

На правах рукописи

Стативко Владислав Сергеевич



**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И
ПРИРОДА СИЛИКАТНО-КАРБОНАТНЫХ ПОРОД В
ОБРАМЛЕНИИ МАССИВОВ
КУСИНСКО-КОПАНСКОГО ИНТРУЗИВНОГО
КОМПЛЕКСА ЮЖНОГО УРАЛА**

*Специальность 1.6.4. Минералогия, кристаллография.
Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых*

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

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН
Кузнецов Антон Борисович

Официальные оппоненты:

Сокол Эллина Владимировна

доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория метаморфизма и метасоматизма, главный научный сотрудник;

Гриценко Юлия Дмитриевна

кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", кафедра минералогии, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится 19 декабря 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ.3 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ГУЛЬБИН
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В XIX–XX веках на Южном Урале в связи с поисками новых перспективных объектов с залежами железных руд для Кусинского завода и добычи абразивного сырья (граната) были заложены минеральные копи: Зеленцовская, Николае-Максимилиановская, Ахматовская, Перовскитовая, Прасковье-Евгеньевская и Шишимская. Копи вскрыли силикатно-карбонатные породы, распространенные в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале. В них описаны десятки новых минералов, имеющих научно-практическое значение (Долгов и др., 2007): перовскит (в 1839 г. Г. Розе), лейхтенбергит (в 1842 г. П.Н. Евреиновым), ксантофиллит (в 1842 Г. Розе), валуевит или клинтонит (в 1874 г. В.И. Редикорцевым), гидроксилклиногумит (в 1999 г. В.М. Гекимянцем, Э.М. Спиридоновым и др.) и др.

На протяжении десятилетий длится дискуссия о происхождении силикатно-карбонатных пород, вскрытых минеральными копиями. Образование этих пород объясняют в рамках контактово-метасоматической (скарновой), метаморфической (родингитовой) и карбонатитовой моделей. Однако многие вопросы, касающиеся механизмов образования рассматриваемых силикатно-карбонатных пород, остаются открытыми. Дальнейшее углубленное изучение этих пород и установление их природы может дать ценную информацию о геологической истории южно-уральского региона.

Степень разработанности темы исследования

В работе В.С. Мясникова (1954) была детально описана минералогия силикатно-карбонатных пород и сделан вывод о том, что эти породы являются скарнами, образованными в результате внедрения кусинско-копанского интрузивного комплекса в рифейские осадочные породы. Позднее была высказана гипотеза о двухстадийной модели, рассматривающей преобразование ранних скарнов в родингитоподобные породы в результате наложенного раннепалеозойского метаморфизма (Гекимянц, 2000). В настоящее время для силикатно-карбонатных пород предлагается карбонатитовая природа

образования (Попов, 2010; 2012; Попов, Рассомахин, 2022; 2023; Степанов и др., 2019; 2020; Stepanov et al., 2024).

Проблеме происхождения силикатно-карбонатных пород посвящены десятки публикаций (Le Bas, 1981; Moore, Wood, 1998; Mitchell, 2005; Sengupta et al., 2009; Aleksandrov, 2011; Dutta et al., 2011; Sklyarov et al., 2013; Старикова и др., 2014; Dai et al., 2017; Doroshkevich et al., 2017). В последнее время некоторые силикатно-карбонатные породы стали определять как коровые карбонатиты, образованные за счет плавления первично осадочных карбонатных комплексов (Santos et al., 2013; Hegner et al., 2020; Wickramasinghe et al., 2024; Su et al., 2024). Изотопные характеристики ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$) подобных пород свидетельствуют о коровом источнике карбонатного вещества, поэтому такие породы являются псевдокарбонатитами – метаморфическими (силикатными мраморами) или метасоматическими (скарнами) породами (Соколов, 2021). Истинные карбонатиты являются продуктами мантийных выплавов (Mitchell, 2005; Соколов, 2021).

Объектом исследования послужили силикатно-карбонатные породы из зоны контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале.

Предметом исследования являются минералы силикатно-карбонатных пород, их минералого-геохимические особенности и изотопно-геохимические характеристики.

Цель работы – установление природы силикатно-карбонатных пород, расположенных в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале.

Идея работы заключается в том, что при установлении природы силикатно-карбонатных пород, необходимо учитывать ключевые минералого-геохимические и изотопно-геохимические критерии, указывающие на их происхождение.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Описать минеральные ассоциации силикатно-карбонатных пород, развитых в зоне контакта массивов

кусинско-копанского интрузивного комплекса с карбонатными толщами саткинской свиты на Южном Урале.

2. Выявить закономерности распределения редких и редкоземельных элементов в силикатно-карбонатных породах и их основных минералах.

3. Определить геохимическую и Sr-изотопную характеристику карбонатных минералов из силикатно-карбонатных пород.

4. Установить основные этапы формирования силикатно-карбонатных пород, развитых в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале.

Научная новизна:

1. Впервые получены данные по содержанию и закономерностям распределения редких и редкоземельных элементов в гранатах, титаните и везувиане из силикатно-карбонатных пород, представленных силикатными мраморами, скарнами, родингитоподобными породами и кальцит-силикатными жилами. Установлено, что в силикатных мраморах везувиан и находящийся с ним в парагенезисе гранат обогащены LREE; в скарнах везувиан и титанит в парагенезисе с гранатом (минералом-концентратором HREE) обогащены LREE и обеднены HREE.

2. Впервые получены данные по Sr-изотопной системе карбонатов силикатно-карбонатных пород, вскрытых в южно-уральских коях. Установлено, что отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в изученных карбонатах сопоставимо с отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для рифейских известняков и доломитов саткинской свиты и значительно отличается от величины этого отношения для карбонатитов.

3. Впервые получены доказательства, что в кальцит-силикатных жилах, секущих силикатные мраморы, родингитоподобные породы и скарны, присутствуют гранаты позднепалеозойского возраста (около 320 млн лет).

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.4. Минералогия, кристаллография.

Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых по пунктам 1, 2, 3, 13, 19 и 20.

Теоретическая и практическая значимость работы

Проведенное исследование вносит значительный вклад в установление природы силикатно-карбонатных пород, расположенных в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале.

Полученные результаты исследования минералов из силикатно-карбонатных пород были использованы в отчетных материалах НИР ИГГД РАН «Этапы формирования, палеогеография, литогеохимия и биостратиграфия осадочных последовательностей докембрия и фанерозоя Северной Евразии» (№ FMUW-2021-0003), что зафиксировано в акте внедрения от 22 июля 2025 г.

Результаты и научные выводы диссертации могут быть использованы при исследованиях силикатно-карбонатных пород, силикатных мраморов, скарнов и карбонатитов, а также в учебных курсах «Минералогия», «Петрография», «Общая геохимия» и «Изотопная геохимия».

Методология и методы исследования

Основой для диссертационной работы послужил каменный материал, отобранный автором в ходе полевых работ 2019-2023 гг. Изученная опорная коллекция составляет порядка 170 образцов.

