | κ | 0.030 | 56.550 | 0.013 | 0.063 | 10.160 | 32.459 | 0.297 | 0.313 | 0.048 | 0.162 | 100.095 | 84,56 | 14,85 | 0,59 | 86,41 |
| TM-132 | ц | 0.008 | 56.747 | 0.001 | 0.072 | 10.234 | 32.698 | 0.285 | 0.282 | 0.040 | 0.163 | 100.530 | 84,62 | 14,86 | 0,52 | 86,57 |
| TM-132 | κ | 0.025 | 57.030 | 0.008 | 0.084 | 10.260 | 32.591 | 0.303 | 0.269 | 0.054 | 0.174 | 100.798 | 84,56 | 14,93 | 0,50 | 85,93 |
| TM-132 | ц | 0.023 | 56.833 | 0.007 | 0.065 | 10.271 | 32.548 | 0.309 | 0.273 | 0.033 | 0.168 | 100.530 | 84,53 | 14,96 | 0,51 | 86,13 |
| TM-132 | κ | 0.036 | 56.863 | 0.001 | 0.085 | 10.158 | 32.661 | 0.305 | 0.283 | 0.030 | 0.165 | 100.587 | 84,70 | 14,78 | 0,53 | 86,48 |
| TM-132 | ц | 0.023 | 56.890 | 0.000 | 0.072 | 10.218 | 32.522 | 0.320 | 0.271 | 0.043 | 0.160 | 100.519 | 84,59 | 14,91 | 0,51 | 85,95 |
| TM-132 | κ | 0.013 | 56.911 | 0.005 | 0.076 | 10.244 | 32.292 | 0.307 | 0.272 | 0.042 | 0.164 | 100.326 | 84,46 | 15,03 | 0,51 | 85,26 |
| TM-132 | ц | 0.027 | 57.026 | 0.003 | 0.064 | 10.274 | 32.549 | 0.293 | 0.271 | 0.037 | 0.154 | 100.698 | 84,53 | 14,97 | 0,51 | 85,84 |
| TM-132 | ц | 0.027 | 56.792 | 0.005 | 0.075 | 10.263 | 32.984 | 0.304 | 0.276 | 0.022 | 0.168 | 100.916 | 84,71 | 14,79 | 0,51 | 87,39 |
| TM-132 | ц | 0.000 | 56.873 | 0.003 | 0.063 | 10.261 | 32.684 | 0.327 | 0.290 | 0.038 | 0.155 | 100.694 | 84,57 | 14,89 | 0,54 | 86,30 |
| TM-132 | κ | 0.013 | 56.721 | 0.010 | 0.078 | 10.265 | 32.923 | 0.314 | 0.289 | 0.045 | 0.162 | 100.820 | 84,66 | 14,81 | 0,53 | 87,24 |
| TM-132 | κ | 0.019 | 56.938 | 0.006 | 0.081 | 10.195 | 32.491 | 0.307 | 0.278 | 0.023 | 0.163 | 100.501 | 84,59 | 14,89 | 0,52 | 85,81 |
| TM-132 | ц | 0.008 | 56.884 | 0.004 | 0.068 | 10.211 | 32.565 | 0.294 | 0.273 | 0.043 | 0.150 | 100.500 | 84,61 | 14,88 | 0,51 | 85,98 |
| TM-132 | ц | 0.018 | 56.774 | 0.009 | 0.064 | 10.217 | 32.686 | 0.320 | 0.281 | 0.046 | 0.166 | 100.581 | 84,64 | 14,84 | 0,52 | 86,55 |
| TM-132 | κ | 0.002 | 56.660 | 0.005 | 0.061 | 10.214 | 32.665 | 0.314 | 0.283 | 0.057 | 0.154 | 100.415 | 84,63 | 14,84 | 0,53 | 86,55 |
| TM-128 | ц | 0.043 | 58.132 | 0.002 | 0.243 | 4.548 | 35.650 | 0.519 | 0.167 | 0.002 | 0.086 | 99.392 | 93,03 | 6,66 | 0,31 | 93,32 |
| TM-128 | κ | 0.029 | 58.009 | 0.000 | 0.238 | 4.563 | 35.885 | 0.526 | 0.176 | 0.005 | 0.085 | 99.516 | 93,04 | 6,64 | 0,33 | 93,34 |
| TM-128 | ц | 0.055 | 58.129 | 0.003 | 0.231 | 4.572 | 35.863 | 0.539 | 0.184 | 0.000 | 0.085 | 99.661 | 93,01 | 6,65 | 0,34 | 93,33 |
| TM-116 | ц | 0.041 | 57.305 | 0.000 | 0.160 | 7.580 | 33.739 | 0.351 | 0.235 | 0.032 | 0.110 | 99.553 | 88,414 | 11,143 | 0,443 | 88,807 |
| TM-116 | κ | 0.024 | 57.124 | 0.007 | 0.155 | 7.593 | 33.750 | 0.367 | 0.238 | 0.049 | 0.123 | 99.430 | 88,396 | 11,156 | 0,448 | 88,794 |
| TM-116 | ц | 0.062 | 57.050 | 0.008 | 0.157 | 7.560 | 33.505 | 0.367 | 0.243 | 0.033 | 0.120 | 99.105 | 88,356 | 11,184 | 0,461 | 88,764 |
| TM-116 | ц | 0.023 | 57.677 | 0.000 | 0.158 | 7.622 | 33.571 | 0.355 | 0.236 | 0.037 | 0.112 | 99.791 | 88,307 | 11,247 | 0,446 | 88,702 |
| TM-116 | κ | 0.030 | 56.801 | 0.000 | 0.156 | 7.609 | 33.638 | 0.346 | 0.248 | 0.032 | 0.123 | 98.983 | 88,324 | 11,208 | 0,468 | 89,008 |
| TM-116 | κ | 0.015 | 56.964 | 0.005 | 0.152 | 7.505 | 33.785 | 0.370 | 0.244 | 0.047 | 0.115 | 99.202 | 88,511 | 11,030 | 0,459 | 89,013 |
| TM-116 | ц | 0.011 | 56.867 | 0.000 | 0.159 | 7.537 | 33.494 | 0.362 | 0.248 | 0.031 | 0.119 | 98.828 | 88,374 | 11,156 | 0,470 | 88,791 |
| TM-116 | κ | 0.014 | 57.144 | 0.003 | 0.154 | 7.568 | 33.604 | 0.365 | 0.252 | 0.053 | 0.129 | 99.286 | 88,360 | 11,163 | 0,476 | 88,783 |
| TM-116 | ц | 0.036 | 57.155 | 0.014 | 0.160 | 7.577 | 33.710 | 0.356 | 0.227 | 0.049 | 0.119 | 99.403 | 88,423 | 11,149 | 0,428 | 88,803 |
| TM-126 | ц | 0,045 | 58,004 | 0,009 | 0,161 | 4,439 | 36,03 | 0,46 | 0,178 | 0,015 | 0,077 | 99,42 | 93,226 | 6,443 | 0,331 | 93,535 |

Продолжение таблицы 4.2.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| TM-126 | к | 0,042 | 58,028 | 0,007 | 0,16 | 4,413 | 35,68 | 0,467 | 0,168 | 0,01 | 0,081 | 99,06 | 93,217 | 6,468 | 0,315 | 93,512 |
| TM-126 | ц | 0,061 | 57,807 | 0,013 | 0,227 | 4,452 | 35,45 | 0,691 | 0,181 | 0,008 | 0,092 | 98,98 | 93,099 | 6,559 | 0,342 | 93,419 |
| TM-126 | к | 0,061 | 58,051 | 0,014 | 0,179 | 4,472 | 35,77 | 0,517 | 0,171 | 0,035 | 0,086 | 99,36 | 93,147 | 6,533 | 0,320 | 93,446 |
| TM-126 | ц | 0,07 | 57,621 | 0,006 | 0,332 | 4,55 | 35,17 | 0,826 | 0,478 | 0,014 | 0,08 | 99,14 | 92,392 | 6,705 | 0,902 | 93,234 |
| TM-126 | к | 0,058 | 57,592 | 0,008 | 0,275 | 4,601 | 35,51 | 0,721 | 0,318 | 0,02 | 0,087 | 99,19 | 92,668 | 6,736 | 0,596 | 93,224 |
| TM-126 | ц | 0,066 | 57,802 | 0,005 | 0,202 | 4,541 | 35,67 | 0,607 | 0,18 | 0,013 | 0,088 | 99,17 | 93,020 | 6,643 | 0,337 | 93,334 |
| TM-126 | к | 0,065 | 57,73 | 0,007 | 0,185 | 4,493 | 35,92 | 0,512 | 0,177 | 0,004 | 0,076 | 99,17 | 93,135 | 6,535 | 0,330 | 93,572 |
| TM-126 | к | 0,021 | 57,992 | 0,002 | 0,161 | 4,486 | 35,94 | 0,452 | 0,173 | 0,023 | 0,083 | 99,34 | 93,155 | 6,523 | 0,322 | 93,456 |
| TM-38 | ц | 0,043 | 57,804 | 0,005 | 0,166 | 5,049 | 35,48 | 0,493 | 0,172 | 0,046 | 0,091 | 99,35 | 92,309 | 7,369 | 0,322 | 92,607 |
| TM-38 | к | 0,021 | 58,073 | 0,009 | 0,14 | 5,06 | 35,48 | 0,436 | 0,178 | 0,023 | 0,108 | 99,53 | 92,284 | 7,383 | 0,333 | 92,592 |
| TM-38 | к | 0,038 | 57,809 | 0,01 | 0,133 | 5,036 | 35,36 | 0,43 | 0,173 | 0,026 | 0,106 | 99,12 | 92,301 | 7,374 | 0,325 | 92,602 |
| TM-38 | ц | 0,037 | 57,361 | 0,008 | 0,146 | 5,072 | 34,89 | 0,425 | 0,199 | 0,023 | 0,099 | 98,26 | 92,111 | 7,512 | 0,378 | 92,460 |
| TM-74 | ц | 0 | 56,72 | 0,04 | 0,14 | 9,02 | 33,36 | 0,41 | 0,29 | 0 | 0,17 | 100,15 | 86,361 | 13,099 | 0,540 | 88,388 |
| TM-74 | к | 0 | 56,95 | 0 | 0,14 | 9 | 33,4 | 0,45 | 0,26 | 0 | 0,16 | 100,36 | 86,449 | 13,068 | 0,484 | 88,071 |
| TM-74 | к | 0 | 56,44 | 0 | 0,1 | 8,97 | 32,9 | 0,4 | 0,28 | 0 | 0,14 | 99,23 | 86,276 | 13,196 | 0,528 | 87,549 |
| TM-74 | ц | 0 | 57,16 | 0 | 0,12 | 8,98 | 33,45 | 0,4 | 0,28 | 0,09 | 0,12 | 100,6 | 86,459 | 13,021 | 0,520 | 87,752 |
| TM-74 | к | 0 | 56,92 | 0 | 0,14 | 8,84 | 33,47 | 0,4 | 0,26 | 0 | 0,16 | 100,19 | 86,674 | 12,842 | 0,484 | 88,302 |
| TM-74 | к | 0 | 56,91 | 0 | 0,12 | 8,99 | 33,44 | 0,36 | 0,25 | 0 | 0,11 | 100,18 | 86,491 | 13,044 | 0,465 | 88,156 |
| TM-91 | ц | 0 | 58,03 | 0 | 0 | 5,95 | 35,79 | 0,61 | 0,14 | 0,08 | 0,09 | 100,69 | 91,23 | 8,51 | 0,26 | 92,21 |
| TM-91 | к | 0 | 57,79 | 0 | 0 | 5,98 | 35,65 | 0,55 | 0,14 | 0,08 | 0,08 | 100,27 | 91,16 | 8,58 | 0,26 | 92,21 |
| TO-69 | | 0 | 58,09 | 0 | 0,32 | 5,12 | 36,57 | 2,56 | 0,24 | 0,06 | 0,1 | 103,06 | 92,31 | 7,25 | 0,44 | 94,33 |
| TO-138 | к | 0.038 | 57.124 | 0.000 | 0.031 | 8.407 | 32.918 | 0.715 | 0.233 | 0.067 | 0.103 | 99.636 | 87,08 | 12,48 | 0,44 | 87,47 |
| TO-138 | ц | 0.038 | 57.034 | 0.000 | 0.020 | 8.450 | 32.873 | 0.677 | 0.242 | 0.080 | 0.090 | 99.504 | 87,00 | 12,54 | 0,46 | 87,40 |

Продолжение таблицы 4.2.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|--------|--------|--------|-------|--------|
| ТО-69 | ц | 0 | 56,61 | 0 | 0 | 10,03 | 32,64 | 0,95 | 0,31 | 0,07 | 0,1 | 100,71 | 84,80 | 14,62 | 0,58 | 86,51 |
| ТО-69 | | 0,06 | 56,53 | 0 | 0 | 10,23 | 32,48 | 1,16 | 0,23 | 0,07 | 0,14 | 100,9 | 84,62 | 14,95 | 0,43 | 86,49 |
| ТО-69 | к | 0,08 | 56,56 | 0 | 0 | 9,52 | 32,98 | 1,19 | 0,23 | 0 | 0,11 | 100,67 | 85,69 | 13,88 | 0,43 | 87,94 |
| ТО-69 | ц | 0 | 56,72 | 0 | 0 | 9,21 | 33,21 | 0,88 | 0,3 | 0 | 0,12 | 100,44 | 86,05 | 13,39 | 0,56 | 87,94 |
| ТО-69 | | 0,06 | 56,01 | 0 | 0,68 | 5,09 | 34,89 | 3,36 | 0,81 | 0 | 0,13 | 101,03 | 91,03 | 7,45 | 1,52 | 94,91 |
| ТО-69 | | 0 | 57,22 | 0 | 0,45 | 5,15 | 35,66 | 2,68 | 0,21 | 0 | 0,13 | 101,5 | 92,14 | 7,47 | 0,39 | 93,45 |
| ТО-258 | ц | 0,31 | 54,9 | 0,02 | 1,04 | 4,91 | 33,2 | 4,17 | 0,53 | 0,01 | 0 | 99,09 | 91,37 | 7,58 | 1,05 | 93,14 |
| ТО-258 | пр | 0,08 | 56,19 | 0,05 | 0,88 | 4,85 | 33,48 | 3,41 | 0,7 | 0 | 0,23 | 99,87 | 91,22 | 7,41 | 1,37 | 92,48 |
| ТО-258 | к | 0,07 | 55,81 | 0 | 1,07 | 4,73 | 33,82 | 3,43 | 1,17 | 0 | 0,17 | 100,27 | 90,64 | 7,11 | 2,25 | 93,12 |
| ТО-258 | ц | 0,26 | 55,69 | 0 | 0,79 | 5,65 | 33,7 | 3,09 | 0,79 | 0 | 0,11 | 100,08 | 90,02 | 8,47 | 1,52 | 93,48 |
| ТО-258 | к | 0,12 | 55,7 | 0 | 0,63 | 5,05 | 33,01 | 2,87 | 0,49 | 0 | 0,09 | 97,96 | 91,20 | 7,83 | 0,97 | 92,10 |
| ТО-258 | ц | 0,14 | 54,6 | 0 | 0,69 | 5,27 | 33,13 | 3,51 | 0,84 | 0 | 0,2 | 98,38 | 90,30 | 8,06 | 1,65 | 93,21 |
| ТО-258 | ц | 0,15 | 55,51 | 0 | 0,58 | 5,18 | 33,38 | 3,31 | 0,49 | 0,17 | 0,39 | 99,16 | 91,11 | 7,93 | 0,96 | 91,99 |
| ТО-258 | к | 0,2 | 56,52 | 0 | 0,87 | 4,98 | 34,9 | 3,31 | 0,12 | 0,01 | 0,33 | 101,24 | 92,38 | 7,39 | 0,23 | 94,01 |
| ТО-258 | ц | 0,15 | 56,02 | 0,07 | 0,57 | 5,23 | 33,24 | 3,64 | 1,37 | 0 | 0,15 | 100,44 | 89,45 | 7,90 | 2,65 | 92,03 |
| ТО-125 | ц | 0 | 56,63 | 0 | 0,62 | 4,28 | 35,12 | 1,85 | 0,12 | 0,23 | 0,1 | 98,95 | 93,39 | 6,38 | 0,23 | 93,60 |
| ТО-125 | к | 0,23 | 57,23 | 0,2 | 0,33 | 4,77 | 35,87 | 1,58 | 0,15 | 0 | 0,17 | 100,53 | 92,80 | 6,92 | 0,28 | 95,43 |
| ТО-29 | ц | 0,06 | 57,34 | 0 | 0,34 | 4,43 | 36,03 | 1,33 | 0,17 | 0,08 | 0 | 99,78 | 93,25 | 6,43 | 0,32 | 93,87 |
| ТО-29 | к | 0 | 57,16 | 0 | 0,38 | 4,5 | 35,97 | 1,25 | 0,18 | 0,1 | 0 | 99,54 | 93,13 | 6,54 | 0,33 | 94,01 |
| ТО-29 | к | 0 | 57,28 | 0 | 0,39 | 4,52 | 36,15 | 1,43 | 0,21 | 0 | 0,08 | 100,06 | 93,08 | 6,53 | 0,39 | 94,57 |
| ТО-29 | ц | 0,08 | 56,76 | 0 | 0,46 | 4,77 | 35,79 | 2,36 | 0,18 | 0 | 0,12 | 100,52 | 92,73 | 6,93 | 0,34 | 95,01 |
| ТО-16 | ц | 0,14 | 55,92 | 0,00 | 0,05 | 10,63 | 30,48 | 1,17 | 0,08 | 0,01 | 0,35 | 98,83 | 83,505 | 16,337 | 0,158 | 83,637 |
| ТО-16 | к | 0,03 | 55,71 | 0,00 | 0,19 | 10,42 | 31,04 | 0,74 | 0,32 | 0,00 | 0,15 | 98,60 | 83,631 | 15,749 | 0,620 | 84,153 |
| ТО-171 | ц | 0,10 | 58,03 | 0,11 | 0,69 | 5,10 | 35,00 | 0,49 | 0,20 | 0,14 | 0,00 | 99,86 | 92,094 | 7,528 | 0,378 | 92,443 |
| ТО-171 | к | 0,18 | 58,10 | 0,02 | 0,24 | 5,08 | 35,46 | 0,62 | 0,18 | 0,00 | 0,00 | 99,88 | 92,250 | 7,414 | 0,337 | 92,561 |
| ТО-22 | ц | 0,17 | 55,65 | 0 | 0 | 10,83 | 30,92 | 1,03 | 0,38 | 0,08 | 0,09 | 99,15 | 82,97 | 16,30 | 0,73 | 84,47 |
| ТО-22 | к | 0,16 | 55,98 | 0 | 0 | 10,78 | 30,99 | 1,07 | 0,42 | 0 | 0 | 99,4 | 83,00 | 16,20 | 0,81 | 84,14 |
| ТО-22 | к | 0,16 | 55,54 | 0 | 0 | 10,58 | 30,74 | 1,11 | 0,43 | 0,08 | 0,1 | 98,74 | 83,12 | 16,05 | 0,84 | 84,19 |
| ТО-22 | ц | 0,17 | 55,75 | 0 | 0 | 10,62 | 30,78 | 1,03 | 0,42 | 0 | 0,07 | 98,84 | 83,10 | 16,08 | 0,81 | 84,07 |

Продолжение таблицы 4.2.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|--------|--------|--------|-------|--------|
| ТО-91 | лм | 0 | 56,94 | 0 | 0,26 | 5,06 | 35,65 | 2,67 | 0,26 | 0,12 | 0,15 | 101,11 | 92,18 | 7,34 | 0,48 | 93,86 |
| ТО-91 | ц | 0 | 56,93 | 0 | 0,24 | 4,97 | 35,8 | 2,75 | 0,21 | 0,08 | 0,14 | 101,12 | 92,41 | 7,20 | 0,39 | 94,21 |
| ТО-281 | ц | 0,06 | 56,69 | 0 | 0,38 | 5,92 | 34,93 | 1,49 | 0,23 | 0,11 | 0,1 | 99,91 | 90,92 | 8,64 | 0,43 | 92,64 |
| ТО-281 | к | 0 | 56,9 | 0 | 0,32 | 5,8 | 35,02 | 1,26 | 0,24 | 0 | 0,09 | 99,63 | 91,09 | 8,46 | 0,45 | 92,29 |
| ТО-281 | ц | 0,07 | 56,81 | 0 | 0,33 | 5,89 | 35,07 | 1,26 | 0,23 | 0,1 | 0,11 | 99,87 | 91,00 | 8,57 | 0,43 | 92,90 |
| ТО-281 | к | 0,05 | 57,25 | 0 | 0,33 | 5,69 | 35,21 | 1,12 | 0,26 | 0,08 | 0,14 | 100,13 | 91,24 | 8,27 | 0,48 | 92,54 |
| ТО-212 | ц | 0 | 57,45 | 0 | 0,33 | 4,37 | 36,21 | 1,42 | 0,19 | 0 | 0,07 | 100,04 | 93,329 | 6,319 | 0,352 | 94,393 |
| ТО-212 | к | 0,06 | 57,09 | 0 | 0,31 | 4,54 | 36,2 | 2,47 | 0,22 | 0,11 | 0,1 | 101,1 | 93,047 | 6,546 | 0,406 | 95,313 |
| ТО-212 | лм | 0 | 56,67 | 0 | 0,32 | 4,43 | 35,83 | 2,88 | 0,28 | 0,08 | 0,14 | 100,63 | 93,025 | 6,452 | 0,522 | 94,854 |
| ТО-254 | к | 0 | 56,4 | 0 | 0,56 | 5,51 | 34,76 | 2,67 | 0,49 | 0 | 0,14 | 100,53 | 90,99 | 8,09 | 0,92 | 92,94 |
| ТО-254 | ц | 0,06 | 56,55 | 0 | 0,48 | 5,55 | 35,05 | 2,6 | 0,47 | 0 | 0,11 | 100,87 | 91,04 | 8,09 | 0,88 | 93,77 |
| ТО-254 | ц | 0 | 56,76 | 0 | 0,59 | 5,39 | 35,05 | 2,63 | 0,48 | 0 | 0,16 | 101,06 | 91,23 | 7,87 | 0,90 | 93,12 |
| ТО-254 | к | 0 | 56,72 | 0 | 0,54 | 5,4 | 35,27 | 2,66 | 0,44 | 0 | 0,15 | 101,18 | 91,34 | 7,84 | 0,82 | 93,69 |
| ТО-42 | ц | 0,14 | 56,31 | 0,11 | 0,13 | 13,68 | 29,30 | 0,58 | 0,43 | 0,02 | 0,08 | 100,78 | 78,588 | 20,584 | 0,829 | 79,244 |
| ТО-42 | к | 0,30 | 55,74 | 0,00 | 0,07 | 13,59 | 29,53 | 0,74 | 0,53 | 0,00 | 0,19 | 100,69 | 78,674 | 20,311 | 1,015 | 81,753 |
| ТО-266 | ц | 0,17 | 56,24 | 0,00 | 0,58 | 4,91 | 33,66 | 2,58 | 1,16 | 0,00 | 0,00 | 99,30 | 90,37 | 7,39 | 2,24 | 92,44 |
| ТО-266 | к | 0,11 | 56,81 | 0,00 | 0,16 | 5,03 | 34,84 | 2,08 | 0,26 | 0,06 | 0,21 | 99,56 | 92,05 | 7,46 | 0,49 | 92,79 |
| ТО-266 | ц | 0,08 | 56,16 | 0,00 | 0,34 | 4,91 | 34,48 | 2,34 | 0,28 | 0,00 | 0,08 | 98,67 | 92,10 | 7,36 | 0,54 | 92,65 |
| ТО-266 | к | 0,04 | 56,33 | 0,00 | 0,19 | 4,91 | 34,91 | 2,02 | 0,21 | 0,00 | 0,15 | 98,76 | 92,32 | 7,28 | 0,40 | 93,23 |

Условные обозначения: ц-центр; к-край; пр-промежуток; лм- ламель

Таблица 4.3. Состав клинопироксена из ксенолитов перидотитового парагенезиса кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная

| № Образца | TM-90 | TM-90 | TM-90 | TM-90 | TM-90 | TM-90 | TM-34 |
|--------------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ц | к | | | ц | к | ц | к | к | к | ц | к | ц | к | к |
| Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 53,94 | 54,75 | 54,37 | 54,47 | 57,53 | 54,81 | 53,57 | 54,59 | 54,76 | 53,54 | 54,08 | 54,4 | 54,62 | 54,87 | 55,43 |
| TiO ₂ | 0,41 | 0,20 | 0,00 | 0,28 | 0,23 | 0,32 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,03 | 0,04 | 0,03 |
| Al ₂ O ₃ | 2,96 | 2,92 | 2,84 | 3,04 | 2,84 | 3,10 | 2,3 | 2,86 | 2,4 | 2,45 | 2,43 | 2,27 | 2,38 | 2,32 | 2,58 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,97 | 1,08 | 0,86 | 1,03 | 1,07 | 1,29 | 1,27 | 1,21 | 1,38 | 1,4 | 1,5 | 1,47 | 1,32 | 1,46 | 1,36 |
| FeO | 0,94 | 1,34 | 0,72 | 1,00 | 1,12 | 1,64 | 1,73 | 1,75 | 1,73 | 1,83 | 1,68 | 1,72 | 1,72 | 1,72 | 1,75 |
| MnO | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,00 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,06 |
| MgO | 15,89 | 16,40 | 16,47 | 16,41 | 16,79 | 16,55 | 15,77 | 15,78 | 16,01 | 15,52 | 15,52 | 15,9 | 15,96 | 15,9 | 15,21 |
| CaO | 21,65 | 21,75 | 21,15 | 22,34 | 21,99 | 24,40 | 21,16 | 20,95 | 21,29 | 20,71 | 20,96 | 21,4 | 21,26 | 21,46 | 20,93 |
| Na ₂ O | 1,72 | 1,78 | 1,67 | 1,78 | 2,32 | 0,72 | 1,86 | 2,07 | 1,9 | 1,98 | 1,87 | 1,94 | 1,87 | 1,82 | 1,93 |
| K ₂ O | 0,00 | 0,07 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 98,55 | 100,29 | 98,18 | 100,35 | 104,01 | 102,91 | 97,75 | 99,31 | 99,58 | 97,54 | 98,13 | 99,2 | 99,22 | 99,64 | 99,28 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,97 | 1,97 | 1,99 | 1,96 | 1,99 | 1,93 | 1,981 | 1,982 | 1,986 | 1,983 | 1,989 | 1,98 | 1,987 | 1,988 | 2,009 |
| Ti | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Al | 0,10 | 0,09 | 0,11 | 0,09 | 0,10 | 0,06 | 0,081 | 0,105 | 0,088 | 0,09 | 0,094 | 0,08 | 0,089 | 0,088 | 0,11 |
| Cr | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,037 | 0,035 | 0,04 | 0,041 | 0,044 | 0,04 | 0,038 | 0,042 | 0,039 |
| Fe | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,05 | 0,022 | 0,032 | 0,034 | 0,032 | 0,047 | 0,02 | 0,036 | 0,044 | 0,053 |
| Mn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Mg | 0,87 | 0,88 | 0,90 | 0,88 | 0,87 | 0,87 | 0,869 | 0,854 | 0,865 | 0,857 | 0,851 | 0,86 | 0,865 | 0,859 | 0,822 |
| Ca | 0,85 | 0,84 | 0,83 | 0,86 | 0,82 | 0,92 | 0,838 | 0,815 | 0,827 | 0,822 | 0,826 | 0,84 | 0,829 | 0,833 | 0,813 |
| Na | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,16 | 0,05 | 0,133 | 0,146 | 0,134 | 0,142 | 0,133 | 0,14 | 0,132 | 0,128 | 0,136 |
| K ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe ³⁺ | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,032 | 0,021 | 0,018 | 0,025 | 0,005 | 0,03 | 0,016 | 0,008 | 0 |
| Total | 3,97 | 3,98 | 3,99 | 3,98 | 4,00 | 3,94 | 3,997 | 3,993 | 3,995 | 3,996 | 3,992 | 4 | 3,995 | 3,992 | 3,984 |
| X mg | 97,19 | 97,99 | 97,61 | 100,00 | 98,74 | 94,77 | 97,53 | 96,39 | 96,22 | 96,40 | 94,77 | 97,52 | 96,00 | 95,13 | 93,94 |
| X ca | 49,47 | 48,81 | 48,00 | 49,45 | 48,51 | 51,48 | 49,09 | 48,83 | 48,88 | 48,96 | 49,25 | 49,21 | 48,94 | 49,23 | 49,72 |
| Миналы, мол. % | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 83,73 | 82,05 | 79,84 | 85,77 | 79,00 | 85,31 | 81,84 | 79 | 80,08 | 79,76 | 80,12 | 81,8 | 80,19 | 80,84 | 80,46 |
| Ur | 2,77 | 3,01 | 2,40 | 2,92 | 2,84 | 3,53 | 3,62 | 3,37 | 3,83 | 3,98 | 4,23 | 4,14 | 3,67 | 4,06 | 3,86 |
| Jd | 9,27 | 9,03 | 9,01 | 8,66 | 10,13 | 1,30 | 7,94 | 10,16 | 8,53 | 8,77 | 8,7 | 7,77 | 8,62 | 8,35 | 9,57 |
| Aeg | 0,00 | 0,12 | 0,00 | 0,79 | 2,05 | 0,00 | 1,45 | 0,6 | 0,57 | 1,05 | 0 | 1,49 | 0,47 | 0 | 0 |
| Fs | 2,48 | 1,80 | 2,12 | 0,00 | 1,09 | 4,74 | 2,15 | 3,11 | 3,31 | 3,06 | 4,56 | 2,19 | 3,5 | 4,29 | 5,25 |
| Clen | 1,74 | 4,00 | 6,63 | 1,86 | 4,90 | 0,00 | 2,99 | 3,76 | 3,68 | 3,38 | 2,39 | 2,65 | 3,54 | 2,47 | 0,87 |

