

*На правах рукописи*

**СТАРИКОВА Анастасия Евгеньевна**

**МИНЕРАЛОГИЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ПОРОД  
ТАЖЕРАНСКОГО МАССИВА  
(ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)**

**25.00.05 – минералогия, кристаллография**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**



**НОВОСИБИРСК – 2013**

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

**Научный руководитель**                      **Томиленко Анатолий Алексеевич,**  
доктор геолого-минералогических наук

**Официальные оппоненты:**

**Чепуров Анатолий Ильич,** доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

**Ришп Герман Самуилович,** кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории ФБГУН Геологического института СО РАН

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г.Иркутск

Защита состоится «21» мая 2013г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 003.067.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

**Адрес:** 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3.  
факс: (383)3332792, e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Автореферат разослан «18» апреля 2013г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.г.-м.н.



О.Л. Гаськова

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность исследований**

Тажеранский щелочной массив (Западное Прибайкалье) является одним из интереснейших минералогических объектов. Несмотря на небольшую площадь массива (~6 км<sup>2</sup>) в его пределах было обнаружено более 150 минеральных видов, причем два из них – тажеранит (Конев и др., 1969) и азопроит (Конев и др., 1970) – являются первыми находками в мире. В 60-70-х годах прошлого века Тажеранский массив был детально изучен А.А. Коневым и другими сотрудниками институтов земной коры и геохимии СО АН СССР. Проведенные петрографические, минералогические и петрохимические исследования были обобщены в монографии (Конев, Самойлов, 1974). Однако следует учесть отсутствие в то время современных аппаратурных возможностей анализа минералов, что не позволило в полной мере охарактеризовать многие минеральные фазы и их ассоциации. После пересмотра возраста и природы всего ольхонского комплекса пород (Бибикова и др., 1990; Добрецов, Буслов, 2007; Донская и др., 2001; Розен, Федоровский, 2001; Федоровский и др., 1995, 2004; Sklyarov, 2005) коллективом, включающим сотрудников ГИН РАН, ИЗК СО РАН, ИГГД РАН и ИГМ СО РАН, начались детальные структурно-геологические и петрологические исследования реперных объектов, первым из которых стал Тажеранский массив. Для понимания процессов взаимодействия магматических пород массива с карбонатами, широко развитых в пределах массива, возникла необходимость в проведении детальных минералогических исследований на современном уровне.

**Цель работы:** реконструкция процессов метасоматоза в пределах Тажеранского массива на основании исследований составов минералов и минеральных парагенезисов метасоматических пород (щелочных метасоматитов, магнезиальных и известковых скарнов и кальцифиров), щелочных и нефелиновых сиенитов, габброидов и мраморов.

### **Задачи исследований**

1. Определение взаимоотношений метасоматитов Тажеранского массива с вмещающими их породами при помощи комплекса структурно-геологических методов исследования: геологического детального картирования и составления опорных разрезов;

2. Типизация метасоматических минеральных ассоциаций и выявление закономерностей их проявления в пределах и в ближайшем окружении Тажеранского массива по результатам структурно-геологических, минералогических и петрографических исследований;

3. Изучение особенностей состава минералов метасоматических пород методами электронной сканирующей микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа;

4. Определение закономерностей транспортировки вещества в процессе метасоматоза на основании изучения особенностей минеральных ассоциаций метасоматитов и состава слагающих их минералов;

5. Оценка физико-химических условий процессов метасоматоза в пределах Тажеранского массива с помощью термобарогеохимических методов.

#### **Фактический материал, методы исследований и личный вклад**

В основу работы положен фактический материал, полученный при полевых работах 2006, 2007, 2010, 2011 гг. При участии автора были составлены геологическая карта массива Тажеран м-ба 1:10000, детальные карты м-ба 1:500 двух опорных участков, сделана фотодокументация обнажений, отобраны пробы основных типов пород (более 500). Для решения минералогических и петрографических задач использовались методы оптической микроскопии (поляризационный микроскоп OLYMPUS BX-51 с цифровой фотокамерой ColorView III), электронной сканирующей микроскопии (SEM Jeol JSM 6380LA, LEO 1430 VP и Philips XL30 с энергодисперсионными рентгеноспектральными приставками), рентгеноспектрального микроанализа (Cameca Camebax-Micro, Jeol JXA-8100 и MAP-3). Автором было изучено более 250 прозрачных шлифов и 50 полированных пластинок, сделано более 1200 анализов минералов и более 200 изображений в обратно-рассеянных электронах. Для исследования включений минералообразующих сред были использованы методы термо- и криометрии (микротермокамера Linkam THMSG-600 с диапазоном измерений температур в интервале от -196 до +600°C) и метод КР-спектроскопии (одноканальный КР-спектрометр Jobin Yvon Ramanor U-1000). Автором было изучено более 40 полированных пластинок метасоматических пород. Работы проводились в ИГМ СО РАН (г.Новосибирск) и частично в Геологическом институте СО РАН (г.Улан-Удэ) и Силезском Университете (г.Катовице, Польша).

**Научная новизна.** Впервые на современном уровне проведено изучение особенностей состава метасоматических минералов в пределах и в ближайшем окружении Тажеранского массива, построены и охарактеризованы основные виды метасоматических колонок для разных типов пород. Обосновано положение об акцессорной минерализации изученных типов метасоматитов. Соискателем впервые для массива был выявлен такой редкий минерал, как цирконолит (Старикова, 2007); впервые вне кор выветривания описан арсениосидерит, развивающийся по леллингиту (Старикова и др., 2012). Получены термобарогеохимические данные, и сделана оценка концентрации солей в скарнообразующем флюиде для диопсид-гроссуляровых кальцифиров.

### **Апробация работы:**

Результаты исследований отражены в 14 публикациях, в том числе трех статьях в рецензируемых научных отечественных периодических изданиях, рекомендованных ВАК, а также на геологической карте Тажеранского массива, и апробированы на российских и международных конференциях, включая Всероссийское совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту» (Иркутск, 2010), Всероссийскую молодежную конференцию «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2011), Международную конференцию «Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма» (Москва-Коктебель, 2010; Москва-Судак, 2012), 34-й Международный геологический конгресс (Брисбен, Австралия, 2012), ACROFI IV (Брисбен, Австралия, 2012).

**Структура работы:** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Содержит 207 страниц текста. Список литературы включает 144 наименования.

В первой главе на основании анализа публикаций по проблемам метасоматоза (Коржинский, 1955; Голубев, 1971; Пospelов, 1973; Шабьин, 1973; Перцев, 1977; Иванов, 1984; Зарайский и др., 1989; Жариков, и др., 1998; Frantz and Popp, 1979; и многие другие) рассмотрены базовые понятия и основные механизмы метасоматических процессов. Кроме того, приведены основные результаты и выводы исследователей Тажеранского массива (Конев, Самойлов, 1974 и другие). Во второй главе описаны методы и материалы исследований. Третья глава посвящена геологическому строению Тажеранского щелочного массива и краткой характеристике слагающих его пород. В главах 4-6 детально рассмотрены особенности проявления и минералогический состав трех типов метасоматических образований, распространенных в пределах и в ближайшем окружении Тажеранского массива: магнезиальных скарнов и кальцифиров, магнезиальный тип (глава 4); известковых скарнов и диопсид-гроссуляровых кальцифиров, известковый тип (глава 5); титанфассаитовых, нефелин-титанфассаитовых и гранат-мелилит-волластонитовых пород, щелочной тип (глава 6). Приведены метасоматические колонки и составы минеральных ассоциаций, обсуждаются механизмы проявления процессов метасоматоза. Особое внимание уделено акцессорной минерализации метасоматических пород. В заключении приведены основные выводы по проведенным исследованиям. Защищаемые положения и выводы диссертации иллюстрируются 69 рисунками и 33 таблицами.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.г.-м.н. А.А. Томиленко. За советы и помощь в интерпретации результатов автор признателен к.г.-м.н. С.З. Смирнову и к.г.-м.н. В.В. Шарыгину. Также автор благодарен исследовательскому коллективу, включающему сотрудников ГИН РАН (д.г.-м.н. В.С. Федоровский), ИЗК СО РАН (член-корр. РАН Е.В. Скляр, д.г.-м.н. А.М. Мазукабзов), ИГГД РАН (д.г.-м.н. А.Б. Котов), ИГМ СО РАН (к.г.-м.н. А.В. Лавренчук и к.г.-м.н. С.А. Каргополов) за помощь и поддержку во время полевых работ. Автор признателен к.г.-м.н. Е.Н. Нигматулиной, С.В. Канакину и к.г.-м.н. Н.С. Карманову за оказанную помощь при исследованиях. Особую благодарность автор выражает Ю.С. Восель и к.г.-м.н. И.А. Вишневской. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №12-05-31253, №12-05-00229-а) и ОПТЭК.