Петрографическое изучение образцов выполнено на кафедре минералогии, кристаллографии, петрографии Санкт-Петербургского горного университета на поляризационном микроскопе LEICA DM750 P с цифровой камерой LEICA ICC50 HD. Химический состав породообразующих минералов силикатно-карбонатных пород определен методом SEM-EDS на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200 в ИГГД РАН. Анализ химического состава силикатно-карбонатных пород проведен методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте имени А.П. Карпинского. Определение содержания редких и редкозе-

мельных элементов в гранатах, титаните и везувиане выполнено методом SIMS на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в Ярославском филиале Физико-Технологического института РАН. Минеральный вид карбонатов установлен методом XRD на рентгеновском дифрактометре Дрон Ум-1 в ИГГД РАН. Для карбонатов содержание Ca, Mg, Fe, Mn и Sr определено методом AAS на атомно-эмиссионном спектрометре Shimadzu ICPE-9000 в ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета, измерение изотопного состава Sr проводилось на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в ИГГД РАН. Изотопный анализ (U-Pb система) для гранатов проводился методом ID-TIMS в ИГГД РАН на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI.

Положения, выносимые на защиту:

1. Распределение высоkozарядных элементов (U, Zr, Hf, Nb, Ta, Y и REE) в гранатах и везувиане из силикатных мраморов, гранатах, титаните и везувиане из скарнов и титаните и везувиане из родингитоподобных пород зависит от состава парагенных минералов. Обогащение перечисленных минералов Ti, Cr и V, и проявление в них положительной Eu-аномалии обусловлено наследованием химических элементов из пород кусинско-копанского интрузивного комплекса.

2. Низкие содержания Mn, Fe, Sr и отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в карбонатных минералах силикатно-карбонатных пород свидетельствуют об осадочной природе их карбонатного вещества, источником которого послужили рифейские известняки и доломиты саткинской свиты.

3. В силикатных мраморах и секущих их гранатсодержащих кальцит-силикатных жилах установлены разновозрастные гранаты (U-Pb метод, около 500 и 320 млн лет), образование которых связано с раннепалеозойским метаморфическим и позднепалеозойским гидротермально-метасоматическим событиями соответственно.

Степень достоверности результатов исследования подкреплена представительным геологическим материалом, отобранным лично автором в южно-уральских минеральных

копях; применением современных методов исследования, обработки и интерпретации данных.

Апробация результатов проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных. За последние 3 года принято участие в 2 научнопрактических мероприятиях с докладами, в том числе на 1 международной: Металлогения древних и современных океанов (2022 г., Миасс); XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (2022 г., СанктПетербург); Конференция «Философия науки»: научные обзоры (2022 г., Санкт-Петербург); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (2023 г., Санкт-Петербург).

Личный вклад автора проявился на всех этапах проведенного исследования. Автор самостоятельно провел полевые работы с отбором образцов, определял цели и задачи диссертационного исследования, проводил анализ научной литературы, участвовал в получении и обработке аналитических данных, осуществил интерпретацию полученных результатов.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 184 наименования и 8 приложений. Диссертация изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 50 рисунков, 27 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю А.Б. Кузнецову. Автор признателен С.Г. Скублову, Ю.Б. Марину, В.И. Алексееву, В.В. Смоленскому, преподавательскому составу кафедры минералогии, кристаллографии, петрографии Горного университета и сотрудникам лаборатории изотопной хемотратиграфии и геохронологии осадочных пород ИГГД РАН за обсуждение результатов исследования. За поддержку и всестороннюю помощь автор благодарен Г.Е. Ратьковскому, Е.Д. Михайловой, А.К. Гаврильчик, М.Е. Мамыкиной, В.К. Полтарак, Ю.В. Власенко, В.М. Гекимянцу и Н.П. Пугачевой. За проведение аналитических работ автор признателен сотрудникам ИГГД РАН – О.Л. Галанкиной, Н.Г. Ризвановой, Н.А. Сергеевой, Е.Б. Сальниковой, М.В. Стифеевой, А.А. Гавриловой, Т.Л. Турченко; и ЯФ ФТИАН РАН – С.Г. Симакину, Е.В. Потапову.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено состояние проблемы исследования силикатно-карбонатных пород в мире и расположенных в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале.

Во второй главе описаны использованные в работе методики и аналитические методы.

В третьей главе представлена общая информация о геологическом строении района и объекта исследования, а также описано геологическое строение минеральных копей и петрографо-минералогические особенности пород.

В четвертой главе приведена геохимическая характеристика силикатно-карбонатных пород, рассмотрен состав

сквозных минералов по главным, редким и редкоземельным элементам.

В пятой главе обсуждаются результаты Sr-изотопной характеристики карбонатов из силикатно-карбонатных пород. Рассматриваются результаты U-Pb датирования граната из силикатных мраморов и секущих их кальцит-силикатных жил.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследования в соответствии с целью и решаемыми задачами.

Краткая характеристика объекта исследования

Рассматриваемые в работе силикатно-карбонатные породы расположены в западной части Южно-Уральского складчатого пояса. Они распространены в зонах контакта среднерифейского кусинско-копанского клинопироксенит-габбро-гранитового интрузивного комплекса и раннерифейских осадочных карбонатных пород саткинской свиты (Алексеев и др., 2000) – рисунок 1а.

Кусинско-копанский комплекс имеет силлообразную форму и представлен двумя фазами внедрения среднерифейского возраста. Ранняя фаза – дифференцированные породы основного состава: преимущественно габброиды, реже габбро-нориты, горнблендиты и клинопироксениты (Алексеев и др., 2000). Поздняя фаза сложена гранитоидами. Время формирования массивов кусинско-копанского комплекса оценивается как 1390–1350 млн лет (Краснобаев и др., 2006; Холоднов и др., 2006, 2010).

Осадочные породы обрамляют кусинско-копанский комплекс с запада и имеют раннерифейский возраст (Кузнецов и др., 2003; 2008; Семихатов и др., 2009; Краснобаев и др., 2013). Вблизи интрузивного комплекса обнажены алевролиты и углеродисто-глинистые сланцы айской свиты, а также карбонатные породы саткинской свиты. К востоку от интрузивного комплекса распространены метаморфические толщи кувашской свиты, предположительно, среднего рифея.

Известными южноуральскими минеральными копиями вскрыты силикатно-карбонатные породы, которые распространены в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и карбонатных толщах саткинской

свиты. В результате выполненных петрографических исследований силикатно-карбонатные породы определены как силикатные мраморы, скарны, родингитоподобные породы и кальцит-силикатные жилы.

Стоит отметить, что определенные нами силикатные мраморы в ряде работ диагностированы как карбонатиты (Попов, 2010; 2011; 2012; 2023; Попов, Рассомахин, 2022; 2023). Мощности силикатных мраморов варьируют от первых до пятнадцати метров. Структура этих пород – гранобластовая, текстура – массивная с элементами пятнистой и полосчатой. Силикатные мраморы состоят из карбонатов ряда кальцит-доломит, фостерита, клиногумита, везувиана, клинохлора, андрадита, брусита, шпинели, перовскита и ряда других минералов. Размеры минералов составляют от первых миллиметров до первых сантиметров.