Продолжение таблицы 4.3

| № Образца | ТМ-34 к | ТМ-34 ц | ТМ-34 к | ТМ-34 к | ТМ-34 ц | ТМ-34 к | ТМ-31 ц | ТМ-31 к | ТМ-38 к | ТМ-38 ц | ТМ-38 ц | ТМ-100 ц | ТМ-100 к |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 54,76 | 54,8 | 54,79 | 55,19 | 54,57 | 54,87 | 55,14 | 55,28 | 54,84 | 54,72 | 54,94 | 54,14 | 54,83 |
| TiO ₂ | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,44 | 0 |
| Al ₂ O ₃ | 2,55 | 2,67 | 2,38 | 2,58 | 2,67 | 2,54 | 2,45 | 2,34 | 2,3 | 2,38 | 2,21 | 3,24 | 2,78 |
| Cr ₂ O ₃ | 1,33 | 1,24 | 1,36 | 1,3 | 1,29 | 1,26 | 1,27 | 1,41 | 1,24 | 1,23 | 1,3 | 2,39 | 1,78 |
| FeO | 1,75 | 1,84 | 1,74 | 1,73 | 1,75 | 1,72 | 1,79 | 1,83 | 1,74 | 1,78 | 1,79 | 1,37 | 1,51 |
| MnO | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0 | 0 |
| MgO | 15,92 | 16,3 | 15,84 | 15,72 | 15,44 | 15,78 | 15,4 | 15,26 | 15,01 | 15,09 | 15,21 | 14,67 | 15,33 |
| CaO | 21,14 | 20,5 | 21,43 | 21,09 | 21 | 21,16 | 21,14 | 21,17 | 21,49 | 21,2 | 21,5 | 20,8 | 21,28 |
| Na ₂ O | 1,92 | 1,95 | 1,88 | 1,97 | 1,93 | 1,97 | 1,9 | 1,86 | 1,87 | 1,84 | 1,83 | 2,51 | 2,38 |
| K ₂ O | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 |
| Total | 99,47 | 99,4 | 99,53 | 99,68 | 98,76 | 99,41 | 99,18 | 99,23 | 98,63 | 98,36 | 98,89 | 99,56 | 99,89 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,986 | 1,99 | 1,988 | 1,995 | 1,992 | 1,991 | 2,003 | 2,007 | 2,006 | 2,005 | 2,005 | 1,966 | 1,983 |
| Ti | 0,001 | 0 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,012 | 0 |
| Al | 0,095 | 0,1 | 0,09 | 0,105 | 0,107 | 0,099 | 0,105 | 0,1 | 0,099 | 0,103 | 0,095 | 0,105 | 0,101 |
| Cr | 0,038 | 0,04 | 0,039 | 0,037 | 0,037 | 0,036 | 0,036 | 0,04 | 0,036 | 0,036 | 0,038 | 0,069 | 0,051 |
| Fe | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,052 | 0,053 | 0,042 | 0,054 | 0,056 | 0,053 | 0,055 | 0,055 | 0,028 | 0,014 |
| Mn | 0,002 | 0 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0 | 0 |
| Mg | 0,861 | 0,88 | 0,856 | 0,847 | 0,84 | 0,853 | 0,834 | 0,826 | 0,818 | 0,824 | 0,827 | 0,794 | 0,826 |
| Ca | 0,822 | 0,8 | 0,833 | 0,817 | 0,821 | 0,823 | 0,823 | 0,824 | 0,842 | 0,832 | 0,841 | 0,809 | 0,825 |
| Na | 0,135 | 0,14 | 0,132 | 0,138 | 0,137 | 0,139 | 0,134 | 0,131 | 0,133 | 0,131 | 0,129 | 0,177 | 0,167 |
| K ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe ₃₊ | 0,013 | 0,01 | 0,013 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,014 | 0,032 |
| Total | 3,993 | 3,99 | 3,994 | 3,994 | 3,991 | 3,996 | 3,992 | 3,987 | 3,991 | 3,989 | 3,993 | 3,973 | 3,999 |
| X mg | 95,56 | 95,33 | 95,54 | 94,22 | 94,06 | 95,31 | 93,92 | 93,65 | 93,92 | 93,74 | 93,76 | 96,59 | 98,33 |
| X ca | 48,84 | 47,58 | 49,32 | 49,10 | 49,43 | 49,11 | 49,67 | 49,94 | 50,72 | 50,24 | 50,42 | 50,47 | 49,97 |
| Минералы, мол.% | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 79,32 | 75,4 | 81 | 78,75 | 79,75 | 79,55 | 80,52 | 81,36 | 79,59 | 80,98 | 80,72 | 78,29 | 81,87 |
| Ur | 3,68 | 3,36 | 3,79 | 3,58 | 3,61 | 3,5 | 3,57 | 4 | 3,49 | 3,5 | 3,66 | 6,77 | 5,05 |
| Jd | 9,19 | 9,44 | 8,72 | 9,73 | 9,65 | 9,59 | 9,53 | 8,94 | 9,41 | 9,34 | 8,98 | 10,32 | 10,07 |
| Aeg | 0,17 | 0,16 | 0,35 | 0 | 0 | 0,31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,35 | 1,44 |
| Fs | 3,88 | 4,03 | 3,87 | 5,04 | 5,19 | 4,08 | 5,32 | 5,49 | 5,18 | 5,36 | 5,33 | 2,77 | 1,4 |
| Clen | 3,76 | 7,62 | 2,27 | 2,89 | 1,8 | 2,96 | 1,06 | 0,21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,16 |

Продолжение таблицы 4.3

| № Образца | TM-100 | TM-100 | TM-100 | TM-100 | TM-100 ц | TM-100 к | TO-78 ц | TO-78 к | TO-78 к | TO-125 ЛМ | TO-125 | TO-125 ЛМ | TO-125 ц | TO-125 ЛМ |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------------|------------|------------|------------|--------------|--------|--------------|-------------|--------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 54,68 | 54,77 | 54,42 | 54,28 | 54,64 | 53,72 | 53,98 | 54,01 | 54,4 | 53,69 | 54,51 | 54,07 | 54,25 | 53,56 |
| TiO ₂ | 0,13 | 0,24 | 0,33 | 0,16 | 0,28 | 0,06 | 0,28 | 0,32 | 0,26 | 0,49 | 0,47 | 0,46 | 0,36 | 0,49 |
| Al ₂ O ₃ | 3,19 | 0,59 | 0,26 | 3,09 | 3,16 | 2,72 | 5,59 | 5,12 | 3,23 | 4,91 | 4,92 | 5,68 | 4,55 | 5,87 |
| Cr ₂ O ₃ | 2,27 | 2,89 | 2,58 | 2,1 | 2,31 | 2,32 | 1,37 | 1,28 | 1,26 | 1,97 | 1,87 | 1,89 | 2,02 | 1,81 |
| FeO | 1,27 | 2,88 | 3,35 | 1,08 | 1,43 | 1,17 | 1,34 | 1,46 | 1,38 | 1,57 | 1,56 | 1,51 | 1,53 | 1,49 |
| MnO | 0 | 0,09 | 0,06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07 | 0 |
| MgO | 14,84 | 14,83 | 15,46 | 14,88 | 14,99 | 14,7 | 15,3 | 15,48 | 16,3 | 14,33 | 14,91 | 14,03 | 14,91 | 13,99 |
| CaO | 20,96 | 21,38 | 22 | 20,5 | 21,04 | 20,58 | 21,29 | 21,53 | 22,23 | 19,85 | 19,41 | 19,14 | 19,88 | 18,87 |
| Na ₂ O | 2,53 | 2,15 | 2,21 | 2,25 | 2,28 | 2,5 | 2,01 | 1,83 | 1,42 | 2,67 | 2,72 | 3,11 | 2,57 | 3,07 |
| K ₂ O | 0,05 | 0,19 | 0,14 | 0 | 0,08 | 0,03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 99,92 | 100,01 | 100,81 | 98,34 | 100,21 | 97,8 | 101,16 | 101,03 | 100,5 | 99,48 | 100,37 | 99,89 | 100,14 | 99,15 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,976 | 2,003 | 1,984 | 1,986 | 1,971 | 1,984 | 1,921 | 1,927 | 1,954 | 1,945 | 1,951 | 1,945 | 1,951 | 1,94 |
| Ti | 0,004 | 0,007 | 0,009 | 0,004 | 0,008 | 0,002 | 0,007 | 0,009 | 0,007 | 0,013 | 0,013 | 0,012 | 0,01 | 0,013 |
| Al | 0,112 | 0,025 | 0 | 0,119 | 0,105 | 0,102 | 0,156 | 0,142 | 0,091 | 0,154 | 0,159 | 0,186 | 0,144 | 0,19 |
| Cr | 0,065 | 0,084 | 0,074 | 0,061 | 0,066 | 0,068 | 0,039 | 0,036 | 0,036 | 0,056 | 0,053 | 0,054 | 0,057 | 0,052 |
| Fe | 0,021 | 0,058 | 0,027 | 0,033 | 0,04 | 0,014 | 0,032 | 0,039 | 0,037 | 0,042 | 0,047 | 0,038 | 0,039 | 0,038 |
| Mn | 0 | 0,003 | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,002 | 0 |
| Mg | 0,799 | 0,808 | 0,84 | 0,811 | 0,806 | 0,809 | 0,812 | 0,823 | 0,873 | 0,773 | 0,795 | 0,752 | 0,799 | 0,755 |
| Ca | 0,812 | 0,838 | 0,86 | 0,804 | 0,813 | 0,814 | 0,812 | 0,823 | 0,856 | 0,77 | 0,745 | 0,738 | 0,766 | 0,732 |
| Na | 0,177 | 0,152 | 0,156 | 0,16 | 0,159 | 0,179 | 0,139 | 0,127 | 0,099 | 0,188 | 0,189 | 0,217 | 0,179 | 0,216 |
| K ₂ | 0,002 | 0,009 | 0,007 | 0 | 0,004 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe ₃₊ | 0,017 | 0,03 | 0,075 | 0 | 0,003 | 0,022 | 0,008 | 0,005 | 0,004 | 0,006 | 0 | 0,008 | 0,007 | 0,007 |
| Total | 3,986 | 4,017 | 4,034 | 3,978 | 3,974 | 3,995 | 3,925 | 3,929 | 3,956 | 3,947 | 3,952 | 3,95 | 3,954 | 3,943 |
| X mg | 97,44 | 93,30 | 96,89 | 96,09 | 95,27 | 98,30 | 96,21 | 95,48 | 95,93 | 94,85 | 94,42 | 95,19 | 95,35 | 95,21 |
| X ca | 50,40 | 50,91 | 50,59 | 49,78 | 50,22 | 50,15 | 50,00 | 50,00 | 49,51 | 49,90 | 48,38 | 49,53 | 48,95 | 49,23 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 79,11 | 78,1 | 81,09 | 80,04 | 79,56 | 80,29 | 82,6 | 83,28 | 84,82 | 76,81 | 72,23 | 73,28 | 75,33 | 72,59 |
| Ur | 6,42 | 8,07 | 7,18 | 6,05 | 6,5 | 6,72 | 3,92 | 3,65 | 3,55 | 5,63 | 5,13 | 5,34 | 5,65 | 5,14 |
| Jd | 11,1 | 2,46 | 0 | 9,85 | 9,24 | 10,15 | 10,19 | 9,16 | 6,26 | 13,07 | 13,18 | 16,21 | 11,97 | 16,23 |
| Aeg | 0,03 | 2,92 | 7,23 | 0 | 0 | 0,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fs | 2,12 | 5,59 | 2,63 | 3,29 | 3,97 | 1,42 | 3,24 | 3,91 | 3,69 | 4,18 | 4,51 | 3,74 | 3,8 | 3,77 |
| Clen | 0 | 0 | 0 | 0,77 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,68 | 0,31 | 4,94 | 1,43 | 3,25 | 2,26 |

Продолжение таблицы 4.3

| № Образца | ТО-212 ЛМ | ТО-212 | ТО-212 Ц | ТО-281 ВК | ТО-254 ц | ТО-254 ц | ТО-254 к | ТО-254 ц | ТО-254 к | ТО-91 ц | ТО-175 ц | ТО-175 к | ТО-175 пр | ТО-175 пр |
|--------------------------------------|--------------|--------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 53,96 | 53,46 | 53,56 | 54,34 | 53,77 | 53,61 | 53,57 | 53,22 | 53,75 | 54,14 | 53,54 | 53,55 | 53,9 | 53,62 |
| TiO ₂ | 0,36 | 0,37 | 0,39 | 0,42 | 0,15 | 0,09 | 0,11 | 0,11 | 0,16 | 0,48 | 0,27 | 0,26 | 0,21 | 0,39 |
| Al ₂ O ₃ | 3,95 | 6,6 | 6,31 | 5,12 | 4,33 | 4,78 | 4,78 | 4,76 | 4,52 | 5,46 | 4,06 | 3,61 | 4,59 | 3,88 |
| Cr ₂ O ₃ | 1,56 | 1,38 | 1,32 | 2,11 | 1,49 | 1,85 | 2,02 | 2,02 | 1,73 | 1,18 | 1,25 | 1,16 | 1,55 | 1,4 |
| FeO | 1,46 | 1,45 | 1,42 | 1,99 | 1,77 | 1,65 | 1,7 | 1,76 | 1,74 | 1,36 | 1,25 | 1,21 | 1,49 | 1,47 |
| MnO | 0,07 | 0,11 | 0,08 | 0 | 0,09 | 0,09 | 0 | 0,09 | 0 | 0 | 0,02 | 0,29 | 0,15 | 0,21 |
| MgO | 16,05 | 15,02 | 14,56 | 14,06 | 15,56 | 15,13 | 15,08 | 15,13 | 15,54 | 15,33 | 15,08 | 15,95 | 14,88 | 15,14 |
| CaO | 19,39 | 19,59 | 20,04 | 19,28 | 20,91 | 20,85 | 20,55 | 20,35 | 20,82 | 21,27 | 22,55 | 21,58 | 21,19 | 21,82 |
| Na ₂ O | 2,18 | 2,48 | 2,55 | 3,13 | 1,95 | 1,97 | 2,05 | 2 | 1,84 | 2,09 | 1,61 | 1,68 | 2,17 | 1,94 |
| K ₂ O | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,04 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,1 | 0,07 | 0,06 |
| Total | 98,98 | 100,46 | 100,23 | 100,45 | 100,02 | 100,02 | 99,9 | 99,44 | 100,1 | 101,31 | 99,64 | 99,39 | 100,2 | 99,93 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,958 | 1,911 | 1,921 | 1,95 | 1,941 | 1,935 | 1,935 | 1,932 | 1,937 | 1,924 | 1,942 | 1,946 | 1,943 | 1,943 |
| Ti | 0,01 | 0,01 | 0,011 | 0,011 | 0,004 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,013 | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,011 |
| Al | 0,127 | 0,189 | 0,187 | 0,167 | 0,125 | 0,138 | 0,139 | 0,136 | 0,129 | 0,152 | 0,116 | 0,101 | 0,138 | 0,108 |
| Cr | 0,045 | 0,039 | 0,037 | 0,06 | 0,043 | 0,053 | 0,058 | 0,058 | 0,049 | 0,033 | 0,036 | 0,033 | 0,044 | 0,04 |
| Fe | 0,039 | 0,03 | 0,032 | 0,042 | 0,033 | 0,042 | 0,046 | 0,045 | 0,048 | 0,031 | 0,033 | 0,013 | 0,029 | 0,02 |
| Mn | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0 | 0,003 | 0,003 | 0 | 0,003 | 0 | 0 | 0,001 | 0,009 | 0,005 | 0,006 |
| Mg | 0,868 | 0,8 | 0,778 | 0,752 | 0,837 | 0,814 | 0,812 | 0,819 | 0,835 | 0,812 | 0,815 | 0,864 | 0,799 | 0,817 |
| Ca | 0,754 | 0,75 | 0,77 | 0,741 | 0,809 | 0,806 | 0,795 | 0,792 | 0,804 | 0,81 | 0,876 | 0,84 | 0,818 | 0,847 |
| Na | 0,153 | 0,172 | 0,177 | 0,218 | 0,136 | 0,138 | 0,144 | 0,141 | 0,129 | 0,144 | 0,113 | 0,118 | 0,152 | 0,136 |
| K ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,005 | 0,003 | 0,003 |
| Fe ³⁺ | 0,005 | 0,013 | 0,011 | 0,018 | 0,02 | 0,007 | 0,006 | 0,009 | 0,005 | 0,009 | 0,005 | 0,024 | 0,016 | 0,024 |
| Total | 3,961 | 3,917 | 3,926 | 3,959 | 3,951 | 3,938 | 3,939 | 3,937 | 3,939 | 3,928 | 3,945 | 3,96 | 3,952 | 3,956 |
| X mg | 95,70 | 96,39 | 96,05 | 94,71 | 96,21 | 95,09 | 94,64 | 94,79 | 94,56 | 96,32 | 96,11 | 98,52 | 96,50 | 97,61 |
| X ca | 46,49 | 48,39 | 49,74 | 49,63 | 49,15 | 49,75 | 49,47 | 49,16 | 49,05 | 49,94 | 51,80 | 49,30 | 50,59 | 50,90 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 71,07 | 74,88 | 78,02 | 73,31 | 80,31 | 81,11 | 79,46 | 78,83 | 79,51 | 82,03 | 79,72 | 84,44 | 80 | 81,44 |
| Ur | 4,22 | 3,89 | 3,79 | 5,92 | 4,22 | 5,31 | 5,76 | 5,77 | 4,88 | 3,36 | 3,51 | 3,35 | 4,42 | 4 |
| Jd | 10,24 | 13,26 | 14,17 | 15,62 | 9,33 | 8,56 | 8,58 | 8,25 | 7,84 | 11,23 | 7,57 | 8,55 | 10,76 | 9,58 |
| Aeg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fs | 3,72 | 2,99 | 3,19 | 4,11 | 3,32 | 4,27 | 4,56 | 4,46 | 4,74 | 3,18 | 3,22 | 1,3 | 2,92 | 2,03 |
| Clen | 10,75 | 4,97 | 0,82 | 1,05 | 2,81 | 0,75 | 1,64 | 2,69 | 3,03 | 0,2 | 0 | 2,37 | 0 | 0 |

Продолжение таблицы 4.3.

| № Образца | ТО-175 к | ТО-175 к | ТО-175 к | ТО-175 ц | ТО-175 ц | ТО-175 пр | ТО-258 к | ТО-258 | ТО-258 | ТО-258 ц | ТО-258 к | ТО-266 ц | ТО-266 ц | ТО-266 ц |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 54,07 | 54,06 | 54,57 | 52,05 | 52,46 | 53,3 | 52,75 | 53,28 | 53,42 | 52,66 | 53,85 | 54,39 | 53,71 | 54,15 |
| TiO2 | 0,23 | 0,24 | 0 | 0,29 | 0,06 | 0,16 | 0,22 | 0 | 0 | 0,15 | 0 | 0 | 0 | 0,46 |
| Al2O3 | 3,58 | 3,67 | 3,17 | 4,61 | 5,26 | 5,12 | 2,93 | 3,71 | 3,71 | 3,78 | 3,54 | 4,22 | 3,04 | 1,72 |
| Cr2O3 | 1,21 | 1,28 | 1,6 | 1,72 | 1,64 | 1,51 | 1,08 | 1,38 | 1,3 | 1,23 | 1,17 | 1,81 | 0,95 | 1,91 |
| FeO | 1,4 | 1,19 | 1,25 | 1,3 | 1,71 | 0,96 | 1,71 | 2,45 | 2,07 | 1,64 | 1,48 | 2,14 | 1,57 | 2,5 |
| MnO | 0,09 | 0,33 | 0,02 | 0 | 0,1 | 0,18 | 0,07 | 0,4 | 0,05 | 0,27 | 0,33 | 0,39 | 0,28 | 0 |
| MgO | 15,09 | 15,17 | 16,02 | 14,82 | 14,79 | 14,97 | 15,93 | 19,34 | 16,04 | 15,2 | 16,47 | 15,26 | 16,2 | 17,19 |
| CaO | 21,46 | 21,18 | 21,7 | 21,17 | 20,5 | 21,12 | 21,69 | 18,98 | 22,07 | 22,73 | 22,51 | 20,22 | 22,35 | 20,57 |
| Na2O | 1,85 | 2,21 | 1,66 | 1,77 | 2,55 | 2,18 | 0,73 | 0,85 | 0,99 | 0,91 | 0,81 | 2,32 | 1,19 | 1,43 |
| K2O | 0 | 0 | 0,11 | 0 | 0 | 0,1 | 0,11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,08 |
| Total | 98,98 | 99,33 | 100,1 | 97,73 | 99,07 | 99,6 | 97,22 | 100,39 | 99,65 | 98,57 | 100,16 | 100,75 | 99,3 | 100,01 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,969 | 1,963 | 1,966 | 1,924 | 1,916 | 1,929 | 1,959 | 1,913 | 1,94 | 1,936 | 1,943 | 1,952 | 1,956 | 1,963 |
| Ti | 0,006 | 0,007 | 0 | 0,008 | 0,002 | 0,004 | 0,006 | 0 | 0 | 0,004 | 0 | 0 | 0 | 0,013 |
| Al | 0,123 | 0,12 | 0,101 | 0,125 | 0,143 | 0,148 | 0,088 | 0,07 | 0,099 | 0,1 | 0,093 | 0,131 | 0,087 | 0,037 |
| Cr | 0,035 | 0,037 | 0,046 | 0,05 | 0,047 | 0,043 | 0,032 | 0,039 | 0,037 | 0,036 | 0,033 | 0,051 | 0,027 | 0,055 |
| Fe | 0,043 | 0,014 | 0,035 | 0,029 | 0 | 0,005 | 0,053 | 0,036 | 0,063 | 0,05 | 0,045 | 0,037 | 0,034 | 0,055 |
| Mn | 0,003 | 0,01 | 0,001 | 0 | 0,003 | 0,006 | 0,002 | 0,012 | 0,002 | 0,008 | 0,01 | 0,012 | 0,009 | 0 |
| Mg | 0,819 | 0,821 | 0,86 | 0,817 | 0,805 | 0,808 | 0,882 | 1,035 | 0,868 | 0,833 | 0,886 | 0,816 | 0,879 | 0,929 |
| Ca | 0,837 | 0,824 | 0,838 | 0,839 | 0,802 | 0,819 | 0,863 | 0,73 | 0,859 | 0,896 | 0,87 | 0,778 | 0,872 | 0,799 |
| Na | 0,131 | 0,156 | 0,116 | 0,127 | 0,181 | 0,153 | 0,053 | 0,059 | 0,07 | 0,065 | 0,057 | 0,161 | 0,084 | 0,101 |
| K2 | 0 | 0 | 0,005 | 0 | 0 | 0,005 | 0,005 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,004 |
| Fe3+ | 0 | 0,022 | 0,003 | 0,011 | 0,052 | 0,024 | 0 | 0,037 | 0 | 0 | 0 | 0,027 | 0,013 | 0,021 |
| Total | 3,965 | 3,974 | 3,97 | 3,93 | 3,952 | 3,944 | 3,943 | 3,932 | 3,937 | 3,928 | 3,936 | 3,966 | 3,963 | 3,975 |
| X mg | 95,01 | 98,32 | 96,09 | 96,57 | 100,00 | 99,38 | 94,33 | 96,64 | 93,23 | 94,34 | 95,17 | 95,66 | 96,28 | 94,41 |
| X ca | 50,54 | 50,09 | 49,35 | 50,66 | 49,91 | 50,34 | 49,46 | 41,36 | 49,74 | 51,82 | 49,54 | 48,81 | 49,80 | 46,24 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 81,03 | 82,6 | 82,88 | 82,1 | 81,4 | 82,64 | 87,42 | 64,61 | 85,82 | 82,4 | 88,18 | 76,63 | 87,42 | 73,68 |
| Ur | 3,45 | 3,7 | 4,51 | 5,06 | 4,8 | 4,42 | 3,21 | 3,47 | 3,73 | 3,54 | 3,38 | 5,06 | 2,74 | 5,05 |
| Jd | 9,48 | 11,96 | 6,96 | 7,7 | 13,52 | 11,23 | 2,11 | 1,77 | 3,24 | 2,88 | 2,36 | 10,85 | 5,68 | 3,39 |
| Aeg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,83 |
| Fs | 4,22 | 1,43 | 3,43 | 2,92 | 0 | 0,52 | 5,38 | 3,2 | 6,28 | 4,99 | 4,52 | 3,65 | 3,45 | 5,09 |
| Clen | 0 | 0 | 2,22 | 0 | 0,28 | 0 | 1,88 | 26,96 | 0,93 | 0 | 1,56 | 3,81 | 0,71 | 11,96 |

Продолжение таблицы 4.3.

| № Образца | ТО-266 к | ТО-266 ц | ТО-266 к | ТО-266 ц | ТО-266 к | ТО-266 ц | ТО-266 ц | ТО-266 ЛМ |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 52,76 | 54,21 | 53,25 | 53,55 | 54,36 | 54,81 | 53,14 | 54,21 |
| TiO ₂ | 0,02 | 0,09 | 0,04 | 0,28 | 0,05 | 0,15 | 0,28 | 0,1 |
| Al ₂ O ₃ | 2,93 | 2,62 | 2,93 | 2,44 | 2,7 | 2,75 | 2,72 | 2,72 |
| Cr ₂ O ₃ | 1,17 | 0,97 | 1 | 0,83 | 1,02 | 1,02 | 0,62 | 0,92 |
| FeO | 2,03 | 1,5 | 1,73 | 1,77 | 1,72 | 1,72 | 1,78 | 2,1 |
| MnO | 0 | 0,09 | 0,24 | 0 | 0,17 | 0,01 | 0,24 | 0 |
| MgO | 15,96 | 16,17 | 16,51 | 15,93 | 16,11 | 15,82 | 16,42 | 16,59 |
| CaO | 22,61 | 22,87 | 22,64 | 22,42 | 22,8 | 22,93 | 22,99 | 22,83 |
| Na ₂ O | 1,32 | 1,26 | 1,31 | 1,09 | 1,23 | 1,42 | 1,05 | 1,11 |
| K ₂ O | 0 | 0,11 | 0,16 | 0,01 | 0,01 | 0,17 | 0,05 | 0,03 |
| Total | 98,8 | 99,89 | 99,81 | 98,32 | 100,17 | 100,8 | 99,29 | 100,61 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | |
| Si | 1,941 | 1,965 | 1,939 | 1,97 | 1,965 | 1,969 | 1,943 | 1,953 |
| Ti | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,008 | 0,001 | 0,004 | 0,008 | 0,003 |
| Al | 0,068 | 0,076 | 0,064 | 0,075 | 0,08 | 0,086 | 0,06 | 0,069 |
| Cr | 0,034 | 0,028 | 0,029 | 0,024 | 0,029 | 0,029 | 0,018 | 0,026 |
| Fe | 0,012 | 0,031 | 0 | 0,054 | 0,042 | 0,045 | 0,017 | 0,04 |
| Mn | 0 | 0,003 | 0,007 | 0 | 0,005 | 0 | 0,007 | 0 |
| Mg | 0,875 | 0,873 | 0,896 | 0,873 | 0,868 | 0,847 | 0,895 | 0,891 |
| Ca | 0,891 | 0,888 | 0,883 | 0,884 | 0,883 | 0,883 | 0,901 | 0,881 |
| Na | 0,094 | 0,089 | 0,092 | 0,078 | 0,086 | 0,099 | 0,074 | 0,078 |
| K ₂ | 0 | 0,005 | 0,007 | 0 | 0 | 0,008 | 0,002 | 0,001 |
| Fe ³⁺ | 0,05 | 0,015 | 0,053 | 0 | 0,01 | 0,007 | 0,038 | 0,024 |
| Total | 3,966 | 3,975 | 3,972 | 3,966 | 3,97 | 3,977 | 3,963 | 3,966 |
| X mg | 98,65 | 96,57 | 100,00 | 94,17 | 95,38 | 94,96 | 98,14 | 95,70 |
| X ca | 50,45 | 50,43 | 49,63 | 50,31 | 50,43 | 51,04 | 50,17 | 49,72 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | |
| Di | 87,72 | 86,7 | 89,37 | 85,96 | 85,79 | 82,52 | 90,22 | 87,43 |
| Ur | 3,41 | 2,76 | 2,91 | 2,38 | 2,88 | 2,82 | 1,81 | 2,6 |
| Jd | 6,03 | 6,03 | 6,44 | 5,28 | 5,64 | 6,81 | 5,7 | 5,09 |
| Aeg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fs | 1,21 | 3,04 | 0 | 5,36 | 4,19 | 4,37 | 1,68 | 3,94 |
| Clen | 0 | 0 | 1,28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,94 |

Условные обозначения: ц-центр; к-край; пр-промежуток; лм- ламель

Таблица 4.4. Состав породообразующего граната из ксенолитов перидотитового и пироксенитового парагенезиса кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная

| Образец № | Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | | | xMg# | xCa# | xCr# | |
|-----------|----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------|-------------------|-------|--------|------|------|------|
| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | Total | | | | |
| TM-90 | к | 42,7 | 0,0 | 22,7 | 1,6 | 7,0 | 0,0 | 20,8 | 4,8 | 0,2 | 99,7 | 84,1 | 14,2 | 4,5 |
| TM-90 | ц | 42,8 | 0,2 | 22,7 | 1,4 | 7,1 | 0,4 | 21,9 | 4,5 | 0,0 | 100,9 | 85,8 | 12,8 | 4,0 |
| TM-90 | ц | 42,0 | 0,2 | 22,6 | 1,2 | 6,8 | 0,2 | 21,5 | 4,9 | 0,1 | 99,5 | 85,9 | 14,1 | 3,3 |
| TM-90 | к | 41,6 | 0,0 | 22,6 | 1,8 | 7,1 | 0,0 | 21,5 | 4,7 | 0,1 | 99,4 | 84,6 | 13,6 | 5,1 |
| TM-90 | ц | 42,4 | 0,0 | 22,5 | 1,6 | 7,1 | 0,3 | 22,0 | 4,3 | 0,1 | 100,3 | 85,8 | 12,4 | 4,6 |
| TM-100 | к | 40,2 | 0,1 | 20,5 | 4,3 | 8,6 | 0,6 | 18,7 | 5,1 | 0,0 | 98,1 | 79,5 | 16,5 | 12,2 |
| TM-100 | ц | 41,2 | 0,2 | 21,0 | 2,5 | 8,6 | 0,6 | 18,9 | 5,2 | 0,1 | 98,3 | 80,7 | 16,4 | 7,4 |
| TM-34 | к | 41,9 | 0,0 | 21,7 | 2,3 | 9,4 | 0,4 | 19,3 | 4,8 | 0,0 | 99,9 | 79,6 | 15,2 | 6,6 |
| TM-34 | ц | 42,3 | 0,1 | 21,6 | 2,1 | 9,1 | 0,4 | 19,8 | 4,8 | 0,0 | 100,2 | 81,3 | 14,9 | 6,0 |
| TM-34 | пр | 42,2 | 0,1 | 21,8 | 2,1 | 9,2 | 0,4 | 19,7 | 4,8 | 0,0 | 100,3 | 80,6 | 14,9 | 6,0 |
| TM-34 | к | 42,5 | 0,0 | 22,0 | 2,1 | 9,4 | 0,5 | 19,6 | 4,4 | 0,0 | 100,6 | 79,9 | 13,9 | 6,1 |
| TM-34 | ц | 42,0 | 0,1 | 21,8 | 2,1 | 9,1 | 0,4 | 19,8 | 4,9 | 0,0 | 100,2 | 80,7 | 15,0 | 6,1 |
| TM-34 | к | 42,0 | 0,0 | 21,7 | 2,2 | 9,4 | 0,5 | 19,7 | 4,7 | 0,0 | 100,2 | 80,0 | 14,6 | 6,5 |
| TM-34 | к | 42,3 | 0,0 | 21,7 | 2,3 | 9,4 | 0,4 | 19,8 | 4,7 | 0,1 | 100,7 | 80,4 | 14,5 | 6,6 |
| TM-34 | к | 42,1 | 0,0 | 21,6 | 2,3 | 9,6 | 0,5 | 19,4 | 4,6 | 0,0 | 100,0 | 79,6 | 14,5 | 6,6 |
| TM-34 | к | 42,2 | 0,0 | 21,9 | 2,2 | 9,6 | 0,5 | 19,6 | 4,5 | 0,0 | 100,5 | 79,5 | 14,2 | 6,4 |
| TM-34 | к | 42,0 | 0,0 | 21,7 | 2,3 | 9,6 | 0,5 | 19,7 | 4,7 | 0,0 | 100,6 | 79,8 | 14,7 | 6,7 |
| TM-34 | к | 41,8 | 0,0 | 21,6 | 2,4 | 9,6 | 0,5 | 19,8 | 4,6 | 0,0 | 100,3 | 80,0 | 14,3 | 6,9 |
| TM-34 | ц | 42,0 | 0,0 | 21,7 | 2,3 | 9,6 | 0,5 | 19,5 | 4,6 | 0,0 | 100,2 | 79,6 | 14,4 | 6,6 |
| TM-34 | ц | 41,9 | 0,1 | 21,7 | 2,3 | 9,4 | 0,5 | 19,5 | 4,8 | 0,0 | 100,2 | 79,8 | 14,9 | 6,7 |
| TM-34 | к | 41,95 | 0,05 | 21,5 | 2,36 | 9,59 | 0,47 | 19,43 | 4,7 | 0,05 | 100,10 | 79,7 | 14,8 | 6,9 |
| TM-34 | ц | 42,19 | 0,07 | 21,77 | 2,32 | 9,5 | 0,45 | 19,63 | 4,78 | 0,05 | 100,76 | 79,8 | 14,9 | 6,7 |
| TM-34 | к | 42,16 | 0,05 | 21,7 | 2,37 | 9,6 | 0,48 | 19,4 | 4,65 | 0,03 | 100,44 | 79,3 | 14,7 | 6,8 |
| TM-34 | к | 41,8 | 0,03 | 21,63 | 2,33 | 9,57 | 0,47 | 19,6 | 4,62 | 0,01 | 100,06 | 79,6 | 14,5 | 6,7 |

