
ГЕОХИМИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ Sr СИЛИКАТНО-КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ИЗ ЗЕЛЕНЦОВСКОЙ КОПИ (КУСИНСКО-КОПАНСКИЙ ИНТРУЗИВНЫЙ КОМПЛЕКС, ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2024 г. Д. чл. В. С. Стативко^{1,2,*}, А. Б. Кузнецов², д. чл. С. Г. Скублов², Г. Е. Ратьковский³, О. К. Каурова², Т. Л. Турченко²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

² Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034, Россия

³ ООО «Новомэк инжиниринг», Большой проспект В.О., 78, Санкт-Петербург, 199106, Россия
* e-mail: vlad.stativko@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.11.2023 г.

После доработки: 01.03.2024 г.

Принята к публикации: 10.04.2024 г.

Объектом исследования являются силикатно-карбонатные породы, приуроченные к массиву габброидов кусинско-копанского интрузивного комплекса. Пониженное содержание примесей (Mn, Fe) и низкое отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кальците (0.7045–0.7048) указывают на то, что источником карбонатного вещества для этих пород являлись перекристаллизованные известняки раннерифейской саткинской свиты. Изотопно-геохимические данные ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношение и пологий спектр распределения РЗЭ) свидетельствуют о влиянии расплава габброидов на их состав. Высказано предположение об образовании изученных пород в результате геологического процесса, близкого к формированию скарнов.

Ключевые слова: силикатно-карбонатные породы, скарны, карбонатиты, Кусинско-Копанский интрузивный комплекс, Южный Урал, отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, РЗЭ

DOI: 10.31857/S0869605524030029, **EDN:** PLZZDA

Зеленцовская копь, заложенная в 1902 году по указанию А. А. Зеленцова, горного начальника Златоустовского округа, расположена в Назямских горах Кусинского района Челябинской области на восточной окраине п. Магнитка. На сегодняшний день копь находится в одном из провалов в зоне обрушения подземных выработок Кусинского месторождения ильменитовых и титаномагнетитовых руд. В бортах провалов можно наблюдать выходы габброидов кусинско-копанского интрузивного комплекса с рудной минерализацией, а также тела пород силикатно-карбонатного состава.

Первое геологическое описание округлой формы копи, в котором породы силикатно-карбонатного состава определены как мраморизованные известняки, было выполнено в 1935 году Д. Д. Топорковым. В отчете Ф. П. Левченко (1961 г.) эти породы названы «карбонатным ксенолитом» (Черноостровец, 2014). Позднее в них была описана эпигенетическая минерализация родингитового типа (Гекимянц, Спиридонов, 1995), возраст которой определен U-Pb методом по перовскиту и находится

в интервале 530—450 млн (Гекимянц, 2000). Исследователи связывают образование силикатно-карбонатных пород с захватом и перекристаллизацией небольшого ксенолита доломитов саткинской свиты (последние распространены на западе от массива габброидов), а так же последующим воздействием флюида, связанного с внедрением гранитоидов Рябиновского массива (Черноостровец, 2014).

С. Ю. Степановым с коллегами (2020) на основе спектров распределения редкоземельных элементов в перовските было высказано предположение о том, что обсуждаемые породы являются карбонатитами, происхождение которых связано с эндогенной активностью в пределах Западного склона Южного Урала в раннем палеозое. В. А. Попов и М. А. Россомахин (2022) рассмотрели процесс формирования карбонатит-скарновой системы, наложенный на метаморфизованный комплекс габброидов.

С целью уточнения генезиса силикатно-карбонатных пород, вскрытых Зеленцовской копьей, в настоящей работе рассмотрены их геохимические особенности. Изотопное отношение Sr в карбонатах и распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в породах сопоставлены с аналогичными данными для осадочных пород саткинской свиты, габброидов кусинско-копанского интрузивного комплекса и карбонатитов из различных массивов.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Зеленцовская копь заложена на западном склоне Южного Урала (Чернореченский хребет) в пределах массива габброидов кусинско-копанского клинопироксенит-габброгранитного интрузивного комплекса (рис. 1б). Последний расположен в зоне субмеридионального Зюраткульского глубинного разлома, который разделяет Тараташский антиклинорий и Кувашско-Машакскую структуру (Алексеев и др., 2000). Массив габброидов образован двумя фазами внедрения среднерифейского возраста. Первая фаза представлена дифференцированными породами основного состава — габбро, габброноритами, горнблэндитами и клинопироксенитами с вкрапленностью рудных минералов. Вторая фаза сложена гранитоидами. В связи с формированием последних, отдельные участки пород первой фазы подверглись эпидотизации, амфиболитизации и фельдшпатизации (Алексеев и др., 2000; Аулов и др. 2015). Массив сформировался в интервале 1390—1350 млн лет (Краснобаев и др., 2006; Холоднов и др., 2006, 2010).

С запада массив габброидов обрамлен раннерифейскими осадочными породами саткинской свиты. Свита объединяет пять согласно залегающих подсвит: нижнекусинскую, верхнекусинскую, половинкинскую, нижнесаткинскую и верхнесаткинскую. В ряду этих литостратиграфических подразделений по составу резко выделяется половинкинская подсвита, которая сложена силикокластическими породами с примесью углеродисто-глинистого вещества (Семихатов и др., 2009). В составе остальных свит преобладают доломиты и подчиненные им известняки. Верхнесаткинская подсвита расчленена на три пачки: глинисто-доломитовую (каменногорскую), доломитовую (карагайскую) и известняковую (казымовскую). Две последние пачки содержат минимальное для саткинской свиты количество терригенной примеси — в среднем 3% от объема породы (Кузнецов и др. 2008). Возраст карбонатных пород саткинской свиты составляет 1550 ± 30 млн лет (Кузнецов и др., 2003, 2008).