## **Обозначения, принятые в работе:**

Фассаит – высокоглиноземистый диопсид. По современной классификации (Morimoto et al., 1988) термин считается устаревшим, однако он до сих пор используется и в российской, и в зарубежной литературе (Корниевский, Корниевский, 2007; Simon, Grossman, 2006 и другие).  $Mg\# = 100 \cdot Mg / (Mg + Fe^{2+})$ , Adr - андрадит, Aln - алланит, Amp - амфибол, An - анортит, Ap - апатит, Bd - бадделейт, Br - брусит, Bt - биотит, Cal - кальцит, Cpx - клинопироксен, Chm - клиногумит, Di - диопсид, Dol - доломит, Ep - эпидот, Fa - фаялит, Fo - форстерит, Gk - гейкилит, Grt - гранат, Grs - гроссуляр, Ilm - ильменит, Kfs - калишпат, Ks - кальсилит, Ma - мариалит, Me - мейонит, Mgt - магнетит, Ne - нефелин, Or - ортоклаз, Phl - флогопит, Pl - плагиоклаз, Prv - перовскит, Qtz - кварц, Spl - шпинель, Srl - шорломит, Srp - серсентин, Tzh - тажеранит, Ttn - титанит, Zrn - циркон, Zrc – цирконолит.

## **ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ**

Тажеранский щелочной массив расположен в пределах раннепалеозойской Ольхонской коллизионной системы (Скляр и др., 2009; Федоровский и др., 2009). Становление массива происходило в течение длительного периода времени 450-470 млн. лет в условиях сдвигового тектогенеза (Скляр и др., 2009, Федоровский и др., 2010). Тажеранский массив сложен щелочными и нефелиновыми сиенитами, также широко представлены дайки субщелочных габброидов. В его северной части картируется мощная толща роговиков по породам основного состава. Для южной части массива характерно присутствие большого количества тел апопериклазовых бруситовых мраморов. Доломитсодержащие кальцитовые мраморы развиты в центральной части.

Также следует отметить полосу кальцитовых мраморов в обрамлении массива. В пределах Тажерана широким распространением пользуются метасоматические породы разнообразного минералогического состава, среди которых можно выделить 3 основных типа: **магнезиальный, известковый и щелочной**. Эти метасоматиты пространственно разобщены и обладают своими специфическими особенностями.

Первое защищаемое положение: **Метасоматоз магнезиального типа в породах Тажеранского массива представлен главным образом последовательной сменой нефелин-диопсидовой, кальцит-шпинель-форстеритовой (кальцита ≤ 50 об.%), шпинель-форстерит-кальцитовой (кальцита > 50 об.%), форстерит-кальцитовой, брусит-кальцитовой минеральных ассоциаций. Их образование происходило при воздействии щелочных флюидов на Са-Mg карбонатный субстрат. Основным источником флюидов служили нефелиновые сиениты.**

Метасоматические породы магнезиального типа являются наиболее распространенными и локализуются в поле развития бруситовых мраморов и нефелиновых сиенитов (рис. 1 во вкладке). По морфологии породы этого типа вслед за А.А. Коневым и В.С. Самойловым (1974) были разделены нами на контактовые и жильные. Контактные метасоматиты представлены магнезиальными скарнами, развитыми на границе нефелиновых сиенитов и бруситовых мраморов и часто имеющими полосчатые (бурундучные) текстуры. К жильным отнесены кальцифиры, слагающие маломощные жилоподобные тела, а также серии таких тел в бруситовых мраморах зачастую в непосредственной близости к широким зонам магнезиальных скарнов.

Наиболее распространенная метасоматическая колонка контактовых магнезиальных скарнов имеет следующий вид: нефелиновый сиенит – нефелин-пироксеновый скарн – шпинель-форстеритовый скарн – бруситовый мрамор (рис. 3). В некоторых случаях вместо нефелин-пироксенового развит шпинель-пироксеновый скарн.

*Нефелиновые сиениты*, на контакте с которыми были обнаружены широкие зоны магнезиальных скарнов, относятся к трахитоидным эгирин-авгитовым сиенитам.

|   |  |   |
|---|--|---|
| Ne, Kfs, Cpx<br>±Ap, Ttn, Zrn,<br>Mgt, Ilm            |  | 1 |
| Di, Ne, Ap<br>±Cal, Phl, Mgt,<br>Ti-Zr<br>минералы    |  | 2 |
| Cal, Fo, Spl ±<br>Phl, Mgt, Ilm,<br>Ti-Zr<br>минералы |  | 3 |
| Cal, Fo, Spl ±<br>Gk, Ti-Zr<br>минералы               |  | 4 |
| Cal, Fo ±Ap,<br>Br, Chum                              |  | 5 |
| Cal, Br ±Dol,<br>Ap, Chum, Srp                        |  | 6 |

**Рис. 3.** Схема метасоматической колонки пород магнезиального типа: 1 – нефелиновый сиенит; 2 – нефелин-пироксеновый скарн; 3 – шпинель-форстеритовый скарн; 4 – шпинель-форстеритовый кальцифир; 5 – форстеритовый кальцифир; 6 – бруситовый мрамор.

Породы сложены таблитчатыми зернами нефелина (Ne - 74-77 мол.%, Ks – 14.3- 14.8 мол.%, Qtz - 8-9 мол.%) и калиевого полевого шпата ( $Or_{74-94}$ ), ксеноморфными выделениями эгирин-авгита ( $FeO_{tot}$  – 14-20 мас.%,  $Na_2O$  – 2-5 мас.%,  $Al_2O_3$  2-3.5 мас.%), отдельными зернами альбит-олигоклаза ( $An_{7-11}$ ) и биотита ( $Mg\#$  - 35.5-45), а также аксессуарными минералами: апатитом, титанитом, титаномагнетитом, ильменитом и бадделейтом. Приконтактовая часть нефелиновых сиенитов нередко обогащена щелочами и характеризуется практически полным отсутствием в ней темноцветных минералов. Возможным объяснением увеличения щелочей является эффект отраженной щелочности, впервые предложенный для скарнов магматического этапа Д.С. Коржинским (1955).

*Нефелин-пироксеновый скарн* сложен чередующимися ксеноморфными зернами нефелина и диопсида с редкими выделениями апатита, магнетита и жилками более позднего кальцита. Резкая граница между сиенитом и скарном нередко представлена маломощной (до 1-2 мм) зоной симплектитов нефелина и диопсида, постепенно переходящей в скарн.

В составе диопсидов по мере удаления от контакта в сторону мраморов наблюдается постепенное уменьшение содержаний железа  $FeO_{tot}$  и  $Na_2O$  – от 6-7 и 1 мас.% в симплектиках до 2-2.5 и 0.4 мас.% на границе со шпинель-форстеритовой зоной соответственно (рис. 2, Табл. 1 во вкладке). Концентрации  $Al_2O_3$  варьируют от 1 мас.% до 3-5 мас.% без видимой закономерности. В нефелинах доля Qtz меняется от 6.5 мол.% в симплектитовой зоне до 1.1 мол.% у границы с шпинель-форстеритовым скарном. Нередко к поздним трещинам, заполненным кальцитом, приурочены гнезда и зоны флогопита ( $Mg\#$  – 92-93), образовавшегося в постмагматический этап скарнообразования по диопсиду и частично нефелину.

*Шпинель-форстеритовый скарн* по мощности превосходит нефелин-пироксеновый в несколько раз. Он представляет собой чередующиеся зоны остаточного кальцита и мелкозернистых агрегатов идиоморфных зерен зеленой шпинели и форстерита, расположенные субпараллельно контакту. Подобная «бурундучная» полосчатость может быть объяснена моделью самоорганизации (Ortoleva, 1994; Holness, 1997). Шпинель-форстеритовые прослои часто бывают раздроблены, но, несмотря на это, обломки остаются конформными контактам и обрастают укрупненными зернами форстерита, по составу не отличимого от мелкозернистых форстеритов в агрегатах. Таким образом, в ранний этап скарнообразования происходило формирование форстерит-шпинелевых агрегатов, их дробление или брекчирование и обрастание будин или брекчий зернами форстерита. Иногда агрегаты могут быть практически полностью замещены более поздним флогопитом ( $Mg\#$  - 95-96).