Продолжение таблицы 4.4.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|-----|
| TM-34 | к | 41,77 | 0,05 | 21,66 | 2,38 | 9,6 | 0,48 | 19,4 | 4,65 | 0,03 | 100,02 | 79,1 | 14,7 | 6,9 |
| TM-38 | к | 41,9 | 0,07 | 21,71 | 2,08 | 8,92 | 0,39 | 19,49 | 4,82 | 0,04 | 99,42 | 80,7 | 15,1 | 6,0 |
| TM-38 | ц | 41,92 | 0,08 | 21,66 | 1,99 | 8,77 | 0,39 | 19,52 | 4,86 | 0,03 | 99,22 | 81,2 | 15,2 | 5,8 |
| TM-38 | к | 41,71 | 0,07 | 21,65 | 2,08 | 8,86 | 0,41 | 19,53 | 4,79 | 0,02 | 99,12 | 80,8 | 15,0 | 6,1 |
| TM-38 | к | 41,85 | 0,04 | 21,67 | 2,1 | 9,06 | 0,42 | 19,52 | 4,6 | 0,06 | 99,32 | 80,5 | 14,5 | 6,1 |
| TM-38 | к | 41,72 | 0,04 | 21,62 | 2,21 | 9,05 | 0,44 | 19,62 | 4,59 | 0,03 | 99,32 | 80,5 | 14,4 | 6,4 |
| TM-38 | ц | 41,77 | 0,07 | 21,46 | 2,29 | 9,12 | 0,43 | 19,33 | 4,84 | 0,03 | 99,34 | 80,3 | 15,2 | 6,7 |
| TM-38 | к | 41,83 | 0,07 | 21,53 | 2,26 | 8,97 | 0,4 | 19,56 | 4,85 | 0,01 | 99,48 | 80,8 | 15,1 | 6,6 |
| TM-31 | к | 41,92 | 0,06 | 21,73 | 2,26 | 8,88 | 0,43 | 19,68 | 4,58 | 0,05 | 99,59 | 80,7 | 14,3 | 6,5 |
| TM-31 | ц | 42,16 | 0,06 | 21,83 | 2,17 | 8,73 | 0,41 | 19,68 | 4,74 | 0,04 | 99,82 | 81,1 | 14,7 | 6,3 |
| TM-31 | к | 42,12 | 0,04 | 21,88 | 2,22 | 8,78 | 0,43 | 19,57 | 4,5 | 0,02 | 99,56 | 79,9 | 14,2 | 6,4 |
| TM-31 | ц | 42,22 | 0,04 | 21,88 | 2,28 | 8,75 | 0,42 | 19,55 | 4,63 | 0,03 | 99,80 | 79,9 | 14,5 | 6,5 |
| TM-31 | к | 42,34 | 0,04 | 21,96 | 2,14 | 8,88 | 0,44 | 19,58 | 4,5 | 0 | 99,88 | 79,7 | 14,2 | 6,1 |
| TM-31 | ц | 42,15 | 0,03 | 21,86 | 2,03 | 8,84 | 0,41 | 19,67 | 4,55 | 0 | 99,54 | 80,9 | 14,3 | 5,9 |
| TM-31 | к | 42,17 | 0,02 | 21,86 | 2,18 | 8,89 | 0,44 | 19,69 | 4,41 | 0,02 | 99,68 | 80,7 | 13,9 | 6,2 |
| TM-31 | к | 42,42 | 0,05 | 22,12 | 2,13 | 8,83 | 0,41 | 19,68 | 4,57 | 0,02 | 100,23 | 79,9 | 14,3 | 6,1 |
| TM-31 | ц | 42,19 | 0,04 | 21,85 | 2,26 | 8,9 | 0,43 | 19,56 | 4,5 | 0 | 99,73 | 79,7 | 14,2 | 6,5 |
| TM-31 | ц | 42,16 | 0,06 | 21,77 | 2,18 | 8,82 | 0,41 | 19,74 | 4,62 | 0,02 | 99,78 | 81,1 | 14,4 | 6,3 |
| TM-31 | к | 42,17 | 0,05 | 21,81 | 2,25 | 8,98 | 0,42 | 19,53 | 4,65 | 0,05 | 99,91 | 80,4 | 14,6 | 6,5 |
| TM-31 | к | 42,13 | 0,05 | 21,85 | 2,18 | 8,73 | 0,4 | 19,77 | 4,7 | 0,03 | 99,84 | 81,1 | 14,6 | 6,3 |
| TM-31 | пр | 42,22 | 0,05 | 21,77 | 2,05 | 8,39 | 0,35 | 19,79 | 4,83 | 0,04 | 99,49 | 82,1 | 14,9 | 5,9 |
| TM-31 | ц | 42,27 | 0,05 | 21,94 | 1,99 | 8,39 | 0,36 | 19,97 | 4,84 | 0,03 | 99,84 | 82,1 | 14,8 | 5,7 |
| TM-126 | к | 42,12 | 0,05 | 21,74 | 2,32 | 7,93 | 0,33 | 20,5 | 4,76 | 0,01 | 99,76 | 83,3 | 14,3 | 6,7 |
| TM-126 | ц | 42,26 | 0,05 | 22,01 | 2 | 7,49 | 0,28 | 20,52 | 4,96 | 0,02 | 99,59 | 84,1 | 14,8 | 5,8 |

Продолжение таблицы 4.4.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| TM-126 | ц | 42,15 | 0,05 | 21,8 | 2,19 | 7,9 | 0,32 | 20,09 | 4,97 | 0,04 | 99,51 | 83,0 | 15,1 | 6,3 |
| TM-126 | ц | 42,02 | 0,04 | 21,65 | 2,27 | 7,97 | 0,32 | 19,97 | 4,98 | 0,02 | 99,24 | 82,9 | 15,2 | 6,6 |
| TM-126 | пр | 42,27 | 0,05 | 21,78 | 2,18 | 7,99 | 0,33 | 19,98 | 4,93 | 0,03 | 99,54 | 82,9 | 15,1 | 6,3 |
| TM-126 | к | 41,77 | 0,04 | 21,42 | 2,58 | 8,27 | 0,38 | 19,93 | 4,88 | 0,02 | 99,29 | 82,2 | 15,0 | 7,5 |
| TM-126 | ц | 41,91 | 0,05 | 21,45 | 2,59 | 8,15 | 0,37 | 19,81 | 4,85 | 0 | 99,18 | 82,2 | 15,0 | 7,5 |
| TM-147 | к | 40,74 | 0,1 | 19,72 | 3,6 | 14,11 | 0,57 | 15,4 | 6,07 | 0 | 100,31 | 67,8 | 22,1 | 10,9 |
| TM-147 | к | 40,6 | 0,09 | 19,81 | 3,58 | 14,08 | 0,58 | 15,37 | 6,16 | 0,01 | 100,28 | 67,6 | 22,4 | 10,8 |
| TM-147 | ц | 40,57 | 0,12 | 19,68 | 3,67 | 14,19 | 0,58 | 15,25 | 6,16 | 0,02 | 100,24 | 67,3 | 22,5 | 11,1 |
| TM-147 | ц | 40,87 | 0,09 | 19,61 | 3,59 | 14,17 | 0,58 | 15,3 | 6,15 | 0,03 | 100,39 | 67,9 | 22,4 | 11,0 |
| TM-147 | к | 40,7 | 0,12 | 19,56 | 3,6 | 14,18 | 0,58 | 15,34 | 6,22 | 0,01 | 100,31 | 67,9 | 22,6 | 11,0 |
| TM-147 | ц | 40,83 | 0,12 | 19,67 | 3,7 | 14,26 | 0,57 | 15,23 | 6,24 | 0,05 | 100,67 | 67,4 | 22,8 | 11,2 |
| TM-147 | ц | 40,49 | 0,12 | 19,56 | 3,61 | 14,21 | 0,57 | 15,26 | 6,23 | 0,02 | 100,07 | 67,6 | 22,7 | 11,0 |
| TM-53 | ц | 42,50 | 0,04 | 22,66 | 1,43 | 8,08 | 0,30 | 20,40 | 4,37 | 0,02 | 99,80 | 81,8 | 13,4 | 4,0 |
| TM-53 | к | 42,59 | 0,06 | 22,71 | 1,53 | 8,09 | 0,29 | 20,37 | 4,34 | 0,01 | 99,99 | 81,8 | 13,3 | 4,3 |
| TM-53 | ц | 42,04 | 0,03 | 22,42 | 1,52 | 8,02 | 0,29 | 20,45 | 4,40 | 0,01 | 99,18 | 82,6 | 13,4 | 4,4 |
| TM-53 | к | 42,38 | 0,01 | 22,55 | 1,43 | 8,07 | 0,30 | 20,63 | 4,27 | 0,02 | 99,66 | 82,9 | 12,9 | 4,1 |
| TM-53 | к | 42,21 | 0,02 | 22,41 | 1,51 | 8,09 | 0,31 | 20,32 | 4,31 | 0,03 | 99,21 | 81,7 | 13,2 | 4,3 |
| TM-53 | к | 42,26 | 0,05 | 22,46 | 1,47 | 8,10 | 0,29 | 20,27 | 4,51 | 0,01 | 99,42 | 82,4 | 13,8 | 4,2 |
| TM-53 | ц | 42,19 | 0,06 | 22,38 | 1,39 | 8,03 | 0,29 | 20,50 | 4,64 | 0,03 | 99,51 | 83,1 | 14,0 | 4,0 |
| TM-53 | к | 42,22 | 0,06 | 22,44 | 1,47 | 7,96 | 0,28 | 20,41 | 4,68 | 0,06 | 99,58 | 82,9 | 14,1 | 4,2 |
| TM-53 | ц | 42,19 | 0,06 | 22,33 | 1,46 | 8,04 | 0,29 | 20,58 | 4,65 | 0,03 | 99,63 | 83,2 | 14,0 | 4,2 |
| TM-53 | к | 42,21 | 0,06 | 22,35 | 1,45 | 8,09 | 0,31 | 20,49 | 4,61 | 0,07 | 99,64 | 83,0 | 13,9 | 4,2 |
| TM-68 | ц | 40,5 | 0,12 | 20,14 | 2,44 | 16,35 | 0,64 | 14,27 | 5,95 | 0,03 | 100,44 | 63,0 | 23,1 | 7,5 |
| TM-68 | к | 40,44 | 0,12 | 20,02 | 2,52 | 16,36 | 0,62 | 14,1 | 6,03 | 0 | 100,21 | 62,7 | 23,5 | 7,8 |

Продолжение таблицы 4.4.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| TM-68 | ц | 40,37 | 0,11 | 20 | 2,54 | 16,26 | 0,62 | 14,28 | 5,95 | 0,02 | 100,15 | 63,1 | 23,1 | 7,9 |
| TM-68 | к | 40,37 | 0,11 | 20,07 | 2,46 | 16,31 | 0,63 | 14,22 | 5,97 | 0,01 | 100,15 | 62,9 | 23,2 | 7,6 |
| TM-68 | к | 40,25 | 0,13 | 20 | 2,56 | 16,32 | 0,63 | 14,06 | 6,04 | 0,02 | 100,01 | 62,5 | 23,6 | 7,9 |
| TM-56 | ц | 40,48 | 0,1 | 19,54 | 3,52 | 15,08 | 0,61 | 14,62 | 6,36 | 0,04 | 100,35 | 65,3 | 23,8 | 10,8 |
| TM-56 | к | 40,47 | 0,1 | 19,49 | 3,48 | 15,12 | 0,6 | 14,64 | 6,37 | 0,02 | 100,29 | 65,4 | 23,8 | 10,7 |
| TM-56 | к | 40,33 | 0,11 | 19,41 | 3,66 | 15,04 | 0,61 | 14,5 | 6,42 | 0,03 | 100,11 | 65,1 | 24,1 | 11,3 |
| TM-56 | ц | 40,22 | 0,09 | 19,51 | 3,49 | 15,08 | 0,62 | 14,65 | 6,29 | 0 | 99,95 | 65,3 | 23,6 | 10,7 |
| TM-56 | ц | 40,4 | 0,11 | 19,39 | 3,6 | 15,15 | 0,61 | 14,58 | 6,43 | 0,03 | 100,30 | 65,3 | 24,1 | 11,1 |
| TM-56 | к | 40,29 | 0,13 | 19,63 | 3,45 | 15,02 | 0,61 | 14,57 | 6,25 | 0,01 | 99,96 | 65,0 | 23,6 | 10,5 |
| TM-56 | к | 40,31 | 0,1 | 19,48 | 3,57 | 15,02 | 0,6 | 14,47 | 6,38 | 0,02 | 99,95 | 65,0 | 24,1 | 10,9 |
| TM-56 | ц | 40,49 | 0,11 | 19,47 | 3,57 | 15,16 | 0,61 | 14,65 | 6,38 | 0 | 100,44 | 65,3 | 23,8 | 11,0 |
| TM-182 | ц | 40,4 | 0,11 | 20,33 | 2,23 | 15,8 | 0,62 | 14,61 | 5,83 | 0 | 99,93 | 64,2 | 22,3 | 6,8 |
| TM-182 | к | 40,49 | 0,09 | 20,17 | 2,45 | 15,75 | 0,62 | 14,55 | 5,89 | 0,02 | 100,03 | 64,3 | 22,5 | 7,5 |
| TM-182 | ц | 40,67 | 0,08 | 20,67 | 2,15 | 15,69 | 0,62 | 14,65 | 5,72 | 0,01 | 100,26 | 64,1 | 21,9 | 6,5 |
| TM-182 | к | 40,52 | 0,09 | 20,15 | 2,43 | 15,86 | 0,62 | 14,56 | 5,95 | 0,03 | 100,21 | 64,2 | 22,7 | 7,5 |
| TM-182 | ц | 40,58 | 0,1 | 20,11 | 2,5 | 15,85 | 0,62 | 14,46 | 5,87 | 0,02 | 100,11 | 64,1 | 22,6 | 7,7 |
| TM-182 | к | 40,35 | 0,15 | 20,03 | 2,56 | 15,95 | 0,62 | 14,53 | 6,03 | 0,02 | 100,24 | 64,0 | 23,0 | 7,9 |
| TM-182 | ц | 40,52 | 0,08 | 20,32 | 2,39 | 15,73 | 0,63 | 14,58 | 5,82 | 0,02 | 100,09 | 64,2 | 22,3 | 7,3 |
| TM-182 | к | 40,54 | 0,11 | 20,13 | 2,53 | 15,85 | 0,63 | 14,44 | 5,95 | 0 | 100,18 | 63,9 | 22,9 | 7,8 |
| TM-116 | к | 40,54 | 0,10 | 18,86 | 4,70 | 12,53 | 0,52 | 15,75 | 6,62 | 0,02 | 99,64 | 71,0 | 23,2 | 14,3 |
| TM-116 | ц | 40,75 | 0,11 | 18,88 | 4,76 | 12,70 | 0,51 | 15,82 | 6,74 | 0,07 | 100,34 | 71,0 | 23,4 | 14,5 |
| TM-116 | ц | 40,60 | 0,15 | 18,64 | 4,80 | 12,67 | 0,51 | 15,42 | 6,73 | 0,04 | 99,56 | 70,6 | 23,9 | 14,7 |
| TM-116 | к | 40,55 | 0,14 | 18,62 | 4,87 | 12,72 | 0,51 | 15,46 | 6,82 | 0,04 | 99,73 | 70,5 | 24,1 | 14,9 |
| TM-116 | к | 40,67 | 0,11 | 18,76 | 4,82 | 12,61 | 0,51 | 15,65 | 6,77 | 0,05 | 99,95 | 70,9 | 23,7 | 14,7 |

Продолжение таблицы 4.4.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| TM-116 | ц | 40,57 | 0,12 | 18,72 | 4,82 | 12,69 | 0,51 | 15,58 | 6,77 | 0,02 | 99,80 | 70,7 | 23,8 | 14,7 |
| TM-116 | к | 40,71 | 0,14 | 18,62 | 4,81 | 12,68 | 0,52 | 15,40 | 6,81 | 0,05 | 99,74 | 70,7 | 24,1 | 14,7 |
| TM-116 | ц | 40,48 | 0,12 | 18,73 | 4,84 | 12,62 | 0,52 | 15,44 | 6,79 | 0,04 | 99,58 | 70,4 | 24,0 | 14,8 |
| TM-74 | ц | 40,1 | 0,07 | 20,1 | 3,47 | 14,1 | 0,62 | 15 | 6,26 | 0 | 99,72 | 67,8 | 23,1 | 10,4 |
| TM-74 | к | 39,9 | 0,07 | 19,85 | 3,57 | 14 | 0,61 | 14,78 | 6,21 | 0 | 98,99 | 67,2 | 23,2 | 10,8 |
| TM-74 | ц | 40,2 | 0,15 | 20,05 | 3,46 | 14,11 | 0,62 | 14,74 | 6,24 | 0 | 99,57 | 66,3 | 23,3 | 10,4 |
| TM-74 | к | 40,3 | 0,09 | 20,16 | 3,47 | 14,07 | 0,65 | 15,01 | 6,27 | 0 | 100,02 | 67,5 | 23,1 | 10,3 |
| TM-74 | ц | 40,18 | 0,09 | 19,97 | 3,5 | 14,15 | 0,64 | 14,77 | 6,26 | 0 | 99,56 | 66,7 | 23,4 | 10,5 |
| TM-74 | к | 40,46 | 0,1 | 20,22 | 3,5 | 14,14 | 0,69 | 15,11 | 6,25 | 0 | 100,47 | 67,7 | 22,9 | 10,4 |
| TM-74 | ц | 40,15 | 0,08 | 20,09 | 3,62 | 13,94 | 0,61 | 14,86 | 6,18 | 0 | 99,53 | 66,9 | 23,0 | 10,8 |
| TM-74 | к | 40,05 | 0,15 | 20,11 | 3,57 | 14,17 | 0,66 | 14,93 | 6,22 | 0 | 99,86 | 67,5 | 23,0 | 10,6 |
| TM-91 | К | 41,91 | 0 | 23,93 | 0,21 | 10,19 | 0,26 | 20,05 | 3,39 | 0 | 99,94 | 77,8 | 10,8 | 0,6 |
| TM-91 | Ц | 41,63 | 0,14 | 23,68 | 0,19 | 10,36 | 0,3 | 19,74 | 3,54 | 0 | 99,58 | 77,2 | 11,4 | 0,5 |
| TM-91 | Ц | 41,98 | 0,11 | 23,84 | 0,21 | 10,33 | 0,27 | 19,87 | 3,5 | 0 | 100,11 | 77,4 | 11,3 | 0,6 |
| TM-91 | К | 41,41 | 0,17 | 23,42 | 0,26 | 10,62 | 0,26 | 19,52 | 3,4 | 0 | 99,06 | 76,6 | 11,1 | 0,7 |
| TM-91 | Ц | 41,76 | 0,15 | 23,53 | 0,23 | 10,48 | 0,28 | 19,63 | 3,58 | 0 | 99,64 | 76,9 | 11,6 | 0,7 |
| TM-91 | К | 41,71 | 0 | 23,75 | 0,14 | 10,55 | 0,31 | 19,68 | 3,36 | 0,07 | 99,57 | 76,9 | 10,9 | 0,4 |
| TM-91 | Ц | 41,34 | 0,07 | 23,51 | 0,24 | 10,55 | 0,27 | 19,47 | 3,4 | 0 | 98,85 | 76,7 | 11,2 | 0,7 |
| TO-78 | к | 42,28 | 0,07 | 24,21 | 1,86 | 8,06 | 0,48 | 20,23 | 5,41 | 0 | 102,60 | 81,7 | 16,1 | 4,9 |
| TO-78 | ц | 42,36 | 0,09 | 24,43 | 1,81 | 8,07 | 0,46 | 20,33 | 5,32 | 0 | 102,87 | 81,8 | 15,8 | 4,7 |
| TO-78 | ВК В Срх | 42,51 | 0,08 | 24,49 | 1,48 | 7,98 | 0,47 | 20,41 | 5,27 | 0 | 102,69 | 82,0 | 15,7 | 3,9 |
| TO-78 | ВК В Срх | 42,22 | 0,12 | 23,89 | 2,41 | 7,96 | 0,48 | 20,37 | 5,43 | 0 | 102,88 | 82,0 | 16,1 | 6,3 |
| TO-78 | к | 42,55 | 0,09 | 24,62 | 1,82 | 8,22 | 0,47 | 20,65 | 5,4 | 0 | 103,82 | 81,7 | 15,8 | 4,7 |
| TO-78 | ц | 42,07 | 0,11 | 24,4 | 1,91 | 8,11 | 0,51 | 20,36 | 5,46 | 0 | 102,93 | 81,7 | 16,2 | 5,0 |

Продолжение таблицы 4.4.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|-----|
| ТО-125 | Ц | 41,84 | 0,11 | 22,37 | 2,48 | 7,85 | 0,51 | 20,15 | 4,75 | 0 | 100,06 | 82,0 | 14,5 | 6,9 |
| ТО-125 | К | 41,91 | 0,12 | 22,63 | 2,13 | 7,81 | 0,45 | 20,38 | 4,6 | 0 | 100,03 | 82,3 | 13,9 | 5,9 |
| ТО-125 | Ц | 41,89 | 0,13 | 22,11 | 2,59 | 7,67 | 0,51 | 20,21 | 5,03 | 0 | 100,14 | 82,4 | 15,2 | 7,3 |
| ТО-125 | К | 41,75 | 0,11 | 22,69 | 1,98 | 7,66 | 0,48 | 20,12 | 4,72 | 0 | 99,51 | 82,4 | 14,4 | 5,5 |
| ТО-125 | К | 41,65 | 0,09 | 22,34 | 2,48 | 7,82 | 0,52 | 19,96 | 5,08 | 0 | 99,94 | 82,0 | 15,5 | 6,9 |
| ТО-125 | Ц | 41,55 | 0,1 | 22,31 | 2,43 | 7,68 | 0,56 | 19,86 | 4,99 | 0 | 99,48 | 82,2 | 15,3 | 6,8 |
| ТО-125 | ВК | 42,07 | 0,07 | 22,82 | 1,64 | 8,11 | 0,5 | 20,44 | 4,12 | 0,06 | 99,83 | 81,8 | 12,7 | 4,6 |
| ТО-212 | Ц | 42,10 | 0,10 | 22,78 | 1,70 | 7,48 | 0,47 | 20,63 | 4,65 | 0,00 | 99,91 | 83,1 | 14,0 | 4,7 |
| ТО-212 | К | 41,87 | 0,11 | 22,99 | 1,84 | 7,48 | 0,44 | 20,71 | 4,56 | 0,00 | 100,00 | 83,1 | 13,7 | 5,1 |
| ТО-212 | К | 41,85 | 0,11 | 22,93 | 1,78 | 7,57 | 0,40 | 20,52 | 4,50 | 0,00 | 99,66 | 82,8 | 13,6 | 4,9 |
| ТО-212 | К | 41,97 | 0,09 | 23,02 | 1,66 | 7,55 | 0,46 | 20,66 | 4,48 | 0,00 | 99,89 | 83,0 | 13,5 | 4,6 |
| ТО-212 | ВК | 41,99 | 0,00 | 22,95 | 1,55 | 7,44 | 0,43 | 20,71 | 4,30 | 0,00 | 99,37 | 83,2 | 13,0 | 4,3 |
| ТО-281 | Ц | 41,59 | 0,11 | 22,48 | 2,04 | 9,46 | 0,48 | 19,17 | 4,74 | 0,00 | 100,07 | 78,9 | 15,1 | 5,7 |
| ТО-281 | К | 40,93 | 0,09 | 21,67 | 2,41 | 10,17 | 0,56 | 18,40 | 4,46 | 0,00 | 98,69 | 76,7 | 14,8 | 6,9 |
| ТО-175 | К | 40,42 | 0,00 | 22,48 | 2,01 | 8,15 | 0,18 | 20,43 | 4,77 | 0,15 | 98,59 | 81,7 | 14,4 | 5,7 |
| ТО-175 | ВК | 40,92 | 0,15 | 21,56 | 1,73 | 8,23 | 0,60 | 20,15 | 5,16 | 0,12 | 98,62 | 82,8 | 15,5 | 5,1 |
| ТО-175 | Ц | 41,71 | 0,00 | 21,84 | 1,89 | 7,51 | 0,34 | 21,03 | 4,45 | 0,11 | 98,88 | 84,7 | 13,2 | 5,5 |
| ТО-175 | ВК | 40,41 | 0,00 | 21,36 | 1,81 | 7,72 | 0,62 | 20,09 | 4,59 | 0,16 | 96,76 | 83,4 | 14,1 | 5,4 |
| ТО-175 | Ц | 42,57 | 0,01 | 22,03 | 1,47 | 8,00 | 0,45 | 20,24 | 4,00 | 0,15 | 98,92 | 81,9 | 12,4 | 4,3 |
| ТО-22 | Ц | 40,56 | 0,07 | 23,02 | 0,36 | 15,41 | 0,31 | 15,83 | 3,66 | 0,07 | 99,29 | 64,7 | 14,3 | 1,0 |
| ТО-22 | К | 40,90 | 0,00 | 23,11 | 0,32 | 14,72 | 0,35 | 16,20 | 3,61 | 0,00 | 99,21 | 66,2 | 13,8 | 0,9 |
| ТО-22 | Ц | 40,80 | 0,00 | 23,11 | 0,29 | 14,82 | 0,32 | 16,10 | 3,60 | 0,00 | 99,04 | 65,9 | 13,8 | 0,8 |
| ТО-22 | К | 41,16 | 0,00 | 23,38 | 0,38 | 14,44 | 0,32 | 16,47 | 3,55 | 0,00 | 99,70 | 67,0 | 13,4 | 1,1 |
| ТО-29 | К | 41,13 | 0,00 | 21,92 | 2,36 | 7,89 | 0,31 | 20,21 | 4,18 | 0,00 | 98,00 | 82,0 | 12,9 | 6,7 |

Продолжение таблицы 4.4.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|-----|
| ТО-29 | пр | 41,73 | 0,10 | 22,26 | 2,29 | 7,64 | 0,30 | 20,60 | 4,17 | 0,00 | 99,09 | 82,8 | 12,7 | 6,5 |
| ТО-29 | к | 42,08 | 0,10 | 22,85 | 1,80 | 7,70 | 0,32 | 20,87 | 4,06 | 0,00 | 99,78 | 82,9 | 12,3 | 5,0 |
| ТО-29 | к | 41,83 | 0,10 | 22,67 | 2,09 | 7,74 | 0,32 | 20,69 | 4,16 | 0,00 | 99,60 | 82,7 | 12,6 | 5,8 |
| ТО-29 | ц | 42,08 | 0,11 | 22,64 | 2,05 | 7,86 | 0,26 | 20,84 | 4,00 | 0,00 | 99,84 | 82,5 | 12,1 | 5,7 |
| ТО-29 | к | 42,38 | 0,12 | 22,98 | 1,94 | 7,86 | 0,30 | 21,14 | 4,05 | 0,00 | 100,77 | 82,7 | 12,1 | 5,4 |
| ТО-29 | к | 41,54 | 0,11 | 22,22 | 1,99 | 7,81 | 0,26 | 20,54 | 4,01 | 0,00 | 98,48 | 82,4 | 12,3 | 5,7 |
| ТО-69 | к | 41,05 | 0,1 | 23,28 | 0,14 | 14,02 | 0,46 | 16,95 | 4,04 | 0 | 100,04 | 68,3 | 14,6 | 0,4 |
| ТО-69 | ц | 41,05 | 0,13 | 23,21 | 0,12 | 14,13 | 0,45 | 16,84 | 4,07 | 0 | 100,00 | 68,0 | 14,8 | 0,4 |
| ТО-69 | ц | 41,17 | 0,07 | 23,41 | 0,17 | 14,03 | 0,43 | 16,81 | 4,02 | 0 | 100,11 | 68,1 | 14,7 | 0,5 |
| ТО-69 | ц | 41,06 | 0,11 | 23,36 | 0,14 | 14,69 | 0,43 | 16,51 | 4 | 0 | 100,30 | 66,7 | 14,8 | 0,4 |
| ТО-69 | ц | 40,63 | 0,07 | 23,09 | 0,2 | 14,85 | 0,49 | 16,2 | 4,03 | 0 | 99,56 | 66,0 | 15,1 | 0,6 |
| ТО-138 | к | 41,46 | 0,10 | 22,77 | 0,21 | 13,71 | 0,40 | 17,57 | 4,01 | 0,03 | 100,26 | 70,6 | 14,1 | 0,6 |
| ТО-138 | пр | 41,73 | 0,10 | 22,76 | 0,20 | 13,55 | 0,40 | 17,61 | 4,01 | 0,04 | 100,40 | 71,1 | 14,1 | 0,6 |
| ТО-138 | ц | 41,54 | 0,10 | 22,84 | 0,19 | 13,62 | 0,39 | 17,42 | 4,00 | 0,04 | 100,14 | 70,4 | 14,2 | 0,6 |
| ТО-138 | пр | 41,60 | 0,12 | 22,83 | 0,16 | 13,72 | 0,39 | 17,64 | 4,03 | 0,05 | 100,54 | 70,7 | 14,1 | 0,5 |
| ТО-138 | к | 41,73 | 0,08 | 22,85 | 0,18 | 13,78 | 0,39 | 17,38 | 4,03 | 0,00 | 100,42 | 70,3 | 14,3 | 0,5 |
| ТО-138 | к | 41,56 | 0,10 | 22,70 | 0,18 | 13,65 | 0,38 | 17,60 | 3,96 | 0,02 | 100,15 | 70,9 | 13,9 | 0,5 |
| ТО-138 | пр | 41,78 | 0,09 | 22,85 | 0,18 | 13,21 | 0,36 | 17,74 | 4,00 | 0,04 | 100,25 | 71,7 | 14,0 | 0,5 |
| ТО-138 | ц | 41,81 | 0,13 | 22,82 | 0,19 | 13,24 | 0,38 | 17,78 | 4,02 | 0,05 | 100,42 | 71,7 | 14,0 | 0,6 |
| ТО-138 | ц | 41,35 | 0,11 | 22,67 | 0,19 | 13,85 | 0,38 | 17,42 | 4,10 | 0,06 | 100,13 | 70,3 | 14,5 | 0,6 |
| ТО-16 | к | 40,97 | 0,02 | 21,98 | 0,05 | 16,86 | 0,48 | 16,62 | 3,85 | 0,00 | 100,83 | 66,1 | 14,3 | 0,2 |
| ТО-16 | к | 40,43 | 0,00 | 21,63 | 0,02 | 16,11 | 0,49 | 15,44 | 3,51 | 0,14 | 97,77 | 65,1 | 14,0 | 0,1 |
| ТО-16 | ц | 40,92 | 0,00 | 22,66 | 0,27 | 15,85 | 0,38 | 15,84 | 3,48 | 0,07 | 99,47 | 64,5 | 13,6 | 0,8 |
| ТО-16 | к | 40,28 | 0,01 | 22,50 | 0,28 | 15,85 | 0,42 | 15,86 | 3,65 | 0,00 | 98,85 | 64,5 | 14,2 | 0,8 |