Наиболее распространенные разновидности пород, вскрытые минеральными копиями, представлены (рисунок 1б): амфиболизированными и эпидотизированными габброидами, кварц-карбонат-хлорит-серпентиновыми сланцами, скарнами, родингитоподобными породами, силикатными мраморами, а также кальцит-силикатными жилами, секущими все вышеперечисленные типы пород.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Распределение высокозарядных элементов (U, Zr, Hf, Nb, Ta, Y и REE) в гранатах и везувиане из силикатных мраморов, гранатах, титаните и везувиане из скарнов и титаните и везувиане из родингитоподобных пород зависит от состава парагенных минералов. Обогащение перечисленных минералов Ti, Cr и V, и проявление в них положительной Eu-аномалии обусловлено наследованием химических элементов из пород кусинско-копанского интрузивного комплекса.

Гранаты из скарнов имеют промежуточный состав между андрадитом и гроссуляром, а гранаты из силикатных мраморов отвечают по составу андрадиту, в котором доля шорломитового и моримотоитового минералов в сумме может достигать 30% (рисунок 2а). Для гранатов из силикатных

мраморов и скарнов установлена связь между содержанием Ti и содержаниями U, Y, Zr, Hf и Nb. Фигуративные точки на бинарных диаграммах в координатах содержания этих элементов размещены в виде трех дискретных групп разных по составу гранатов, формируя при этом общий тренд изменения состава в рядуgrossуляр–андрадит–Ti-андрадит (рисунок 2б).

Содержание Ti, Fe, Cr, Mg, V, U, Hf, Y, Nb, Zr и REE в изученных гранатах из силикатных мраморов и скарнов сравнительно меньшее, чем в гранатах из карбонатитовых комплексов (Сальникова и др., 2018; Стифеева и др., 2020; Гриценко, 2018; Yang et al., 2018; Dongre et al., 2019; Костюк и др., 2021; Samal et al., 2021; Savard et al., 2021), и больше, чем в гранатах из эталонных скарнов других регионов (Gaspar et al., 2008; Fei et al., 2019; Tian et al., 2019; Jiang et al., 2020; Duan et al., 2020; Stavrev et al., 2020; Kostić et al., Li et al., 2021). Кроме того, гранаты из силикатных мраморов и скарнов обогащены Eu и характеризуются положительной Eu-аномалией (рисунок 2в). Источником вышеописанных химических элементов для исследованных гранатов могли послужить интрузивные образования кусинско-копанского комплекса.

Титанит из скарнов, родингитоподобных пород и измененных габброидов обладает близким химическим составом по главным элементам и содержит малое количество элементов-примесей (Fe, V, Cr, Mn и др.). Титанит из скарнов сравнительно обогащен LREE и Th, из родингитоподобных пород – HREE, Hf и Ta, из измененных габброидов – V, Cr и Sr (рисунок 3а-б). Уровень содержания и характер распределения REE для рассматриваемого титанита сопоставим с аналогичными данными, полученными для титанита, образованного в ходе гидротермальных (контактово-метасоматических) процессов (Horie et al., 2008; Li et al., 2010; Paoli et al., 2019).

Для рассмотренного титанита установлена зависимость его редкоэлементного состава от минералов, с которыми он находится в парагенезисе. В скарнах титанит в парагенезисе с минералом-концентратором HREE (гранатом) обогащен LREE и обеднен HREE (рисунок 3б). В родингитоподобных породах титанит в парагенезисе с минералом-концентратором LREE (эпидотом) обеднен LREE и обогащен HREE. Титанит из из-

мененных габброидов, образован по породообразующим минералам габбро (плагиоклазу и пироксену), поэтому он обеднен LREE и обогащен HREE. На всех рассмотренных спектрах распределения REE для титанита установлена положительная Eu-аномалия, которая обусловлена унаследованием Eu из габброидов кусинско-копанского комплекса.

Минералы группы везувиана, отобранные из силикатных мраморов, родингитоподобных пород, скарнов и кальцит-силикатных жил по своему составу соответствуют везувиану. Везувиан из силикатных мраморов характеризуется повышенным содержанием $\text{FeO}_{\text{общ}}$, везувиан из скарнов Шишимской копи – повышенным содержанием Al_2O_3 . Везувиан из кальцит-силикатных жил и родингитоподобных пород обладают близким химическим составом по главным элементам.

Для рассмотренного везувиана установлена взаимосвязь их редкоэлементного состава с содержанием элементов-примесей в сосуществующих с ними минералах (рисунок 3в-г). В силикатных мраморах везувиан находится в парагенезисе с гранатом, их спектры распределения REE близки друг другу, они обогащены REE (в частности LREE), Fe, V, Cr, Y, Zr и Th. В родингитоподобных породах везувиан образовался в парагенезисе с хлоритом, который практически не накапливает в себе элементы-примеси, поэтому он обогащен Ni, Zn, Sr и Nb, а спектры распределения REE свидетельствуют об установившемся геохимическом равновесии в породе. В скарнах везувиан находится в парагенезисе с гранатом (минералом-концентратором HREE, а также V, Cr, Y, Zr, Nb и Ti), поэтому он значительно обогащен LREE и обеднен V, Cr, Y, Zr, Nb и Ti. В кальцит-силикатных жилах везувиан обогащен U, его спектры распределения REE значительно дифференцированы. Примечательно, что на всех спектрах распределения REE для везувиана в разной степени проявлена положительная Eu-аномалия, которая может быть обусловлена наследованием Eu из габброидов кусинско-копанского комплекса.

2. Низкие содержания Mn, Fe, Sr и отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в карбонатных минералах силикатно-карбонатных пород свидетельствуют об осадочной

природе их карбонатного вещества, источником которого послужили рифейские известняки и доломиты саткинской свиты.

Карбонатная составляющая силикатно-карбонатных пород в большинстве своем представлена кальцитом с небольшой примесью доломита, реже – доломитом с примесью кальцита. В кальците содержание Са находится в диапазоне от 27.4 до 43.3 мас. %, Mg – от 0.20 до 7.20 мас. %, что обусловлено примесью доломита. В доломите содержание Са находится в пределах от 22.7 до 27.7 мас. %, Mg – от 9.58 до 15.6 мас. %. Концентрация Mn в кальците варьирует от 54 до 500 ppm, Fe – от 120 до 3300 ppm, Sr – от 55 до 200 ppm. Содержание Mn в доломите изменяется от 145 до 480 ppm, Fe – от 1005 до 2600 ppm, Sr – от 40 до 130 ppm (рисунок 4а).