Шпинель относится к Al-шпинелям (Табл. 1). Ее зеленая окраска обусловлена вхождением в структуру железа, содержание которого ( $\text{FeO}_{\text{tot}}$ ) варьирует от 10.5 до 13 мас.%. Оливин представлен форстеритом ( $\text{Fo}_{91-92}$ ) (Табл. 1). Кальцит содержит примеси  $\text{MgO}$  (до 1.5 мас.%) и  $\text{FeO}$  (до 0.3 мас.%).

*Бруситовый мрамор* представляет собой равномернокрапленную массивную породу, состоящую главным образом из кальцита (50-70 об.%) и брусита (30-50 об.%) с незначительной примесью доломита. В небольших количествах могут встречаться форстерит, клиногумит, серпентин и магнетит. Брусит имеет необычную изометричную форму с концентрически-зональным строением, что может объясняться образованием его при гидратации раннего периклаза. Последний в свою очередь является продуктом декарбонатизации доломита:



Бруситизированные периклазовые мраморы являются типичной внешней зоной метасоматических колонок гипабиссальных фаций, возникающих на контакте интрузивных силикатных пород с доломитами (Александров, 1990 и др.).

Изученные жильные метасоматические породы магнезиального типа представлены шпинель-форстеритовыми и форстеритовыми кальцифирами. *Шпинель-форстеритовые кальцифиры* сложены идиоморфными зернами форстерита и шпинели, а также их мелкозернистыми агрегатами, равномерно распределенными в кальцитовом матриксе. В составах форстерита и шпинели наблюдаются значительно более низкие содержания железа, по сравнению с таковым в минералах из магнезиальных скарнов (Табл. 1). Для форстерита -  $\text{FeO}$  до 1.15 мас.%, для шпинели -  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  до 3.7 мас.%. Шпинель часто имеет фиолетовую окраску за счет вхождения в ее структуру четырехвалентного титана ( $\text{TiO}_2$  до 0.7 мас.%) и за счет большого количества ориентированных пластинчатых выделений красновато-коричневого гейкклита (рис. 11 а). Подобные включения были описаны в шпинелях из Адамелло (Италия), где они были интерпретированы в качестве продуктов распада высокотитанистой шпинели (Reusser et al., 2001).

*Форстеритовые кальцифиры*, как правило, образуют серии маломощных прослоев. Основными минералами, слагающими эти кальцифиры, являются безжелезистый форстерит и кальцит. Также может присутствовать небольшое количество брусита и клиногумита. Главный акцессорный минерал – апатит.

Как для контактовых магнезиальных скарнов, так и для жильных кальцифиров Тажеранского массива характерна необычная Ti-Zr минерализация. Считается (Коржинский, 1953, Cullers et al., 1973; Mysel,

1979 и др.), что Ti и Zr крайне малоподвижные элементы. Изменение мобильности этих элементов может быть связано с высокой щелочностью высокотемпературных флюидов, где, как полагают многие авторы (Giere, 1986; Rubin Jr. et al., 1993 и др.),  $Ti^{4+}$ ,  $Zr^{4+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $Th^{4+}$ ,  $Nb^{3+}$ ,  $Y^{3+}$  образуют с  $K^+$  полядерные комплексы, лигандами которых выступают  $F^-$  и  $PO_4^{3-}$ . Проявление Ti-Zr минерализации и в скарнах, и в кальцифирах Тажеранского массива свидетельствует об их образовании при высоких температурах, соответствующих температурам раннего этапа скарнообразования, а также о том, что в их формировании принимали участие щелочные флюиды, имеющие единый источник - нефелиновые сиениты. Этот факт совместно с частой пространственной близостью скарнов и кальцифиров позволяет предполагать, что их образование происходило в едином процессе скарнообразования, и, вероятно, кальцифиры являются одной из внешних зон общей метасоматической колонки (рис. 3). Формирование метасоматитов происходило в магматический этап (при существовании силикатного расплава) при температурах не ниже  $770^\circ C$ . При этом в карбонатное вещество осуществлялся привнос K, Na, Si, Al, Fe и P, а также Ti, Zr и Nb из нефелиновых сиенитов. Источником Mg и Ca в скарнах служили карбонатные породы.

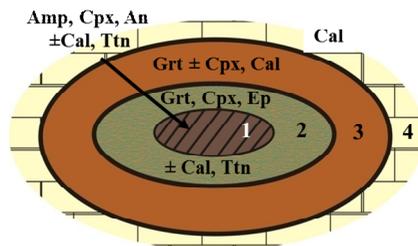
Согласно работам Д.С. Коржинского и его последователей (Коржинский, 1955; Перцев, 1977; Жариков и др. 1998 и другие) существует два крайних механизма переноса вещества при метасоматозе: инфильтрационный и диффузионный, а также их комбинация. Преобладающим механизмом переноса вещества в магнезиальных скарнах и кальцифирах Тажеранского массива являлась инфильтрация. Об этом свидетельствует практически полное отсутствие вариаций компонентов в минералах переменного состава (рис. 2 во вкладке). Вместе с тем в нефелин-пироксеновом скарне наблюдается снижение содержания кремния в нефелинах и железа в диопсидах, что может указывать на некоторую роль диффузии в этом процессе.

Второе защищаемое положение: **Метасоматические породы известкового типа в ближайшем окружении Тажеранского массива представлены известковыми скарнами и диопсид-гроссуляровыми кальцифирами. Метасоматическая колонка известковых скарнов состоит из последовательной смены анортит-паргасит-диопсидовой, эпидот-кальцит-диопсид-гроссуляровой и кальцит-гроссуляровой минеральных ассоциаций. В образовании диопсид-гроссуляровых кальцифиров принимали участие водные флюиды с высокими содержаниями солей ( $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $CaCl_2$  и  $MgCl_2$ ).**

*Известковые скарны* развиты в виде линз и округлых тел в полосе кальцитовых мраморов, являющейся частью крупной сдвиговой петли, в центре которой находится Тажеранский массив. Вероятнее всего, их образование не имело связи с магматитами массива. Процессы метасоматоза, по-видимому, проходили между блоками основных пород Бирхинского комплекса, входящих в ближайшее окружение Тажерана, и карбонатами в рамках регионального метаморфизма. Тела скарнов имеют зональное строение, насчитывающее две, максимум три зоны. Центральная часть сложена анортит-паргасит-диопсидовым скарном с псевдопорфиrowой структурой, который сменяется гранат-пироксеновым скарном (рис. 4). К мраморам примыкает гранатовый скарн. Кроме основных минералов в анортит-паргасит-диопсидовом скарне встречаются зерна кальцита, апатита и мелкозернистые включения магнетита в пироксене. В составах паргасита (Mg# - 60-80) отмечаются значимые содержания  $K_2O$  (1.5-2 мас.%), сравнимые с таковыми для  $Na_2O$  (1.7-2.3 мас.%), и  $TiO_2$  (до 1.5 мас.%). Пироксены в анортит-паргасит-диопсидовой зоне представлены диопсидами (Mg# - 81-88) с содержанием  $Al_2O_3$  не превышающим 4 мас.%, для гранат-пироксеновой зоны характерны более глиноземистые и железистые диопсиды ( $Al_2O_3$  до 7 мас.%, Mg# - 72-85) (рис. 5, Табл. 1 во вкладке). Гранат относится к гроссуляр-андрадитовому ряду с постепенным снижением концентраций  $Fe_2O_3$  от 14.5 мас.% на границе гранат-пироксенового с анортит-паргасит-диопсидовым скарном до 9 мас.% на границе гранатового скарна с мраморами (рис. 5, Табл. 1 во вкладке). В эпидоте гранат-пироксеновой зоны нередко отмечаются примесь REE ( $La_2O_3$  до 1.5 мас.%,  $Ce_2O_3$  до 2 мас.%,  $Nd_2O_3$  до 1.1 мас.%). Во всех зонах встречается титанит.

Состав подобных зон метасоматической колонки и особенности изменения составов породообразующих минералов характерны для развитых колонок диффузионных среднетемпературных скарнов (Жариков, 1966, Перцев, 1977).