С востока габброиды кусинско-копанского комплекса контактируют с метаморфическими толщами кувашской свиты. Последняя сложена метаморфизованными вулканогенно-терригенными породами: метаморфизованными трахириолитами, риолитами и трахириодацитами, разнообразными сланцами (слюдисто-хлоритовыми, двуслюдяными с гранатом, биотит-амфиболовыми) и амфиболитами. Возраст пород заключен в интервале 1350—1295 млн лет (Аулов и др. 2015).

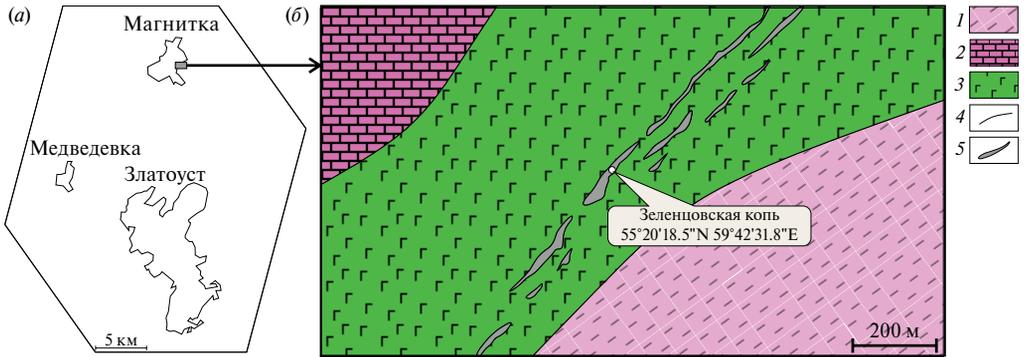


Рис. 1. Географическая (а) и геологическая (б) схемы расположения Зеленцовской копи. 1 — метаморфизованные вулканогенно-терригенные породы кувашской свиты (средний рифей), 2 — терригенно-карбонатная саткинская свита (нижний рифей), 3 — габбро, габбро-нориты, горнблендиты, клинопироксениты кусинско-копанского комплекса (первая фаза), 4 — контакт пород, 5 — провалы (обвалившиеся шахты).

Fig. 1. Geographical (a) and geological (б) schemes of the Zelentsovskaya mine location. 1 — metamorphosed volcanogenic and terrigenous rocks of the Kuvash formation (Middle Riphean), 2 — terrigenous-carbonate Satka formation (Lower Riphean), 3 — gabbro, gabbro-norites, hornblende, clinopyroxenites of the Kusa-Kopan complex (first phase), 4 — rock contact, 5 — failures (collapsed mines).

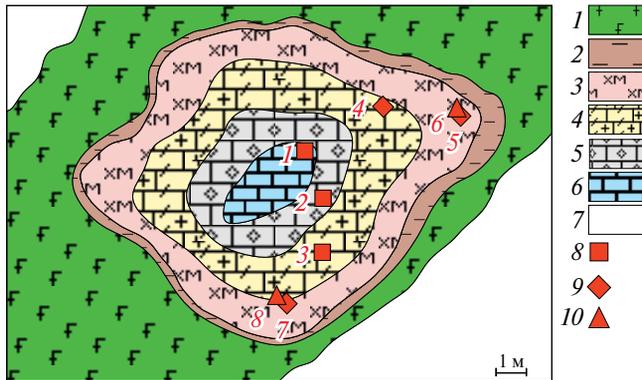


Рис. 2. Геологическая схема восточной стенки провала в Зеленцовской копи. 1 — амфиболизированное и эпидотизированное габбро, 2 — роговик, 3 — гранат-везувиан-оливиновый скарн (магнезиальный скарн), 4 — гранат-клиногумит-везувиановый мрамор, 5 — бруситовый мрамор, 6 — мрамор, 7 — задерновано, 8—10 — точки отбора образцов (8 — равномернозернистых пород, 9 — неравномернозернистых пород, 10 — жил и прожилков).

Fig. 2. Geological scheme of the eastern wall of failure in the Zelentsovskaya mine. 1 — amphibolized and epidotized gabbro, 2 — hornfels, 3 — garnet-vesuvianite-olivine skarn (magnesian skarn), 4 — garnet-clinohumite-vesuvianite marble, 5 — brusite marble, 6 — marble, 7 — sodded, 8—10 — points of the sample collection (8 — equigranular rock, 9 — inequigranular rock, 10 — veins).

Выходы пород силикатно-карбонатного состава, приуроченные к габброидам, наблюдаются в восточной стенке провала и обладают зональным строением (рис. 2). От центра к периферии здесь последовательно сменяются зоны, сложенные: мрамором, бруситовым мрамором (рис. 3а), брусит-клиногумит-везувиановым мрамором (рис. 3б), гранат-везувиан-оливиновым скарном (рис. 3в), роговиком, амфиболизированным и эпидотизированным габбро. В целом силикатно-карбонатные породы более чем на 50 % сложены кальцитом, а также второстепенными минералами: оливином

(форстеритом), монтичеллитом, гидроксилклиногумитом, везувианом, хлоритом (клинохлором), гранатом гроссуляр-андрадитового ряда, шпинелью, титанитом, пировскитом, магнетитом. Структура этих пород гранобластовая, среднезернистая.

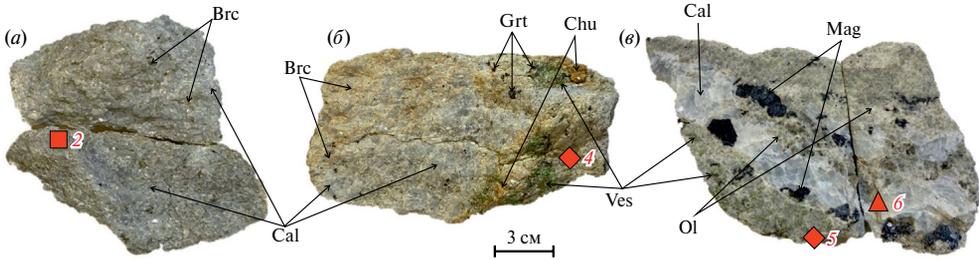


Рис. 3. Фотографии образцов, отобранных в Зеленцовской копи.

a — равномернозернистый бруситовый мрамор, *б* — переход равномернозернистого брусит-хлорит-клиногумитового мрамора в пятнистый неравномернозернистый гранат-клиногумит-везувиановый мрамор, *е* — гранат-везувиан-оливиновый скарн с кальцитовым прожилком и магнетитом на зальбандах. Цифрами отмечены точки отбора проб (нумерация соответствует табл. 1).