Продолжение таблицы 4.4.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|-----|
| ТО-16 | ц | 40,58 | 0,00 | 22,02 | 0,30 | 15,98 | 0,75 | 16,58 | 3,84 | 0,33 | 100,38 | 66,8 | 14,3 | 0,9 |
| ТО-16 | к | 39,54 | 0,21 | 23,04 | 0,40 | 16,15 | 0,32 | 15,96 | 3,66 | 0,28 | 99,56 | 63,8 | 14,2 | 1,1 |
| ТО-16 | ц | 41,08 | 0,45 | 23,19 | 0,22 | 16,47 | 0,47 | 15,14 | 3,62 | 0,00 | 100,64 | 62,1 | 14,7 | 0,6 |
| ТО-16 | ц | 39,28 | 0,31 | 21,99 | 0,48 | 17,72 | 0,42 | 15,34 | 3,66 | 0,34 | 99,54 | 61,1 | 14,7 | 1,4 |
| ТО-42 | ц | 40,41 | 0,05 | 21,03 | 0,75 | 19,32 | 0,43 | 13,08 | 5,24 | 0 | 100,31 | 56,8 | 22,4 | 2,3 |
| ТО-42 | ц | 39,91 | 0,18 | 21,24 | 0,68 | 18,98 | 0,48 | 12,93 | 5,16 | 0,06 | 99,62 | 56,3 | 22,3 | 2,1 |
| ТО-42 | к | 38,99 | 0,14 | 21,4 | 0,79 | 18,6 | 0,23 | 14 | 4,96 | 0,08 | 99,19 | 58,2 | 20,3 | 2,4 |
| ТО-42 | ц | 39,34 | 0,18 | 21,4 | 0,59 | 19,41 | 0,83 | 13,16 | 5,16 | 0,07 | 100,14 | 55,9 | 22,0 | 1,8 |
| ТО-42 | к | 40,46 | 0,32 | 22,02 | 0,44 | 18,62 | 0,63 | 13,47 | 4,99 | 0,1 | 101,05 | 57,2 | 21,0 | 1,3 |
| ТО-42 | ц | 39,5 | 0,16 | 22 | 0,74 | 18,44 | 0,77 | 13,22 | 4,98 | 0 | 99,81 | 56,2 | 21,3 | 2,2 |
| ТО-42 | ц | 38,98 | 0,09 | 22,08 | 0,45 | 18,01 | 0,66 | 14,2 | 4,98 | 0,23 | 99,68 | 58,8 | 20,1 | 1,4 |
| ТО-42 | к | 40,13 | 0,27 | 22 | 0,6 | 18,32 | 0,36 | 13,51 | 4,77 | 0,1 | 100,06 | 57,2 | 20,2 | 1,8 |
| ТО-42 | ц | 39,5 | 0,06 | 21,95 | 0,58 | 18,08 | 0,63 | 13,4 | 4,79 | 0 | 98,99 | 57,2 | 20,5 | 1,8 |
| ТО-42 | ц | 39,63 | 0 | 21,49 | 0,71 | 17,81 | 0,67 | 13,67 | 5,11 | 0,07 | 99,16 | 58,9 | 21,2 | 2,2 |
| ТО-42 | ц | 38,12 | 0,02 | 21,82 | 0,41 | 17,11 | 0,33 | 12,61 | 4,67 | 0,12 | 95,21 | 56,8 | 21,0 | 1,2 |
| ТО-42 | ц | 38,58 | 0,29 | 21,1 | 0,86 | 18,36 | 0,5 | 13 | 5,11 | 0,25 | 98,05 | 56,4 | 22,0 | 2,7 |
| ТО-42 | ц | 39,95 | 0,27 | 21,09 | 0,63 | 18,65 | 0,48 | 13,13 | 5,24 | 0,07 | 99,51 | 57,3 | 22,3 | 1,9 |
| ТО-42 | ц | 39,39 | 0,21 | 21,48 | 0,63 | 19,23 | 0,59 | 13,26 | 5,29 | 0,12 | 100,20 | 56,2 | 22,3 | 1,9 |
| ТО-42 | к | 39,17 | 0,2 | 21,75 | 0,53 | 18,3 | 0,56 | 13,34 | 5,35 | 0,02 | 99,22 | 57,0 | 22,4 | 1,6 |

Условные обозначения: ц-центр; к-край; пр-промежуток; вк- включения

Таблица 4.6. Состав клинопироксена из ксенолитов вебстеритов кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная.