Кроме известковых скарнов к известковому типу метасоматитов нами были отнесены *гранат-диопсид-кальцитовые породы*, доля карбоната в которых превышает 50% (кальцифиры). Они были обнаружены на западном продолжении полосы кальцитовых мраморов. Кальцитовый матрикс кальцифиров насыщен кристаллами

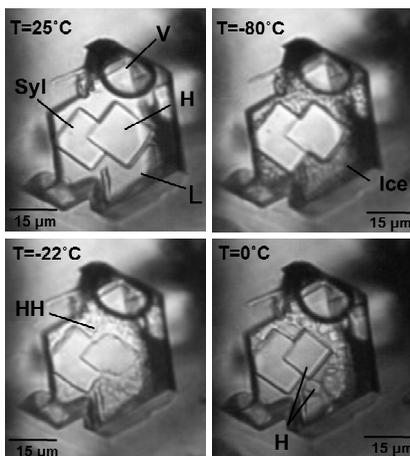


**Рис. 4.** Схема линзы известковых скарнов в мраморах: 1- анортит-паргасит-диопсидовый скарн; 2 – гранат-пироксеновый скарн; 3 – гранатовый скарн; 4 – кальцитовый мрамор.

диопсида ( $Mg\# - 73-81$ ), граната гроссуляра-андрадитового ряда ( $Grs_{68-81}-Adr_{32-19}$ ) и титанита, а также их разноразмерными агрегатами. Также в породах присутствуют скаполит ( $Me_{50-61}-Ma_{39-50}$ ), калишпат ( $BaO$  до 2 мас.%) и более поздний кварц. Акцессорные минералы представлены цирконом и алланитом.

В зернах граната из диопсид-гроссуляровых кальцифиров были обнаружены многочисленные флюидные первичные включения с высокими концентрациями солей, содержащие твердые фазы сильвин и галит, реже ксеногенный кальцит (рис. 6). При этом суммарный объем твердых фаз составляет не менее 30% от общего объема включения.  $CO_2$  в газовой фазе методом КР-спектроскопии обнаружен не был. Гомогенизация включений происходит в жидкую фазу в интервале температур 375 – 420°C. Первым растворяется кристалл сильвина (125–150°C), затем галита (350–380°C), последним исчезает газовый пузырек. Криометрические исследования показали, что интервал температур эвтектики составляет от -45°C до -55°C. При температуре от -27°C до -30°C происходит плавление последнего кристаллика льда. Такие температуры слишком низки для системы  $NaCl-KCl-H_2O$  и предполагают присутствие в растворе значительных концентраций  $CaCl_2$  или/и  $MgCl_2$  (от 10 до 23 мас.%). Опираясь на ранние экспериментальные и расчетные данные (Палкин, 1935; Курнаков и др., 1936; Wood, 1975; Marcus, Soffer, 1988, 1990) была сделана приблизительная оценка концентраций солей в скарнообразующем флюиде. Для минимальных концентраций  $MgCl_2/CaCl_2$ :  $MgCl_2/CaCl_2 - 5.5$  мас.%,  $KCl - 21$  мас.%,  $NaCl - 33.7$  мас.%; для максимальных:  $MgCl_2/CaCl_2 - 12.7$  мас.%,  $KCl - 17.1$  мас.%,  $NaCl - 31.5$  мас.%.

Таким образом, можно сказать, что температура образования диопсид-гроссуляровых кальцифиров была не ниже 420°C. И в их формировании принимали участие водные флюиды с высокими содержаниями солей. Одним из возможных источников флюидов могли быть граниты, жилы которых широко распространены именно на западной окраине массива и отражают финальный этап его эволюции.



**Рис. 6.** Фазовые превращения флюидного включения в гранате при низких температурах. *V* – газовый пузырек, *L* – водный раствор, *Ice* – лед, *Syl* – сильвин, *H* – галит, *HH* – гидрогалит.

Третье защищаемое положение: **Высокотемпературные породы, сложенные титанфассаитовыми, нефелин-титанфассаитовыми и гранат-мелилит-волластонитовыми минеральными ассоциациями, относятся к единому щелочному типу метасоматитов Тажеранского массива. Их образование связано с взаимодействием долеритовых магм с карбонатными породами.**

*Титанфассаитовые и нефелин-титанфассаитовые породы* слагают крутозалегающую полосу между кальцитовыми мраморами и высокотемпературными роговиками основного состава в центральной части массива (г. Мраморная). Также их разновеликими угловатыми и округлыми включениями насыщена приконтактная часть мраморов. В самих титанфассаитовых породах отсутствует четкая зональность, характерная для метасоматитов. Их нефелинсодержащие разности слагают шпирь неправильной формы среди безнефелиновых, и имеют с ними постепенные переходы, не обнаруживая каких-либо закономерностей в распространении.

Кроме нефелина и фассаита в породах обычно присутствует паргасит, кальцит и апатит. В некоторых телах появляется флогопит. В примыкающих к мраморам участках, а также в ксенолитах титанфассаитовых пород в мраморах нередко встречаются идиоморфные зерна мелилита, который по своему составу относится к ряду акерманит ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  - 30-36 мол.%) – Na-мелилит ( $\text{CaNaAlSi}_2\text{O}_7$  - 50-59 мол.%) с примесью геленитового компонента ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$  до 11 мол.%) (рис. 8, Табл. 1 во вкладке). Высокие содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  (до 6.9 мас.%) близки к максимальным значениям, отмеченным как для природных (Wiedenmann et al., 2009, 2010), так и для искусственных мелилитов (Yoder H.S., 1973). Мелилиты с подобными составами относятся к алюмоакерманитам. Для титанфассаитовых и нефелинтитанфассаитовых пород характерно повсеместное проявление постмагматических метасоматических наложений, выражающихся в появлении граната гроссуляр-андрадитового ряда (Grs от 60 до 85 мол.%) с варьирующими содержаниями  $\text{TiO}_2$  (от 0 до 1.5 мас.%), второй генерации пироксена (диопсид,  $\text{Mg}\#$  – 89-91.5) и нефелина. В составах пироксенов первой генерации (фассаитов) отмечаются значительные примеси  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (от 5 до 12 мас.%) и  $\text{TiO}_2$  (1-2 мас.%). Для  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  отмечаются сильные вариации значений (от 6 до 14 мас.%).

Титанфассаитовые породы не имеют пространственной связи с магматическим источником и ранее интерпретировались как метасоматиты по контактирующим с мраморами роговикам основного состава под воздействием сиенитовой магмы. Однако резкий прямой контакт между ними и роговиками противоречит гипотезе о

биметасоматозе. В одном из участков титанфассаитовых пород нами была обнаружена зона с реликтовой офитовой текстурой (рис. 7 во вкладке). В этой зоне наблюдается постепенный переход от пород, содержащих сохранившиеся лейсты плагиоклаза, до титанфассаитовых пород с обособлениями идиоморфных зерен нефелина. В центральной части зоны крупные лейсты сложены плагиоклазом ( $An_{78-85}$ ), частично замещенным нефелином. Мафические минералы представлены оливином ( $Fa_{55-60}$ ), клинопироксеном диопсид-геденбергитового ряда ( $Mg\#$  - 56-63), амфиболом и биотитом. К краевым частям плагиоклаз полностью исчезает, но видны реликты лейст, полностью сложенные агрегатами нефелина. Этот переход позволяет предполагать метасоматическую проработку ранее существующих долеритов, относящихся к Бирхинскому комплексу (500 млн. лет), с нефелинизацией плагиоклаза и высокотемпературной перекристаллизацией первичных темноцветов.