Fig. 3. Photographs of samples taken in the Zelentsovskaya mine.

a — equigranular brusite marble, *b* — transition of equigranular brusite-chlorite-clinohumite marble to patchy inequigranular garnet-clinohumite-vezuvianite marble, *e* — garnet-vezuvian-olivine skarn with calcite veining and magnetite in capels. Numbers mark the sampling points (numbering corresponds to Table 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из обнажения, вскрытого Зеленцовской копью, было отобрано 26 образцов, из которых 13 составили силикатно-карбонатные породы, 7 — карбонатно-силикатные породы с прожилками кальцита, 4 — габбро (в том числе амфиболитованное и эпидотизированное габбро и габбро-пегматит), 2 — роговики. Для изотопно-геохимического изучения было выбрано 6 наиболее представительных образцов силикатно-карбонатных пород и 2 пробы крупнокристаллического кальцита из прожилка. Образцы измельчались до размерности <0.25 мм и делились на магнитную и немагнитную фракции при помощи роликового электромагнитного сепаратора (ИГГД РАН). Далее все исследования карбонатной части проводились после удаления магнитной фракции.

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН УМ-1 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением при силе тока 20 мА и напряжении 30 кВ, скорость детектора — 2 град/мин (ИГГД РАН). После обработки дифрактограмм были вычислены кристаллохимические параметры пиков, которые были обработаны методом Ритвельда (Rietveld) при помощи программы Topas (“Новомэк Инжиниринг”). С помощью этой программы был определен полуколичественный минеральный состав пород (табл. 1).

Таблица 1. Минеральный состав пород

Table 1. Mineral composition of rocks

№ п/п	Название породы	Состав немагнитной фракции (%) по данным РФА
1	Р/з мрамор	Cal 95, Dol 5
2	Р/з бруситовый мрамор	Cal 80, Brc 15, Dol сл.
3	Р/з бруситовый мрамор	Cal 85, Brc 10, Ol, Ttn сл.
4	Нр/з клиногумит-везувиан-оливиновый мрамор	Cal 95, Ol, Ves сл.
5	Нр/з везувиан-гранат-оливиновый скарн	Ol 55, Chl 15, Grt 10, Ves 10, Cal 10, Mag сл.

6	Прожилок крупнокристаллического кальцита	Cal 95, Ol сл.
7	Нр/з везувиан-гранат-оливиновый скарн	Ol 45, Chl 20, Grt 15 Srp 10, Ves 10, Mag, Cal сл.
8	Прожилок крупнокристаллического кальцита	Cal 95, Ol сл.

Примечание. Название «мрамор» используется для силикатно-карбонатных пород, «скарн» — для карбонатно-силикатных пород. Р/з — равномернозернистая порода, Нр/з — неравномернозернистая порода. Сл. — <5%. Врс — брусит, Cal — кальцит, Chl — хлорит, Chu — клиногумит, Dol — доломит, Grt — гранат, Mag — магнетит, Ol — оливин, Ttn — титанит, Ves — везувиан.

Содержание Ca, Mg, Mn, Fe и Sr определялось в карбонатной составляющей образцов силикатно-карбонатных пород атомно-абсорбционным методом после растворения проб в 1N растворе HCl (табл. 2). Относительная погрешность определения менее 5%. Для изучения изотопного состава Sr истертые образцы растворяли в 1N HCl, после чего Sr выделяли на катионите Dowex AG50Wx8 (Кузнецов и др., 2019). Изотопный состав Sr определялся на масс-спектрометре Triton TI (ИГГД РАН). Среднее значение в стандартном образце NIST SRM 987 в период работы составило 0.71027 ± 0.00001 (2σ , $n = 12$). Измеренные значения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ округлены до четвертого знака после запятой.

Таблица 2. Содержание элементов и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношение для карбонатной составляющей силикатно-карбонатных пород

Table 2. Element contents and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio for the carbonate part of silicate-carbonate rocks

№	Мас. %		Мкг/г			Mg/Ca	Mn/Sr	Fe/Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	Ca	Mg	Mn	Fe	Sr				
1	37.3	2.10	56	312	84	0.06	0.7	3.7	0.7047
2	30.1	7.20	59	400	72	0.24	0.8	5.6	0.7047
3	37.1	5.11	57	540	130	0.14	0.4	4.2	0.7048
4	37.0	1.90	49	370	78	0.05	0.6	4.8	0.7056
5	3.11	14.4	410	2700	72	4.63	5.7	37.5	0.7075
6	40.8	2.05	74	430	105	0.05	0.7	4.1	0.7045
8	42.3	1.47	54	300	120	0.03	0.5	2.5	0.7047

Примечание. Здесь и далее номера проб соответствуют таковым в табл. 1.

В двух валовых пробах с преобладанием силикатной компоненты (более 95 %) анализировались содержания РЗЭ методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 по стандартной методике с использованием кислотного разложения в смеси кислот HF + HNO₃ (ВСЕГЕИ). Относительная погрешность определения для РЗЭ менее 5%, нижние пределы обнаружения — 0.005—0.010 мкг/г (табл. 3).

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов в карбонатно-силикатных породах (ppm)

Table 3. Content of rare-earth elements in carbonate-silicate rocks (ppm)

№ п/п	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
5	5.66	12.6	1.85	9.36	2.73	0.92	2.94	0.50	3.47	0.78	2.30	0.38	2.65	0.44
7	18.7	43.5	5.65	25.5	5.80	1.73	5.08	0.74	4.58	0.91	2.29	0.33	2.05	0.28

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Силикатно-карбонатные породы, вскрытые Зеленцовской копьей, могут рассматриваться как силикатный мрамор (бруситовый или гранат-клиногумит-везувиановый), а карбонатно-силикатные породы — как магнезиальный скарн (гранат-везувиан-оливиновый).