| № Образца | TM-147 | TM-53 | TM-53 | TM-53 | TM-68 | TM-68 | TM-68 | TM-68 | TM-68 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | к | ц | к | ц | к | ц | ц | | | | ц | ц | к | к | ц |
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 54,69 | 54,69 | 54,76 | 54,68 | 54,65 | 54,87 | 54,6 | 55,65 | 55,48 | 55,53 | 55,01 | 55,02 | 55,03 | 54,83 | 54,77 |
| TiO ₂ | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,05 |
| Al ₂ O ₃ | 0,64 | 0,63 | 0,65 | 0,64 | 0,66 | 0,66 | 0,63 | 3,26 | 3,21 | 2,83 | 0,47 | 0,5 | 0,49 | 0,47 | 0,47 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,57 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,59 | 0,56 | 0,6 | 0,8 | 0,79 | 0,86 | 0,27 | 0,26 | 0,28 | 0,27 | 0,27 |
| FeO | 3,12 | 3,12 | 3,12 | 3,11 | 3,11 | 3,12 | 3,12 | 1,5 | 1,53 | 1,52 | 3,62 | 3,63 | 3,62 | 3,62 | 3,59 |
| MnO | 0,09 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| MgO | 16,71 | 16,48 | 16,47 | 16,48 | 16,58 | 16,6 | 16,58 | 15,3 | 15,27 | 15,47 | 17,59 | 17,51 | 17,44 | 17,49 | 17,46 |
| CaO | 22,98 | 22,92 | 22,79 | 22,88 | 22,86 | 22,91 | 22,82 | 21,06 | 21,15 | 21,43 | 23,23 | 23,14 | 23,17 | 23,05 | 23,18 |
| Na ₂ O | 0,63 | 0,69 | 0,66 | 0,71 | 0,68 | 0,68 | 0,66 | 2,02 | 1,97 | 1,87 | 0,44 | 0,46 | 0,45 | 0,45 | 0,41 |
| K ₂ O | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| Total | 99,49 | 99,26 | 99,19 | 99,23 | 99,28 | 99,52 | 99,16 | 99,68 | 99,49 | 99,58 | 100,77 | 100,67 | 100,62 | 100,31 | 100,28 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 2 | 2,004 | 2,007 | 2,004 | 2,002 | 2,004 | 2,002 | 2,003 | 2,002 | 2,004 | 1,99 | 1,992 | 1,993 | 1,992 | 1,991 |
| Ti | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Al | 0,027 | 0,027 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,027 | 0,138 | 0,137 | 0,12 | 0,01 | 0,013 | 0,014 | 0,012 | 0,011 |
| Cr | 0,016 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,016 | 0,017 | 0,023 | 0,023 | 0,025 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,008 |
| Fe | 0,095 | 0,094 | 0,096 | 0,092 | 0,095 | 0,094 | 0,096 | 0,045 | 0,046 | 0,046 | 0,088 | 0,092 | 0,095 | 0,092 | 0,092 |
| Mn | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Mg | 0,911 | 0,9 | 0,899 | 0,9 | 0,905 | 0,904 | 0,906 | 0,821 | 0,821 | 0,832 | 0,948 | 0,945 | 0,941 | 0,947 | 0,946 |
| Ca | 0,9 | 0,9 | 0,895 | 0,899 | 0,897 | 0,897 | 0,897 | 0,812 | 0,818 | 0,829 | 0,9 | 0,897 | 0,899 | 0,897 | 0,903 |
| Na | 0,045 | 0,049 | 0,047 | 0,05 | 0,048 | 0,048 | 0,047 | 0,141 | 0,138 | 0,131 | 0,031 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,029 |
| K ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe ₃₊ | 0 | 0,002 | 0 | 0,003 | 0 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,021 | 0,018 | 0,014 | 0,018 | 0,017 |
| Total | 3,999 | 3,997 | 3,993 | 3,998 | 3,998 | 3,997 | 3,997 | 3,986 | 3,986 | 3,988 | 4,001 | 4,001 | 4 | 4,001 | 3,999 |
| X mg | 90,56 | 90,54 | 90,35 | 90,73 | 90,50 | 90,58 | 90,42 | 94,80 | 94,69 | 94,76 | 91,51 | 91,13 | 90,83 | 91,15 | 91,14 |
| X ca | 49,70 | 50,00 | 49,89 | 49,97 | 49,78 | 49,81 | 49,75 | 49,72 | 49,91 | 49,91 | 48,70 | 48,70 | 48,86 | 48,64 | 48,84 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 85,76 | 86,51 | 86 | 86,35 | 85,78 | 85,92 | 85,69 | 80,67 | 81,35 | 82,15 | 84,36 | 83,95 | 84,18 | 83,82 | 84,64 |
| Ur | 1,57 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,63 | 1,55 | 1,66 | 2,26 | 2,24 | 2,43 | 0,72 | 0,7 | 0,75 | 0,72 | 0,73 |
| Jd | 2,6 | 2,62 | 2,7 | 2,66 | 2,72 | 2,72 | 2,6 | 11,74 | 11,47 | 10,54 | 0,92 | 1,2 | 1,28 | 1,11 | 1 |
| Aeg | 0 | 0,16 | 0 | 0,31 | 0 | 0,13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,24 | 1,12 | 0,93 | 1,13 | 0,98 |
| Fs | 9,09 | 9,03 | 9,19 | 8,85 | 9,11 | 9 | 9,14 | 4,48 | 4,59 | 4,55 | 8,27 | 8,62 | 8,92 | 8,58 | 8,62 |
| Clen | 0,98 | 0,01 | 0,44 | 0,16 | 0,75 | 0,67 | 0,9 | 0,84 | 0,34 | 0,33 | 4,49 | 4,41 | 3,95 | 4,64 | 4,03 |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | TM-68 к | TM-68 ц | TM-68 к | TM-68 ц | TM-68 ц | TM-68 к | TM-68 к | TM-68 ц | TM-68 к | TM-68 ц | TM-56 к | TM-56 ц | TM-56 ц | TM-56 к | TM-56 ц |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 54,96 | 54,84 | 54,88 | 54,88 | 54,88 | 54,71 | 54,81 | 54,79 | 54,45 | 54,83 | 54,84 | 54,92 | 54,63 | 54,68 | 54,79 |
| TiO2 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| Al2O3 | 0,48 | 0,49 | 0,47 | 0,49 | 0,5 | 0,46 | 0,48 | 0,48 | 0,49 | 0,47 | 0,49 | 0,53 | 0,47 | 0,49 | 0,49 |
| Cr2O3 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,28 | 0,26 | 0,28 | 0,37 | 0,39 | 0,36 | 0,37 | 0,4 |
| FeO | 3,63 | 3,63 | 3,62 | 3,63 | 3,62 | 3,61 | 3,6 | 3,6 | 3,58 | 3,63 | 3,22 | 3,26 | 3,2 | 3,23 | 3,2 |
| MnO | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,1 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| MgO | 17,39 | 17,59 | 17,35 | 17,37 | 17,51 | 17,53 | 17,48 | 17,59 | 17,48 | 17,47 | 17,58 | 17,65 | 17,59 | 17,67 | 17,73 |
| CaO | 23,25 | 23,3 | 23,18 | 23,17 | 23,21 | 23,15 | 23,18 | 23,27 | 23,2 | 23,19 | 23,24 | 23,13 | 23,17 | 23,23 | 23,29 |
| Na2O | 0,44 | 0,46 | 0,44 | 0,46 | 0,45 | 0,45 | 0,44 | 0,45 | 0,4 | 0,46 | 0,48 | 0,49 | 0,42 | 0,43 | 0,44 |
| K2O | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 |
| Total | 100,55 | 100,71 | 100,31 | 100,42 | 100,58 | 100,32 | 100,39 | 100,58 | 100 | 100,47 | 100,36 | 100,52 | 99,96 | 100,23 | 100,48 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,992 | 1,986 | 1,994 | 1,992 | 1,989 | 1,988 | 1,99 | 1,987 | 1,986 | 1,99 | 1,989 | 1,989 | 1,989 | 1,987 | 1,986 |
| Ti | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Al | 0,013 | 0,007 | 0,014 | 0,013 | 0,011 | 0,008 | 0,011 | 0,007 | 0,007 | 0,01 | 0,01 | 0,011 | 0,009 | 0,008 | 0,007 |
| Cr | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0,011 | 0,011 | 0,01 | 0,011 | 0,011 |
| Fe | 0,094 | 0,081 | 0,095 | 0,093 | 0,088 | 0,085 | 0,089 | 0,081 | 0,084 | 0,088 | 0,077 | 0,078 | 0,079 | 0,075 | 0,073 |
| Mn | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Mg | 0,94 | 0,949 | 0,939 | 0,94 | 0,946 | 0,95 | 0,946 | 0,951 | 0,95 | 0,945 | 0,95 | 0,953 | 0,955 | 0,957 | 0,958 |
| Ca | 0,903 | 0,904 | 0,902 | 0,901 | 0,901 | 0,902 | 0,902 | 0,904 | 0,907 | 0,902 | 0,903 | 0,897 | 0,904 | 0,904 | 0,904 |
| Na | 0,031 | 0,032 | 0,031 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,031 | 0,032 | 0,028 | 0,032 | 0,034 | 0,034 | 0,03 | 0,03 | 0,031 |
| K2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe3+ | 0,016 | 0,029 | 0,015 | 0,017 | 0,022 | 0,025 | 0,02 | 0,029 | 0,025 | 0,022 | 0,021 | 0,02 | 0,018 | 0,023 | 0,024 |
| Total | 4,001 | 4,001 | 4,001 | 4,001 | 4 | 4,001 | 4 | 4,001 | 3,999 | 4,001 | 4 | 3,999 | 3,998 | 3,998 | 3,998 |
| X mg | 90,91 | 92,14 | 90,81 | 91,00 | 91,49 | 91,79 | 91,40 | 92,15 | 91,88 | 91,48 | 92,50 | 92,43 | 92,36 | 92,73 | 92,92 |
| X ca | 49,00 | 48,79 | 49,00 | 48,94 | 48,78 | 48,70 | 48,81 | 48,73 | 48,84 | 48,84 | 48,73 | 48,49 | 48,63 | 48,58 | 48,55 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 84,84 | 85,11 | 84,67 | 84,59 | 84,62 | 84,59 | 84,61 | 85,07 | 85,35 | 84,68 | 85,12 | 84,24 | 85,02 | 85,13 | 85,23 |
| Ur | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,76 | 0,71 | 0,75 | 1 | 1,05 | 0,97 | 1 | 1,08 |
| Jd | 1,21 | 0,67 | 1,31 | 1,22 | 0,99 | 0,77 | 1 | 0,68 | 0,65 | 0,93 | 0,98 | 1,07 | 0,89 | 0,71 | 0,63 |
| Aeg | 1 | 1,67 | 0,9 | 1,09 | 1,25 | 1,48 | 1,18 | 1,54 | 1,31 | 1,36 | 1,2 | 1,11 | 0,92 | 1,14 | 1,21 |
| Fs | 8,83 | 7,59 | 8,94 | 8,76 | 8,24 | 7,94 | 8,35 | 7,58 | 7,9 | 8,24 | 7,26 | 7,36 | 7,44 | 7,09 | 6,84 |
| Clen | 3,42 | 4,26 | 3,48 | 3,61 | 4,17 | 4,5 | 4,13 | 4,37 | 4,09 | 4,05 | 4,44 | 5,17 | 4,75 | 4,94 | 5,01 |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | TM-56 | TM-182 | TM-116 | TM-116 | TM-116 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | к | ц | к | к | ц | ц | к | к | к | ц | к | к | ц | ц | ц |
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 54,77 | 54,95 | 54,36 | 55,07 | 55,07 | 49,7 | 54,78 | 54,95 | 54,67 | 55,06 | 55,02 | 54,76 | 54,23 | 54,88 | 54,77 |
| TiO2 | 0,05 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,14 | 0,06 | 0,06 |
| Al2O3 | 0,49 | 0,52 | 0,59 | 0,47 | 0,48 | 0,42 | 0,49 | 0,48 | 0,51 | 0,47 | 0,46 | 0,48 | 2,63 | 0,7 | 0,71 |
| Cr2O3 | 0,4 | 0,27 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,26 | 1,35 | 0,8 | 0,81 |
| FeO | 3,31 | 3,65 | 3,67 | 3,45 | 3,48 | 3,42 | 3,5 | 3,53 | 3,65 | 3,48 | 3,47 | 3,48 | 4,21 | 2,72 | 2,72 |
| MnO | 0,08 | 0,1 | 0,1 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,06 | 0,08 |
| MgO | 17,66 | 17,71 | 17,7 | 17,61 | 17,66 | 15,17 | 17,62 | 17,69 | 17,63 | 17,67 | 17,75 | 17,75 | 15,4 | 16,95 | 17,09 |
| CaO | 23,32 | 23,13 | 22,89 | 23,16 | 23,09 | 22,94 | 23,3 | 23,15 | 23,03 | 23,27 | 23,22 | 23,24 | 19,04 | 22,81 | 22,82 |
| Na2O | 0,46 | 0,48 | 0,53 | 0,42 | 0,46 | 0,39 | 0,44 | 0,45 | 0,41 | 0,41 | 0,4 | 0,47 | 2,45 | 0,84 | 0,9 |
| K2O | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 100,55 | 100,89 | 100,16 | 100,61 | 100,67 | 92,42 | 100,52 | 100,67 | 100,34 | 100,76 | 100,71 | 100,6 | 99,56 | 99,82 | 99,96 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,985 | 1,986 | 1,98 | 1,993 | 1,992 | 1,975 | 1,987 | 1,989 | 1,986 | 1,99 | 1,99 | 1,984 | 1,981 | 1,997 | 1,992 |
| Ti | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,002 | 0,002 |
| Al | 0,006 | 0,008 | 0,005 | 0,013 | 0,012 | 0 | 0,008 | 0,009 | 0,008 | 0,01 | 0,009 | 0,005 | 0,094 | 0,027 | 0,022 |
| Cr | 0,011 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,007 | 0,039 | 0,023 | 0,023 |
| Fe | 0,073 | 0,082 | 0,07 | 0,091 | 0,088 | 0,074 | 0,079 | 0,084 | 0,088 | 0,087 | 0,085 | 0,072 | 0,077 | 0,074 | 0,06 |
| Mn | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,002 |
| Mg | 0,954 | 0,954 | 0,961 | 0,95 | 0,952 | 0,898 | 0,952 | 0,954 | 0,955 | 0,952 | 0,957 | 0,959 | 0,838 | 0,919 | 0,926 |
| Ca | 0,906 | 0,896 | 0,893 | 0,898 | 0,895 | 0,977 | 0,905 | 0,898 | 0,897 | 0,901 | 0,9 | 0,902 | 0,745 | 0,889 | 0,889 |
| Na | 0,032 | 0,034 | 0,037 | 0,029 | 0,032 | 0,03 | 0,031 | 0,032 | 0,029 | 0,029 | 0,028 | 0,033 | 0,174 | 0,059 | 0,063 |
| K2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe3+ | 0,027 | 0,028 | 0,042 | 0,013 | 0,017 | 0,04 | 0,027 | 0,023 | 0,023 | 0,018 | 0,02 | 0,033 | 0,052 | 0,009 | 0,023 |
| Total | 3,999 | 4 | 4,001 | 4 | 4 | 4,006 | 4 | 4,001 | 3,998 | 3,999 | 4 | 4,001 | 4,007 | 4,001 | 4,003 |
| X mg | 92,89 | 92,08 | 93,21 | 91,26 | 91,54 | 92,39 | 92,34 | 91,91 | 91,56 | 91,63 | 91,84 | 93,02 | 91,58 | 92,55 | 93,91 |
| X ca | 48,71 | 48,43 | 48,17 | 48,59 | 48,46 | 52,11 | 48,73 | 48,49 | 48,43 | 48,62 | 48,47 | 48,47 | 47,06 | 49,17 | 48,98 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 85,49 | 83,73 | 83,64 | 83,9 | 83,46 | 83,13 | 85,23 | 83,95 | 83,7 | 84,42 | 84,1 | 84,8 | 68,46 | 84,53 | 84,71 |
| Ur | 1,08 | 0,72 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,76 | 0,7 | 0,72 | 0,75 | 0,72 | 0,72 | 0,7 | 3,58 | 2,19 | 2,22 |
| Jd | 0,56 | 0,73 | 0,5 | 1,19 | 1,13 | 0 | 0,71 | 0,86 | 0,75 | 0,97 | 0,87 | 0,46 | 8,64 | 2,58 | 2,12 |
| Aeg | 1,41 | 1,69 | 2,25 | 0,81 | 1,13 | 2,02 | 1,5 | 1,37 | 1,19 | 1 | 1,03 | 1,94 | 3,72 | 0,83 | 1,7 |
| Fs | 6,9 | 7,69 | 6,55 | 8,52 | 8,21 | 6,84 | 7,44 | 7,82 | 8,18 | 8,15 | 7,96 | 6,81 | 7,04 | 7,04 | 5,71 |
| Clen | 4,56 | 5,44 | 6,32 | 4,83 | 5,32 | 0 | 4,42 | 5,27 | 5,42 | 4,74 | 5,32 | 5,28 | 8,56 | 2,84 | 3,53 |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | TM-116 | TM-116 | TM-116 | TM-116 | TM-74 | TM-74 | TM-74 | TM-74 | TM-91 | TM-91 | TM-91 | TM-91 | TM-91 | TM-91 | TM-91 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | ц | к | к | ц | ц | ц | ц | к | к | к | ц | к | ц | ц | ц |
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 54,37 | 54,74 | 54,71 | 54,65 | 54,53 | 55,39 | 54,66 | 54,77 | 54,52 | 55,18 | 54,61 | 56,13 | 55,61 | 55,77 | 55,28 |
| TiO2 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,34 | 0,36 | 0,33 | 0,33 | 0,36 | 0,32 | 0,65 |
| Al2O3 | 0,69 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,62 | 0,64 | 0,65 | 0,64 | 6,28 | 6,55 | 6,56 | 6,5 | 6,54 | 6,57 | 6,49 |
| Cr2O3 | 0,8 | 0,81 | 0,81 | 0,78 | 0,52 | 0,53 | 0,53 | 0,47 | 0,28 | 0,22 | 0,26 | 0,31 | 0,23 | 0,21 | 0,21 |
| FeO | 2,8 | 2,72 | 2,71 | 2,78 | 3,07 | 3,19 | 3,11 | 3,12 | 2,16 | 2,14 | 2,07 | 2,05 | 2,13 | 2,17 | 2,51 |
| MnO | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,12 | 0,13 | 0,09 | 0 | 0 | 0,07 | 0 | 0,09 | 0 | 0 | 0 |
| MgO | 16,8 | 16,9 | 16,8 | 16,88 | 17,23 | 17,49 | 17,29 | 17,14 | 13,52 | 13,53 | 13,3 | 13,91 | 13,74 | 13,6 | 13,77 |
| CaO | 22,96 | 22,92 | 22,91 | 22,8 | 23,02 | 23,02 | 23,13 | 23,14 | 17,81 | 17,71 | 17,58 | 18,23 | 17,98 | 17,95 | 17,21 |
| Na2O | 0,81 | 0,85 | 0,84 | 0,8 | 0,54 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 3,77 | 3,85 | 3,83 | 3,85 | 3,87 | 3,84 | 3,96 |
| K2O | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 99,36 | 99,77 | 99,6 | 99,51 | 99,65 | 100,95 | 100,02 | 99,84 | 98,68 | 99,61 | 98,54 | 101,4 | 100,46 | 100,43 | 100,08 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,991 | 1,995 | 1,996 | 1,996 | 1,991 | 1,995 | 1,989 | 1,995 | 1,974 | 1,977 | 1,977 | 1,976 | 1,976 | 1,981 | 1,972 |
| Ti | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,009 | 0,01 | 0,009 | 0,009 | 0,01 | 0,009 | 0,017 |
| Al | 0,021 | 0,025 | 0,027 | 0,026 | 0,018 | 0,022 | 0,017 | 0,022 | 0,242 | 0,254 | 0,257 | 0,246 | 0,25 | 0,256 | 0,245 |
| Cr | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,014 | 0,008 | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,006 | 0,006 | 0,006 |
| Fe | 0,067 | 0,069 | 0,073 | 0,076 | 0,08 | 0,089 | 0,077 | 0,087 | 0,044 | 0,053 | 0,053 | 0,046 | 0,048 | 0,06 | 0,059 |
| Mn | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0 | 0 | 0,002 | 0 | 0,003 | 0 | 0 | 0 |
| Mg | 0,917 | 0,918 | 0,914 | 0,919 | 0,938 | 0,939 | 0,938 | 0,93 | 0,73 | 0,722 | 0,718 | 0,73 | 0,728 | 0,72 | 0,732 |
| Ca | 0,901 | 0,895 | 0,896 | 0,892 | 0,901 | 0,888 | 0,902 | 0,903 | 0,691 | 0,68 | 0,682 | 0,688 | 0,685 | 0,683 | 0,658 |
| Na | 0,058 | 0,06 | 0,059 | 0,057 | 0,038 | 0,039 | 0,04 | 0,04 | 0,265 | 0,267 | 0,269 | 0,263 | 0,267 | 0,264 | 0,274 |
| K2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe3+ | 0,019 | 0,014 | 0,01 | 0,009 | 0,014 | 0,007 | 0,018 | 0,008 | 0,021 | 0,011 | 0,009 | 0,014 | 0,015 | 0,005 | 0,015 |
| Total | 4,001 | 4,002 | 4,001 | 4,001 | 3,998 | 3,998 | 3,998 | 3,999 | 3,984 | 3,982 | 3,981 | 3,984 | 3,985 | 3,984 | 3,978 |
| X mg | 93,19 | 93,01 | 92,60 | 92,36 | 92,14 | 91,34 | 92,41 | 91,45 | 94,32 | 93,16 | 93,13 | 94,07 | 93,81 | 92,31 | 92,54 |
| X ca | 49,56 | 49,37 | 49,50 | 49,25 | 48,99 | 48,60 | 49,02 | 49,26 | 48,63 | 48,50 | 48,71 | 48,52 | 48,48 | 48,68 | 47,34 |
| Минералы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 86,51 | 85,52 | 85,65 | 84,9 | 85,33 | 83,26 | 85,58 | 85,48 | 66,55 | 65,2 | 65,58 | 66,2 | 65,69 | 65,43 | 62,17 |
| Ur | 2,22 | 2,23 | 2,23 | 2,14 | 1,42 | 1,41 | 1,45 | 1,28 | 0,77 | 0,6 | 0,72 | 0,83 | 0,62 | 0,56 | 0,56 |
| Jd | 2,02 | 2,35 | 2,53 | 2,48 | 1,7 | 2,07 | 1,62 | 2,13 | 23,35 | 24,32 | 24,72 | 23,69 | 23,96 | 24,51 | 23,18 |
| Aeg | 1,28 | 1,16 | 0,91 | 0,77 | 0,5 | 0,18 | 0,68 | 0,33 | 1,37 | 0,73 | 0,42 | 0,78 | 1 | 0,25 | 1,46 |
| Fs | 6,44 | 6,55 | 6,96 | 7,19 | 7,55 | 8,35 | 7,28 | 8,19 | 4,25 | 5,07 | 5,14 | 4,44 | 4,59 | 5,73 | 5,62 |
| Clen | 1,53 | 2,19 | 1,71 | 2,52 | 3,5 | 4,72 | 3,4 | 2,58 | 3,72 | 4,08 | 3,43 | 4,06 | 4,13 | 3,52 | 7,02 |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | ТМ-91 ц | ТО-22 св.уч | ТО-22 | ТО-22 | ТО-22 к | ТО-22 ц | ТО-22 к | ТО-22 | ТО-22 к | ТО-22 ц | ТО-22 | ТО-22 | ТО-22 | ТО-22 | ТО-22 |
|--------------------------------------|------------|----------------|-------|-------|------------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 56,24 | 51,25 | 53,8 | 54,36 | 54,58 | 54,68 | 54,79 | 54,34 | 55,12 | 54,91 | 54,86 | 54,98 | 54,01 | 52,74 | 53,43 |
| TiO2 | 0,37 | 0,1 | 0,26 | 0,17 | 0,2 | 0,16 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,23 | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,93 | 0,27 |
| Al2O3 | 6,58 | 4,95 | 1,86 | 1,89 | 6,1 | 6,22 | 6,19 | 6,19 | 6,33 | 6,1 | 6,04 | 6,08 | 2,82 | 3,78 | 3,97 |
| Cr2O3 | 0,2 | 0,3 | 0,48 | 0,48 | 0,38 | 0,45 | 0,45 | 0,35 | 0,42 | 0,36 | 0,31 | 0,37 | 0,52 | 0,32 | 0,46 |
| FeO | 2,14 | 6,56 | 4,43 | 4,33 | 4,3 | 3,71 | 4,09 | 4,32 | 3,84 | 4,13 | 4,37 | 4,43 | 4,69 | 5,51 | 4,55 |
| MnO | 0 | 0,21 | 0 | 0,07 | 0,09 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 0 | 0 | 0,09 | 0 | 0,09 | 0,08 |
| MgO | 13,92 | 14,45 | 16,6 | 16,37 | 13,66 | 13,44 | 13,44 | 13,91 | 13,58 | 13,72 | 13,7 | 13,7 | 16,15 | 15,24 | 14,88 |
| CaO | 18,25 | 19,92 | 20,56 | 20,88 | 16,49 | 16,88 | 16,57 | 15,84 | 16,85 | 16,66 | 16,57 | 16,6 | 19,19 | 18,56 | 19,39 |
| Na2O | 3,81 | 1,05 | 1,41 | 1,4 | 3,47 | 3,47 | 3,53 | 3,37 | 3,4 | 3,42 | 3,41 | 3,38 | 1,64 | 1,92 | 2,14 |
| K2O | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,04 | 0,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 101,51 | 98,79 | 99,4 | 99,95 | 99,27 | 99,05 | 99,28 | 98,5 | 99,77 | 99,53 | 99,51 | 99,88 | 99,28 | 99,09 | 99,17 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,977 | 1,906 | 1,972 | 1,98 | 1,976 | 1,979 | 1,981 | 1,977 | 1,98 | 1,979 | 1,98 | 1,978 | 1,974 | 1,94 | 1,958 |
| Ti | 0,01 | 0,003 | 0,007 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,006 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,026 | 0,007 |
| Al | 0,25 | 0,123 | 0,052 | 0,062 | 0,236 | 0,245 | 0,244 | 0,243 | 0,248 | 0,239 | 0,237 | 0,236 | 0,096 | 0,104 | 0,129 |
| Cr | 0,006 | 0,009 | 0,014 | 0,014 | 0,011 | 0,013 | 0,013 | 0,01 | 0,012 | 0,01 | 0,009 | 0,011 | 0,015 | 0,009 | 0,013 |
| Fe | 0,055 | 0,172 | 0,088 | 0,098 | 0,12 | 0,112 | 0,124 | 0,131 | 0,115 | 0,125 | 0,132 | 0,133 | 0,126 | 0,138 | 0,103 |
| Mn | 0 | 0,007 | 0 | 0,002 | 0,003 | 0 | 0 | 0 | 0,002 | 0 | 0 | 0,003 | 0 | 0,003 | 0,002 |
| Mg | 0,729 | 0,801 | 0,907 | 0,889 | 0,737 | 0,725 | 0,724 | 0,754 | 0,727 | 0,737 | 0,737 | 0,734 | 0,88 | 0,836 | 0,813 |
| Ca | 0,687 | 0,794 | 0,808 | 0,815 | 0,64 | 0,655 | 0,642 | 0,618 | 0,649 | 0,643 | 0,641 | 0,64 | 0,752 | 0,732 | 0,761 |
| Na | 0,26 | 0,076 | 0,1 | 0,099 | 0,244 | 0,244 | 0,247 | 0,238 | 0,237 | 0,239 | 0,239 | 0,236 | 0,116 | 0,137 | 0,152 |
| K2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,002 | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe3+ | 0,008 | 0,032 | 0,048 | 0,034 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,017 | 0,032 | 0,036 |
| Total | 3,982 | 3,922 | 3,996 | 3,997 | 3,981 | 3,979 | 3,981 | 3,976 | 3,974 | 3,979 | 3,98 | 3,977 | 3,983 | 3,956 | 3,976 |
| X mg | 92,98 | 82,32 | 91,16 | 90,07 | 86,00 | 86,62 | 85,38 | 85,20 | 86,34 | 85,50 | 84,81 | 84,66 | 87,48 | 85,83 | 88,76 |
| X ca | 48,52 | 49,78 | 47,11 | 47,83 | 46,48 | 47,46 | 47,00 | 45,04 | 47,17 | 46,59 | 46,52 | 46,58 | 46,08 | 46,68 | 48,35 |
| Миналы, мол. % | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 65,86 | 75,7 | 73,73 | 75,07 | 58,12 | 60,57 | 58,61 | 54,97 | 60,1 | 58,47 | 57,87 | 57,98 | 66,98 | 65,89 | 71,31 |
| Ur | 0,53 | 0,84 | 1,27 | 1,27 | 0,99 | 1,19 | 1,17 | 0,9 | 1,11 | 0,93 | 0,8 | 0,95 | 1,34 | 0,84 | 1,25 |
| Jd | 23,91 | 6,38 | 4,78 | 5,67 | 21,15 | 21,34 | 21,42 | 20,27 | 20,84 | 20,79 | 20,75 | 20,41 | 8,52 | 9,39 | 12,12 |
| Aeg | 0,44 | 0 | 3,1 | 2,17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 2,11 | 0,87 |
| Fs | 5,25 | 16,41 | 8,06 | 9,04 | 10,9 | 10,39 | 11,29 | 11,7 | 10,69 | 11,31 | 11,9 | 12,08 | 11,24 | 12,42 | 9,65 |
| Clen | 4,01 | 0,68 | 9,07 | 6,79 | 8,84 | 6,51 | 7,51 | 12,17 | 7,27 | 8,5 | 8,68 | 8,58 | 11,42 | 9,36 | 4,8 |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | ГО-29 ЛМ | ГО-69 ц | ГО-69 | ГО-69 ц | ГО-69 ц | ГО-69 | ГО-69 | ГО-138 к | ГО-138 к | ГО-138 ц | ГО-138 ц | ГО-138 к | ГО-138 ц | ГО-138 ц | ГО-138 к | ГО-138 ц |
|--------------------------------------|-------------|------------|--------|------------|------------|-------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 53,96 | 54,64 | 54,82 | 54,51 | 55,3 | 55,14 | 54,71 | 54,5 | 54,17 | 55,02 | 54,33 | 54,31 | 54,84 | 54,65 | 54,51 | 54,41 |
| TiO ₂ | 0,62 | 0,38 | 0,4 | 0,33 | 0,32 | 0,29 | 0,46 | 0,35 | 0,35 | 0,32 | 0,37 | 0,37 | 0,35 | 0,37 | 0,38 | 0,38 |
| Al ₂ O ₃ | 7,41 | 6,32 | 6,44 | 5,96 | 4,61 | 5,22 | 6,25 | 6,69 | 7,13 | 4,59 | 6,46 | 5,85 | 4,82 | 6,35 | 6,53 | 6,59 |
| Cr ₂ O ₃ | 2,65 | 0,13 | 0,19 | 0,19 | 0,21 | 0,21 | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,2 | 0,19 | 0,2 | 0,25 | 0,18 | 0,19 | 0,2 |
| FeO | 1,74 | 3,95 | 4,06 | 3,58 | 3,59 | 3,71 | 3,67 | 3,48 | 3,49 | 3,33 | 3,5 | 3,55 | 3,52 | 3,37 | 3,33 | 3,47 |
| MnO | 0 | 0,09 | 0,07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07 |
| MgO | 12,12 | 13,37 | 13,39 | 13,72 | 14,57 | 14,42 | 13,58 | 12,83 | 12,66 | 14,24 | 13,06 | 13,51 | 14,02 | 13,31 | 13,1 | 13,04 |
| CaO | 16,74 | 18,16 | 18,14 | 18,65 | 19,64 | 19,17 | 18,41 | 17,78 | 17,49 | 19,18 | 17,76 | 18,02 | 18,95 | 18,03 | 17,79 | 17,74 |
| Na ₂ O | 4,61 | 3,43 | 3,42 | 3,26 | 2,78 | 2,94 | 3,34 | 3,58 | 3,7 | 2,89 | 3,53 | 3,33 | 3,02 | 3,49 | 3,62 | 3,6 |
| K ₂ O | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 |
| Total | 99,85 | 100,47 | 100,93 | 100,2 | 101,02 | 101,1 | 100,59 | 99,45 | 99,26 | 99,83 | 99,27 | 99,21 | 99,83 | 99,8 | 99,51 | 99,51 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,938 | 1,96 | 1,958 | 1,96 | 1,976 | 1,967 | 1,958 | 1,968 | 1,959 | 1,985 | 1,967 | 1,97 | 1,98 | 1,967 | 1,967 | 1,964 |
| Ti | 0,017 | 0,01 | 0,011 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,012 | 0,01 | 0,01 | 0,009 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Al | 0,252 | 0,227 | 0,229 | 0,213 | 0,17 | 0,187 | 0,222 | 0,253 | 0,263 | 0,181 | 0,242 | 0,22 | 0,186 | 0,236 | 0,244 | 0,245 |
| Cr | 0,075 | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,005 | 0,005 | 0,006 |
| Fe | 0,031 | 0,091 | 0,098 | 0,076 | 0,083 | 0,083 | 0,088 | 0,099 | 0,093 | 0,087 | 0,092 | 0,089 | 0,087 | 0,087 | 0,085 | 0,089 |
| Mn | 0 | 0,003 | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Mg | 0,649 | 0,715 | 0,713 | 0,735 | 0,776 | 0,767 | 0,724 | 0,69 | 0,682 | 0,766 | 0,705 | 0,73 | 0,755 | 0,714 | 0,704 | 0,702 |
| Ca | 0,644 | 0,698 | 0,694 | 0,719 | 0,752 | 0,733 | 0,706 | 0,688 | 0,678 | 0,742 | 0,689 | 0,7 | 0,733 | 0,695 | 0,688 | 0,686 |
| Na | 0,321 | 0,239 | 0,237 | 0,227 | 0,193 | 0,203 | 0,232 | 0,251 | 0,26 | 0,202 | 0,248 | 0,234 | 0,211 | 0,244 | 0,253 | 0,252 |
| K ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,001 | 0 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe ³⁺ | 0,022 | 0,027 | 0,024 | 0,031 | 0,024 | 0,028 | 0,022 | 0,006 | 0,012 | 0,013 | 0,013 | 0,019 | 0,019 | 0,015 | 0,016 | 0,016 |
| Total | 3,949 | 3,974 | 3,971 | 3,975 | 3,989 | 3,982 | 3,969 | 3,971 | 3,966 | 3,992 | 3,974 | 3,98 | 3,99 | 3,975 | 3,975 | 3,973 |
| X mg | 95,44 | 88,71 | 87,92 | 90,63 | 90,34 | 90,24 | 89,16 | 87,45 | 88,00 | 89,80 | 88,46 | 89,13 | 89,67 | 89,14 | 89,23 | 88,75 |
| X ca | 49,81 | 49,40 | 49,32 | 49,45 | 49,21 | 48,87 | 49,37 | 49,93 | 49,85 | 49,20 | 49,43 | 48,95 | 49,26 | 49,33 | 49,43 | 49,42 |
| Миналы, мол. % | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 64,4 | 66,82 | 66,29 | 69,17 | 71,48 | 69,61 | 67,64 | 66,15 | 65,49 | 70,46 | 65,93 | 66,51 | 69,63 | 66,6 | 65,99 | 65,85 |
| Ur | 7,52 | 0,35 | 0,51 | 0,52 | 0,56 | 0,56 | 0,46 | 0,47 | 0,5 | 0,54 | 0,52 | 0,54 | 0,68 | 0,49 | 0,52 | 0,55 |
| Jd | 24,57 | 21,75 | 21,84 | 20,47 | 16,15 | 17,73 | 21,25 | 23,64 | 24,57 | 17,15 | 23,18 | 20,86 | 17,63 | 22,65 | 23,46 | 23,5 |
| Aeg | 0 | 0,74 | 0,26 | 0,89 | 1,6 | 1,02 | 0,49 | 0 | 0 | 1,26 | 0,02 | 0,84 | 1,78 | 0,19 | 0,32 | 0,13 |
| Fs | 3,06 | 8,73 | 9,33 | 7,34 | 7,93 | 7,85 | 8,4 | 9,5 | 9 | 8,29 | 8,85 | 8,41 | 8,27 | 8,29 | 8,11 | 8,49 |
| Clen | 0,45 | 1,6 | 1,77 | 1,61 | 2,27 | 3,22 | 1,76 | 0,24 | 0,44 | 2,3 | 1,5 | 2,84 | 2,02 | 1,78 | 1,6 | 1,47 |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | ТО-16 ВК | ТО-16 ц | ТО-16 к | ТО-16 к | ТО-16 ц | ТО-16 ц | ТО-16 к | ТО-16 ц | ТО-16 ц | ТО-16 ц | ТО-16 ц | ТО-16 ц | ТО-16 к | ТО-16 ц | ТО-16 ц | |
|--------------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 54,28 | 55,71 | 55,17 | 55,22 | 55,19 | 54,76 | 56,26 | 55,48 | 56,03 | 53,24 | 54,57 | 55,05 | 54,8 | 54,89 | 54,53 | 54,42 |
| TiO2 | 0,17 | 0,05 | 0,42 | 0,04 | 0,17 | 0 | 0 | 0,17 | 0,2 | 0,15 | 0,29 | 0,41 | 0,48 | 0,29 | 0 | 0,05 |
| Al2O3 | 2,67 | 7,64 | 6,76 | 6,55 | 7,18 | 7,4 | 6,73 | 7,12 | 7,08 | 6,79 | 6,53 | 6,97 | 7,18 | 7,35 | 6,47 | 7,02 |
| Cr2O3 | 0,49 | 0,43 | 0,15 | 0,15 | 0,34 | 0,64 | 0,25 | 0,29 | 0,36 | 0,25 | 0,24 | 0,29 | 0,06 | 0,48 | 0,52 | 0,26 |
| FeO | 4,29 | 3,78 | 3,9 | 4,05 | 3,66 | 3,57 | 2,49 | 3,33 | 3,57 | 4,09 | 4,4 | 3,2 | 3,05 | 2,89 | 3,62 | 3,45 |
| MnO | 0,21 | 0,19 | 0 | 0,4 | 0 | 0,02 | 0,02 | 0 | 0,06 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 0 | 0,26 | 0,18 |
| MgO | 15,97 | 12,37 | 11,82 | 12,77 | 12,19 | 11,85 | 11,96 | 12,77 | 12,33 | 12,51 | 11,58 | 12 | 11,37 | 12,13 | 12,88 | 12,2 |
| CaO | 20,85 | 15,86 | 17,14 | 17,56 | 16,87 | 16,23 | 16,86 | 17,15 | 17,48 | 16,52 | 15,97 | 16,38 | 16,66 | 16,59 | 17,17 | 17,36 |
| Na2O | 1,07 | 4,45 | 4,98 | 5,06 | 4,42 | 4,33 | 4,76 | 4,6 | 4,22 | 4,33 | 4,93 | 4,44 | 4,17 | 4,34 | 4,16 | 4 |
| K2O | 0,01 | 0,09 | 0,03 | 0 | 0 | 0,08 | 0,14 | 0,02 | 0 | 0,19 | 0 | 0 | 0,05 | 0,15 | 0 | 0 |
| Total | 100,01 | 100,57 | 100,37 | 101,8 | 100,02 | 98,88 | 99,47 | 100,93 | 101,33 | 98,07 | 98,51 | 98,74 | 98,02 | 99,11 | 99,61 | 98,94 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,973 | 1,982 | 1,98 | 1,964 | 1,979 | 1,983 | 2,016 | 1,972 | 1,983 | 1,959 | 1,994 | 1,992 | 1,997 | 1,98 | 1,971 | 1,975 |
| Ti | 0,005 | 0,001 | 0,011 | 0,001 | 0,005 | 0 | 0 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,008 | 0,011 | 0,013 | 0,008 | 0 | 0,001 |
| Al | 0,087 | 0,303 | 0,266 | 0,238 | 0,283 | 0,299 | 0,284 | 0,27 | 0,278 | 0,253 | 0,275 | 0,289 | 0,305 | 0,292 | 0,247 | 0,275 |
| Cr | 0,014 | 0,012 | 0,004 | 0,004 | 0,01 | 0,018 | 0,007 | 0,008 | 0,01 | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,002 | 0,014 | 0,015 | 0,007 |
| Fe | 0,13 | 0,105 | 0,043 | 0 | 0,083 | 0,105 | 0,035 | 0,041 | 0,098 | 0,044 | 0,076 | 0,097 | 0,093 | 0,085 | 0,051 | 0,084 |
| Mn | 0,006 | 0,006 | 0 | 0,012 | 0 | 0,001 | 0,001 | 0 | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0,006 | 0 | 0,008 | 0,006 |
| Mg | 0,865 | 0,656 | 0,632 | 0,677 | 0,651 | 0,64 | 0,639 | 0,676 | 0,65 | 0,686 | 0,63 | 0,647 | 0,617 | 0,652 | 0,694 | 0,66 |
| Ca | 0,812 | 0,605 | 0,659 | 0,669 | 0,648 | 0,63 | 0,647 | 0,653 | 0,663 | 0,651 | 0,625 | 0,635 | 0,65 | 0,641 | 0,665 | 0,675 |
| Na | 0,075 | 0,307 | 0,347 | 0,349 | 0,307 | 0,304 | 0,331 | 0,317 | 0,29 | 0,309 | 0,349 | 0,312 | 0,295 | 0,304 | 0,292 | 0,281 |
| K2 | 0 | 0,004 | 0,001 | 0 | 0 | 0,004 | 0,006 | 0,001 | 0 | 0,009 | 0 | 0 | 0,002 | 0,007 | 0 | 0 |
| Fe3+ | 0 | 0,008 | 0,074 | 0,12 | 0,027 | 0,003 | 0,039 | 0,058 | 0,008 | 0,082 | 0,058 | 0 | 0 | 0,002 | 0,059 | 0,021 |
| Total | 3,969 | 3,988 | 4,018 | 4,034 | 3,993 | 3,987 | 4,007 | 4,001 | 3,987 | 4,004 | 4,023 | 3,992 | 3,98 | 3,984 | 4,001 | 3,985 |
| X mg | 86,93 | 86,20 | 93,63 | 100,00 | 88,69 | 85,91 | 94,81 | 94,28 | 86,90 | 93,97 | 89,24 | 86,96 | 86,90 | 88,47 | 93,15 | 88,71 |
| X ca | 48,42 | 47,98 | 51,05 | 49,70 | 49,88 | 49,61 | 50,31 | 49,13 | 50,50 | 48,69 | 49,80 | 49,53 | 51,30 | 49,57 | 48,93 | 50,56 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 75,83 | 56,62 | 60,42 | 65,23 | 62,23 | 60,07 | 63,03 | 63,12 | 61,91 | 62,67 | 59,73 | 60,97 | 59,48 | 61,62 | 64,19 | 63,44 |
| Ur | 1,31 | 1,13 | 0,41 | 0,41 | 0,93 | 1,75 | 0,7 | 0,79 | 0,96 | 0,7 | 0,66 | 0,8 | 0,17 | 1,32 | 1,43 | 0,72 |
| Jd | 5,73 | 27,62 | 25,41 | 23,21 | 27,12 | 27,25 | 28,05 | 26,11 | 26,49 | 24,36 | 26,25 | 27,79 | 28,22 | 27,85 | 23,82 | 26,35 |
| Aeg | 0 | 0 | 7,06 | 10,39 | 1,46 | 0 | 3,89 | 3,74 | 0,12 | 4,67 | 5,54 | 0 | 0 | 0 | 2,89 | 0 |
| Fs | 12,18 | 9,83 | 4,12 | 0 | 7,95 | 10 | 3,48 | 3,99 | 9,33 | 4,26 | 7,31 | 9,3 | 8,95 | 8,17 | 4,88 | 8,03 |
| Clen | 4,95 | 4,8 | 0 | 0,75 | 0,31 | 0,93 | 0 | 2,25 | 0 | 3,34 | 0,51 | 1,16 | 0 | 1,04 | 2,78 | 0 |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | ГО-16 ВК | ГО-16 ВК | ГО-16 ВК | ГО-16 ВК | ГО-42 ц | ГО-42 к | ГО-42 ц | ГО-42 к | ГО-42 ц | ГО-42 ц | ГО-42 к | ГО-42 ц | ГО-42 к | ГО-42 к | ГО-42 ц | ГО-42 к | ГО-42 к | ГО-42 к |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 52,52 | 51,74 | 53,45 | 53,18 | 53,55 | 54,21 | 53,87 | 54,19 | 53,75 | 54,48 | 54,3 | 54,29 | 54,22 | 54,29 | 54,04 | 53,93 | 53,42 | |
| TiO2 | 0 | 0,16 | 0 | 0 | 0,12 | 0,09 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0 | 0,14 | 0,06 | 0 | 0,53 | 0,43 | 0,55 | 0,44 | |
| Al2O3 | 3,07 | 3,06 | 2,44 | 2,81 | 1,57 | 1,19 | 1,19 | 1,42 | 1,55 | 1,92 | 1,42 | 1,73 | 1,4 | 2,27 | 1,94 | 1,5 | 1,37 | |
| Cr2O3 | 0,54 | 0,28 | 0,31 | 0,3 | 0,31 | 0,07 | 0,37 | 0,04 | 0,11 | 0,09 | 0,33 | 0 | 0,22 | 0,09 | 0 | 0,07 | 0 | |
| FeO | 4,02 | 5,23 | 5,72 | 5,79 | 5,32 | 5,65 | 5,14 | 4,95 | 5,36 | 5,39 | 5,37 | 5,45 | 5,21 | 6,33 | 6,3 | 6,18 | 5,6 | |
| MnO | 0,08 | 0,06 | 0,11 | 0,35 | 0,03 | 0 | 0 | 0,03 | 0,21 | 0,19 | 0 | 0 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | |
| MgO | 15,02 | 14,31 | 14,69 | 14,8 | 15,32 | 15,59 | 15,41 | 15,45 | 15,55 | 15,25 | 15,39 | 15,39 | 15,75 | 16,36 | 16,48 | 16,46 | 15,68 | |
| CaO | 21,5 | 19,33 | 18,91 | 19,81 | 22,31 | 22,75 | 22,09 | 22,37 | 21,74 | 21,96 | 21,99 | 22,55 | 22,78 | 18,23 | 18,92 | 19,5 | 20,93 | |
| Na2O | 1,51 | 2,08 | 2,54 | 1,95 | 0,9 | 0,87 | 0,94 | 0,87 | 0,84 | 1,01 | 0,92 | 1,17 | 1,2 | 1,85 | 1,56 | 1,47 | 1,43 | |
| K2O | 0 | 0,04 | 0 | 0,04 | 0,02 | 0,07 | 0 | 0,09 | 0,06 | 0 | 0,17 | 0,15 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Total | 98,26 | 96,29 | 98,17 | 99,03 | 99,45 | 100,49 | 99,09 | 99,45 | 99,21 | 100,29 | 100,03 | 100,79 | 100,94 | 100,1 | 99,83 | 99,82 | 99,03 | |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,952 | 1,965 | 1,991 | 1,969 | 1,977 | 1,984 | 1,992 | 1,994 | 1,986 | 1,989 | 1,99 | 1,979 | 1,975 | 1,984 | 1,978 | 1,978 | 1,979 | |
| Ti | 0 | 0,005 | 0 | 0 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0 | 0,004 | 0,002 | 0 | 0,013 | 0,012 | 0,015 | 0,012 | |
| Al | 0,087 | 0,102 | 0,098 | 0,092 | 0,045 | 0,035 | 0,044 | 0,056 | 0,053 | 0,071 | 0,052 | 0,053 | 0,035 | 0,136 | 0,062 | 0,043 | 0,039 | |
| Cr | 0,016 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,002 | 0,011 | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,01 | 0 | 0,006 | 0,002 | 0 | 0,002 | 0 | |
| Fe | 0,071 | 0,098 | 0,093 | 0,109 | 0,138 | 0,137 | 0,143 | 0,143 | 0,15 | 0,156 | 0,158 | 0,119 | 0,091 | 0,14 | 0,146 | 0,139 | 0,114 | |
| Mn | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,011 | 0,001 | 0 | 0 | 0,001 | 0,007 | 0,006 | 0 | 0 | 0,004 | 0,003 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | |
| Mg | 0,832 | 0,81 | 0,815 | 0,817 | 0,843 | 0,85 | 0,849 | 0,847 | 0,856 | 0,83 | 0,841 | 0,836 | 0,855 | 0,879 | 0,899 | 0,9 | 0,866 | |
| Ca | 0,856 | 0,787 | 0,755 | 0,786 | 0,883 | 0,892 | 0,875 | 0,882 | 0,861 | 0,859 | 0,864 | 0,881 | 0,889 | 0,618 | 0,742 | 0,766 | 0,831 | |
| Na | 0,109 | 0,153 | 0,183 | 0,14 | 0,064 | 0,062 | 0,067 | 0,062 | 0,06 | 0,071 | 0,065 | 0,083 | 0,085 | 0,188 | 0,111 | 0,105 | 0,103 | |
| K2 | 0 | 0,002 | 0 | 0,002 | 0,001 | 0,003 | 0 | 0,004 | 0,003 | 0 | 0,008 | 0,007 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Fe3+ | 0,054 | 0,068 | 0,085 | 0,07 | 0,026 | 0,036 | 0,016 | 0,009 | 0,016 | 0,009 | 0,006 | 0,047 | 0,068 | 0,041 | 0,047 | 0,051 | 0,059 | |
| Total | 3,979 | 4 | 4,034 | 4,005 | 3,991 | 4,003 | 4 | 4,001 | 3,995 | 3,993 | 3,997 | 4,006 | 4,01 | 4,005 | 4,002 | 4,004 | 4,009 | |
| X mg | 92,14 | 89,21 | 89,76 | 88,23 | 85,93 | 86,12 | 85,58 | 85,56 | 85,09 | 84,18 | 84,18 | 87,54 | 90,38 | 86,26 | 86,03 | 86,62 | 88,37 | |
| X ca | 50,71 | 49,28 | 48,09 | 49,03 | 51,16 | 51,21 | 50,75 | 51,01 | 50,15 | 50,86 | 50,67 | 51,31 | 50,97 | 41,28 | 45,22 | 45,98 | 48,97 | |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 80,32 | 74,14 | 69,12 | 73,72 | 77,7 | 77,96 | 78,23 | 77,92 | 79,98 | 76,38 | 77,32 | 77,26 | 80,32 | 51,61 | 64,32 | 67,56 | 77,04 | |
| Ur | 1,53 | 0,79 | 0,84 | 0,82 | 0,83 | 0,19 | 1 | 0,11 | 0,3 | 0,24 | 0,88 | 0 | 0,6 | 0,17 | 0 | 0,18 | 0 | |
| Jd | 8,36 | 9,63 | 8,99 | 8,63 | 4,18 | 3,21 | 4,05 | 5,11 | 4,97 | 6,34 | 4,74 | 4,91 | 3,31 | 11,35 | 5,36 | 3,79 | 3,64 | |
| Aeg | 0,61 | 4,01 | 6,98 | 3,68 | 0,93 | 2,26 | 1,16 | 0,49 | 0,35 | 0 | 0,39 | 2,73 | 4,06 | 3,42 | 4,07 | 4,5 | 5,52 | |
| Fs | 6,83 | 9,23 | 8,51 | 10,27 | 12,7 | 12,55 | 13,17 | 13,17 | 13,99 | 14,34 | 14,55 | 10,96 | 8,51 | 11,71 | 12,65 | 12,21 | 10,57 | |
| Clen | 0 | 2,2 | 5,56 | 2,88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21,75 | 13,6 | 11,76 | 3,23 | |

Продолжение таблицы 4.6

| № Образца | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-84 | ТМ-137 | ТМ-137 | ТМ-137 | ТМ-137 | ТО-131 | ТО-131 | ТО-131 | ТО-131 | ТО-131 |
|--------------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | к | к | к | ц | ц | к | ц | к | к | ц | к | ц | ц | ц | ц | к | к | ц |
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO2 | 53,91 | 53,84 | 54,63 | 53,3 | 52,76 | 54,38 | 53,53 | 53,3 | 54,52 | 54,56 | 54,76 | 54,54 | 53,34 | 54,55 | 54,1 | 53,92 | 53,66 | |
| TiO2 | 0,6 | 0,43 | 0 | 0,34 | 0,55 | 0,49 | 0,28 | 0,46 | 0,48 | 0,41 | 0,42 | 0,39 | 1,91 | 0,28 | 0,39 | 0,49 | 0,59 | |
| Al2O3 | 1,91 | 1,63 | 0,3 | 1,47 | 1,96 | 1,26 | 1,61 | 1,75 | 3,13 | 2,86 | 2,78 | 2,58 | 6,65 | 6,02 | 5,86 | 6,34 | 7,09 | |
| Cr2O3 | 0 | 0,08 | 0 | 0 | 0,07 | 0,08 | 0 | 0 | 0,19 | 0,21 | 0,19 | 0,19 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | |
| FeO | 5,99 | 5,82 | 6,57 | 5,75 | 3,89 | 2,96 | 4,59 | 3,5 | 5,82 | 5,77 | 5,76 | 5,73 | 2,79 | 3,71 | 2,8 | 2,88 | 2,81 | |
| MnO | 0,12 | 0,1 | 0,57 | 0,21 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,09 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | 0,12 | 0,04 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | |
| MgO | 16,37 | 15,69 | 14,54 | 14,54 | 15,67 | 16,98 | 15,59 | 16,17 | 16,65 | 16,93 | 17 | 17,4 | 13,28 | 17,53 | 13,84 | 13,53 | 13,12 | |
| CaO | 19,69 | 20,58 | 24,64 | 24,14 | 25,06 | 25,43 | 25,19 | 25,33 | 16,03 | 16,28 | 16,21 | 16,33 | 18,64 | 14,83 | 19,5 | 19,04 | 18,6 | |
| Na2O | 1,47 | 1,64 | 0,24 | 0,47 | 0,13 | 0,12 | 0,11 | 0,15 | 2,6 | 2,44 | 2,4 | 2,28 | 3,15 | 2,63 | 2,9 | 2,95 | 3,2 | |
| K2O | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0 | 0,01 | |
| Total | 100,06 | 99,81 | 101,49 | 100,22 | 100,21 | 101,88 | 101,04 | 100,75 | 99,55 | 99,59 | 99,64 | 99,56 | 99,87 | 99,68 | 99,49 | 99,25 | 99,21 | |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,971 | 1,978 | 1,998 | 1,966 | 1,935 | 1,953 | 1,951 | 1,941 | 1,982 | 1,984 | 1,988 | 1,983 | 1,921 | 1,949 | 1,956 | 1,952 | 1,942 | |
| Ti | 0,016 | 0,012 | 0 | 0,009 | 0,015 | 0,013 | 0,008 | 0,013 | 0,013 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,052 | 0,008 | 0,011 | 0,013 | 0,016 | |
| Al | 0,053 | 0,049 | 0,011 | 0,03 | 0,02 | 0,006 | 0,02 | 0,016 | 0,117 | 0,106 | 0,107 | 0,094 | 0,204 | 0,202 | 0,206 | 0,223 | 0,244 | |
| Cr | 0 | 0,002 | 0 | 0 | 0,002 | 0,002 | 0 | 0 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | |
| Fe | 0,136 | 0,116 | 0,192 | 0,158 | 0,098 | 0,068 | 0,119 | 0,078 | 0,124 | 0,122 | 0,13 | 0,118 | 0,084 | 0,096 | 0,067 | 0,084 | 0,081 | |
| Mn | 0,004 | 0,003 | 0,018 | 0,007 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | |
| Mg | 0,892 | 0,859 | 0,792 | 0,799 | 0,857 | 0,909 | 0,847 | 0,878 | 0,902 | 0,917 | 0,92 | 0,943 | 0,713 | 0,933 | 0,746 | 0,73 | 0,707 | |
| Ca | 0,771 | 0,81 | 0,965 | 0,954 | 0,985 | 0,978 | 0,984 | 0,988 | 0,625 | 0,634 | 0,631 | 0,636 | 0,719 | 0,568 | 0,756 | 0,739 | 0,721 | |
| Na | 0,104 | 0,117 | 0,017 | 0,034 | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 0,011 | 0,183 | 0,172 | 0,169 | 0,161 | 0,22 | 0,182 | 0,203 | 0,207 | 0,225 | |
| K2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | |
| Fe3+ | 0,047 | 0,063 | 0,009 | 0,019 | 0,022 | 0,021 | 0,021 | 0,029 | 0,053 | 0,053 | 0,045 | 0,057 | 0 | 0,015 | 0,018 | 0,004 | 0,004 | |
| Total | 3,994 | 4,01 | 4,002 | 3,975 | 3,946 | 3,964 | 3,962 | 3,955 | 4,009 | 4,01 | 4,011 | 4,012 | 3,916 | 3,956 | 3,966 | 3,954 | 3,944 | |
| X mg | 86,77 | 88,10 | 80,49 | 83,49 | 89,74 | 93,04 | 87,68 | 91,84 | 87,91 | 88,26 | 87,62 | 88,88 | 89,46 | 90,67 | 91,76 | 89,68 | 89,72 | |
| X ca | 46,36 | 48,53 | 54,92 | 54,42 | 53,47 | 51,83 | 53,74 | 52,95 | 40,93 | 40,88 | 40,68 | 40,28 | 50,21 | 37,84 | 50,33 | 50,31 | 50,49 | |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 68,37 | 74,38 | 67,44 | 69,77 | 78,46 | 86,18 | 76,27 | 81,49 | 51,99 | 52,63 | 52,22 | 52,3 | 70,65 | 46,85 | 72,73 | 70,93 | 68,93 | |
| Ur | 0 | 0,21 | 0 | 0 | 0,19 | 0,22 | 0 | 0 | 0,45 | 0,5 | 0,45 | 0,45 | 0,2 | 0,14 | 0,17 | 0,19 | 0,25 | |
| Jd | 4,7 | 4,5 | 0,91 | 2,59 | 0,66 | 0,55 | 0,7 | 0,98 | 9,7 | 8,82 | 8,89 | 7,73 | 20,18 | 14,89 | 19,66 | 19,93 | 21,62 | |
| Aeg | 4,2 | 5,81 | 0,54 | 0,35 | 0 | 0,02 | 0 | 0 | 4,38 | 4,43 | 3,71 | 4,65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Fs | 12,03 | 10,61 | 16,38 | 13,79 | 8,94 | 6,41 | 10,7 | 7,24 | 10,35 | 10,12 | 10,77 | 9,68 | 8,33 | 7,94 | 6,5 | 8,12 | 7,86 | |
| Clen | 10,69 | 4,49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23,12 | 23,49 | 23,95 | 25,21 | 0 | 30,17 | 0 | 0 | 0 | |