*Гранат-мелилит-волластонитовые метасоматиты* по общепринятой классификации должны быть отнесены к высокотемпературным известковым скарнам магматической стадии. Однако для Тажеранского массива целесообразнее оставить их в одной группе с титанфассаитовыми породами по двум причинам: 1) их частая пространственная приуроченность к титанфассаитовым породам; 2) повышенное содержание щелочей в породообразующих минералах, нехарактерное для подобных скарновых образований. Основными слагающими гранат-мелилит-волластонитовые породы минералами являются мелилит, гранат, волластонит и кальцит. В подчиненном количестве встречаются минералы ряда монтичеллит-кирштейнит, куспидин, диопсид, графит и более поздний нефелин. Из рудных минералов обычны перовскит и сульфиды. Для пород характерно наличие большого количества кайм и симплектитовых структур, в составы которых практически всегда входит гранат. Гранат по химическому составу относится к гроссуляр-андрадитовому ряду. Для него характерно зональное строение: более ранняя генерация обогащена  $TiO_2$  (до 4.5 мас.%) и  $Al_2O_3$  (до 19.3 мас.%), в то время как более поздняя обогащена  $Fe_2O_{3tot}$  (до 19 мас.%) (рис. 9 во вкладке). Мелилиты из гранат-мелилит-волластонитовых пород схожи по составу с таковыми из титанфассаитовых пород и относятся к ряду акерманит ( $Ac$  40-60 мол.%) – Na-мелилит ( $Na-Ml$  35-45 мол.%) (рис. 8 во вкладке). Отличие заключается в практически полном отсутствии геленитового компонента (менее 1 мол.%) и повышенном содержании  $FeO_{tot}$  (1.5-2.5 мас.%). Волластонит образует идиоморфные зерна и не содержит заметных примесей. Минералы ряда монтичеллит-кирштейнит являются одними из наиболее поздних образований и чаще всего представлены симплектитовыми сростаниями с безтитановым гранатом.

Составы всех исследованных нами минералов этого ряда попадают в область железистых монтичеллитов с магнизиальным номером, снижающимся до 50%. Кирштейнит ( $\text{CaFeSiO}_4$ ) как таковой нами обнаружен не был, однако ранее он был описан А.А. Коневым и В.С. Самойловым (1974) в схожих породах массива. Это весьма редкий минерал, встречающийся в метеоритах, техногенных парабазах и щелочных породах основного состава. В скарнах помимо Тажеранского массива отмечен не был.

Сходство составов мелилитов из титанфассаитовых и гранат-мелилит-волластонитовых пород, а также их пространственная близость дает основание предполагать наличие генетической связи между этими породами. Еще одним фактом в пользу данного предположения послужила находка гранат-монтичеллитовых симплектитов в одном из ксенолитов титанфассаитовых пород в мраморах. Состав монтичеллита из ксенолита также отличается высокими содержаниями FeO (14-14.5 мас.%). Можно предположить, что гранат-мелилит-волластонитовые породы также являются высокотемпературными метасоматитами, образовавшимися при взаимодействии долеритовой магмы и карбонатов, при этом значительно расширяется поле составов минералов метасоматического генезиса.

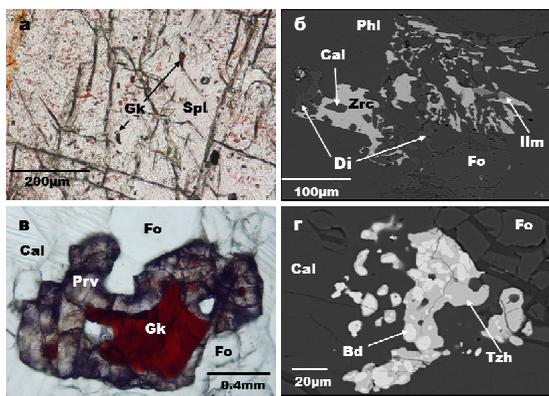
При давлении менее 1 кбар, определенного для массива ранее А.А. Коневым и В.С. Самойловым (1974), температурный интервал образования щелочных метасоматитов соответствует мелилит-монтичеллитовой фации известковых скарнов и составляет 700-850°C (Жариков и др., 1998).

**Четвертое защищаемое положение: Каждый тип метасоматических пород характеризуется специфической аксессуарной минерализацией: в магнизиальных скарнах и кальцифирах отмечается Ti-Zr минерализация (тажеранит, кальциртит, цирконолит, бадделеит); для диопсид-гроссуляровых кальцифиров отмечается редкоземельная (алланит) и циркониевая (циркон); для щелочных метасоматитов характерна арсенидная (леллингит, вестервелдит, никелин и замещающий их арсениосидерит) и сульфидная (пирротин, троилит, пентландит, халькопирит и джерфишерит) специализация.**

В магнизиальных скарнах и кальцифирах широко проявлена Ti-Zr минерализация, главными минералами которой являются тажеранит  $\text{Ca}_2\text{Zr}_5\text{Ti}_2\text{O}_{16}$  (кубический), кальциртит  $\text{Ca}_2\text{Zr}_5\text{Ti}_2\text{O}_{16}$  (тетрагональный), цирконолит  $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ , бадделеит  $\text{ZrO}_2$  и перовскит  $\text{CaTiO}_3$  (рис. 11). **Бадделеит** встречается в виде округлых мелких зерен в силикатных минералах, в тажераните и в перовските, редко в кальците. В его составе отмечаются примеси  $\text{HfO}_2$  (до 1.3 мас.%),  $\text{TiO}_2$  (до 0.5 мас.%) и FeO (до 0.6

мас.%) (Табл. 2). Тажераниты образуют идиоморфные округлые зерна в кальцифирах и ксеноморфные – в магнезиальных скарнах. Тажераниты из кальцифиров содержат до 1.5 мас.%  $\text{HfO}_2$  и практически не содержат  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (<0.08 мас.%), тогда как в тажеранитах из магнезиальных скарнов концентрации  $\text{HfO}_2$  не превышают 0.9 мас.%, а содержания  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  достигают 2.4 мас.%. Состав цирконолита характеризуется значительными примесями  $\text{UO}_2$  и  $\text{ThO}_2$  (до 4 мас.%), повышенными концентрациями редкоземельных элементов ( $\text{REE}_2\text{O}_3$  до 0.7 мас.%) и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (до 3.5 мас.%). В перовскитах из кальцифиров наблюдаются примеси  $\text{ZrO}_2$  (до 0.2 мас.%) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 0.2 мас.%). В магнезиальных скарнах этот минерал содержит примеси  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (до 1 мас.%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (до 1.1 мас.%),  $\text{UO}_2$  (до 0.5 мас.%),  $\text{ThO}_2$  (до 0.4 мас.%) и  $\text{REE}_2\text{O}_3$  (до 4.5 мас.%). Таким образом, для практически всех исследованных нами Ti-Zr минералов прослеживаются схожие закономерности: минералы из магнезиальных скарнов характеризуются повышенными концентрациями FeO,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$  и  $\text{REE}_2\text{O}_3$ ; минералы из кальцифиров обладают повышенными содержаниями MgO,  $\text{HfO}_2$  и MnO.

Акцессорная минерализация в *диопсид-гроссуляровых кальцифирах* представлена, главным образом, цирконом и алланитом. Распределение циркона в породе относительно равномерное, в то время как алланит имеет «пятнистое» распространение, образуя скопления на небольших участках. Циркон в силикатных агрегатах присутствует в виде включений в гранате, нередко в виде скоплений зерен. Наиболее характерны выделения циркона на границах силикатных минералов с кальцитом. Значимых количеств каких-либо примесей в составе циркона не обнаружено. Алланит встречается в виде отдельных относительно крупных кристаллов (до 50 мкм) в кальците с хорошо выраженной зональностью (рис. 7 б). Вариации суммарных содержаний REE в



**Рис. 11.** Проявление минералов Ti и Zr в метасоматических породах магнезиального типа: (а) шпинель с обильными включениями пластинок гейкилита из шпинель-форстеритового кальцифира (в проходящем свете); (б) метакристалл цирконолита из магнезиального скарна (в обратно-рассеянных электронах); (в) перовскит со включением гейкилита из шпинель-форстеритового кальцифира (в проходящем свете); (г) тажеранит с включениями зерен бадделейта из магнезиального скарна (в обратно-рассеянных электронах).

алланитах весьма высоки: от 6 до 20 мас.%. Наиболее значительны содержания  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (до 11 мас.%) и  $\text{La}_2\text{O}_3$  (до 8 мас.%).