Большинство исследуемых образцов сложено кальцитом с небольшой примесью доломита (до 5 %, табл. 1). Концентрация Mg в них варьирует от 1.5 до 2.1 мас. % (табл. 2). В двух пробах (2 и 3) содержание Mg повышено (5.1 и 7.2 мас. %), что может быть связано с частичным растворением брусита (табл. 1). Содержание Mn, Fe и Sr в карбонатной части изучаемых карбонатно-силикатных пород находится в пределах 49—74 мкг/г, 300—540 мкг/г и 72—130 мкг/г соответственно. При этом карбонатная составляющая везувиан-гранат-оливиновой породы (проба 5) отличается очень высоким содержанием Mn (410 мкг/г) и Fe (2700 мкг/г), при небольшой концентрации Sr (72 мкг/г).

Центральные части зонального тела силикатно-карбонатных пород (рис. 2) выполнены крупнокристаллической кальцитовой породой голубого оттенка. Отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Mn/Sr и Fe/Sr для кальцита из этих пород составляют 0.7047, 0.7 и 3.7 соответственно. От центра к периферии кальцитовая порода сменяется среднекристаллической брусит-кальцитовой породой бледно-голубого оттенка. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кальцитовой составляющей двух образцов брусит-кальцитовой породы равно 0.7047 и 0.7048, отношения Mn/Sr — 0.8 и 0.4, Fe/Sr — 5.6 и 4.2. Брусит-кальцитовая порода постепенно сменяется среднекристаллической брусит-хлорит-клиногумит-кальцитовой породой, которая, в свою очередь, переходит в пятнистую неравномернокристаллическую гранат-клиногумит-везувиан-кальцитовую породу с магнетитом. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кальците из этой породы составляет 0.7056, а Mn/Sr и Fe/Sr — 0.6 и 4.8 соответственно. Периферийная зона сложена неравномернокристаллической гранат-везувиан-оливиновой породой с кальцитом, магнетитом, перовскитом и хлоритом. Величина отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кальците из этой породы составляет 0.7075; отношения Mn/Sr и Fe/Sr очень высокие (5.7 и 37.5), вероятно из-за высокого содержания силикатной примеси в образце. Прожилки, секущие гранат-везувиан-оливиновую породу, выполнены крупнокристаллическим голубым кальцитом. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в двух образцах кальцита из прожилков составляет 0.7045 и 0.7047, отношения Mn/Sr — 0.5 и 0.7, Fe/Sr — 2.5 и 4.1, что сопоставимо с результатами, полученными для кальцита из брусит-кальцитовых пород.

Геохимические характеристики (Mn/Sr 0.5—0.7, Fe/Sr 2.5—4.8) изученных силикатно-карбонатных пород близки к геохимическим характеристикам неметаморфизованных осадочных карбонатных пород, а также к аналогичным характеристикам мраморов, которые сохранили свои Rb-Sr системы неизменными. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в таких осадочных карбонатных породах и мраморах является важным источником информации о протолите (Кузнецов и др., 2008, 2019, 2021; Горохов и др., 2021).

Для решения вопроса о генезисе рассматриваемых силикатно-карбонатных пород проведено сравнение их геохимических особенностей с опубликованными данными для известняков казымовской и доломитов карагайской пачек саткинской свиты (рис. 4). Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в известняках казымовской пачки варьирует в пределах 0.7046—0.7048, в доломитах карагайской пачки — в пределах 0.7068—0.7213 (Кузнецов и др., 2008). Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кальцитовых прожилках и карбонатной составляющей среднекристаллических силикатно-карбонатных пород из Зеленцовской копи (0.7045—0.7048) сопоставимо с этим отношением в известняках казымовской пачки. При этом для карбонатной составляющей неравномернокристаллических пород характерно увеличение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7056 и 0.7075), что указывает на повышенное содержание в изучаемом веществе радиогенного ^{87}Sr . Это может быть связано как с его привнесением в ходе контактово-метасоматических реакций с вмещающими породами (габброидами), так и с изначально высоким количеством силикатного компонента в породе.

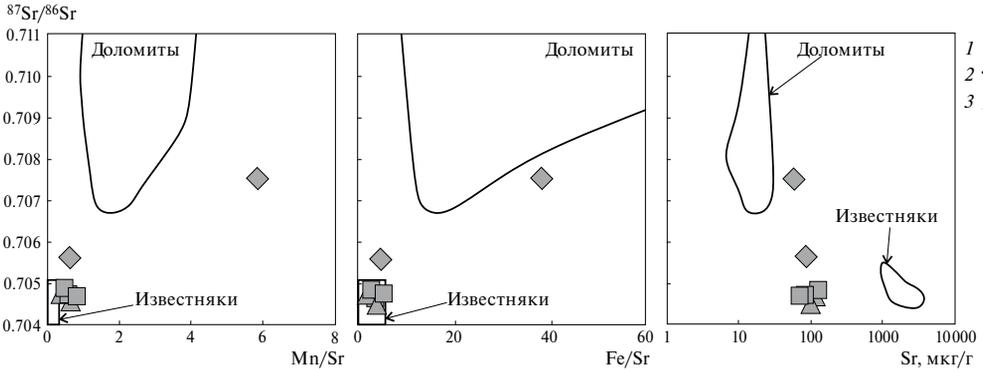


Рис. 4. Бинарные диаграммы зависимости отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от отношений Mn/Sr и Fe/Sr и содержания Sr для кальцита из равномернозернистых пород (1), неравномернозернистых пород (2), жил и прожилков (3). На диаграммы вынесены поля с аналогичными данными для известняков казымовской и доломитов карагайской пачек саткинской свиты (Кузнецов и др., 2008).

Fig. 4. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio versus Mn/Sr , Fe/Sr ratios, and Sr content for calcite from equigranular rock (1), inequigranular rock (2), veins (3). The fields with similar data for limestones of the Kazym Suite and dolomites of the Karagai Suite in the Satka Formation (Kuznetsov et al., 2008) are shown on diagrams.