Содержание Mn и Fe (0.19–0.38 и 1.15–5.45 мас. %) в карбонатах из карбонатитов Ильмено-Вишневогорского комплекса (Недосекова, 2006, 2013, 2020) значительно выше, чем в изученных карбонатах из силикатно-карбонатных пород. Содержание Mn и Fe в карбонатах из карбонатитов Ковдорского комплекса (Кольский полуостров) составляет 0.05–0.15 и 0.64–6.61 мас. % (Шаповалов и др., 2015), что также отлично от полученных нами данных. Содержание Mg, Mn и Sr в карбонатах из карбонатитов комплекса «Алей» («Aley») в Канаде отличаются широкой вариативностью – 707–98765, 2086–13511 и 1694–10767 ppm соответственно (Chakhmouradian et al, 2016). Рассмотренные выше литературные данные демонстрируют значимое обогащение карбонатов из карбонатитов Mg, Fe, Mn и Sr, что резко отлично от аналогичных данных, полученных для карбонатов из исследуемых силикатно-карбонатных пород.

Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для карбонатов из силикатно-карбонатных пород Зеленцовской копи составляет 0.7047–7056, Ахматовской и Шишимской копей – 0.7052–7059 и 0.7047–7058 соответственно (рисунок 4а-б). Полученные значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для исследуемых карбонатов сопоставимы с отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7046–0.7050) для известняков казымовской пачки верхнесаткинской подсвиты саткинской свиты (Кузнецов и др., 2008). Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для карбо-

натов из силикатно-карбонатных пород Перовскитовой копи составляет 0.7074–0.7104, Прасковье-Евгеньевской копи – 0.7062–0.7084. Полученные значения соотносятся с отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7068–0.7213) для доломитов карагайской пачки верхнесаткинской подсвиты саткинской свиты (Кузнецов и др., 2008).

Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в габброидах кусинско-копанского интрузивного комплекса составляет 0.705–0.706 (рисунок 4б) и отвечает «коровым» изотопным меткам (Холоднов и др., 2006, 2010; Шардакова, 2017). Измеренные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для карбонатов из разновозрастных карбонатитовых массивов находятся довольно в узких пределах 0.7030–0.7042 (Кононова, Донцова, 1979; Недосекова и др., 2006, 2013, 2020; Арзамасцев, Фу-Ян Ву, 2014) при медианном значении 0.7036 (рисунок 4б) и соответствуют «мантийным» изотопным меткам. Для карбонатов из карбонатитов Вишневогорского массива (Южный Урал) отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ составляет 0.7035–0.7036 при содержании Sr 1800–22000 ppm, а для Четласского комплекса (Средний Тиман) – 0.7030–0.7037 при Sr 1063–7043 ppm (Недосекова и др., 2006, 2013).

В целом, содержание Mg, Fe, Mn и Sr в карбонатах из силикатно-карбонатных пород значительно ниже, чем в карбонатах из карбонатитов. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для карбонатов силикатно-карбонатных пород, в сравнении с аналогичными данными для карбонатов из карбонатитов, значительно выше. Изотопно-геохимические данные указывают, что источником карбонатного вещества для изученных силикатно-карбонатных пород послужили рифейские известняки и доломиты саткинской свиты. Таким образом, карбонатитовая природа образования силикатно-карбонатных пород представляется маловероятной.

3. В силикатных мраморах и секущих их гранатсодержащих кальцит-силикатных жилах установлены разновозрастные гранаты (U-Pb метод, около 500 и 320 млн лет), образование которых связано с раннепалеозойским метаморфическим и позднепалеозойским гидротермально-метасоматическим событиями соответственно.

Оценка возраста силикатно-карбонатных пород затруднена по причине отсутствия в них традиционных минералов-геохронометров (циркона или рутила). В связи с этим в этой работе проведено U-Pb (ID-TIMS) геохронологическое исследование гранатов из силикатных мраморов Перовскитовой копи и секущих их гранатосодержащих кальцит-силикатных жилах Ахматовской и Перовскитовой копей.

Выполнено пять анализов для гранатов из силикатных мраморов Перовскитовой копи. Определенный U-Pb возраст гранатов из силикатных мраморов Перовскитовой копи составил 504 ± 4 млн лет, СКВО=1.8 (Стативко и др., 2025) – рисунок 4в (а). Полученные значения сопоставимы с определениями возраста U-Pb методом (497–532 млн лет) для перовскита из этих же пород (Stepanov et al., 2024), и значительно отличаются от возраста вмещающих карбонатных пород саткинской свиты (1550 ± 30 млн лет) и кусинско-копанского интрузивного комплекса (1390–1350 млн лет) (Кузнецов и др., 2003, 2008; Семихатов и др., 2009; Краснобаев и др., 2013). Фиксируемые значительные отличия возраста интрузива и карбонатных пород саткинской свиты от возраста гранатов из силикатных мраморов противоречат образованию последних синхронно с внедрением кусинско-копанского интрузивного комплекса. С возрастом образования гранатов из силикатных мраморов согласуется время раннепалеозойского низкоградного метаморфизма, проявленного на Южном Урале (Гекимянц, 2000), в ходе которого одновременно с родингитоподобными породами могли образоваться рассматриваемые силикатные мраморы.

Для гранатов из кальцит-силикатных жил, секущих скарны и силикатные мраморы Ахматовской и Перовскитовой копей, выполнено четыре анализа (Stativko et al., 2025). Гранаты из кальцит-силикатных жил Ахматовской копи характеризуется конкордантным возрастом 319 ± 1 млн лет, СКВО=0.08 – рисунок 4в (б). Возраст гранатов из кальцит-силикатных жил Перовскитовой копи составил 320 ± 1 млн лет (СКВО = 1.00). Рассчитанный конкордантный U-Pb возраст гранатов из кальцит-силикатных жил Перовскитовой копи совпал с результатами для гранатов из аналогичных пород

Ахматовской копи, что может свидетельствовать об их образовании в результате одного и того же геологического процесса. Полученные нами оценки U-Pb возраста гранатов (около 320 млн лет) из кальцит-силикатных жил значительно моложе возраста перовскита (532–497 млн лет) и гранатов (около 500 млн лет) из силикатных мраморов. Полученные возрасты гранатов из кальцит-силикатных жил соответствуют постколлизийному этапу эволюции Уральского подвижного пояса, сопровождавшемуся складчато-надвиговыми деформациями после приращения Магнитогорской островной дуги – 335–285 млн лет назад (Ферштатер и др., 2007; Пучков, 2010; Рахимов и др., 2014). Предположительно, по тектоническим швам могли перемещаться гидротермальные растворы (флюиды?), способствовавшие образованию гранатосодержащих кальцит-силикатных жил.