Условные обозначения: ц-центр; к-край; вк-включения

Таблица 4.7. Состав граната из ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки Мир.

| Образец № | | Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | Total | xMg# | xCa# | xCr# |
|-----------|---|---------------------------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|--------|-------|-------|------|
| | | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | Cr3O3 | FeO | MnO | MgO | CaO | Na2O | | | | |
| TM-33 | ц | 40,97 | 0,3 | 23,1 | 0 | 14,2 | 0,34 | 16,44 | 4,38 | 0,1 | 99,83 | 67,36 | 16,08 | 0,00 |
| TM-33 | ц | 40,94 | 0,24 | 23,1 | 0 | 13,8 | 0,37 | 16,39 | 4,77 | 0,1 | 99,71 | 67,95 | 17,32 | 0,00 |
| TM-33 | ц | 41,03 | 0,31 | 22,91 | 0 | 13,88 | 0,32 | 16,64 | 4,34 | 0,11 | 99,54 | 68,44 | 15,78 | 0,00 |
| TM-33 | к | 40,51 | 0,28 | 22,98 | 0 | 14,19 | 0,38 | 15,69 | 4,98 | 0,09 | 99,1 | 66,35 | 18,59 | 0,00 |
| TM-33 | к | 40,69 | 0,32 | 22,79 | 0 | 14,44 | 0,36 | 15,41 | 5,47 | 0,09 | 99,57 | 65,81 | 20,32 | 0,00 |
| TM-33 | к | 40,81 | 0,22 | 22,97 | 0 | 13,77 | 0,4 | 16,04 | 5,06 | 0,12 | 99,39 | 67,63 | 18,48 | 0,00 |
| TM-109 | к | 41,26 | 0,06 | 22,74 | 0,06 | 15,64 | 0,36 | 16,94 | 3,21 | 0,00 | 100,27 | 66,92 | 11,98 | 0,15 |
| TM-109 | ц | 41,47 | 0,08 | 22,89 | 0,08 | 15,61 | 0,36 | 16,99 | 3,21 | 0,01 | 100,70 | 66,90 | 11,96 | 0,26 |
| TM-109 | ц | 41,42 | 0,14 | 22,70 | 0,08 | 15,69 | 0,36 | 16,64 | 3,53 | 0,00 | 100,56 | 66,49 | 13,25 | 0,26 |
| TM-109 | | 41,44 | 0,12 | 22,72 | 0,06 | 15,68 | 0,35 | 16,75 | 3,49 | 0,07 | 100,68 | 66,72 | 13,02 | 0,15 |
| TM-109 | к | 41,39 | 0,14 | 22,74 | 0,07 | 15,64 | 0,36 | 16,75 | 3,44 | 0,08 | 100,61 | 66,68 | 12,85 | 0,21 |
| TM-109 | к | 41,41 | 0,15 | 22,71 | 0,07 | 15,71 | 0,37 | 16,70 | 3,47 | 0,05 | 100,64 | 66,54 | 13,01 | 0,21 |
| TM-109 | к | 41,56 | 0,14 | 22,82 | 0,07 | 15,88 | 0,37 | 16,68 | 3,31 | 0,04 | 100,87 | 66,16 | 12,50 | 0,21 |
| TM-156 | к | 39,7 | 0,1 | 21,82 | 0,1 | 18,48 | 0,4 | 13,93 | 4,62 | 0,06 | 99,21 | 58,56 | 19,26 | 0,31 |
| TM-156 | ц | 39,03 | 0,31 | 21,65 | 0,06 | 17,91 | 0,62 | 14,07 | 4,66 | 0,1 | 98,41 | 59,34 | 19,23 | 0,21 |
| TM-156 | к | 39,20 | 0,32 | 21,51 | 0,00 | 16,87 | 0,33 | 13,21 | 5,69 | 0,10 | 97,23 | 59,31 | 23,63 | 0,00 |

Таблица 4.8. Состав клинопироксена из ксенолитов эклогитов трубки Мир.

| № Образца | TM-33 | TM-33 | TM-33 | TM-109 |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | ц | к | к | ц | ц | к | к | ц | ц | к | к | ц | к | ц |
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 55,45 | 55,03 | 55,26 | 55,74 | 55,72 | 55,53 | 55,82 | 55,74 | 55,97 | 55,8 | 55,88 | 55,81 | 55,82 | 55,73 | 55,9 | 55,85 | 56,04 |
| TiO ₂ | 0,4 | 0,37 | 0,41 | 0,31 | 0,34 | 0,33 | 0,35 | 0,41 | 0,38 | 0,35 | 0,33 | 0,35 | 0,34 | 0,39 | 0,35 | 0,38 | 0,35 |
| Al ₂ O ₃ | 7,23 | 7,64 | 6,87 | 6,99 | 6,93 | 6,92 | 6,88 | 6,8 | 6,83 | 6,85 | 6,97 | 6,78 | 6,9 | 6,83 | 6,94 | 6,84 | 6,98 |
| Cr ₂ O ₃ | 0 | 0,07 | 0 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,08 |
| FeO | 4,28 | 4,18 | 4,27 | 3,21 | 3,19 | 3,24 | 3,24 | 3,26 | 3,22 | 3,22 | 3,24 | 3,56 | 3,24 | 3,37 | 3,36 | 3,34 | 3,35 |
| MnO | 0,07 | 0 | 0 | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| MgO | 12,27 | 11,94 | 12,53 | 12,16 | 12,31 | 12,28 | 12,2 | 12,38 | 12,38 | 12,34 | 12,27 | 13,06 | 12,32 | 12,33 | 12,31 | 12,29 | 12,32 |
| CaO | 15,83 | 15,51 | 16,13 | 16,2 | 16,27 | 16,18 | 16,23 | 16,44 | 16,44 | 16,3 | 16,29 | 15,28 | 16,38 | 16,28 | 16,19 | 16,23 | 16,07 |
| Na ₂ O | 4,48 | 4,72 | 4,28 | 4,6 | 4,57 | 4,68 | 4,57 | 4,57 | 4,62 | 4,6 | 4,67 | 4,53 | 4,64 | 4,64 | 4,72 | 4,59 | 4,8 |
| K ₂ O | 0,12 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 100,13 | 99,56 | 99,85 | 99,33 | 99,46 | 99,3 | 99,42 | 99,73 | 99,95 | 99,6 | 99,77 | 99,49 | 99,76 | 99,71 | 99,91 | 99,65 | 100,04 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1,985 | 1,98 | 1,985 | 2,002 | 1,999 | 1,997 | 2,003 | 1,997 | 2 | 2 | 1,999 | 2 | 1,998 | 1,997 | 1,999 | 2,001 | 2 |
| Ti | 0,011 | 0,01 | 0,011 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,011 | 0,01 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,011 | 0,009 | 0,01 | 0,009 |
| Al | 0,29 | 0,304 | 0,276 | 0,296 | 0,292 | 0,291 | 0,291 | 0,284 | 0,287 | 0,289 | 0,293 | 0,286 | 0,289 | 0,286 | 0,291 | 0,289 | 0,294 |
| Cr | 0 | 0,002 | 0 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,002 |
| Fe | 0,114 | 0,103 | 0,113 | 0,091 | 0,09 | 0,079 | 0,092 | 0,086 | 0,086 | 0,088 | 0,086 | 0,099 | 0,083 | 0,086 | 0,084 | 0,093 | 0,082 |
| Mn | 0,002 | 0 | 0 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 |
| Mg | 0,655 | 0,64 | 0,671 | 0,651 | 0,658 | 0,658 | 0,653 | 0,661 | 0,659 | 0,659 | 0,654 | 0,697 | 0,657 | 0,659 | 0,656 | 0,656 | 0,655 |
| Ca | 0,607 | 0,598 | 0,621 | 0,623 | 0,626 | 0,624 | 0,624 | 0,631 | 0,629 | 0,626 | 0,625 | 0,587 | 0,628 | 0,625 | 0,62 | 0,623 | 0,615 |
| Na | 0,311 | 0,329 | 0,298 | 0,32 | 0,318 | 0,326 | 0,318 | 0,317 | 0,32 | 0,32 | 0,324 | 0,315 | 0,322 | 0,322 | 0,327 | 0,319 | 0,332 |
| K ₂ | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe ³⁺ | 0,014 | 0,023 | 0,015 | 0,005 | 0,006 | 0,018 | 0,006 | 0,012 | 0,011 | 0,009 | 0,011 | 0,008 | 0,014 | 0,016 | 0,016 | 0,007 | 0,017 |
| Total | 3,995 | 3,994 | 3,995 | 4,001 | 4,002 | 4,007 | 3,999 | 4,003 | 4,005 | 4,005 | 4,005 | 4,003 | 4,005 | 4,005 | 4,007 | 4,002 | 4,009 |
| X mg | 85,18 | 86,14 | 85,59 | 87,74 | 87,97 | 89,28 | 87,65 | 88,49 | 88,46 | 88,22 | 88,38 | 87,56 | 88,78 | 88,46 | 88,65 | 87,58 | 88,87 |
| X ca | 48,10 | 48,30 | 48,07 | 48,90 | 48,75 | 48,67 | 48,86 | 48,84 | 48,84 | 48,72 | 48,87 | 45,72 | 48,87 | 48,68 | 48,59 | 48,71 | 48,43 |
| Минералы, мол.% | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Di | 56,59 | 55,78 | 57,75 | 59,62 | 59,65 | 59,45 | 59,82 | 60,38 | 60,23 | 59,75 | 59,66 | 53,7 | 60,07 | 59,65 | 59,08 | 59,49 | 58,46 |
| Ur | 0 | 0,19 | 0 | 0,24 | 0,22 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,22 | 0,24 | 0,22 | 0,23 | 0,22 | 0,24 | 0,24 | 0,22 | 0,21 |
| Jd | 27,05 | 28,36 | 25,67 | 28,3 | 27,88 | 27,7 | 27,89 | 27,17 | 27,49 | 27,62 | 28,03 | 26,17 | 27,67 | 27,28 | 27,71 | 27,58 | 27,93 |
| Aeg | 1,3 | 2,17 | 1,38 | 0,49 | 0,54 | 1,74 | 0,53 | 1,14 | 1,01 | 0,85 | 1,06 | 0,73 | 1,31 | 1,48 | 1,56 | 0,69 | 1,66 |
| Fs | 10,64 | 9,56 | 10,55 | 8,73 | 8,59 | 7,56 | 8,79 | 8,2 | 8,19 | 8,37 | 8,2 | 9,04 | 7,96 | 8,16 | 8,01 | 8,86 | 7,85 |
| Clen | 4,42 | 3,95 | 4,65 | 2,62 | 3,12 | 3,31 | 2,72 | 2,86 | 2,85 | 3,17 | 2,84 | 10,14 | 2,77 | 3,19 | 3,4 | 3,17 | 3,88 |

Продолжение таблицы 4.8

| № Образца | TM- 109 к | TM- 109 ц | TM- 109 к | TM- 109 ц | TM- 109 к | TM- 109 к | TM- 109 ц | TM- 156 ц | TM- 156 ц | TM- 156 к | TM- 156 ц |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 55,58 | 55,77 | 55,85 | 55,88 | 55,65 | 56,03 | 55,83 | 54,35 | 53,97 | 52,43 | 53,06 |
| TiO ₂ | 0,34 | 0,37 | 0,4 | 0,41 | 0,38 | 0,37 | 0,31 | 0,3 | 0,51 | 0,37 | 0,39 |
| Al ₂ O ₃ | 6,79 | 6,85 | 6,86 | 6,69 | 6,65 | 6,66 | 6,62 | 8,13 | 8,71 | 7,54 | 8,01 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,21 | 0 | 0,17 | 0 |
| FeO | 3,28 | 3,37 | 3,4 | 3,35 | 3,36 | 3,31 | 3,32 | 3,67 | 4,01 | 3,84 | 3,9 |
| MnO | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0 | 0,05 | 0,2 | 0,03 |
| MgO | 12,25 | 12,31 | 12,34 | 12,34 | 12,41 | 12,39 | 12,54 | 10,73 | 10,11 | 11,14 | 10,94 |
| CaO | 16,21 | 16,2 | 16,17 | 16,29 | 16,31 | 16,43 | 16,45 | 15,4 | 15,36 | 15,59 | 15,67 |
| Na ₂ O | 4,71 | 4,6 | 4,7 | 4,49 | 4,49 | 4,53 | 4,51 | 5,69 | 5,48 | 4,99 | 5,19 |
| K ₂ O | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,03 | 0 | 0 |
| Total | 99,29 | 99,6 | 99,86 | 99,58 | 99,38 | 99,86 | 99,73 | 98,48 | 98,23 | 96,27 | 97,19 |
| Расчет формулы на 6 атомов кислорода | | | | | | | | | | | |
| Si | 2 | 2 | 1,998 | 2,004 | 2,001 | 2,004 | 2 | 1,978 | 1,97 | 1,96 | 1,962 |
| Ti | 0,009 | 0,01 | 0,011 | 0,011 | 0,01 | 0,01 | 0,008 | 0,008 | 0,014 | 0,01 | 0,011 |
| Al | 0,288 | 0,289 | 0,288 | 0,283 | 0,282 | 0,281 | 0,28 | 0,327 | 0,345 | 0,293 | 0,311 |
| Cr | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,006 | 0 | 0,005 | 0 |
| Fe | 0,079 | 0,093 | 0,086 | 0,095 | 0,093 | 0,088 | 0,085 | 0,038 | 0,078 | 0,037 | 0,043 |
| Mn | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0 | 0,002 | 0,006 | 0,001 |
| Mg | 0,657 | 0,658 | 0,658 | 0,659 | 0,665 | 0,66 | 0,67 | 0,582 | 0,55 | 0,621 | 0,603 |
| Ca | 0,625 | 0,622 | 0,62 | 0,626 | 0,628 | 0,63 | 0,632 | 0,601 | 0,601 | 0,625 | 0,621 |
| Na | 0,329 | 0,32 | 0,326 | 0,312 | 0,313 | 0,314 | 0,313 | 0,402 | 0,388 | 0,362 | 0,372 |
| K ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,001 | 0 | 0 |
| Fe ³⁺ | 0,02 | 0,009 | 0,016 | 0,005 | 0,008 | 0,011 | 0,014 | 0,074 | 0,045 | 0,083 | 0,078 |
| Total | 4,01 | 4,004 | 4,006 | 3,999 | 4,003 | 4,002 | 4,007 | 4,015 | 3,993 | 4,002 | 4,001 |
| X mg | 89,27 | 87,62 | 88,44 | 87,40 | 87,73 | 88,24 | 88,74 | 93,87 | 87,58 | 94,38 | 93,34 |
| X ca | 48,75 | 48,59 | 48,51 | 48,72 | 48,57 | 48,84 | 48,54 | 50,80 | 52,22 | 50,16 | 50,74 |
| Миналы, мол.% | | | | | | | | | | | |
| Di | 59,75 | 59,25 | 59,05 | 59,91 | 59,82 | 60,38 | 60,08 | 55,97 | 51,58 | 60,66 | 58,2 |
| Ur | 0,24 | 0,22 | 0,24 | 0,19 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,58 | 0 | 0,49 | 0 |
| Jd | 27,52 | 27,54 | 27,39 | 27,07 | 26,83 | 26,93 | 26,6 | 31,44 | 32,35 | 28,59 | 30,01 |
| Aeg | 1,91 | 0,81 | 1,54 | 0,51 | 0,77 | 1,05 | 1,38 | 6,6 | 4,03 | 6,27 | 5,91 |
| Fs | 7,53 | 8,81 | 8,15 | 9,11 | 8,85 | 8,45 | 8,08 | 3,62 | 7,28 | 3,62 | 4,13 |
| Clen | 3,05 | 3,37 | 3,63 | 3,21 | 3,49 | 2,95 | 3,62 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 4.9. Состав амфибола из ксенолитов перидотитового парагенезиса кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная

| № Образца | TM-90 | TM-90 | TM-90 | TO-171 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 22,35 | 46,09 | 44,26 | 49,96 | 49,75 | 50,41 | 49,91 | 45,66 | 46,35 | 44,71 | 46,24 |
| TiO ₂ | 1,34 | | 1,64 | 0,03 | 0,22 | 0,46 | 0,13 | 0,00 | 0,09 | 0,39 | 0,17 |
| Al ₂ O ₃ | 14,43 | 9,29 | 14,08 | 8,34 | 7,43 | 7,68 | 8,08 | 11,74 | 11,11 | 10,56 | 9,72 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,66 | | 1,02 | 1,72 | 1,83 | 1,25 | 1,82 | 1,64 | 1,85 | 1,66 | 1,98 |
| MnO | 0,27 | 2,75 | 0,06 | 0,14 | 0,15 | | 0,07 | 0,18 | 0,00 | 0,46 | 0,19 |
| FeO | 9,18 | 14,56 | 4,44 | 2,57 | 2,78 | 2,63 | 2,56 | 4,00 | 4,20 | 3,56 | 3,60 |
| MgO | 14,03 | 12,58 | 18,28 | 19,97 | 20,62 | 21,58 | 20,41 | 19,50 | 19,29 | 19,07 | 19,61 |
| CaO | 18,60 | 12,24 | 8,99 | 10,07 | 9,49 | 9,52 | 9,59 | 9,81 | 9,37 | 9,72 | 9,85 |
| Na ₂ O | 0,25 | | 4,19 | 4,15 | 4,28 | 4,70 | 4,37 | 4,11 | 3,60 | 3,52 | 3,88 |
| K ₂ O | 0,88 | 0,11 | 0,52 | 0,80 | 1,28 | 0,52 | 0,98 | 0,63 | 0,89 | 0,92 | 0,76 |
| F | | | | 0,45 | 0,42 | 0,45 | 1,01 | 0,81 | 0,20 | | 0,26 |
| Cl | 0,00 | 0,00 | | | | | | 0,02 | | | |
| O=F,Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,19 | -0,18 | -0,19 | -0,43 | -0,35 | -0,08 | 0,00 | -0,11 |
| Сумма | 81,99 | 97,62 | 97,48 | 98,01 | 98,07 | 99,01 | 98,50 | 97,75 | 96,87 | 94,57 | 96,15 |
| Расчет формулы на 16 катионов | | | | | | | | | | | |
| Si | 4,19 | 6,84 | 6,28 | 7,00 | 7,00 | 6,98 | 6,99 | 6,50 | 6,62 | 6,56 | 6,67 |
| Al | 3,19 | 1,16 | 1,72 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,01 | 1,50 | 1,38 | 1,44 | 1,33 |
| Ti | 0,19 | | | | | | | | | | |
| T | 7,57 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 |
| Ti | | | 0,18 | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | | 0,01 | 0,04 | 0,02 |
| Al | | 0,46 | 0,63 | 0,38 | 0,23 | 0,24 | 0,32 | 0,47 | 0,49 | 0,38 | 0,32 |
| Cr | 0,10 | | 0,11 | 0,19 | 0,20 | 0,14 | 0,20 | 0,19 | 0,21 | 0,19 | 0,23 |
| Fe2+ | 0,98 | 1,76 | 0,21 | 0,25 | 0,22 | 0,12 | 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,22 | 0,22 |
| Mg | 3,93 | 2,78 | 3,87 | 4,17 | 4,33 | 4,46 | 4,26 | 4,14 | 4,11 | 4,17 | 4,22 |
| C | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 |
| Mn2+ | 0,04 | 0,35 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | | 0,01 | 0,02 | | 0,06 | 0,02 |
| Fe2+ | 0,46 | 0,05 | 0,32 | 0,05 | 0,11 | 0,18 | 0,10 | 0,28 | 0,32 | 0,22 | 0,22 |
| Ca | 1,49 | 1,61 | 1,37 | 1,51 | 1,43 | 1,41 | 1,44 | 1,50 | 1,43 | 1,53 | 1,52 |
| Na | | | 0,31 | 0,42 | 0,44 | 0,40 | 0,45 | 0,21 | 0,25 | 0,19 | 0,24 |
| B | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| Ca | 2,25 | 0,34 | | | | | | | | | |
| Na | 0,09 | | 0,84 | 0,70 | 0,73 | 0,86 | 0,73 | 0,93 | 0,75 | 0,81 | 0,85 |
| K | 0,21 | 0,02 | 0,09 | 0,14 | 0,23 | 0,09 | 0,18 | 0,11 | 0,16 | 0,17 | 0,14 |
| A | 2,55 | 0,36 | 0,94 | 0,85 | 0,96 | 0,95 | 0,91 | 1,04 | 0,91 | 0,98 | 0,99 |
| Номенклатура амфиболов | | | | | | | | | | | |
| Группа | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca |
| Название | Ed | Ed | Prg | Prg | Ed | Ed | Prg | Prg | Prg | Prg | Prg |

Продолжение таблицы 4.9

| № Образца | TO-254 | TO-266 | TO-266 | TO-281 |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 56,23 | 55,75 | 56,41 | 55,80 | 55,94 | 52,46 | 55,97 | 58,34 | 56,52 | 44,09 | 44,06 | 42,79 | |
| TiO ₂ | 0,07 | | | 0,07 | | | | | 0,15 | 0,13 | 0,17 | 0,52 | |
| Al ₂ O ₃ | 0,85 | 1,20 | 1,19 | 1,13 | 1,45 | 1,32 | 1,85 | 0,93 | 1,23 | 13,66 | 13,89 | 15,64 | |
| Cr ₂ O ₃ | 0,34 | 0,61 | 0,38 | 0,37 | 0,89 | | 0,61 | 0,29 | 0,48 | 1,56 | 1,35 | 1,45 | |
| MnO | 0,12 | | 0,11 | | | | | | | 0,12 | 0,26 | 0,25 | |
| FeO | 3,61 | 2,50 | 2,87 | 2,43 | 3,53 | 2,80 | 3,11 | 2,35 | 2,77 | 2,84 | 3,21 | 6,72 | |
| MgO | 24,63 | 22,92 | 23,33 | 23,13 | 23,32 | 23,50 | 23,37 | 24,03 | 23,90 | 19,30 | 18,85 | 16,90 | |
| CaO | 4,00 | 6,93 | 6,75 | 6,50 | 4,59 | 6,39 | 4,95 | 7,25 | 6,90 | 11,48 | 11,66 | 8,62 | |
| Na ₂ O | 6,51 | 5,50 | 5,49 | 5,62 | 6,63 | 4,97 | 6,38 | 5,80 | 5,39 | 3,57 | 3,65 | 4,70 | |
| K ₂ O | 0,75 | 0,97 | 0,91 | 1,10 | 0,76 | 0,76 | 0,87 | 1,49 | 1,16 | 0,14 | 0,14 | 0,36 | |
| F | | | | | | | | | | | 0,25 | | |
| Cl | | | | | | | | | | 0,05 | 0,13 | | |
| O=F,Cl (calc) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,01 | -0,13 | 0,00 | |
| Сумма | 97,11 | 96,38 | 97,44 | 96,15 | 97,11 | 92,20 | 97,11 | 100,48 | 98,50 | 96,93 | 97,49 | 97,95 | |
| Si | 7,820 | 7,82 | 7,826 | 7,837 | 7,796 | 7,696 | 7,782 | 7,856 | 7,77 | 6,28 | 6,269 | 6,121 | |
| Al | 0,139 | 0,18 | 0,174 | 0,163 | 0,204 | 0,228 | 0,218 | 0,144 | 0,199 | 1,72 | 1,731 | 1,879 | |
| Ti | 0,007 | | | | | | | | 0,016 | | | | |
| T | 7,966 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7,924 | 8 | 8 | 7,985 | 8 | 8 | 8 | |
| Ti | | | | 0,007 | | | | | | 0,014 | 0,018 | 0,056 | |
| Al | | 0,018 | 0,021 | 0,024 | 0,034 | | 0,085 | 0,004 | | 0,573 | 0,598 | 0,758 | |
| Cr | 0,037 | 0,07 | 0,042 | 0,041 | 0,098 | | 0,067 | 0,031 | 0,052 | 0,176 | 0,152 | 0,164 | |
| Fe2+ | | 0,122 | 0,112 | 0,085 | 0,024 | | 0,003 | 0,141 | 0,05 | 0,139 | 0,234 | 0,418 | |
| Mg | 4,963 | 4,792 | 4,825 | 4,843 | 4,845 | 5 | 4,844 | 4,824 | 4,898 | 4,098 | 3,998 | 3,604 | |
| C | 5 | 5 | 5 | 5 | 5,001 | 5 | 4,999 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | |
| Mn2+ | 0,014 | | 0,013 | | | | | | | 0,014 | 0,031 | 0,03 | |
| Fe2+ | 0,42 | 0,171 | 0,221 | 0,2 | 0,388 | 0,344 | 0,358 | 0,123 | 0,268 | 0,199 | 0,148 | 0,386 | |
| Mg | 0,144 | | | | | 0,139 | | | | | | | |
| Ca | 0,596 | 1,041 | 1,003 | 0,978 | 0,685 | 1,004 | 0,737 | 1,046 | 1,016 | 1,752 | 1,777 | 1,321 | |
| Na | 0,826 | 0,787 | 0,763 | 0,822 | 0,927 | 0,513 | 0,904 | 0,831 | 0,715 | 0,034 | 0,043 | 0,262 | |
| B | 2 | 1,999 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,999 | 2 | 1,999 | 1,999 | 1,999 | 1,999 | |
| Na | 0,929 | 0,708 | 0,714 | 0,709 | 0,864 | 0,901 | 0,816 | 0,684 | 0,721 | 0,952 | 0,963 | 1,041 | |
| K | 0,133 | 0,174 | 0,161 | 0,197 | 0,135 | 0,142 | 0,154 | 0,256 | 0,203 | 0,025 | 0,025 | 0,066 | |
| A | 1,062 | 0,882 | 0,875 | 0,906 | 0,999 | 1,043 | 0,97 | 0,94 | 0,924 | 0,977 | 0,988 | 1,107 | |
| Номенклатура амфиболов | | | | | | | | | | | | | |
| Группа | Na-Ca | Ca | Ca | Ca |
| Название | richterite | Prg | Prg | Prg |

Условные обозначения: Ca Prg- кальциевый паргасит; Ca Ed- кальциевый эденит; Na-Ca-richterite- натрово-кальциевый рихтерит