В целом, отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для изученных карбонатов варьирует в пределах от 0.7045 до 0.7075 при содержании в них Sr 70–130 мкг/г. Карбонаты из карбонатитовых массивов характеризуются более узкими пределами этого отношения: 0.7030–0.7042 (Кононова, Донцова, 1979; Недосекова и др., 2006, 2013, 2020; Арзамасцев, Фу-Ян Ву, 2014) при медианном значении 0.7036 (рис. 5), что соответствует мантийным изотопным меткам. Так, 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 мкг/г; для Четласского комплекса (Средний Тиман) — 0.7030–0.7037 при Sr 1063–7043 мкг/г (Недосекова, 2006, 2013, 2020). Содержание Mn и Fe в карбонатах из карбонатитов также выше, чем в изученных: Ильмено-Вишневогорский массив — 0.19–0.38 и 1.15–5.45 мас.% соответственно (Недосекова, 2006, 2013, 2020); Ковдорский массив — 0.05–0.15 и 0.64–6.61 мас.% соответственно (Шаповалов и др., 2015).

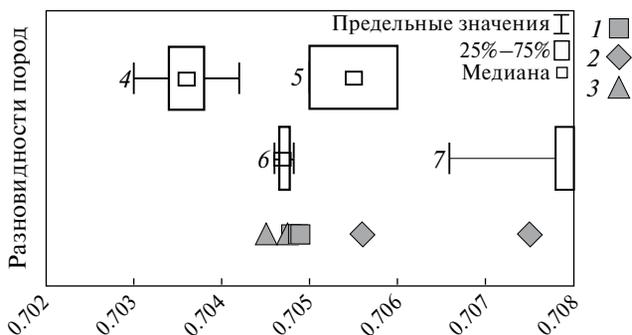


Рис. 5. Измеренное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в породах и минералах.

1–3 — кальцит из равномернозернистых пород (1), неравномернозернистых пород (2) и прожилков (3); 4 — карбонаты из карбонатитов; 5 — габброиды кусинско-копанского интрузивного комплекса; 6–7 — осадочные породы саткинской свиты: 6 — известняки (казымовская пачка), 7 — доломиты (карагайская пачка).

Fig. 5. Measured $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in rocks and minerals.

1–3 — calcite from equigranular rock (1), inequigranular rock (2), and veins (3); 4 — carbonates from carbonatite, 5 — gabbroid of the Kusa-Kopan intrusive complex, 6–7 — sedimentary rocks of the Satka Formation: 6 — limestone (Kazym Suite), 7 — dolomite (Karagai Suite).

Ранее было высказано предположение, что источником повышенного содержания REE, Ti, Zr, Hf, Nb и Y в гранатах из изученных силикатно-карбонатных пород являются интрузивные образования кусинско-копанского комплекса (Стативко и др., 2023). Увеличение содержания радиогенного изотопа ^{87}Sr в неравномернокристаллических породах может отражать нарушение изотопной системы (Кузнецов и др., 2008; Овчинникова и др., 2008; Овчинникова и др., 2014) и свидетельствовать о влиянии на них магматического расплава. Следует учесть, что отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для габброидов кусинско-копанского комплекса составляет 0.705–0.706 и отвечает коровым изотопным меткам (Холоднов и др., 2006, 2010; Шардакова, 2017).

Характер распределения редкоземельных элементов в минералах несет важную информацию об условиях образования магматических и метаморфических пород (Levashova et al., 2023; Salimgaraeva et al., 2023; Skublov et al., 2023; Скублов и др., 2024; Abdrakhmanov et al., 2024). Спектры распределения РЗЭ для двух изученных образцов карбонатно-силикатных пород (магнезиальных скарнов) различаются как по уровню содержания (117 ppm, проба 7; 46.6 ppm, проба 5), так и по степени фракционирования редкоземельных элементов (рис. 6). Отношение La_N/Lu_N составляет 6.93 (проба 7) и 1.34 (проба 5). При этом проба 5 обладает “обратным” характером фракционирования тяжелых РЗЭ (Gd_N/Lu_N 0.83), чем отличается от пробы 7 (Gd_N/Lu_N 2.24). Для сравнения: распределение РЗЭ в габброидах кусинско-копанского комплекса отличается узким диапазоном вариаций содержаний элементов при явном обогащении легкими РЗЭ (Ковалев, 2008; Ковалев, Ковалев, 2014) и сопоставимо с распределением РЗЭ в изученных породах (рис. 6). Карбонатитовые массивы отличаются более высоким содержанием РЗЭ, высокой степенью их фракционирования и резким преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми (Wooley, Kempe, 1989; Verhulst et al., 2000; Downes et al., 2005; Hou et al., 2006; Burke, Khan, 2006; Casquet et al., 2008; Шаповалов и др., 2015; Хромова и др., 2020; Vladykin, Pirajno, 2021; Kostyuk et al., 2021; Недосекова, 2022).

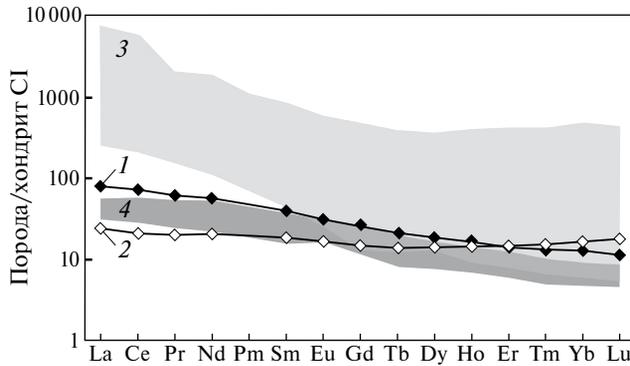


Рис. 6. Спектры распределения РЗЭ, нормированные по хондриту CI (McDonough, Sun, 1995).