Различия в возрасте гранатов из силикатных мраморов и секущих их кальцит-силикатных жил стали следствием нескольких тектоно-термальных событий и отражают многоэтапность в образовании силикатно-карбонатных пород, развитых в зоне контакта кусинско-копанского интрузивного комплекса и карбонатных пород саткинской свиты. Основываясь на ранее опубликованных данных и результатах наших исследований, можно выделить три основных этапа формирования силикатно-карбонатных пород развитых в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале (рисунок 4г): 1) в начале среднего рифея (около 1390–1350 млн лет) в результате внедрения кусинско-копанского интрузива в осадочные толщи саткинской свиты на их контактах образовались скарны; 2) в раннем палеозое (около 500 млн лет) в ходе метаморфизма по рифейским карбонатным породам и скарнам сформировались силикатные мраморы и родингитоподобные породы соответственно; 3) в позднем палеозое (около 320 млн лет) вследствие многократных складчато-надвиговых деформаций и воздействия гидротермальных растворов (флюидов?) образовались гранатосодержащие кальцит-силикатные жилы, секущие силикатные мраморы и скарны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного комплексного петрографического, минералого-геохимического и изотопно-геохимического исследований силикатно-карбонатных пород, расположенных в зоне контакта массивов кусинско-копанского интрузивного комплекса и рифейских осадочных карбонатных пород на Южном Урале, установлены природа и этапы их образования. Силикатнокарбонатные породы являются силикатными мраморами (кальцифирами), скарнами, родингитоподобными породами и кальцит-силикатными жилами.

Особенности состава силикатно-карбонатных пород (силикатных мраморов), а также характер распределения REE для них резко отличны от аналогичных данных по карбонатам, поэтому магматическое (карбонатитовое) происхождение изучаемых пород маловероятно. Перераспределение REE в силикатных мраморах обусловлено воздействием пород рамы (кусинско-копанского интрузивного комплекса) на карбонатные породы в результате контактового метасоматоза.

Гранаты из силикатных мраморов по составу соответствуют андрадиту, в котором сумма долей шорломитового и моримотоитового миналов достигает 30 %. Они, в сравнении с гранатами из скарнов, обогащены LREE и рядом несовместимых элементов – U, Y, Zr, Hf и Nb. Гранаты из скарнов обладают промежуточным составом в изоморфном ряду андрадит-гроссуляр и, в сравнении с гранатами из силикатно-карбонатных пород, обогащены Cr и V.

Изученный титанит характеризуется близким химическим составом по главным элементам. Содержание редких и редкоземельных элементов в зернах титанита варьирует: в скарнах обогащен LREE и Th; в родингитоподобных породах обогащен HREE, Hf и Ta и обеднен LREE; по породообразующим минералам габбро (плагноклазу и пироксену), обеднен LREE и обогащен HREE, V, Cr и Sr.

Везувиан из различных минеральных агрегатов в большинстве своем является Ti-содержащей разновидностью. Везувиан из силикатно-карбонатных пород обогащен Fe, V, Cr,

Y, Zr, Th и Sn, из жильных тел в хлоритовых сланцах – U, из родингитоподобных пород – Ni, Zn, Sr и Nb, из скарнов – Al.

На всех спектрах распределения REE для рассмотренных гранатов, титанита и везувиана в разной степени проявлена положительная Eu-аномалия. Обогащение перечисленных минералов Ti, Cr и V, и проявление в них положительной Eu-аномалии обусловлено их наследованием из пород кусинско-копанского интрузивного комплекса.

Карбонатная составляющая силикатно-карбонатных пород для большинства исследуемых образцов представлена кальцитом с небольшой примесью доломита, для остальных – доломитом с примесью кальцита. Содержания Ca, Mg, Fe, Mn и Sr в карбонатах, а также их Sr-изотопная характеристика свидетельствуют о том, что источником карбонатного вещества для рассмотренных силикатно-карбонатных пород, расположенных в толщах саткинской свиты и габброидах кусинско-копанского комплекса, послужили фрагменты раннерифейских пород саткинской свиты.

U-Pb возраст гранатов из силикатных мраморов составил 504 ± 4 млн лет, из секущих их кальцит-силикатных жил – 320 ± 1 млн лет. Основываясь на результатах изотопных и геохронологических исследований, выделено три этапа формирования для силикатнокарбонатных пород: 1) в начале среднего рифея в результате внедрения кусинско-копанского интрузива в осадочные толщи саткинской свиты на их контактах образовались скарны; 2) в раннем палеозое в ходе метаморфизма по рифейским карбонатным породам и скарнам сформировались силикатные мраморы и родингитоподобные породы соответственно; 3) в позднем палеозое вследствие складчато-надвиговых деформаций и воздействия гидротермальных растворов (флюидов?) образовались гранатсодержащие кальцит-силикатные жилы, секущие силикатные мраморы, родингитоподобные породы и скарны. Автор видит перспективу дальнейшего изучения природы силикатно-карбонатных пород в комплексном минералогическом и изотопно-геохимическом анализе образцов из разных регионов мира.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Стативко, В.С.** Геохимия редкоземельных элементов и изотопный состав Sr силикатно-карбонатных пород из Зеленцовской копи (Кусинско-Копанский интрузивный комплекс, Южный Урал) / **В.С. Стативко**, А.Б. Кузнецов, С.Г. Скублов, Г.Е. Ратьковский, О.К. Каурова, Т.Л. Турченко // Записки Российского минералогического общества. – 2024. – Т. 153, № 3. – С. 29-41.

2. **Стативко, В.С.** Геохимия везувиана из контактово-метасоматических пород минеральных копей Южного Урала / **В.С. Стативко**, Г.Е. Ратьковский, А.Б. Кузнецов // Вестник геонаук. – 2024. – № 11(359). – С. 30-41.

3. **Stativko, V.S.** U–Pb Age and Chemical Characteristics of Ti-Rich Andradites from Vein Calcite–Silicate Rocks of the Akhmatovskaya and Perovskitovaya Mines in the South Urals / **V.S. Stativko**, M.V. Stifeeva, E.B. Salnikova, A.B. Kuznetsov, A.B. Kotov, V.V. Smolensky // Doklady Earth Sciences. – 2025. – Vol. 522, No. 39.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. **Стативко, В.С.** Редкие и редкоземельные элементы в гранатах из силикатнокарбонатных образований Кусинско-Копанского комплекса (Южный Урал) / **В.С. Стативко**, С.Г. Скублов, В.В. Смоленский, А.Б. Кузнецов // Литосфера. – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 225–246.

5. **Стативко, В.С.** Геохимические особенности титанита и U–Pb возраст граната из минеральных копей Южного Урала / **В.С. Стативко**, А.Б. Кузнецов, В.В. Смоленский, Н.Г. Ризванова, Н.А. Сергеева // Записки Горного института. – 2025. – № 16495. – С. 1-19.