В щелочных метасоматитах проявлена арсенидная (леллингит, вестервелдит, никелин) и сульфидная (пирротин, халькопирит, пентландит, троилит и сложные сульфиды калия (Sharygin, Starikova, 2010)) минерализация. Леллингит ( $\text{FeAs}_2$ ) образует идиоморфные, ограненные зерна размером до 0.6 мм и характеризуется высокими содержаниями Co (3-6 мас.%), Ni (4-6 мас.%) (рис. 10, Табл. 3 во вкладке) и низкой концентрацией S (0.3-0.4 мас.%). Нередко по леллингиту развивается арсениосидерит в виде тонкозернистых агрегатов или тонких пластинок, частично или полностью замещая его. Вестервелдит ( $(\text{Fe},\text{Ni},\text{Co})\text{As}$ ) распространен намного меньше, чем леллингит и не был встречен в ассоциации с последним, хотя нередко образует сростания с никелином. Химический состав вестервелдитов достаточно постоянен: Fe – 24-28 мас.%, Ni – 12.5-14 мас.%, Co – 2-6 мас.%. Примеси Sb (до 0.05 мас.%) и S (до 0.2 мас.%) крайне незначительны. Никелин ( $\text{NiAs}$ ) обнаружен в ассоциации как с леллингитом, так и с вестервелдитом. В составе никелина могут присутствовать значимые содержания Fe (до 8 мас.%), Co (до 3 мас.%) и Sb (до 3.5 мас.%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований были детально охарактеризованы три типа метасоматических образований (магнезиальный, известковый и щелочной). Все три типа пространственно разобщены и обладают разными специфическими особенностями.

Метасоматиты магнезиального типа локализованы в южной части массива, их образование происходило при взаимодействии нефелиновых сиенитов и Ca-Mg карбонатных пород. Метасоматическая колонка этого типа, как правило, имеет следующий вид: нефелиновый сиенит / нефелин-пироксеновый скарн / шпинель-форстеритовый скарн / шпинель-форстеритовый кальцифир / форстеритовый кальцифир / бруситовый мрамор. Основным механизмом переноса вещества при метасоматозе служила инфильтрация.

Известковые скарны не имеют прямой связи с Тажеранским массивом и развиты в полосе кальцитовых мраморов в его обрамлении в виде отдельных округлых или линзовидных тел. Для скарнов характерна развитая диффузионная метасоматическая колонка, включающая пироксен-плаггиоклаз-паргаситовый скарн, гранат-пироксеновый скарн и гранатовый скарн. В образовании диопсид-гроссуляровых кальцифиров принимали участие водные флюиды с высокими содержаниями солей:

NaCl – 33.7-31.5 мас.%, KCl – 21-17.1 мас.%, CaCl<sub>2</sub> и MgCl<sub>2</sub> – 5.5-12.7 мас.%.

Щелочные метасоматиты развиты в центральной части массива. Их образование связано с взаимодействием долеритовых магм и карбонатного материала, которое происходило при высоких температурах 750-850°C. Щелочные метасоматиты представлены титанфассаитовыми, нефелин-титанфассаитовыми и гранат-мелилит-волластонитовыми породами.

Для изученных типов метасоматитов характерны не только различные парагенезисы породообразующих минералов, но и свои специфические акцессории. В магнезиальных скарнах проявлена Ti-Zr минерализация (тажеранит, кальцитрит, цирконолит, баделеит, перовскит, гейкилит). В известковых скарнах встречаются циркон и алланит. Для щелочных метасоматитов наиболее характерны арсениды (леллингит, вестервелдит, никелин) и сульфиды (пирротин, троилит, халькопирит, джерфишерит).

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации:**

##### Статьи:

1. Скляр Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., **Старикова А.Е.** Инъекционные карбонатные и силикатно-карбонатные комплексы в коллизионных системах (свидетельства из Западного Прибайкалья, Россия) // Геотектоника, 2013, т.47, № 3, с. 58-77.

2. **Старикова А.Е.**, Канакин С.В., Скляр Е.В. Арсениосидерит в метасоматитах Тажеранского массива (Западное Прибайкалье) // Записки РМО, 2012, № 4, с. 96-106.

3. Скляр Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Левицкий В.И., Сальникова Е.Б., **Старикова А.Е.**, Яковлева С.З., Анисимова И.В., Федосеенко А.М. Карбонатиты в коллизионных обстановках и квазикарбонатиты Ольхонской коллизионной системы // Геология и геофизика, 2009, т. 50, № 12, с. 1405-1423.

4. **Старикова А.Е.** Ti-Zr акцессорная минерализация в кальцифирах Тажеранского массива (Западное Прибайкалье) // Щелочной магматизм, его источники и плюмы. Иркутск, Изд-во ИГ СО РАН, 2007, с. 223-236.

##### Карта:

1. Федоровский В.С., Скляр Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Каргополов С.А., Лавренчук А.В., **Старикова А.Е.** Геологическая карта массива Тажеран м-ба 1:10000.М.: Изд-во Группа компаний А1 TIS, 2009.

##### Тезисы и материалы конференций/совещаний:

1. Скляр Е.В., **Старикова А.Е.**, Канакин С.В., Лавренчук А.В. Пироксениты Тажеранского массива (Западное Прибайкалье): минералогия и генезис // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и их минерагения. М-лы IV конференции, Улан-Удэ, Экос, 2012, с. 151-154.

2. **Старикова А.Е.**, Скляр Е.В., Канакин С.В. Арсениосидерит в скарноидах Тажеранского массива (Западное Прибайкалье) // Геодинамическая эволюция

литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту (м-лы совещания). Иркутск, Изд-во ИГ СО РАН, 2010, вып. 8, т. 2, с. 101-103.

3. **Старикова А.Е.** Механизмы образования кальцифиров Тажеранского массива (Западное Прибайкалье) // Электронный сборник тезисов Пятой Сибирской конференции молодых учёных по наукам о Земле, минералогия, 2010.

4. **Старикова А.Е.** Строение и состав магниезных скарнов Тажеранского массива (Западное Прибайкалье) // м-лы XXIV Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика», 2011, с. 123-124.

5. **Старикова А.Е.** Минералы группы мелилита из пород Тажеранского щелочного массива (Западное Прибайкалье) // XXIX Международная конференция «Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма». Школа «Щелочной магматизм Земли», 2012, с.142-144.

6. Sharygin V.V., **Starikova A. Ye.** Sulfide associations in garnet-melilite-wollastonite skarns of the Tazheran alkaline massif, Baikal region // XXVII International conference, school "Geochemistry of alkaline rocks" Abstract Volume, Moscow-Koktebel', Russia-Ukraine, 2010, p. 164-165.

7. **Starikova A.E.** A melilite-bearing calcic skarn, the Tazheran massif, Western Baikal area, Russia // 6<sup>th</sup> ISECGSC Abstracts Volume, Novosibirsk, 2012, p. 109.

8. **Starikova A.E.** Fluid inclusions in garnet of calcic skarns, the Tazheran massif (western Baikal area, Russia) // ACROFI IV Abstracts Volume, Brisbane, 2012, p. 79-80.

9. **Starikova A.E.** A melilite-bearing high-temperature calcic skarn, the Tazheran massif, Western Baikal area, Russia // 34<sup>th</sup> IGC Abstract CD ROM, 2012.



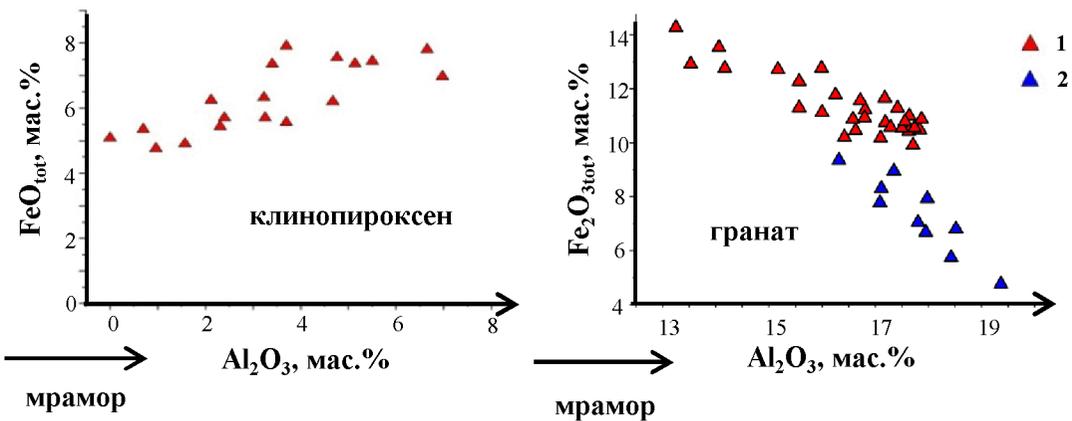


Рис. 5. Вариации составов клинопироксена и граната из гранат-пироксеновой (1) и гранатовой (2) зоны известковых скарнов.