1–2 — изученные силикатно-карбонатные породы, 3 — карбонатиты, 4 — габброиды кусинско-копанского интрузивного комплекса.

Fig. 6. REE distribution spectra normalized by chondrite CI (McDonough, Sun, 1995).

1–2 — studied rocks; 3 — carbonatite; 4 — gabbroid of the Kusa-Kopan intrusive complex.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показывают, что «карбонатитовая гипотеза» образования силикатно-карбонатных пород, вскрытых Зеленцовской копьей, не находит подтверждения. Скорее всего источником карбонатного вещества для изученных

пород послужили перекристаллизованные фрагменты раннерифейских известняков саткинской свиты, которые прорывает интрузия габброидов. Изотопно-геохимические данные (отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, спектр РЗЭ) также свидетельствует о влиянии магматического расплава на состав силикатно-карбонатных пород.

Авторы благодарны рецензентам за подробные рекомендации при обсуждении результатов. Авторы признательны Н. П. Пугачёвой (ИГГД РАН) за подготовку проб к исследованию. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2021-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А. А., Алексеева Г. В., Ковалев С. Г. Расслоенные интрузии Западного склона Урала. Уфа: Гилем, **2000**. 188 с.

Арзамасцев А. А., Фу-Ян Ву. U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции // Петрология. **2014**. Т. 22. № 5. С. 496—496.

Аулов Б. Н., Владимирцева Ю. А., Гвоздик Н. И., Королькова З. Г., Левин Ф. Д., Луцаева А. В., Поташова М. Н., Самозванцев В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XII — Златоуст. Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ. **2015**. 365 с.

Гекимянц В. М., Спиридонов Э. М. Эпигенетическая минерализация родингитового типа в скарнах Кусинского Fe-Ti месторождения Южного Урала // Матер. Уральской летней минералогической школы-95. Екатеринбург: УГГА, **1995**. С. 48.

Гекимянц В. М. Минералогия титана и циркония в скарнах, родингитах и родингитоподобных образованиях Западного Урала. Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. М.: МГУ, **2001**.

Горохов И. М., Кузнецов А. Б., Азимов П. Я., Дубинина Е. О., Васильева И. М., Ризванова Н. Г. Sr- и C-изотопная хемостратиграфия метакarbonатных пород палеопротерозойской сортавальской серии, Фенноскандинавский щит, северное Приладожье // Стратиграфия. Геологическая корреляция. **2021**. Т. 29. № 2. С. 3—22.

Ковалев С. Г. Позднедокембрийский рифтогенез в истории развития западного склона Южного Урала // Геотектоника. **2008**. № 2. С. 68—79.

Ковалев С. Г., Ковалев С. С. Геохимическая специализация Шатакского и Кусинско-Копанского магматических комплексов (Башкирский мегантиклинорий) // Геологический сборник. **2014**. № 11. С. 176—188.

Кононова В. А., Донцова Е. И., Кузнецова Л. Д. Изотопный состав кислорода и стронция Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса и вопросы генезиса миаскитов // Геохимия. **1979**. Т. 12. С. 1784—1795.

Краснобаев А. А., Ферштатер Г. Б., Беа Ф., Монтеро П. Цирконовый возраст габбро и гранитоидов кусинско-копанского комплекса (Южный Урал) // Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. **2006**. С. 300—303.

Кузнецов А. Б., Овчинникова Г. В., Горохов И. М., Каурова О. К., Крупенин М. Т., Маслов А. В. Sr-изотопная характеристика и Pb-Pb возраст известняков бакальской свиты (типовой разрез нижнего рифея, Южный Урал) // Доклады РАН. **2003**. Т. 391. № 6. С. 794—798.

Кузнецов А. Б., Овчинникова Г. В., Семихатов М. А., Горохов И. М., Каурова О. К., Крупенин М. Т., Васильева И. М., Гороховский Б. М., Маслов А. В. Sr изотопная характеристика и Pb-Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала // Стратиграфия. Геологическая корреляция. **2008**. Т. 16. № 2. С. 16—34.

Кузнецов А. Б., Кочнев Б. Б., Васильева И. М., Овчинникова Г. В. Верхний рифей Енисейского края: Sr-хемостратиграфия и Pb-Pb возраст известняков тунгусикской и широкинской серий // Стратиграфия. Геологическая корреляция. **2019**. Т. 27. № 5. С. 46—62.

Кузнецов А. Б., Горохов И. М., Азимов П. Я., Дубинина Е. О. Sr- и C-хемостратиграфический потенциал палеопротерозойских осадочных карбонатов в условиях среднетемпературного метаморфизма: мраморы Рускеалы, Карелия // Петрология. **2021**. Т. 29. № 2. С. 172—194.

Недосекова И. Л., Прибавкин С. В., Серов П. А., Ронкин Ю. Л., Лепихина О. П. Sr-Nd-C-O изотопные данные и геохимия карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса и Куртинской зоны // Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, **2006**. С. 235—245.

Недосекова И. Л., Владыкин Н. В., Прибавкин С. В., Баянова Т. Б. Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс: происхождение, рудоносность, источники вещества (Урал, Россия) // Геология рудных месторожд. **2009**. Т. 51. № 2. С. 157—181.

Недосекова И. Л., Владыкин Н. В., Удоратина О. В., Ронкин Ю. Л. Карбонатиты Четласского комплекса (Средний Тиман): геохимические и изотопные данные / Труды Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого. **2013**. № 160. С. 150—158.

Недосекова И. Л., Коротеев В. А., Баянова Т. Б., Серов П. А., Попова В. И., Червяковская М. В. О возрасте пироксеновых карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса, Ю. Урал (по данным Sm-Nd и Rb-Sr изотопных методов) // Литосфера. **2020**. Т. 20. № 4. С. 486—498.

Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Васильева И. М., Горохов И. М., Крупенин М. Т., Маслов А. В., Турченко Т. Л. Pb-Pb возраст преобразования осадочных фосфоритов в нижнерифейских карбонатных отложениях, саткинская свита Южного Урала // Стратиграфия. Геологическая корреляция. **2008**. Т. 16. № 2. С. 35—40.

Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Крупенин М. Т., Горохов И. М., Каурова О. К., Маслов А. В., Гороховский Б. М. U-Pb систематика протерозойских магнезитов Саткинского месторождения Южного Урала: источник флюида и возраст // Доклады РАН. **2014**. Т. 456. № 2. С. 219—222.

Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Крупенин М. Т., Васильева И. М., Каурова О. К. Pb-Pb возраст рифейских магнезитов Бакальского рудного поля // Доклады РАН. **2018**. Т. 481. № 5. С. 529—533.

Попов В. А., Рассомахин М. А. Полиминеральные псевдоморфозы по крупным кристаллам эпидота из Зеленцовской копи на Южном Урале // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, **2022**. № 19. С. 115—124.

Скублов С. Г., Левашова Е. В., Мамыкина М. Е., Гусев Н. И., Гусев А. И. Полифазный Белокурихинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 552—575.

Семихатов М. А., Кузнецов А. Б., Маслов А. В., Горохов И. М., Овчинникова Г. В. Стратотип нижнего рифея бурзянская серия Южного Урала: литостратиграфия, палеонтология, геохронология, Sr- и C-изотопные характеристики карбонатных пород // Стратиграфия. Геологическая корреляция. **2009**. Т. 17. № 6. С. 17—45.

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

Степанов С. Ю., Пучков В. Н., Паламарчук Р. С., Попов В. А., Лепихина Е. Н., Шарпенко Л. Н., Антонов А. В. Первое свидетельство палеозойской эндогенной активности на западном склоне Южного Урала // Доклады РАН. **2020**. Т. 493. № 1. С. 21—26.

Холоднов В. В., Ронкин Ю. Л., Ферштатер Г. Б., Прибавкин С. В., Бородин Н. С., Лепихина О. П., Попова О. Ю. Новые Sm-Nd изотопные данные о возрасте Кусинского габбрового массива (Южный Урал) / Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, **2006**. С. 331—334.

Холоднов В. В., Ферштатер Г. Б., Ронкин Ю. Л., Бородин Н. С., Прибавкин С. В., Лепихина О. П. Sm-Nd, Rb-Sr возраст габброидов, гранитоидов и титаномагнетитовых руд из расслоенных интрузий Кусинско-Копанского комплекса (Южный Урал) // Докл. РАН. **2010**. Т. 432. № 5. С. 650—654.

Хромова Е. А., Дорошкевич А. Г., Избродин И. А. Геохимическая и Sr-Nd-Pb изотопная характеристики щелочных пород и карбонатитов Белозиминского массива (Восточный Саян) // Гео-сферные исследования. **2020**. № 1. С. 33—55.

Черноостровец А. Н. История открытия и изучения Зеленцовской минеральной копи (копь 3-ей «магнитной сопки») Назямских гор на Южном Урале // Уральский геологический журнал. **2014**. № 3. С. 42—52.

Шаповалов Ю. Б., Горбачев Н. С., Костюк А. В., Султанов Д. М. Геохимические особенности карбонатитов Фенноскандинавского щита // Доклады РАН. **2015**. Т. 463. № 5. С. 592—592.

Шардакова Г. Ю. Гранитоиды и базиты разных этапов геодинамической эволюции западного склона южного Урала: геохимические и изотопные различия, источники, вопросы / Уральская минералогич. школа. **2017**. № 23. С. 238—245.

REE Geochemistry and Sr Isotopic Composition of Silicate-Carbonate Rocks from the Zelentsovskaya Mine (Kusa-Kopan Intrusive Complex, Southern Urals)

V. S. Stativko^{a,b}, A. B. Kuznetsov^b, S. G. Skublov^b, G. E. Ratkovskiy^c, O. K. Kaurova^b, T. L. Turchenko^b

^a Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

^b Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint Petersburg, Russia

^c Novomek Engineering LLC, Saint Petersburg, Russia

* e-mail: vlad.stativko@mail.ru

The object of this study is silicate-carbonate rocks located in gabbroid of the Kusinko-Kopan intrusive complex within the Zelentsovskaya mine in the South Urals. Low Mn and Fe contents and low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in calcite (0.7045–0.7048) indicate that the source of carbonate matter for these rocks was recrystallized limestones of the Lower Riphean Satka Formation. Isotopic-geochemical data ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and flat REE distribution pattern) indicate the influence of gabbroid melt on their composition. It is suggested that the silicate-carbonate rocks were formed as a result of the geological process closest to the skarn formation.

Keywords: silicate-carbonate rocks, skarns, carbonatites, Kusa-Kopan intrusive complex, Southern Urals, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio, REE