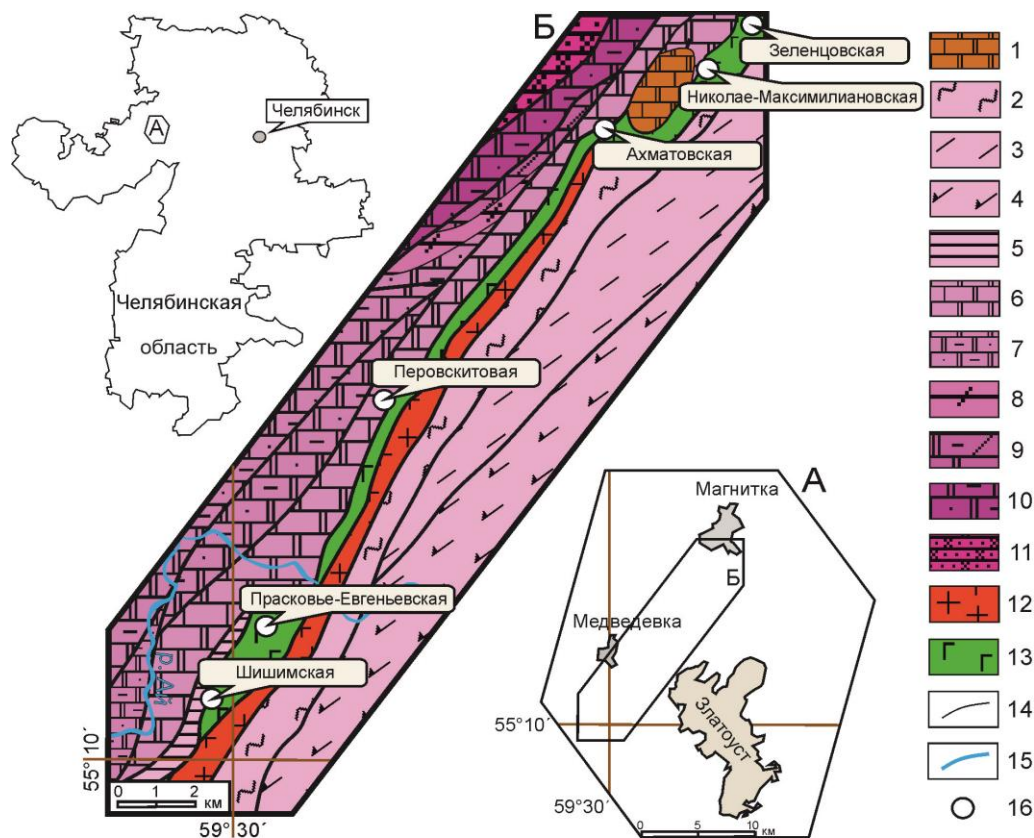


Рисунок 1а – Географическая (А) и геологическая (Б) карты-схемы района работ.

Условные обозначения: 1 – доломиты, известняки тирлянкой свиты; 2–4 – метаморфические толщи кувашской свиты: 2 – сланцы слюисто-хлоритовые, слюисто-кварцевые, полевошпат-кварцевые, филлиты, 3 – сланцы двуслюдяные с гранатом, 4 – амфиболиты, сланцы двуслюдяные биотит-амфиболитовые, амфибол-полевошпатовые; 5 – аргиллиты и алевролиты бакальской свиты; 6–10 – осадочные толщи саткинской свиты: 6 – доломиты и доломитовые известняки нижнекусинской подсвиты, 7 – доломиты, доломиты песчаные и глинистые верхнекусинской подсвиты, 8 – сланцы глинистые, алевролитистые половинкинской подсвиты, 9 – доломиты глинистые и мергели доломитовые нижнесаткинской подсвиты, 10 – доломиты глинистые и песчаные верхнесаткинской подсвиты; 11 – песчаники полевошпат-кварцевые айской свиты; 12–13 – кусинско-копанский интрузивный комплекс: 12 – граниты, 13 – габбро, габбронориты, горнблендиты, клинопироксениты; 14 – контакт пород; 15 – водоёмы; 16 – минеральные копи (Построены В.С. Стативко на основе (Аулов и др., 2015) с изменениями)

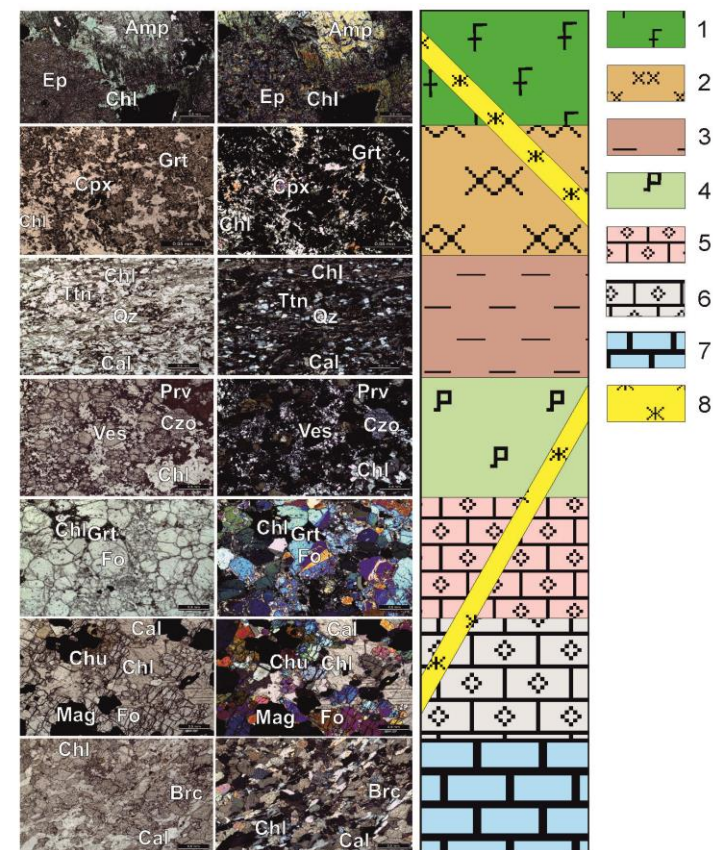
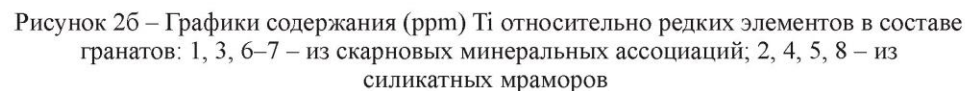
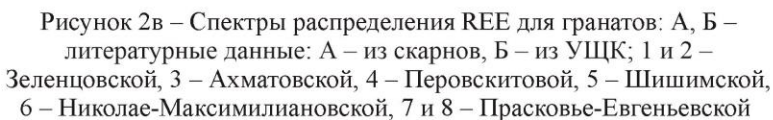
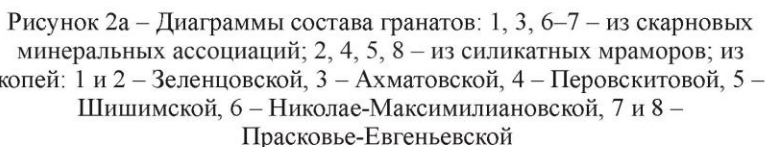


Рисунок 1б – Разновидности пород в шлифах при параллельных (слева) и скрещенных (справа) николях, проявленные в рассмотренных минеральных коях и пространственно-временная схема к ним: 1 – бруситовый мрамор, 2 – везувиан-клиногумит-форстеритовый мрамор, 3 – гранат-форстеритовый мрамор, 4 – родингитоподобные породы, 5 – кварц-карбонат-хлорит-серпентиновые сланцы, 6 – пироксен-гранатовые скарги, 7 – измененное (амфиболитизированное) габбро, 8 – кальцит-силикатные жилы. Аббревиатуры минералов: Amp – минералы группы амфиболов (роговых обманок), Brc – брусит, Cal – кальцит, Chl – минералы группы хлорита, Chu – клиногумит, Cpx – клинопироксен ряда диопсид-геденбергит, Czo – клиноцоизит, Ep – минералы группы эпидота, Fo – форстерит, Grt – гранаты ряда андрадит-гроссуляра, Mag – магнетит, Prv – перовскит, Qz – кварц, Ttn – титанит, Ves – везувиан