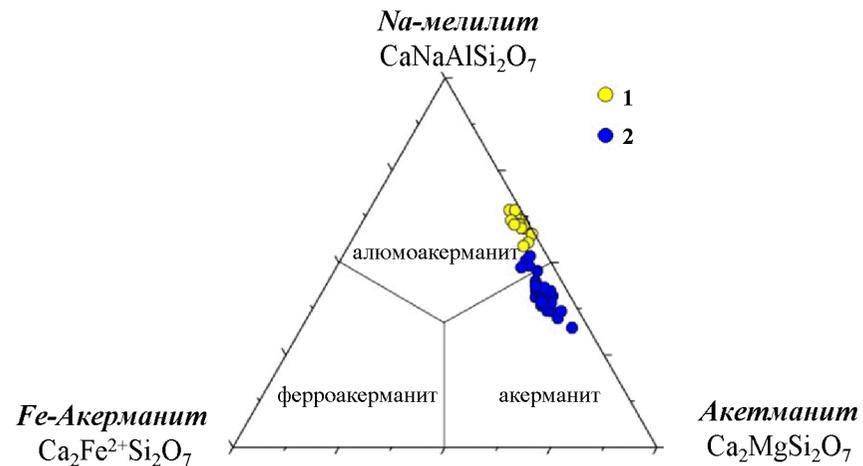


Рис. 8. Вариации составов мелилитов из титанфассаитовых и нефелин-титанфассаитовых (1) и гранат-мелилит-волластонитовых пород (2).

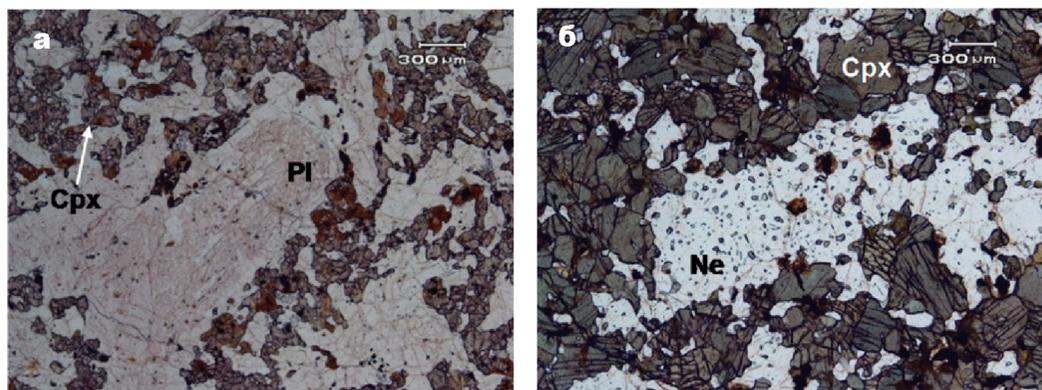


Рис. 7. Постепенный переход от участков с сохранившейся офитовой структурой (а) до титанфассаитовых пород с обособлениями нефелина (в): (а) в порода с реликтами лейст плагиоклаза; (б) титанфассаитовая порода с обособлениями нефелина, сохранившими облик лейст; (в) нефелин-титанфассаитовая порода.

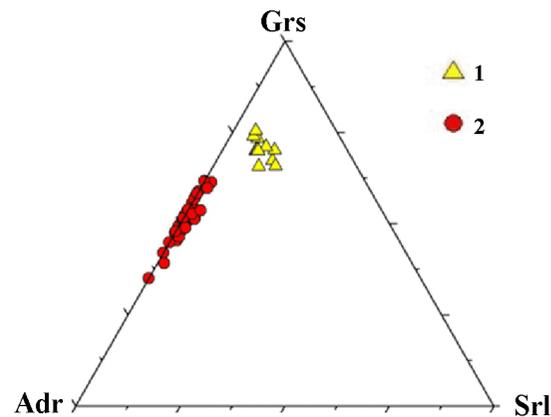


Рис. 9. Составы гранатов из гранат-мелилит-волластонитовых пород: 1 – центральная часть зерен; 2 – краевые части зерен.

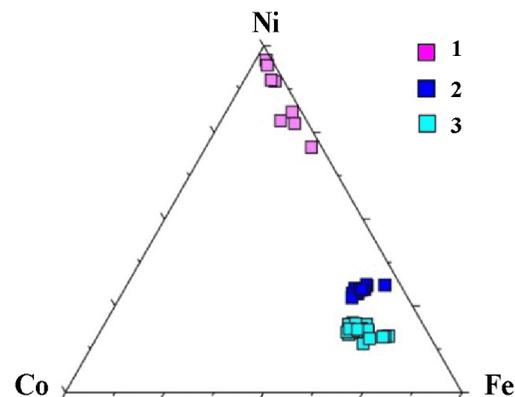


Рис. 10. Вариации составов арсенидов из титанфассаитовых и нефелин-титанфассаитовых пород: 1 – никелин; 2 – вестервелдит; 3 – леллингит.

Таблица 1

## Представительные анализы (мас.%) породообразующих минералов

|                                    | клинопироксен |        |        |        |       |       | шпинель |        | оливин |       |        | гранат |        | мелилит |       | монтichelлит |
|------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|-------|-------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|-------|--------------|
|                                    | 1             | 2      | 3      | 4      | 5     | 6     | 7       | 8      | 9      | 10    | 11     | 12     | 13     | 14      | 15    | 16           |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 51.34         | 54.76  | 52.72  | 53.81  | 47.94 | 46.14 | -       | -      | 41.03  | 41.91 | 42.64  | 36.75  | 39.66  | 43.42   | 44.58 | 35.14        |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.97          | 0.19   | 0.29   | -      | 1.18  | 0.82  | -       | 0.72   | -      | -     | -      | 0.57   | 0.05   | -       | -     | -            |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 2.10          | 1.18   | 3.89   | -      | 6.65  | 10.60 | 66.16   | 68.40  | -      | -     | -      | 13.25  | 19.36  | 13.38   | 8.03  | -            |
| <b>FeO<sub>tot</sub>*</b>          | 15.64         | 3.38   | 2.20   | 5.07   | 7.80  | 7.64  | 11.28   | 3.47   | 8.04   | 1.02  | -      | 14.28  | 4.75   | 0.40    | 1.73  | 17.35        |
| <b>MnO</b>                         | 0.67          | -      | -      | -      | -     | -     | -       | 0.04   | 0.48   | 0.06  | -      | 0.79   | 0.34   | -       | -     | 1.68         |
| <b>MgO</b>                         | 7.75          | 16.30  | 15.83  | 15.51  | 11.56 | 9.93  | 22.26   | 27.40  | 50.65  | 56.82 | 57.38  | -      | 0.05   | 5.39    | 7.58  | 13.17        |
| <b>CaO</b>                         | 18.01         | 24.10  | 24.74  | 25.49  | 24.04 | 24.23 | -       | -      | -      | 0.06  | -      | 33.34  | 36.25  | 30.94   | 33.08 | 32.74        |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 3.51          | 0.65   | 0.46   | -      | -     | 0.36  | -       | -      | -      | -     | -      | -      | -      | 6.25    | 4.76  | -            |
| <b>Сумма</b>                       | 99.99         | 100.58 | 100.15 | 100.01 | 99.26 | 99.96 | 100.02  | 100.03 | 100.20 | 99.90 | 100.02 | 98.87  | 100.40 | 99.78   | 99.76 | 100.08       |
| <b>Формульные коэффициенты**</b>   |               |        |        |        |       |       |         |        |        |       |        |        |        |         |       |              |
| <b>Si</b>                          | 1.940         | 1.981  | 1.910  | 1.984  | 1.806 | 1.723 | -       | -      | 0.997  | 0.989 | 0.999  | 2.942  | 3.012  | 1.923   | 1.998 | 0.997        |
| <b>Ti</b>                          | 0.028         | 0.005  | 0.008  | -      | 0.033 | 0.023 | -       | 0.012  | -      | -     | -      | 0.034  | 0.003  | -       | -     | -            |
| <b>Al</b>                          | 0.093         | 0.051  | 0.166  | -      | 0.295 | 0.467 | 1.940   | 1.936  | -      | -     | -      | 1.250  | 1.733  | 0.70    | 0.42  | -            |
| <b>Fe<sup>3+</sup></b>             | 0.229         | 0.023  | 0.031  | 0.032  | 0.026 | 0.067 | 0.060   | 0.037  | -      | -     | -      | 0.797  | 0.231  | -       | -     | -            |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             | 0.265         | 0.079  | 0.036  | 0.125  | 0.220 | 0.172 | 0.175   | 0.032  | 0.163  | 0.020 | -      | 0.063  | 0.041  | 0.015   | 0.065 | 0.412        |
| <b>Mn</b>                          | 0.021         | -      | -      | -      | -     | -     | -       | 0.001  | 0.010  | 0.001 | -      | 0.054  | 0.022  | -       | -     | 0.040        |
| <b>Mg</b>                          | 0.436         | 0.879  | 0.855  | 0.852  | 0.649 | 0.553 | 0.825   | 0.980  | 1.834  | 1.998 | 2.003  | -      | 0.005  | 0.356   | 0.506 | 0.557        |
| <b>Ca</b>                          | 0.730         | 0.935  | 0.961  | 1.007  | 0.970 | 0.970 | -       | -      | -      | 0.001 | -      | 2.860  | 2.950  | 1.468   | 1.589 | 0.995        |
| <b>Na</b>                          | 0.257         | 0.046  | 0.032  | -      | -     | 0.026 | -       | -      | -      | -     | -      | -      | -      | 0.537   | 0.414 | -            |