Таблица 4.10. Состав амфибола из ксенолитов пироксенитового парагенезиса кимберлитовых трубок Мир и Обнаженная

| № Образца | TM-147 | TM-147 | TM-147 | TM-147 | TM-147 | TM-147 | TM-147 | TM-147 | TM-147 | TM-182 | TM-182 | TM-182 | TM-182 | TM-182 | TM-182 | TM-53 | TM-53 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|-------|--------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 41,78 | 42,17 | 39,79 | 56,82 | 42,83 | 45,74 | 40,54 | 41,31 | 42,23 | 40,35 | 42,81 | 36,71 | 44,18 | 42,30 | 43,22 | 37,08 | |
| TiO ₂ | 0,22 | 0,32 | 0,27 | 0,85 | 0,80 | 0,42 | 1,35 | 2,24 | | | 0,80 | 0,23 | 0,67 | 0,72 | 0,20 | 0,27 | |
| Al ₂ O ₃ | 12,79 | 12,98 | 13,64 | 1,80 | 11,32 | 7,37 | 13,64 | 12,94 | 13,55 | 15,68 | 12,43 | 14,30 | 11,85 | 12,87 | 14,19 | 19,14 | |
| Cr ₂ O ₃ | 1,46 | 1,74 | 1,23 | 0,20 | 0,66 | 0,99 | 1,78 | 0,72 | 1,48 | 1,32 | 0,76 | 2,54 | 1,05 | 1,20 | 0,83 | 1,29 | |
| MnO | 0,44 | 0,40 | 0,46 | | 0,28 | 0,27 | 0,23 | 0,35 | 0,53 | 0,39 | 0,19 | 0,48 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | | |
| FeO | 8,35 | 8,92 | 8,13 | 4,34 | 7,85 | 8,79 | 9,84 | 8,58 | 10,56 | 11,32 | 7,92 | 11,21 | 8,50 | 8,80 | 5,62 | 4,57 | |
| MgO | 16,42 | 15,14 | 15,89 | 23,40 | 17,88 | 20,31 | 16,73 | 16,19 | 15,22 | 14,44 | 17,30 | 14,54 | 17,33 | 16,52 | 21,46 | 22,90 | |
| CaO | 10,24 | 9,05 | 11,18 | 6,28 | 9,39 | 7,36 | 8,19 | 8,91 | 9,92 | 9,85 | 9,88 | 6,32 | 9,70 | 9,81 | 8,61 | | |
| Na ₂ O | 2,62 | 3,03 | 2,33 | 6,79 | 3,15 | 4,14 | 2,87 | 3,46 | 2,31 | 2,28 | 3,14 | 0,84 | 3,19 | 3,06 | 3,41 | 5,19 | |
| K ₂ O | 0,47 | 0,39 | 0,80 | 1,08 | 0,53 | 1,99 | 1,29 | 0,41 | 0,25 | 0,30 | 0,69 | 4,57 | 0,61 | 0,63 | 0,29 | 1,96 | |
| F | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cl | 0,08 | 0,11 | 0,15 | | | 0,31 | 0,18 | | 0,23 | 0,19 | | 0,25 | | | 0,15 | | |
| O=F,Cl (calc) | -0,02 | -0,02 | -0,03 | 0,00 | 0,00 | -0,07 | -0,04 | 0,00 | -0,05 | -0,04 | 0,00 | -0,06 | 0,00 | 0,00 | -0,03 | 0,00 | |
| Сумма | 94,85 | 94,23 | 93,84 | 101,56 | 94,69 | 97,62 | 96,60 | 95,11 | 96,23 | 96,08 | 95,92 | 91,93 | 97,29 | 96,12 | 98,16 | 92,40 | |
| Расчет формулы на 16 катионов | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 6,245 | 6,336 | 6,053 | 7,649 | 6,373 | 6,686 | 6,012 | 6,15 | 6,26 | 6,016 | 6,298 | 5,863 | 6,409 | 6,24 | 6,121 | 5,532 | |
| Al | 1,755 | 1,664 | 1,947 | 0,286 | 1,627 | 1,27 | 1,988 | 1,85 | 1,74 | 1,984 | 1,702 | 2,137 | 1,591 | 1,76 | 1,879 | 2,468 | |
| Ti | | | | 0,065 | | 0,044 | | | | | | | | | | | |
| T | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Ti | 0,025 | 0,036 | 0,031 | 0,021 | 0,09 | 0,002 | 0,151 | 0,251 | 0,627 | 0,771 | 0,453 | 0,554 | 0,434 | 0,478 | 0,49 | 0,897 | |
| Al | 0,498 | 0,634 | 0,499 | 0,358 | 0,397 | 0,421 | 0,397 | 0,421 | 0,627 | 0,771 | 0,453 | 0,554 | 0,434 | 0,478 | 0,49 | 0,897 | |
| Cr | 0,173 | 0,207 | 0,148 | 0,021 | 0,078 | 0,114 | 0,209 | 0,085 | 0,173 | 0,156 | 0,088 | 0,321 | 0,12 | 0,14 | 0,093 | 0,152 | |
| Fe2+ | 0,646 | 0,732 | 0,718 | 0,262 | 0,508 | 0,458 | 0,545 | 0,651 | 0,837 | 0,864 | 0,576 | 0,636 | 0,624 | 0,669 | | | |
| Mg | 3,659 | 3,391 | 3,604 | 4,696 | 3,966 | 4,426 | 3,699 | 3,593 | 3,363 | 3,209 | 3,794 | 3,462 | 3,748 | 3,633 | 4,396 | 3,921 | |
| C | 5,001 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5,001 | 5,001 | 5 | 5 | 5 | 5,001 | 4,999 | 5 | 5 | 5 | |
| Mn2+ | 0,056 | 0,051 | 0,059 | | 0,035 | 0,033 | 0,029 | 0,044 | 0,067 | 0,049 | 0,024 | 0,065 | 0,026 | 0,026 | 0,025 | | |
| Fe2+ | 0,398 | 0,389 | 0,316 | 0,227 | 0,469 | 0,617 | 0,675 | 0,418 | 0,472 | 0,548 | 0,398 | 0,862 | 0,407 | 0,417 | 0,666 | 0,57 | |
| Mg | | | | | | | | | | | | | | | 0,135 | 1,172 | |
| Ca | 1,547 | 1,457 | 1,625 | 0,906 | 1,496 | 1,153 | 1,296 | 1,421 | 1,461 | 1,403 | 1,557 | 1,074 | 1,508 | 1,551 | 1,174 | | |
| Na | | 0,103 | | 0,867 | | 0,197 | | 0,117 | | | 0,021 | | 0,06 | 0,006 | | 0,258 | |
| B | 2,001 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2,001 | 2,001 | 2 | 2 | 2 | |
| Ca | 0,093 | | 0,198 | | 0,001 | | 0,006 | | 0,114 | 0,171 | | 0,008 | | | 0,132 | | |
| Na | 0,759 | 0,779 | 0,687 | 0,905 | 0,909 | 0,977 | 0,825 | 0,882 | 0,664 | 0,659 | 0,875 | 0,26 | 0,837 | 0,869 | 0,936 | 1,243 | |
| K | 0,09 | 0,075 | 0,155 | 0,185 | 0,101 | 0,371 | 0,244 | 0,078 | 0,047 | 0,057 | 0,129 | 0,931 | 0,113 | 0,119 | 0,052 | 0,374 | |
| A | 0,942 | 0,854 | 1,04 | 1,09 | 1,011 | 1,348 | 1,075 | 0,96 | 0,825 | 0,887 | 1,004 | 1,199 | 0,95 | 0,988 | 1,12 | 1,617 | |
| Номенклатура амфиболов | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Группа | Ca | Ca | Ca | Na-Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Mg-Fe- |
| Название | Prg | Prg | Prg | richterite | Prg | Ed | Prg | Prg | Prg | Prg | Prg | Prg | pottassic-prg | Prg | Prg | Prg | Mn-Cum |

Продолжение таблицы 4.10.

| № Образца | TM-53 | TM-53 | TM-53 | TM-91 | TM-126 | TM-126 | TM-126 |
|--------------------------------|-------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 39,86 | 42,64 | 44,73 | 51,43 | 37,10 | 41,23 | 40,37 | 39,30 | 43,84 | 42,70 | 58,55 | 47,49 | 44,88 |
| TiO ₂ | | | 0,35 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,47 |
| Al ₂ O ₃ | 14,98 | 18,74 | 11,85 | 8,03 | 17,31 | 13,64 | 17,86 | 16,10 | 13,17 | 13,74 | 0,62 | 11,37 | 13,83 |
| Cr ₂ O ₃ | 2,67 | 3,46 | 1,34 | 0,23 | | | | | | | | | |
| MnO | 0,56 | 0,63 | | | | | | | | | | | |
| FeO | 9,57 | 13,96 | 8,00 | 5,24 | 5,79 | 6,59 | 6,87 | 5,75 | 5,96 | 6,07 | 3,58 | 4,12 | 5,79 |
| MgO | 14,69 | 17,36 | 18,27 | 23,88 | 15,41 | 19,93 | 18,56 | 16,55 | 19,27 | 19,14 | 24,87 | 19,45 | 19,27 |
| CaO | 10,26 | 5,19 | 10,10 | 9,79 | 12,09 | 7,89 | 8,17 | 12,17 | 8,91 | 8,72 | 3,23 | 7,89 | 8,00 |
| Na ₂ O | 1,51 | | 2,99 | 2,57 | 2,16 | 2,88 | 3,33 | 2,25 | 3,44 | 3,30 | 7,40 | 4,79 | 4,29 |
| K ₂ O | 0,24 | 1,28 | 0,53 | 1,01 | 0,84 | 1,42 | 0,20 | 0,92 | 0,30 | 0,29 | 0,92 | 0,83 | 0,41 |
| F | | | | | | | | | | | | | |
| Cl | 0,14 | | | 0,38 | 0,20 | 0,12 | 0,42 | 0,13 | | 0,08 | | | |
| O=F,Cl (calc) | -0,03 | 0,00 | 0,00 | -0,09 | -0,05 | -0,03 | -0,09 | -0,03 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 94,45 | 103,26 | 98,16 | 102,87 | 90,85 | 93,67 | 95,69 | 93,14 | 94,89 | 94,02 | 99,17 | 95,94 | 96,94 |
| Расчет формулы на 16 катионов | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 6,017 | 5,873 | 6,41 | 6,896 | 5,758 | 6,16 | 5,883 | 5,933 | 6,392 | 6,294 | 7,945 | 6,778 | 6,392 |
| Al | 1,983 | 2,127 | 1,59 | 1,104 | 2,242 | 1,84 | 2,117 | 2,067 | 1,608 | 1,706 | 0,055 | 1,222 | 1,608 |
| Ti | | | | | | | | | | | | | |
| T | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Ti | | | 0,038 | 0,04 | | | | | | | | | 0,05 |
| Al | 0,683 | 0,916 | 0,411 | 0,165 | 0,924 | 0,562 | 0,95 | 0,798 | 0,655 | 0,682 | 0,045 | 0,691 | 0,714 |
| Cr | 0,319 | 0,377 | 0,152 | 0,024 | | | | | | | | | |
| Fe2+ | 0,693 | 0,143 | 0,497 | | 0,511 | | 0,018 | 0,478 | 0,156 | 0,112 | | 0,171 | 0,144 |
| Mg | 3,306 | 3,565 | 3,903 | 4,771 | 3,565 | 4,438 | 4,032 | 3,725 | 4,188 | 4,206 | 4,955 | 4,138 | 4,092 |
| C | 5,001 | 5,001 | 5,001 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5,001 | 4,999 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Mn2+ | 0,072 | 0,074 | | | | | | | | | | | |
| Fe2+ | 0,515 | 1,465 | 0,462 | 0,588 | 0,241 | 0,823 | 0,819 | 0,248 | 0,57 | 0,636 | 0,406 | 0,321 | 0,546 |
| Mg | | | | 0,003 | | | | | | | 0,076 | | |
| Ca | 1,413 | 0,461 | 1,538 | 1,406 | 1,759 | 1,176 | 1,181 | 1,752 | 1,392 | 1,364 | 0,47 | 1,207 | 1,221 |
| Na | | | | 0,003 | | | | | 0,038 | | 1,048 | 0,473 | 0,233 |
| B | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,999 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2,001 | 2 |
| Ca | 0,247 | 0,305 | 0,012 | | 0,251 | 0,087 | 0,095 | 0,217 | | 0,013 | | | |
| Na | 0,442 | | 0,831 | 0,665 | 0,65 | 0,834 | 0,941 | 0,659 | 0,935 | 0,943 | 0,899 | 0,853 | 0,951 |
| K | 0,046 | 0,225 | 0,097 | 0,173 | 0,166 | 0,271 | 0,037 | 0,177 | 0,056 | 0,055 | 0,159 | 0,151 | 0,075 |
| A | 0,735 | 0,53 | 0,94 | 0,838 | 1,067 | 1,192 | 1,073 | 1,053 | 0,991 | 1,011 | 1,058 | 1,004 | 1,026 |
| Группа | Ca | Mg-Fe-Mn | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Na-Mg-Fe-Mn | Ca | Ca |
| Название | Prg | Cum | Prg | Ed | Prg | Prg | Prg | Prg | Prg | Prg | | Prg | Prg |

Продолжение таблицы 4.10.

| № Образца | ТО-29 | ТО-29 | ТО-29 | ТО-29 | ТО-16 | ТО-16 | ТО-16 | ТО-16 | ТО-22 | ТО-22 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 42,89 | 44,82 | 47,59 | 47,59 | 38,36 | 51,92 | 49,10 | 42,31 | 42,20 | 42,53 |
| TiO ₂ | 0,84 | 0,20 | 0,91 | 0,91 | 0,17 | 0,27 | 0,22 | 0,26 | 1,28 | 0,39 |
| Al ₂ O ₃ | 15,10 | 12,52 | 11,23 | 11,23 | 18,29 | 5,03 | 7,36 | 13,35 | 14,51 | 14,29 |
| V ₂ O ₃ | | | 0,08 | 0,08 | | | | | | |
| Cr ₂ O ₃ | 1,49 | 0,59 | 2,08 | 2,08 | | 0,07 | 0,24 | 0,17 | 0,17 | 0,25 |
| MnO | 0,15 | 0,33 | 0,07 | 0,07 | 0,16 | 0,00 | 0,22 | 0,25 | 0,13 | 0,20 |
| FeO | 5,05 | 5,87 | 3,36 | 3,36 | 9,68 | 6,41 | 6,43 | 11,71 | 9,26 | 9,86 |
| MgO | 17,11 | 20,15 | 19,10 | 19,10 | 22,00 | 20,37 | 19,26 | 16,74 | 16,64 | 15,85 |
| CaO | 8,90 | 8,64 | 7,79 | 7,79 | 0,30 | 6,92 | 7,52 | 7,68 | 8,89 | 9,82 |
| SrO | | 0,25 | 0,26 | 0,26 | | | | | | |
| Na ₂ O | 4,02 | 3,02 | 4,52 | 4,52 | 5,42 | 5,08 | 4,44 | 3,87 | 3,49 | 3,09 |
| K ₂ O | 0,47 | 0,15 | 0,28 | 0,28 | 1,53 | 0,26 | 0,44 | 0,09 | 0,61 | 0,83 |
| F | | | | | | 0,06 | 0,10 | 0,68 | | |
| Cl | | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | | | 0,12 | | 0,05 |
| O=F,Cl (calc) | 0,00 | -0,01 | 0,00 | 0,00 | -0,01 | -0,03 | -0,04 | -0,31 | 0,00 | -0,01 |
| Сумма | 96,02 | 96,57 | 97,27 | 97,27 | 95,95 | 96,36 | 95,29 | 96,92 | 97,18 | 97,15 |
| Расчет формулы на 16 катионов | | | | | | | | | | |
| Si | 6,2 | 6,426 | 6,7 | 6,7 | 7,396 | 7,396 | 7,114 | 6,246 | 6,138 | 6,219 |
| Al | 1,8 | 1,574 | 1,3 | 1,3 | 0,604 | 0,604 | 0,886 | 1,754 | 1,862 | 1,781 |
| T | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Ti | 0,09 | 0,02 | 0,10 | 0,10 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,14 | 0,04 |
| Al | 0,77 | 0,54 | 0,56 | 0,56 | 0,24 | 0,24 | 0,37 | 0,57 | 0,63 | 0,68 |
| V | | | 0,01 | 0,01 | | | | | | |
| Cr | 0,17 | 0,07 | 0,23 | 0,23 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 |
| Fe2+ | 0,28 | 0,06 | 0,09 | 0,09 | 0,40 | 0,40 | 0,42 | 0,70 | 0,61 | 0,79 |
| Mg | 3,69 | 4,31 | 4,01 | 4,01 | 4,33 | 4,33 | 4,16 | 3,68 | 3,61 | 3,46 |
| C | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 |
| Mn2+ | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | | | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| Fe2+ | 0,33 | 0,64 | 0,31 | 0,31 | 0,37 | 0,37 | 0,36 | 0,75 | 0,52 | 0,41 |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|----------|------------|------|------|------|------|-----|
| Mg | | | | | | | | | | | |
| Ca | 1,38 | 1,33 | 1,18 | 1,18 | 1,06 | 1,06 | 1,17 | 1,22 | 1,39 | 1,54 | |
| Sr | | 0,02 | 0,02 | 0,02 | | | | | | | |
| Na | 0,27 | | 0,49 | 0,49 | 0,58 | 0,58 | 0,44 | 0,01 | 0,08 | 0,02 | |
| B | 2,00 | 2,03 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | |
| Ca | | | | | | | | | | | |
| Na | 0,86 | 0,84 | 0,74 | 0,74 | 0,83 | 0,83 | 0,80 | 1,10 | 0,90 | 0,85 | |
| K | 0,09 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,08 | 0,02 | 0,11 | 0,16 | |
| A | 0,94 | 0,87 | 0,79 | 0,79 | 0,87 | 0,87 | 0,88 | 1,12 | 1,02 | 1,01 | |
| Номенклатура амфиболов | | | | | | | | | | | |
| Группа | Ca | Ca | Ca | Ca | Mg-Fe-Mn | Na-Ca | Ca | Ca | Ca | Ca | Ca |
| Название | Prg | Prg | Prg | Prg | cum | richterite | Ed | Prg | Prg | Prg | Prg |

Продолжение таблицы 4.10.

| № Образца | ТО-22 | ТО-29 | ТО-29 | ТО-29 | ТО-29 | ТО-29 | ТО-42 | ТО-138 | ТО-138 | ТО-138 | ТО-138 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Содержание оксидов, мас.% | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 47,48 | 47,00 | 43,70 | 44,20 | 46,73 | 43,98 | 44,39 | 45,70 | 42,49 | 44,26 | |
| TiO ₂ | 0,72 | 0,75 | 1,02 | 0,13 | 0,92 | 0,43 | 0,23 | 1,28 | 0,70 | 1,58 | |
| Al ₂ O ₃ | 8,94 | 11,86 | 13,80 | 19,03 | 13,28 | 10,85 | 14,76 | 12,28 | 13,28 | 10,00 | |
| V ₂ O ₃ | | | | | | | | | | | |
| Cr ₂ O ₃ | 0,31 | 1,75 | 1,27 | 1,09 | 1,46 | 0,16 | 0,25 | 0,20 | | | |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,37 | 0,15 | 0,33 | 0,30 | | 0,21 | 0,19 | |
| FeO | 6,67 | 3,15 | 4,80 | 6,90 | 4,18 | 12,54 | 9,20 | 7,45 | 8,57 | 7,13 | |
| MgO | 18,86 | 19,09 | 18,61 | 22,58 | 20,61 | 14,58 | 18,39 | 17,71 | 16,42 | 16,83 | |
| CaO | 8,14 | 8,16 | 8,40 | 1,59 | 8,53 | 6,94 | 8,70 | 8,87 | 9,26 | 9,98 | |
| SrO | | | | | | | | | | | |
| Na ₂ O | 4,72 | 3,89 | 3,73 | 2,02 | 3,55 | 4,63 | 2,56 | 4,27 | 3,46 | 3,61 | |
| K ₂ O | 0,42 | 0,40 | 0,34 | | 0,33 | 0,33 | 0,82 | 0,55 | 0,46 | 0,48 | |
| F | | | | | | | | | | | |
| Cl | | | | 0,05 | 0,03 | | | | | | |
| O=F,Cl (calc) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,01 | -0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| Сумма | 96,26 | 96,05 | 95,79 | 97,95 | 99,76 | 94,77 | 99,60 | 98,31 | 94,85 | 94,06 | |
| Расчет формулы на 16 катионов | | | | | | | | | | | |
| Si | 6,848 | 6,671 | 6,3 | 6,09 | 6,428 | 6,628 | 6,256 | 6,492 | 6,309 | 6,598 | |
| Al | 1,152 | 1,329 | 1,7 | 1,91 | 1,572 | 1,372 | 1,744 | 1,508 | 1,691 | 1,402 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | |
| Ti | 0,08 | 0,08 | 0,11 | 0,01 | 0,10 | 0,05 | 0,02 | 0,14 | 0,08 | 0,18 | |
| Al | 0,37 | 0,66 | 0,65 | 1,18 | 0,58 | 0,56 | 0,71 | 0,55 | 0,63 | 0,36 | |
| V | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0,04 | 0,20 | 0,15 | 0,12 | 0,16 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | | | |
| Fe2+ | 0,46 | 0,03 | 0,10 | | | 1,10 | 0,38 | 0,54 | 0,65 | 0,73 | |
| Mg | 4,06 | 4,04 | 4,00 | 3,69 | 4,16 | 3,28 | 3,86 | 3,75 | 3,64 | 3,74 | |
| C | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | |
| Mn2+ | | | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | | 0,03 | 0,02 | |
| Fe2+ | 0,34 | 0,35 | 0,48 | 0,80 | 0,48 | 0,48 | 0,71 | 0,34 | 0,41 | 0,16 | |
| Mg | | | | 0,95 | 0,06 | | | | | | |
| Ca | 1,26 | 1,24 | 1,30 | 0,21 | 1,26 | 1,12 | 1,26 | 1,35 | 1,47 | 1,59 | |
| Sr | | | | | | | | | | | |
| Na | 0,40 | 0,41 | 0,21 | | 0,18 | 0,36 | | 0,31 | 0,09 | 0,22 | |
| B | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | |
| Ca | | | | 0,02 | | | 0,06 | | | | |
| Na | 0,92 | 0,66 | 0,83 | 0,54 | 0,77 | 1,00 | 0,70 | 0,87 | 0,91 | 0,82 | |
| K | 0,08 | 0,07 | 0,06 | | 0,06 | 0,06 | 0,15 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | |
| A | 1,00 | 0,73 | 0,90 | 0,56 | 0,82 | 1,06 | 0,90 | 0,97 | 0,99 | 0,91 | |
| Группа | Номенклатура амфиболов | | | | | | | | | | |
| Название | Ca Prg | Ca Prg | Ca Prg | Mg-Fe-Mn cum | Ca Prg |

Условные обозначения: Ca Prg- кальцевый паргасит; Ca Ed- кальцевый эденит; Na-Ca-richterite- натрово-кальцевый рихтерит; Mg-Fe-Mn- cum- куммингтонит

Таблица 4.11. Химический состав амфиболов из ксенолитов эклогитового типа пород, кимберлитовая трубка Мир

| № Образца | TM-109 | TM-33 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 47,71 | 43,66 | 45,10 | 46,60 | 37,55 | 40,33 | 44,35 | 46,32 | 42,70 | 47,75 | 50,75 | 36,69 |
| TiO ₂ | 0,57 | 0,63 | 1,35 | 1,38 | | 0,63 | 1,50 | 2,39 | 1,40 | 2,14 | 1,53 | 0,23 |
| Al ₂ O ₃ | 9,15 | 12,98 | 11,77 | 12,47 | 13,89 | 15,02 | 13,93 | 11,19 | 9,20 | 13,76 | 12,13 | 20,50 |
| Cr ₂ O ₃ | | | | | | | | | 0,25 | | | |
| MnO | | | | | | | | | | | | 0,31 |
| FeO | 7,04 | 8,80 | 8,72 | 9,40 | 9,30 | 10,43 | 8,67 | 8,59 | 7,26 | 8,92 | 8,16 | 14,04 |
| MgO | 19,57 | 16,42 | 16,47 | 17,40 | 18,59 | 17,73 | 15,64 | 16,43 | 24,61 | 18,04 | 26,57 | 14,26 |
| CaO | 8,09 | 8,63 | 7,71 | 7,84 | 6,94 | 8,58 | 7,63 | 7,39 | 7,46 | 7,54 | 7,56 | 10,62 |
| Na ₂ O | 4,92 | 4,34 | 4,80 | 5,01 | 3,17 | 3,37 | 5,20 | 5,14 | 3,41 | 5,36 | 5,01 | |
| K ₂ O | 0,34 | 0,51 | 0,63 | 0,71 | 0,42 | 0,36 | 0,94 | 1,02 | 0,49 | 1,00 | 0,57 | |
| F | | | | | | | | | | | | |
| Cl | | | | | 0,42 | 0,16 | | | 0,55 | | 0,28 | |
| O=F,Cl (calc) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,09 | -0,04 | 0,00 | 0,00 | -0,12 | 0,00 | -0,06 | 0,00 |
| Initial Total | 97,39 | 95,97 | 96,55 | 100,81 | 90,19 | 96,57 | 97,86 | 98,47 | 97,21 | 104,51 | 112,50 | 96,65 |

Продолжение таблицы 4.11

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|-------|--------|--------|---------------|--------|-------------|-------------|---------------|--------|---------------|---------------|
| Si | 6,809 | 6,403 | 6,557 | 6,502 | 5,919 | 5,946 | 6,377 | 6,607 | 6,199 | 6,411 | 6,309 | 5,458 |
| Al | 1,191 | 1,597 | 1,443 | 1,498 | 2,081 | 2,054 | 1,623 | 1,393 | 1,574 | 1,589 | 1,691 | 2,542 |
| Ti | | | | | | | | | 0,153 | | | |
| T subtotal | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7,926 | 8 | 8 | 8 |
| Ti | 0,061 | 0,07 | 0,148 | 0,145 | | 0,07 | 0,162 | 0,256 | | 0,216 | 0,143 | 0,026 |
| Al | 0,347 | 0,646 | 0,574 | 0,553 | 0,499 | 0,556 | 0,737 | 0,488 | | 0,588 | 0,087 | 1,052 |
| Cr | | | | | | | | | 0,029 | | | |
| Fe ²⁺ | 0,428 | 0,694 | 0,709 | 0,683 | 0,133 | 0,478 | 0,748 | 0,762 | | 0,585 | | 0,76 |
| Mg | 4,163 | 3,59 | 3,57 | 3,619 | 4,368 | 3,897 | 3,352 | 3,494 | 4,971 | 3,611 | 4,77 | 3,162 |
| C subtotal | 4,999 | 5 | 5,001 | 5 | 5 | 5,001 | 4,999 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Mn ²⁺ | | | | | | | | | | | | 0,039 |
| Fe ²⁺ | 0,412 | 0,385 | 0,351 | 0,414 | 1,093 | 0,808 | 0,294 | 0,263 | 0,881 | 0,416 | 0,848 | 0,987 |
| Mg | | | | | | | | | 0,355 | | 0,154 | |
| Ca | 1,237 | 1,356 | 1,201 | 1,172 | 0,907 | 1,192 | 1,175 | 1,129 | 0,764 | 1,085 | 0,997 | 0,974 |
| Na | 0,351 | 0,259 | 0,448 | 0,414 | | | 0,53 | 0,608 | | 0,499 | | |
| B subtotal | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,999 | 2 | 2 | 2 | 1,999 | 2 |
| Ca | | | | | 0,265 | 0,164 | | | 0,396 | | 0,01 | 0,719 |
| Na | 1,011 | 0,975 | 0,905 | 0,942 | 0,969 | 0,963 | 0,919 | 0,814 | 0,96 | 0,896 | 1,208 | |
| K | 0,062 | 0,095 | 0,117 | 0,126 | 0,084 | 0,068 | 0,172 | 0,186 | 0,091 | 0,171 | 0,09 | |
| A subtotal | 1,073 | 1,07 | 1,022 | 1,068 | 1,318 | 1,195 | 1,091 | 1 | 1,447 | 1,067 | 1,308 | 0,719 |
| O (non-W) | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| OH | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,888 | 1,96 | 2 | 2 | 1,865 | 2 | 1,941 | 2 |
| Cl | | | | | 0,112 | 0,04 | | | 0,135 | | 0,059 | |
| W subtotal | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Sum T,C,B,A | 16,072 | 16,07 | 16,023 | 16,068 | 16,318 | 16,196 | 16,089 | 16 | 16,373 | 16,067 | 16,307 | 15,719 |
| Группа | Ca | Ca | Ca | Ca | Mg-Fe-Mn | Ca | Na-Ca | Na-Ca | Mg-Fe-Mn | Ca | Mg-Fe-Mn | Mg-Fe-Mn |
| Название | Ed | Prg | Prg | Prg | cummingtonite | Prg | Katophorite | Katophorite | cummingtonite | Prg | cummingtonite | cummingtonite |

Таблица 4.12. Составы джерфшерита в интерстиционных обособлениях и прожилках в перидотитах, пироксенитах и эклогитах кимберлитовой трубки Мир и Обнаженная

| № Образца | ТМ-156 (эклогит) | ТМ-100 (перидотит) | Тм-56 (Гранатовый вебстерит) | ТО-266 (шпинелевый лерцолит) | ТО-266 (шпинелевый лерцолит) | ТО-266 (шпинелевый лерцолит) | ТО-266 (шпинелевый лерцолит) | ТО-138 (гранатовый вебстерит) |
|-----------|------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Si | | | | | | | | | | 0,93 | 0,22 | 0,40 | 1,68 | 0,45 |
| K | 7,88 | 9,27 | 9,17 | 9,25 | 9,45 | 8,53 | 9,33 | 9,3 | 7,65 | 8,78 | 8,85 | 8,88 | 8,28 | |
| Na | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe | 39,77 | 43,13 | 42,26 | 41,12 | 41,74 | 41,48 | 40,55 | 39,68 | 33,22 | 37,85 | 36,20 | 36,55 | 37,37 | |
| Ni | 15,67 | 11,61 | 10,27 | 12,25 | 9,45 | 13,43 | 13,87 | 15,09 | 19,95 | 13,11 | 17,06 | 15,02 | 10,31 | |
| Co | 0,51 | | | | | | | | 0,98 | 0,24 | 0,13 | 0,37 | | |
| Cu | 1,03 | 1,61 | 2,67 | 1,11 | 2,77 | 1,07 | 1,27 | 1 | 0,48 | 6,15 | 2,31 | 3,71 | 6,63 | |
| S | 34,21 | 32,15 | 33,61 | 34,2 | 34,31 | 34,28 | 33,66 | 33,65 | 29,38 | 31,16 | 31,01 | 30,80 | 32,07 | |
| Cl | | | 1,32 | 1,3 | 1,34 | 1,21 | 1,32 | 1,28 | 1,00 | 1,07 | 1,21 | 1,28 | 1,21 | |
| Zn | 0,50 | | | | | | | | | | | | | |
| Cr | | | | | | | | | 0,64 | 0,00 | 0,00 | 0,18 | | |
| Сумма | 99,57 | 97,77 | 99,3 | 99,23 | 99,06 | 100 | 100 | 100 | 94,23 | 98,58 | 97,17 | 98,47 | 96,32 | |