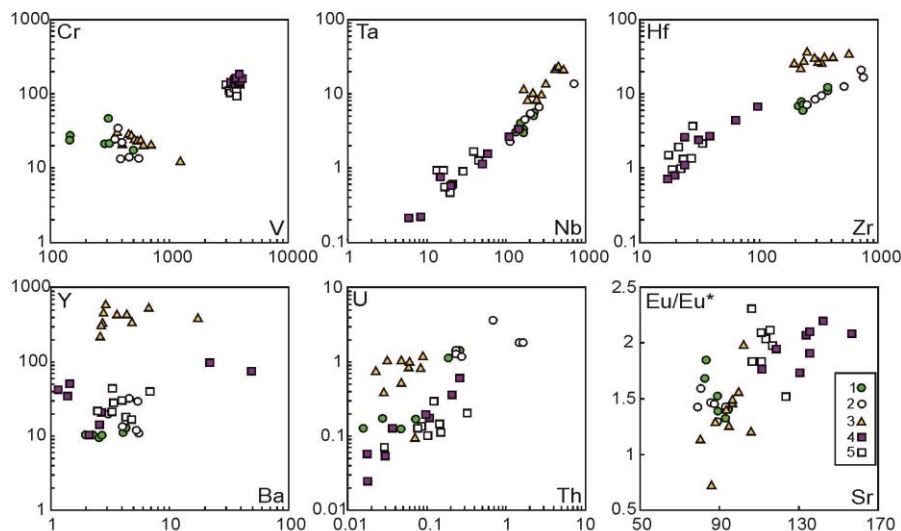


Рисунок 3а – Бинарные диаграммы соотношения редких элементов (ppm) в титаните из различных минеральных ассоциаций: 1 – эпидот-титанит-гранатовая (Ахматовская копь); 2 – гранат-титанит-диопсидовая (Ахматовская копь); 3 – эпидот-титанит-клиноклоровая (Николае-Максимилиановская копь); 4, 5 – хлорит-титанит-гранатовая (Прасковье-Евгеньевская копь): 4 – гранат в подчиненном количестве; 5 – гранат преобладает

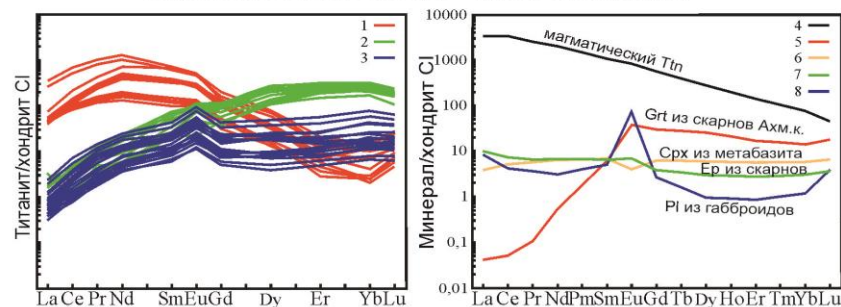


Рисунок 3б – Спектры распределения REE для различных минералов: 1-3 – титанита в зависимости от парагенных и «материнских» минералов: 1 – с гранатом (Ахматовская копь), 2 – с эпидотом (Николае-Максимилиановская копь); 3 – по плагиоклазу и/или пироксену (Прасковье-Евгеньевская копь); 4-8 – усредненные данные: 4 – магматического титанита из пород щелочно-ультраосновных серий Кольской провинции (Арзамасцев, Арзамасцева, 2013), 5 – граната из скарнов Ахматовской копи (Стативко и др., 2023), 6 – клинопироксена из метабазитов пояса Лимпопо, Южная Африка (Buick et al., 2007), 7 – эпидота из скарнов месторождения Петровица, Болгария (Hantsche et al., 2021), 8 – плагиоклаза из габброидов (Леснов, 2000)

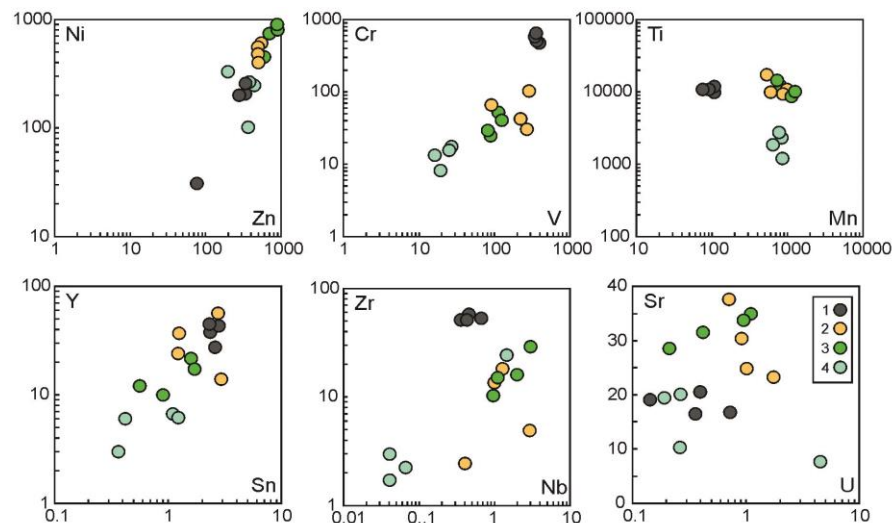


Рисунок 3в – Бинарные диаграммы содержания элементов-примесей в везувините из различных минеральных ассоциаций (порода, копь): 1 – с гранатом и кальцитом (гранат-везувинитовый мрамор, Зеленцовская); 2 – с гранатом и кальцитом (гранат-везувинитовый кальцитовый жил в хлоритовом сланце, Николае-Максимилиановская); 3 – с клиноклором (родингит, Ахматовская); 4 – с кальцитом и гранатом (гранат-везувинитовый скарн, Шишимская)