**Примечание:** 1-3, 7-11 – минералы из метасоматических пород магнезиального типа и из контактирующих с ними пород: 1 – из нефелинового сиенита; 2, 3 – из пироксен-нефелинового скарна; 2 – у контакта с нефелиновым сиенитом, 3 – у контакта со шпинель-форстеритовым скарном; 7, 9 – из шпинель-форстеритового скарна; 8, 10 – из шпинель-форстеритового кальцифира; 11 – из форстеритового кальцифира. 4, 5, 12, 13 – минералы из известковых скарнов: 4, 5, 12 – из гранат-диопсидового скарна; 4, 12 – у контакта с анортит-паргасит-диопсидовой породой, 5 – у контакта с гранатовым скарном. 6, 14-16 – минералы из метасоматических пород щелочного типа: 6, 14 – из нефелин-титанфассаитовой породы; 15, 16 – из гранат-мелилит-волластонитовой породы.

\* – для гранатов указано Fe<sub>2</sub>O<sub>3tot</sub> (расчетное), \*\* – формульные коэффициенты рассчитаны на 4 катиона и 6 атомов кислорода для клинопироксенов, на 3 катиона и 4 кислорода для шпинелей, на 4 атома кислорода для оливинов, на 8 катионов и 12 кислорода для гранатов, на 7 кислорода для мелилитов, на 3 катиона для монтichelлитов.

Таблица 2

**Представительные анализы (мас.%) минералов Ti и Zr из метасоматических пород магнезиального типа**

|                                   | 1            | 2             | 3             | 4            | 5            | 6            | 7             | 8             |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| ZrO <sub>2</sub>                  | 36.70        | 97.70         | 68.3          | 69.68        | 0.05         | 0.16         | -             | -             |
| HfO <sub>2</sub>                  | 0.30         | 1.28          | 0.78          | 1.15         | -            | -            | -             | -             |
| TiO <sub>2</sub>                  | 38.17        | 0.31          | 17.18         | 16.82        | 57.78        | 58.30        | 55.70         | 67.16         |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 2.98         | -             | 1.44          | -            | 0.43         | 0.10         | -             | -             |
| FeO                               | 2.53         | 0.61          | 0.28          | -            | 0.36         | 0.02         | 35.98         | 2.30          |
| CaO                               | 13.12        | 0.03          | 11.64         | 11.31        | 37.83        | 39.74        | 0.27          | 0.52          |
| MgO                               | 0.15         | 0.08          | 0.05          | 0.20         | 0.02         | 0.05         | 7.38          | 30.47         |
| MnO                               | 0.09         | -             | -             | -            | -            | -            | 1.88          | 0.08          |
| UO <sub>2</sub> +ThO <sub>2</sub> | 3.43         | 0.09          | 0.19          | 0.09         | 0.36         | -            | -             | -             |
| REE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 0.22         | 0.06          | 0.08          | 0.08         | 1.61         | 0.20         | -             | -             |
| SrO                               | 0.30         | -             | -             | -            | 0.23         | 0.20         | -             | -             |
| Na <sub>2</sub> O                 | 0.08         | -             | 0.09          | 0.03         | 0.52         | 0.16         | -             | -             |
| <b>Сумма</b>                      | <b>98.07</b> | <b>100.16</b> | <b>100.03</b> | <b>99.35</b> | <b>99.20</b> | <b>99.74</b> | <b>101.21</b> | <b>100.53</b> |
| Формульные коэффициенты*          |              |               |               |              |              |              |               |               |
| Zr                                | 1.081        | 0.972         | 4.981         | 5.138        | 0.001        | 0.002        | -             | -             |
| Hf                                | 0.005        | 0.007         | 0.033         | 0.050        | -            | -            | -             | -             |
| Ti                                | 1.081        | 0.005         | 1.932         | 1.913        | 1.001        | 1.004        | 0.987         | 1.026         |
| Nb                                | 0.082        | -             | 0.097         | -            | 0.004        | 0.001        | -             | -             |
| Fe                                | 0.128        | 0.010         | 0.035         | -            | 0.014        | 0.001        | 0.709         | 0.037         |
| Ca                                | 0.849        | 0.001         | 1.868         | 1.834        | 0.935        | 0.976        | 0.007         | 0.011         |
| Mg                                | 0.013        | 0.002         | 0.012         | 0.046        | 0.001        | 0.002        | 0.259         | 0.922         |
| Mn                                | 0.005        | -             | -             | -            | -            | -            | 0.037         | 0.001         |
| U+Th                              | 0.046        | 0.0003        | 0.006         | 0.003        | 0.002        | -            | -             | -             |
| REE                               | 0.009        | 0.001         | 0.006         | 0.006        | 0.014        | 0.003        | -             | -             |
| Sr                                | 0.011        | -             | -             | -            | 0.003        | 0.003        | -             | -             |
| Na                                | 0.009        | -             | 0.025         | 0.008        | 0.023        | 0.007        | -             | -             |

**Примечание:** 1 – цирконолит из магнезиального скарна; 2 – бадделеит из магнезиального скарна; 3,4 – тажеранит; 3 – из магнезиального скарна, 4 – из кальцифира; 5,6 – перовскит; 5 – из магнезиального скарна, 6 – из кальцифира; 7 – ильменит из магнезиального скарна; 8 - гейкилит из кальцифира.

\* - формульные коэффициенты рассчитаны на 4 катиона для цирконолита, 1 катион для бадделеита, 9 катионов для тажеранита, 2 катиона для перовскита, ильменита и гейкилита.

Таблица 3

**Представительные анализы арсенидов (мас.%) из титанфассаитовых пород.**

|                          | 1            | 2             | 3            | 4             |
|--------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Fe                       | 26.96        | 17.67         | 6.91         | 25.39         |
| Ni                       | 1.11         | 5.21          | 34.98        | 13.22         |
| Co                       | 0.59         | 4.98          | 1.04         | 4.67          |
| S                        | 1.64         | 0.28          | -            | 0.08          |
| As                       | 69.68        | 71.57         | 53.84        | 56.74         |
| Sb                       | -            | 0.35          | 2.95         | 0.04          |
| <b>Сумма</b>             | <b>99.98</b> | <b>100.06</b> | <b>99.72</b> | <b>100.14</b> |
| формульные коэффициенты* |              |               |              |               |
| Fe                       | 0.970        | 0.652         | 0.167        | 0.598         |
| Ni                       | 0.038        | 0.183         | 0.805        | 0.297         |
| Co                       | 0.020        | 0.174         | 0.024        | 0.104         |
| Σ <sub>катионов</sub>    | 1.028        | 1.009         | 0.996        | 0.999         |
| S                        | 0.103        | 0.018         | -            | 0.003         |
| As                       | 1.869        | 1.967         | 0.971        | 0.997         |
| Sb                       | -            | 0.006         | 0.033        | 0.001         |
| Σ <sub>анионов</sub>     | 1.972        | 1.991         | 1.004        | 1.001         |

**Примечание:** 1,2 – леллингиты; 3 – никелины; 4 – вестервелдиты.

\* - формульные коэффициенты рассчитаны на 3 иона для леллингита, на 2 иона для никелина и вестервелдита.