Таблица 4.13. Анализ аксессуарного монтичеллита из ксенолита гранатового вебстерита кимберлитовой трубки Мир

| Образец | Минерал | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Cl | Сумма |
|---------|---------|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-----|-------|------|-------|
| ТМ-68 | Мтс | 37,25 | 0,57 | 1,11 | 18,85 | 0,35 | 19 | 19,43 | 0,55 | 97,11 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица 9.1. Редкоэлементные составы гранатов из ксенолитов перидотитов, вебстерит-пироксенитов и эклогитов кимберлитовых трубок Якутии (Обнаженная и Мир)

| № образца | | Содержание элементов, ppm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|---------------------------------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | Sc | Ti | V | Sr | Zr | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| Перидотитовый тип | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TO78 | Ц | 64.04 | 599 | 246 | 0.45 | 5.21 | 0.22 | 0.43 | 0.04 | 0.43 | 0.53 | 0.29 | 0.92 | 0.23 | 1.46 | 0.25 | 0.45 | 0.06 | 0.28 | 0.05 |
| TO78 | К | 51.27 | 441 | 147 | 10.21 | 14.48 | 4.49 | 7.73 | 0.54 | 1.59 | 0.37 | 0.28 | 1.36 | 0.17 | 1.10 | 0.17 | 0.44 | 0.05 | 0.18 | 0.06 |
| TO281 | Ц | 59.79 | 682.92 | 114.78 | 1.41 | 10.40 | 0.05 | 0.18 | 0.02 | 0.18 | 0.37 | 0.21 | 1.25 | 0.25 | 2.33 | 0.50 | 1.74 | 0.26 | 1.80 | 0.29 |
| TO281 | К | 56.19 | 620.72 | 114.51 | 2.88 | 9.67 | 0.15 | 0.27 | 0.03 | 0.20 | 0.37 | 0.19 | 0.85 | 0.17 | 1.73 | 0.39 | 1.15 | 0.21 | 1.30 | 0.18 |
| TO212 | Ц | 69.53 | 400.90 | 111.42 | 4.59 | 16.85 | 0.19 | 0.42 | 0.03 | 0.23 | 0.41 | 0.23 | 1.03 | 0.22 | 1.72 | 0.40 | 1.04 | 0.17 | 0.84 | 0.12 |
| TO212 | К | 68.53 | 437.74 | 100.85 | 6.38 | 17.33 | 0.95 | 1.96 | 0.11 | 0.42 | 0.38 | 0.25 | 0.89 | 0.22 | 1.83 | 0.40 | 0.92 | 0.13 | 0.77 | 0.12 |
| TO125 | Ц | 117.80 | 368.18 | 84.07 | 5.97 | 9.99 | 0.23 | 0.42 | 0.04 | 0.29 | 0.32 | 0.16 | 0.79 | 0.13 | 0.98 | 0.23 | 0.67 | 0.12 | 0.99 | 0.16 |
| TO125 | К | 111.58 | 414.90 | 83.54 | 3.30 | 9.50 | 0.11 | 0.26 | 0.04 | 0.34 | 0.33 | 0.20 | 0.85 | 0.16 | 1.08 | 0.24 | 0.81 | 0.13 | 1.01 | 0.17 |
| TM34 | Ц | 117.06 | 401.82 | 175.60 | 0.01 | 2.62 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.07 | 0.69 | 0.22 | 2.60 | 0.78 | 2.94 | 0.44 | 4.01 | 0.60 |
| TM34 | К | 114.75 | 393.89 | 176.85 | 1.03 | 2.32 | 0.03 | 0.08 | 0.00 | 0.08 | 0.06 | 0.08 | 0.63 | 0.25 | 2.86 | 0.77 | 2.71 | 0.45 | 3.93 | 0.56 |
| TM34 | Ц | 109.78 | 300.55 | 133.79 | 0.30 | 1.27 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.05 | 0.06 | 0.40 | 0.21 | 2.22 | 0.76 | 2.87 | 0.44 | 3.16 | 0.58 |
| TM34 | К | 112.16 | 286.97 | 155.68 | 0.19 | 1.37 | 0.02 | 0.07 | 0.00 | 0.01 | 0.11 | 0.06 | 0.71 | 0.23 | 2.25 | 0.80 | 2.86 | 0.46 | 3.14 | 0.51 |
| TM31 | Ц | 102.66 | 266.85 | 153.01 | 0.02 | 3.43 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.08 | 0.08 | 0.47 | 0.15 | 1.88 | 0.56 | 2.02 | 0.30 | 2.48 | 0.46 |
| TM31 | К | 104.02 | 313.93 | 150.24 | 0.01 | 4.96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.08 | 0.10 | 0.67 | 0.22 | 2.09 | 0.66 | 2.50 | 0.41 | 3.15 | 0.49 |
| TM73 | Ц | 100.57 | 396.40 | 149.91 | 2.97 | 2.91 | 0.12 | 0.18 | 0.03 | 0.06 | 0.08 | 0.09 | 0.61 | 0.22 | 2.16 | 0.48 | 1.87 | 0.29 | 2.20 | 0.38 |
| TM73 | К | 105.51 | 418.03 | 152.03 | 2.75 | 2.64 | 0.03 | 0.08 | 0.01 | 0.05 | 0.10 | 0.08 | 0.44 | 0.23 | 2.35 | 0.57 | 1.95 | 0.32 | 2.38 | 0.44 |
| TM73 | К | 102.26 | 406.63 | 147.47 | 5.28 | 3.48 | 0.14 | 0.18 | 0.01 | 0.09 | 0.04 | 0.08 | 0.54 | 0.21 | 1.93 | 0.52 | 1.75 | 0.30 | 2.39 | 0.38 |
| TM38 | Ц | 101.05 | 412.98 | 136.10 | 0.01 | 5.21 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.12 | 0.66 | 0.23 | 2.66 | 0.71 | 2.57 | 0.39 | 2.96 | 0.53 |
| TM38 | К | 99.00 | 416.50 | 137.95 | 0.04 | 5.51 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.10 | 0.11 | 0.68 | 0.22 | 2.51 | 0.67 | 2.32 | 0.37 | 2.76 | 0.48 |
| TM61 | Ц | 106.6 | 367.11 | 182.78 | 0.65 | 4.86 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.07 | 0.69 | 0.24 | 2.44 | 0.67 | 2.30 | 0.41 | 3.28 | 0.44 |
| TM61 | К | 108.7 | 322.27 | 158.24 | 0.22 | 3.48 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.05 | 0.56 | 0.24 | 2.50 | 0.72 | 2.38 | 0.40 | 3.14 | 0.48 |
| TM61 | К | 108.7 | 309.63 | 102.98 | 0.04 | 2.99 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.08 | 0.70 | 0.24 | 2.42 | 0.74 | 2.41 | 0.42 | 2.94 | 0.52 |

Продолжение таблицы 9.1

| № образца | | Sc | Ti | V | Sr | Zr | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | |
|-------------------------------|---|--------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Пироксенитовый тип | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ТО16 | Ц | 85.92 | 493 | 160 | 0.07 | 1.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.09 | 0.12 | 0.85 | 0.47 | 5.59 | 1.78 | 7.19 | 1.23 | 9.55 | 1.63 | |
| ТО16 | К | 75.75 | 502 | 159 | 0.11 | 1.76 | 0.02 | 0.06 | 0.00 | 0.04 | 0.17 | 0.14 | 0.81 | 0.47 | 4.98 | 1.65 | 6.26 | 1.15 | 8.21 | 1.44 | |
| ТО16 | К | 77.95 | 504 | 156 | 0.50 | 2.12 | 0.09 | 0.20 | 0.02 | 0.07 | 0.12 | 0.14 | 0.96 | 0.43 | 5.28 | 1.63 | 6.47 | 1.17 | 8.61 | 1.52 | |
| ТО22 | Ц | 31.25 | 231.01 | 34.91 | 0.15 | 1.38 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.21 | 0.31 | 0.51 | 1.15 | 0.20 | 1.39 | 0.31 | 0.81 | 0.11 | 0.70 | 0.12 | |
| ТО22 | К | 30.25 | 256.04 | 40.16 | 0.77 | 2.09 | 0.15 | 0.22 | 0.03 | 0.21 | 0.27 | 0.49 | 1.08 | 0.19 | 1.37 | 0.31 | 0.69 | 0.10 | 0.67 | 0.10 | |
| ТО69 | Ц | 60.74 | 720.39 | 92.05 | 2.56 | 5.50 | 1.98 | 2.45 | 0.18 | 0.83 | 1.02 | 0.68 | 3.21 | 0.78 | 5.86 | 1.58 | 4.89 | 0.87 | 6.33 | 1.02 | |
| ТО69 | К | 60.47 | 418.39 | 69.44 | 2.98 | 3.46 | 0.88 | 1.11 | 0.07 | 0.41 | 0.79 | 0.51 | 2.45 | 0.61 | 5.80 | 1.41 | 4.60 | 0.73 | 5.45 | 0.96 | |
| ТО29 | Ц | 67.23 | 700.23 | 101.50 | 8.03 | 43.38 | 2.25 | 2.35 | 0.10 | 0.79 | 2.57 | 1.54 | 4.35 | 0.63 | 3.52 | 0.46 | 0.86 | 0.11 | 0.66 | 0.10 | |
| ТО29 | К | 68.75 | 720.78 | 109.38 | 33.44 | 46.31 | 2.57 | 3.35 | 0.25 | 1.20 | 2.95 | 1.63 | 5.11 | 0.73 | 4.00 | 0.57 | 1.23 | 0.15 | 0.82 | 0.12 | |
| ТО29 | Ц | 62.05 | 642.66 | 112.08 | 114.40 | 42.14 | 10.98 | 19.58 | 1.45 | 4.57 | 2.96 | 1.55 | 4.90 | 0.62 | 2.86 | 0.51 | 0.83 | 0.11 | 0.65 | 0.09 | |
| ТО29 | К | 70.46 | 396.56 | 70.05 | 43.05 | 30.44 | 3.52 | 5.12 | 0.24 | 1.16 | 1.67 | 0.96 | 4.02 | 0.53 | 3.70 | 0.56 | 1.52 | 0.18 | 1.37 | 0.19 | |
| ТО29 | К | 92.67 | 479.88 | 72.80 | 16.95 | 29.19 | 1.49 | 2.67 | 0.17 | 0.83 | 1.62 | 1.26 | 4.64 | 0.76 | 4.45 | 0.72 | 1.55 | 0.24 | 1.40 | 0.19 | |
| ТО138 | Ц | 62.1 | 761.80 | 105.06 | 0.12 | 7.87 | 0.00 | 0.04 | 0.03 | 0.62 | 1.07 | 0.60 | 2.72 | 0.55 | 5.25 | 1.15 | 4.09 | 0.63 | 4.89 | 0.70 | |
| ТО138 | К | 62.4 | 1115.75 | 104.73 | 0.10 | 9.51 | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.69 | 0.97 | 0.57 | 2.86 | 0.61 | 5.45 | 1.26 | 4.16 | 0.61 | 4.46 | 0.72 | |
| ТМ137 | Ц | 94.03 | 6774.44 | 292.46 | 0.51 | 57.12 | 0.02 | 0.28 | 0.09 | 1.22 | 0.84 | 0.51 | 2.00 | 0.46 | 3.47 | 0.86 | 2.62 | 0.47 | 2.97 | 0.50 | |
| ТМ137 | К | 95.20 | 6579.98 | 285.30 | 2.19 | 57.92 | 0.21 | 0.61 | 0.12 | 1.10 | 0.88 | 0.43 | 2.06 | 0.47 | 4.08 | 0.87 | 2.95 | 0.42 | 3.38 | 0.51 | |
| ТМ126 | Ц | 76.96 | 217.64 | 163.04 | 0.02 | 3.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.05 | 0.30 | 0.14 | 1.57 | 0.46 | 1.55 | 0.30 | 2.11 | 0.35 | |
| ТМ126 | К | 78.38 | 255.85 | 167.48 | 0.07 | 3.78 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.09 | 0.06 | 0.32 | 0.17 | 1.90 | 0.50 | 1.84 | 0.30 | 2.44 | 0.41 | |
| ТМ56 | Ц | 25.12 | 222.66 | 169.41 | 14.35 | 0.99 | 0.89 | 2.13 | 0.31 | 1.79 | 0.52 | 0.16 | 0.52 | 0.09 | 0.29 | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | |
| ТМ56 | К | 24.57 | 200.09 | 170.56 | 14.63 | 1.39 | 0.92 | 2.22 | 0.36 | 1.70 | 0.63 | 0.17 | 0.54 | 0.05 | 0.21 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | |
| ТМ56 | Ц | 24.78 | 221.24 | 168.76 | 14.83 | 1.83 | 0.94 | 2.44 | 0.42 | 2.20 | 0.57 | 0.17 | 0.48 | 0.07 | 0.26 | 0.04 | 0.08 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | |
| ТМ56 | К | 23.78 | 217.78 | 168.71 | 15.55 | 2.18 | 1.08 | 2.55 | 0.34 | 1.96 | 0.65 | 0.15 | 0.60 | 0.06 | 0.24 | 0.03 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | |
| ТМ182 | Ц | 16.70 | 192.57 | 181.68 | 33.51 | 3.81 | 2.01 | 4.83 | 0.82 | 2.85 | 0.89 | 0.22 | 0.70 | 0.10 | 0.51 | 0.07 | 0.18 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | |
| ТМ182 | К | 14.31 | 235.77 | 183.97 | 19.36 | 8.15 | 2.39 | 4.02 | 0.60 | 2.08 | 0.42 | 0.22 | 0.60 | 0.11 | 0.46 | 0.06 | 0.18 | 0.01 | 0.14 | 0.01 | |
| ТМ147 | Ц | 223.65 | 810.49 | 554.89 | 55.45 | 23.95 | 8.60 | 21.06 | 1.98 | 6.50 | 1.33 | 0.82 | 1.42 | 0.33 | 2.55 | 0.60 | 2.10 | 0.33 | 2.60 | 0.47 | |
| ТМ147 | К | 252.72 | 941.63 | 759.33 | 1.20 | 13.51 | 0.06 | 0.32 | 0.06 | 0.47 | 0.48 | 0.25 | 0.72 | 0.32 | 2.44 | 0.70 | 2.29 | 0.41 | 3.21 | 0.52 | |
| ТМ68 | Ц | 7.1 | 46.95 | 49.85 | 3.33 | 0.41 | 0.15 | 0.49 | 0.09 | 0.48 | 0.19 | 0.05 | 0.17 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | |
| ТМ68 | К | 7.3 | 47.06 | 50.12 | 3.31 | 0.30 | 0.15 | 0.48 | 0.09 | 0.46 | 0.19 | 0.05 | 0.16 | 0.02 | 0.09 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | |

Продолжение таблицы 9.1

| <i>№ образца</i> | | Sc | Ti | V | Sr | Zr | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|------------------------|---|-------|---------|-------|--------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Эклогитовый тип | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TM156 | Ц | 46.78 | 1615 | 120 | 1.63 | 6.92 | 0.06 | 0.15 | 0.05 | 0.84 | 1.30 | 0.67 | 2.90 | 0.84 | 7.89 | 1.82 | 4.98 | 0.86 | 6.06 | 0.82 |
| TM156 | К | 48.97 | 2162 | 138 | 1.00 | 8.56 | 0.10 | 0.14 | 0.06 | 0.80 | 1.42 | 0.82 | 3.50 | 0.89 | 8.67 | 2.15 | 6.61 | 1.08 | 6.96 | 1.04 |
| TM33 | Ц | 15.88 | 1925 | 241 | 362.71 | 64.04 | 2.88 | 10.96 | 2.00 | 9.50 | 2.73 | 0.90 | 2.62 | 0.30 | 1.30 | 0.20 | 0.35 | 0.04 | 0.21 | 0.04 |
| TM33 | К | 34.05 | 1934 | 76 | 10.61 | 62.26 | 0.67 | 0.95 | 0.14 | 1.23 | 1.15 | 0.75 | 3.03 | 0.73 | 6.58 | 1.49 | 4.63 | 0.66 | 4.54 | 0.65 |
| TM109 | Ц | 47.7 | 1145.43 | 97.17 | 0.05 | 6.44 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.28 | 0.47 | 0.28 | 1.34 | 0.33 | 2.74 | 0.74 | 2.45 | 0.38 | 3.10 | 0.50 |
| TM109 | К | 51.0 | 855.26 | 83.87 | 0.04 | 3.95 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.19 | 0.40 | 0.23 | 1.18 | 0.33 | 2.84 | 0.72 | 2.44 | 0.41 | 3.07 | 0.48 |

Таблица 9.2. Редкоэлементные составы клинопироксенов из ксенолитов перидотитов, вебстерит-пироксенитов и эклогитов кимберлитовых трубок Якутии (Обнаженная и Мир)

| № Образца | | Содержание элементов, ppm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|---------------------------------|----------|---------|--------|--------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | Sc | Ti | V | Sr | Zr | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| Перидотитовый тип | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TO78 | Ц | 31.86 | 1528 | 243 | 141.04 | 5.74 | 3.70 | 11.61 | 1.57 | 6.22 | 1.19 | 0.54 | 1.38 | 0.16 | 1.07 | 0.18 | 0.43 | 0.05 | 0.26 | 0.03 |
| TO78 | К | 28.10 | 1705 | 280 | 150.79 | 7.18 | 4.69 | 12.89 | 1.81 | 7.04 | 1.27 | 0.59 | 1.39 | 0.15 | 0.60 | 0.11 | 0.17 | 0.01 | 0.07 | 0.01 |
| TO78 | Ц | 21.85 | 1469 | 302 | 148.90 | 7.48 | 3.56 | 11.85 | 1.72 | 7.08 | 1.26 | 0.49 | 0.90 | 0.08 | 0.24 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| TO78 | К | 23.03 | 1875 | 271 | 143.46 | 6.67 | 3.86 | 12.95 | 1.79 | 7.41 | 1.42 | 0.50 | 1.00 | 0.09 | 0.45 | 0.03 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| TO281 | Ц | 3.05 | 292.51 | 26.52 | 0.19 | 0.13 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TO281 | К | 3.45 | 196.56 | 29.48 | 0.35 | 0.21 | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TO212 | Ц | 20.79 | 1572.23 | 388.16 | 7.59 | 4.58 | 0.32 | 0.71 | 0.05 | 0.30 | -0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| TO212 | К | 13.61 | 1063.53 | 198.04 | 2.87 | 3.28 | 0.12 | 0.41 | 0.02 | 0.12 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 |
| TO125 | Ц | 291.44 | 22849.57 | 2820.48 | 43.53 | 31.82 | 1.94 | 3.45 | 0.58 | 3.43 | 1.31 | 0.18 | 0.00 | 0.10 | 0.43 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TO125 | К | 115.09 | 6181.69 | 893.61 | 157.28 | 102.15 | 7.38 | 11.82 | 1.29 | 3.83 | 0.14 | 0.21 | 0.46 | 0.14 | 0.24 | 0.06 | 0.43 | 0.06 | 0.37 | 0.03 |
| TM34 | Ц | 21.46 | 236.26 | 211.70 | 121.00 | 34.30 | 2.39 | 3.71 | 0.37 | 1.28 | 0.22 | 0.11 | 0.41 | 0.09 | 0.45 | 0.06 | 0.14 | 0.01 | 0.09 | 0.03 |
| TM34 | К | 18.35 | 255.38 | 252.93 | 0.80 | 1.38 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.18 | 0.05 | 0.41 | 0.06 | 0.28 | 0.04 | 0.11 | 0.01 | 0.05 | 0.01 |
| TM73 | Ц | 23.50 | 332.46 | 353.15 | 11.01 | 2.08 | 0.97 | 1.06 | 0.09 | 0.55 | 0.12 | 0.11 | 0.38 | 0.06 | 0.25 | 0.04 | 0.08 | 0.01 | 0.02 | 0.00 |
| TM73 | К | 23.14 | 531.67 | 316.27 | 112.55 | 23.99 | 4.42 | 12.50 | 1.71 | 7.23 | 1.54 | 0.35 | 1.37 | 0.10 | 0.61 | 0.09 | 0.22 | 0.03 | 0.15 | 0.01 |
| TM31 | Ц | 21.85 | 184.68 | 282.22 | 14.08 | 2.89 | 0.68 | 1.01 | 0.11 | 0.50 | 0.20 | 0.08 | 0.37 | 0.03 | 0.23 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 0.03 | 0.01 |
| TM31 | К | 21.13 | 195.68 | 286.13 | 5.21 | 2.51 | 0.10 | 0.15 | 0.02 | 0.24 | 0.13 | 0.08 | 0.33 | 0.04 | 0.23 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| TM38 | Ц | 5.76 | 119.87 | 17.67 | 0.01 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TM38 | К | 6.44 | 119.87 | 17.30 | 0.90 | 0.03 | 0.15 | 0.31 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| TM38 | К | 6.06 | 119.87 | 17.77 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TM61 | Ц | 21.6 | 311.38 | 283.72 | 4.36 | 3.82 | 0.12 | 0.32 | 0.02 | 0.16 | 0.24 | 0.10 | 0.50 | 0.06 | 0.44 | 0.07 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 |
| TM61 | К | 21.0 | 314.66 | 289.16 | 5.05 | 4.13 | 0.19 | 0.46 | 0.04 | 0.12 | 0.20 | 0.09 | 0.36 | 0.06 | 0.36 | 0.05 | 0.13 | 0.00 | 0.06 | 0.00 |

Продолжение таблицы 9.2.

| № Образца | | Sc | Ti | V | Sr | Zr | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|---------------------------|---|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Пироксенитовый тип | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ТО16 | Ц | 26.89 | 847 | 485 | 81.42 | 3.81 | 3.15 | 6.07 | 0.65 | 1.53 | 0.29 | 0.14 | 0.73 | 0.13 | 0.63 | 0.10 | 0.21 | 0.02 | 0.12 | 0.02 |
| ТО16 | К | 29.18 | 937 | 548 | 104.63 | 3.47 | 4.15 | 9.03 | 0.93 | 2.92 | 0.46 | 0.18 | 0.87 | 0.12 | 0.72 | 0.15 | 0.26 | 0.04 | 0.08 | 0.02 |
| ТО22 | Ц | 15.01 | 696.30 | 197.29 | 381.84 | 7.44 | 4.49 | 8.23 | 0.97 | 5.29 | 1.51 | 0.90 | 1.03 | 0.10 | 0.45 | 0.04 | 0.09 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| ТО22 | К | 14.50 | 770.38 | 190.64 | 380.31 | 8.89 | 5.29 | 10.14 | 1.28 | 6.57 | 1.50 | 0.94 | 1.28 | 0.09 | 0.38 | 0.04 | 0.08 | 0.01 | 0.04 | 0.01 |
| ТО69 | Ц | 33.81 | 1218.65 | 310.16 | 320.77 | 12.80 | 1.86 | 9.89 | 2.35 | 15.20 | 3.96 | 1.27 | 3.33 | 0.39 | 2.00 | 0.33 | 0.79 | 0.10 | 0.80 | 0.14 |
| ТО69 | К | 24.19 | 1476.59 | 263.91 | 300.22 | 9.62 | 0.84 | 8.03 | 2.19 | 13.59 | 3.74 | 1.14 | 2.67 | 0.30 | 1.29 | 0.16 | 0.38 | 0.03 | 0.14 | 0.02 |
| ТО175 | Ц | 24.98 | 1033.29 | 196.20 | 129.31 | 8.11 | 2.67 | 9.74 | 1.49 | 6.98 | 1.24 | 0.40 | 0.93 | 0.07 | 0.29 | 0.02 | 0.06 | 0.00 | 0.03 | 0.01 |
| ТО175 | К | 30.96 | 1051.81 | 172.73 | 147.05 | 11.12 | 14.01 | 27.74 | 3.46 | 13.38 | 2.19 | 0.60 | 1.90 | 0.15 | 0.78 | 0.12 | 0.24 | 0.02 | 0.14 | 0.02 |
| ТО254 | Ц | 287.61 | 543.49 | 212.55 | 658.77 | 106.69 | 283.50 | 500.74 | 46.23 | 126.94 | 13.18 | 3.22 | 10.57 | 1.29 | 6.37 | 1.14 | 3.00 | 0.37 | 2.26 | 0.40 |
| ТО254 | К | 249.46 | 786.79 | 288.26 | 645.14 | 161.59 | 416.55 | 624.75 | 67.04 | 187.66 | 21.73 | 4.37 | 16.73 | 2.35 | 12.59 | 2.46 | 7.02 | 0.87 | 5.15 | 0.66 |
| ТО29 | Ц | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ТО29 | К | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ТО138 | Ц | 21.1 | 2045.84 | 308.86 | 275.91 | 9.73 | 1.64 | 9.69 | 2.18 | 12.37 | 2.88 | 0.92 | 2.02 | 0.23 | 1.11 | 0.16 | 0.38 | 0.02 | 0.13 | 0.02 |
| ТО138 | К | 23.1 | 2204.05 | 326.86 | 274.06 | 10.77 | 1.63 | 9.63 | 2.16 | 12.92 | 3.07 | 0.96 | 1.94 | 0.25 | 1.06 | 0.14 | 0.31 | 0.01 | 0.13 | 0.02 |
| ТМ137 | Ц | 24.77 | 2386.46 | 281.56 | 132.40 | 13.19 | 2.35 | 7.80 | 1.27 | 6.73 | 1.60 | 0.50 | 1.55 | 0.21 | 1.01 | 0.15 | 0.36 | 0.03 | 0.17 | 0.02 |
| ТМ137 | К | 24.30 | 2309.53 | 285.35 | 141.39 | 11.99 | 2.30 | 8.54 | 1.37 | 7.63 | 1.80 | 0.57 | 1.75 | 0.19 | 0.95 | 0.15 | 0.44 | 0.04 | 0.18 | 0.02 |
| ТМ126 | Ц | 6.37 | 52.21 | 18.71 | 0.31 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ТМ126 | К | 7.71 | 62.18 | 22.56 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ТМ126 | Ц | 6.42 | 52.68 | 19.50 | 12.47 | 0.56 | 2.25 | 4.17 | 0.34 | 1.04 | 0.13 | 0.05 | 0.19 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ТМ126 | К | 4.12 | 32.10 | 16.51 | 3.58 | 0.39 | 0.70 | 1.54 | 0.13 | 0.39 | 0.05 | 0.02 | 0.06 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ТМ56 | Ц | 4.85 | 147.13 | 22.99 | 0.93 | 1.86 | 0.15 | 0.31 | 0.03 | 0.09 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| ТМ56 | К | 13.66 | 363.35 | 62.50 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ТМ56 | К | 6.15 | 193.50 | 31.45 | 0.73 | 1.19 | 0.10 | 0.20 | 0.04 | 0.10 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Продолжение таблицы 9.2.

| № Образца | | Sc | Ti | V | Sr | Zr | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | |
|-------------------------------|---|-------|---------|--------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Пироксенитовый тип | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TM182 | Ц | 13.97 | 162.95 | 194.56 | 23.97 | 5.40 | 1.72 | 4.32 | 0.69 | 2.53 | 0.78 | 0.25 | 0.50 | 0.12 | 0.43 | 0.04 | 0.17 | 0.02 | 0.11 | 0.00 | |
| TM182 | К | 10.92 | 161.26 | 189.00 | 15.34 | 1.22 | 0.93 | 3.07 | 0.42 | 2.72 | 0.75 | 0.25 | 0.50 | 0.09 | 0.28 | 0.04 | 0.10 | 0.02 | 0.09 | 0.01 | |
| TM147 | Ц | 11.71 | 176.49 | 186.70 | 13.92 | 2.57 | 0.65 | 2.19 | 0.52 | 1.78 | 0.82 | 0.19 | 0.38 | 0.10 | 0.39 | 0.07 | 0.11 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | |
| TM147 | К | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| TM147 | К | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| TM68 | Ц | 8.7 | 200.97 | 42.60 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.59 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| TM68 | К | 8.7 | 210.41 | 44.53 | 0.02 | 0.12 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| TM68 | Ц | 27.3 | 175.63 | 194.83 | 12.86 | 1.26 | 0.57 | 1.90 | 0.33 | 2.00 | 0.52 | 0.18 | 0.58 | 0.07 | 0.28 | 0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | |
| TM68 | К | 27.3 | 179.42 | 200.31 | 13.03 | 1.19 | 0.57 | 1.93 | 0.33 | 1.81 | 0.65 | 0.21 | 0.58 | 0.05 | 0.31 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | |
| Эклогитовый тип | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TM109 | Ц | 21.6 | 2402.69 | 367.72 | 195.47 | 18.39 | 1.86 | 8.56 | 1.65 | 9.05 | 1.75 | 0.54 | 1.39 | 0.17 | 0.83 | 0.09 | 0.20 | 0.02 | 0.09 | 0.01 | |
| TM109 | К | 22.7 | 2452.58 | 380.23 | 197.41 | 19.41 | 1.92 | 8.27 | 1.81 | 9.17 | 1.67 | 0.58 | 1.28 | 0.16 | 0.77 | 0.13 | 0.19 | 0.02 | 0.08 | 0.01 | |
| TM109 | Ц | 21.8 | 2276.54 | 370.54 | 190.26 | 18.33 | 1.87 | 8.17 | 1.74 | 8.46 | 1.60 | 0.55 | 1.31 | 0.15 | 0.74 | 0.11 | 0.14 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | |
| TM109 | К | 22.3 | 2427.69 | 405.99 | 195.79 | 18.05 | 2.00 | 9.12 | 1.68 | 9.06 | 1.62 | 0.55 | 1.14 | 0.13 | 0.70 | 0.09 | 0.19 | 0.03 | 0.10 | 0.01 | |
| TM156 | Ц | 18.27 | 2960 | 381 | 119.91 | 8.24 | 0.45 | 3.81 | 1.09 | 6.17 | 1.62 | 0.50 | 1.19 | 0.18 | 0.79 | 0.10 | 0.25 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | |
| TM156 | К | 15.38 | 3053 | 383 | 117.71 | 8.31 | 0.35 | 3.78 | 1.04 | 6.07 | 1.25 | 0.53 | 1.05 | 0.13 | 0.73 | 0.08 | 0.24 | 0.02 | 0.07 | 0.00 | |
| TM156 | К | 19.48 | 2501 | 400 | 126.28 | 10.18 | 0.43 | 4.37 | 1.13 | 7.05 | 1.60 | 0.54 | 1.20 | 0.15 | 0.82 | 0.09 | 0.19 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | |
| TM33 | Ц | 17.33 | 1923 | 218 | 366.39 | 66.46 | 2.35 | 9.08 | 1.67 | 9.52 | 2.19 | 0.88 | 2.69 | 0.32 | 1.50 | 0.24 | 0.46 | 0.05 | 0.19 | 0.02 | |
| TM33 | К | 16.23 | 1931 | 226 | 380.97 | 67.66 | 2.58 | 9.01 | 1.61 | 9.37 | 2.27 | 0.77 | 2.32 | 0.31 | 1.40 | 0.19 | 0.40 | 0.04 | 0.19 | 0.03 | |

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица 9.3. Оценки РТ-параметров, изученных образцов из трубок Мир и Обнаженная

| Образец | Трубка | Парагенезис | Порода | Минералы со структурами распада | | | Т С | Р (кбар) |
|---------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|----------|
| | | | | Срх | Орх | Grt | | |
| ТМ-38 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | 742 | 31 |
| ТМ-34 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | 687 | 30 |
| ТМ-31 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | 729 | 32 |
| ТМ-90 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | 638 | 22 |
| ТМ-100 | Мир | П | Верлит | | | | 675 | 11 |
| ТМ-132 | Мир | П | гранатовый лерцолит | + | | | 906 | 48 |
| ТМ-61 | Мир | П | гранатовый лерцолит | | | | 581 | 14 |
| ТМ-73 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | 595 | 18 |
| ТМ-74 | Мир | П | Гранатовый лерцолит | | | | 916 | 52 |
| ТО-78 | Обнаженная | П | Верлит | + | | | 719 | 19 |
| ТО-125 | Обнаженная | П | Гранатовый лерцолит | | + | | 595 | 18 |

| | | | | | | | | |
|--------|------------|---|---------------------|---|--|--|-----|----|
| ТО-212 | Обнаженная | П | Гранатовый лерцолит | | | | 655 | 16 |
| ТО-91 | Обнаженная | П | Шпинелевый лерцолит | + | | | 719 | 19 |
| ТО-175 | Обнаженная | П | Гранатовый лерцолит | | | | 672 | 15 |

Продолжение таблицы 9.3

| | | | | | | | | |
|--------|------------|----|----------------------|---|--|--|------|----|
| ТО-258 | Обнаженная | П | Шпинелевый лерцолит | | | | 581 | 14 |
| ТО-266 | Обнаженная | П | Шпинелевый лерцолит | + | | | 655 | 17 |
| ТМ-126 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | 1266 | 56 |
| ТМ-147 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | 675 | 11 |
| ТМ-53 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | 722 | 25 |
| ТМ-68 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | + | | | 956 | 54 |
| ТМ-56 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | + | | | 950 | 55 |
| ТМ-182 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | 963 | 56 |
| ТМ-116 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | 841 | 45 |

| | | | | | | | | |
|--------|------------|----|----------------------|---|---|---|-----|----|
| ТМ-91 | Мир | ВП | Гранатовый вебстерит | | | + | 808 | 35 |
| ТО-22 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | 908 | 26 |
| ТО-29 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | + | | 585 | 15 |
| ТО-69 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | + | | 777 | 26 |
| ТО-138 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | + | 831 | 20 |
| ТО-16 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | | 763 | 20 |
| ТО-42 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | | | + | 796 | 29 |
| ТО-131 | Обнаженная | ВП | Гранатовый вебстерит | + | | + | 923 | 22 |
| ТМ-33 | Мир | Э | Эклогит | | | | 998 | 24 |
| ТМ-109 | Мир | Э | Эклогит | + | | | 840 | 20 |
| ТМ-156 | Мир | Э | Эклогит | | | | 866 | 28 |

Условные обозначения: П-перидотитовый тип; ВП-вебстерит-пироксенитовый; Э-эклогитовый