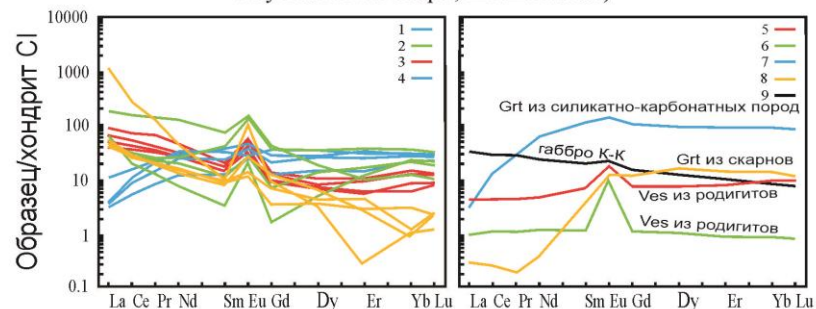


Рисунок 3г – Спектры распределения REE: 1-4 – для везувинитов из (коп): 1 – гранат-везувинитового мрамора (Зеленцовская); 2 – гранат-везувинитовый кальцитовый жил на хлоритовом сланце (Николае-Максимилиановская); 3 – родингитов (Ахматовская); 4 – гранат-везувинитового скарна (Шишимская); 5-6 – для везувинита из родингитов: 5 – Западные Карпаты, Словакия (Butek et al., 2022); 6 – Баженовского офиолитового комплекса Среднего Урала, Россия (Ерохин, 2012); 7-8 – для граната из (Стативко и др., 2023): 7 – гранат-везувинитового мрамора Зеленцовской копи; 8 – пироксен-гранатового скарна Николае-Максимилиановской копи; 9 – для габбро Копанского массива кусинско-копанского интрузивного комплекса (Kholodnov et al., 2018)

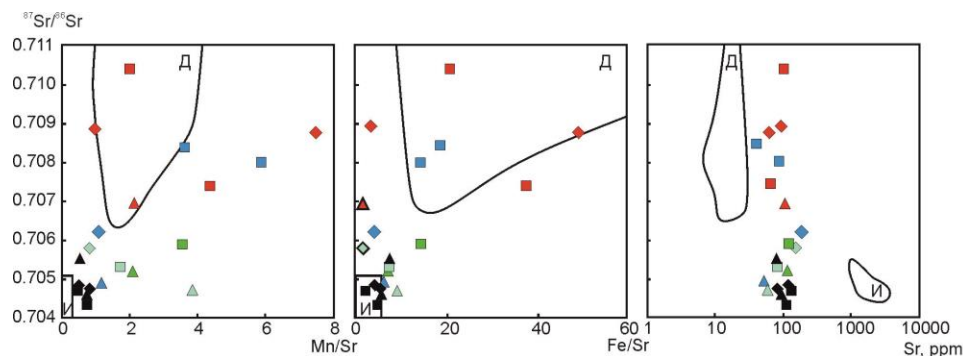


Рисунок 4а – Бинарные диаграммы зависимости отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и Mg/Ca от отношений Mn/Sr и Fe/Sr и содержания Sr для карбонатов из силикатно-карбонатных пород. На диаграмму вынесены поля с аналогичными данными для известняков казымовской и доломитов карагайской пачек саткинской свиты из (Кузнецов и др., 2008). Условные обозначения на рисунке 4б

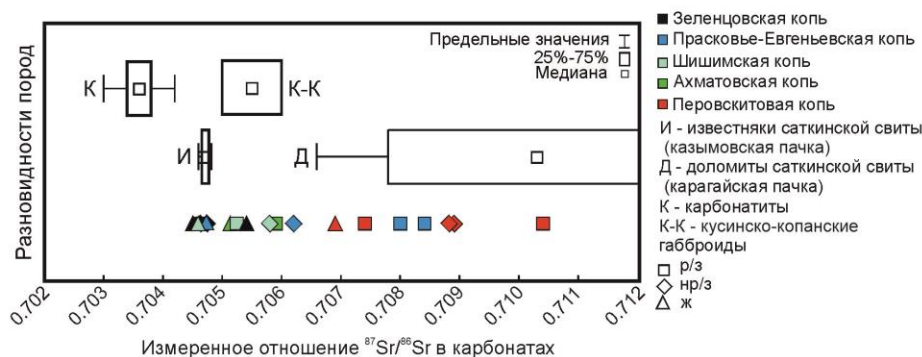


Рисунок 4б – Измеренное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в различных породах: 1–3 – для кальцитов из: 1 – равномернозернистых пород, 2 – неравномернозернистых пород, 3 – жил/прожилков; 4–7 – данные из литературных источников: 4 – карбонатитов (Арзамасцев, Фу-Ян, 2014; Кононова и др., 1978; Недосекова и др., 2006, 2013, 2020), 5 – габброидов кусинско-копанского интрузивного комплекса (Холоднов и др., 2006, 2010; Шардакова, 2017), 6–7 – осадочных пород саткинской свиты (пачки) (Кузнецов и др., 2007, 2008): 6 – известняки (казымовская), 7 – доломиты (карагайская)

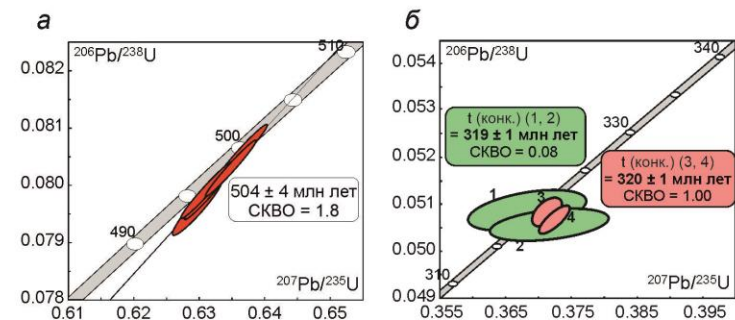


Рисунок 4в – Диаграмма с конкордией для гранатов из силикатно-карбонатных пород Перовскитовой копи (а) и для гранатов из кальцит-силикатных жил Перовскитовой и Ахматовской копей (б)

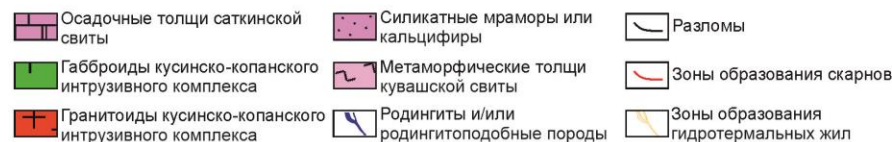
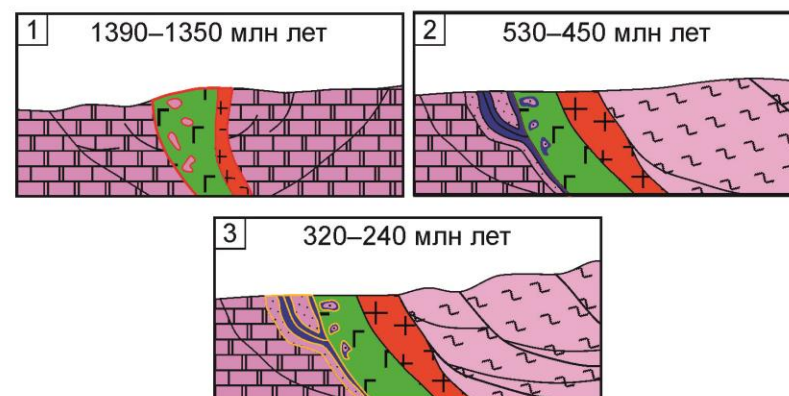


Рисунок 4г – Этапы образования силикатно-карбонатных пород