REFERENCES

- Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L., Skublov S. G., Galankina O. L.* Mineralogical constraints on the pressure–temperature evolution of granulites in the Bunge Hills, East Antarctica. *Minerals*. **2024**. Vol. 14 (5). Paper 488.
- Alekseev A. A., Alekseeva G. V., Kovalev S. G.* Stratified intrusions of the Western slope of the Urals. Ufa: Gilem, **2000**. 188 p. (in Russian).
- Arzamastsev A. A., Wu F. Y.* U–Pb geochronology and Sr–Nd isotopic systematics of minerals from the ultrabasic-alkaline massifs of the Kola province. *Petrology*. **2014**. Vol. 22. N 5. P. 462–479.
- Aulov B. N., Vladimirtseva Yu. A., Gvozdk N. I., Korol'kova Z. G., Levin F. D., Lipaeva A. V., Potashova M. N., Samozvantsev V. A.* State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second ed. Series South Ural. Sheet N-40-XII — Chrysostom. Explanatory note. Moscow: MF VSEGEI, **2015**. 365 p. (in Russian).
- Burke K., Khan S.* Geoinformatic approach to global nepheline syenite and carbonatite distribution: Testing a Wilson cycle model. *Geosphere*. **2006**. Vol. 2. N 1. P. 53–60.
- Casquet C., Pankhurst R. J., Galindo C., Rapela C., Fanning C. M., Baldo E., Dahlquist J., González Casado J. M., Colombo F.* A deformed alkaline igneous rock–carbonatite complex from the Western Sierras Pampeanas, Argentina: Evidence for late Neoproterozoic opening of the Clymene Ocean? *Precambrian Research*. **2008**. Vol. 165. N 3–4. P. 205–220.
- Chernoostrovets A. N.* History of discovery and study of the Zelentsovskaya mineral mine (lode of the 3rd “magnetic sopka”) of the Nazyamskiye Mountains in the South Urals. *Ural Geological Journal*. **2014**. N 3. P. 42–52 (in Russian).
- Downes H., Balaganskaya E., Beard A., Liferovich R.* Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: A review. *Lithos*. **2005**. Vol. 85. N 1–4. P. 48–75.
- Gekimyants V. M., Spiridonov E. M.* Epigenetic mineralization of rhodringite type in skarns of the Kusinsky Fe–Ti deposit of the Southern Urals. In: *Ural Mineralogical School*. **1995**. 48 p.
- Gekimyants V. M.* Mineralogy of titanium and zirconium in skarns, roddingites and roddingite-like formations of the Western Urals. Ph D. thesis syn. Moscow: Moscow State University. **2001**.
- Gorokhov I. M., Kuznetsov A. B., Azimov P. Y., Vasilieva I. M., Rizvanova N. G., Dubinina E. O.* Sr and C isotope chemostratigraphy of the paleoproterozoic metacarbonate rocks of the sortavala group:

Fennoscandian shield, northern Ladoga area. *Stratigraphy and Geological Correlation*. **2021**. Vol. 29. N 2. P. 121—139.

Houa Z., Tian S., Yuan Z., Xie Yu., Yin S., Yi L., Fei H., Yang Z. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *Earth Planet. Sci. Lett.* **2006**. Vol. 244. P. 234—250.

Kholodnov V. V., Ferstatter G. B., Ronkin Yu. L., Borodina N. S., Pribavkin S. V., Lepikhina O. P. Sm-Nd and Rb-Sr ages of gabbroids, granitoids, and titanomagnetite ores from layered intrusions of the Kusa-Kopan Complex (South Urals). *Doklady Earth Sci.* **2010**. Vol. 432. N 2. P. 732 (in Russian).

Kholodnov V. V., Ronkin Y. L., Ferstatter G. B., Pribavkin S. V., Borodina N. S., Lepikhina O. P., Popova O. Y. New Sm-Nd isotope data on the age of the Kusinsky gabbroic massif (Southern Urals). In: *Year book-2005*. Ekaterinburg, **2005**. P. 331—334 (in Russian).

Khromova E. A., Doroshkevich A. G., Izbrodin I. A. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of alkaline rocks and carbonatite of the Belaya Zima massif (Eastern Sayan). *Geosphere Research*. **2020**. N 1. P. 33—55 (in Russian).

Kononova V. A., Dontsova E. I., Kuznetsova L. D. Oxygen and strontium isotopic composition of the Ilmeno-Vishnevogorsky alkaline complex and questions of the genesis of miaskites. *Geochemistry*. **1979**. Vol. 12. P. 1784—1795 (in Russian).

Kostyuk A. V., Gorbachev N. S., Nekrasov A. N. Petrogenesis of garnet-bearing carbonatite in the Tromsø Nappe, Norway. *Geochem. Int.* **2021**. Vol. 59. P. 801—812.

Kovalev S. G. Late Precambrian rifting in the geological history of the western slope of the South Urals. *Geotectonics*. **2008**. Vol. 42. N 2. P. 137—146 (in Russian).

Kovalev S. G., Kovalev S. S. Geochemical specialization of the Shat and Kusa-Kopan magmatic complexes (Bashkir meganticlinorium). *Geological Collection*. **2014**. N 11. P. 176—188 (in Russian).

Krasnobaev A. A., Ferstatter G. B., Bea F., Montero P. Zircon age of gabbro and granitoids of the Kusa-Kopan complex (Southern Urals). *Year book-2005*. Ekaterinburg, **2005**. P. 300—303 (in Russian).

Kuznetsov A. B., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M., Kaurova O. K., Krupenin M. T., Maslov A. V. Sr-isotope signature and Pb-Pb age of the Bakal formation limestones in the Lower Riphean type section, the Southern Urals. *Doklady Earth Sci.* **2003**. Vol. 391A. N 6. P. 819—822.

Kuznetsov A. B., Ovchinnikova G. V., Semikhatov M. A., Gorokhov I. M., Kaurova O. K., Krupenin M. T., Vasilyeva I. M., Gorokhovskiy B. M., Maslov A. V. The Sr isotopic characterization and Pb-Pb age of carbonate rocks from the Satka formation, the Lower Riphean Burzyan Group of the southern Urals. *Stratigraphy and Geological Correlation*. **2008**. Vol. 16. N 2. P. 120—137.

Kuznetsov A. B., Kochnev B. B., Vasilyeva I. V., Ovchinnikova G. V. The Upper Riphean of the Yenisei Range: Sr chemostratigraphy and Pb-Pb age of limestones of the Tungusik and Shirokaya Groups. *Stratigraphy and Geological Correlation*. **2019**. Vol. 27. N 5. P. 538—554.

Kuznetsov A. B., Gorokhov I. M., Azimov P. Y., Dubinina E. O. Sr- and C-chemostratigraphy potential of the paleoproterozoic sedimentary carbonates under medium-temperature metamorphism: the Ruskeala marble, Karelia. *Petrology*. **2021**. Vol. 29. N 2. P. 175—194.

Levashova E. V., Mamykina M. E., Skublov S. G., Galankina O. L., Li Q. L., Li X. H. Geochemistry (TE, REE, Oxygen) of zircon from leucogranites of the Belokurikhinsky massif, Gorny Altai, as indicator of formation conditions. *Geochem. Int.* **2023**. Vol. 61. P. 1323—1339.

McDonough W. F., Sun S. S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* **1995**. Vol. 120. N 3—4. P. 223—253.

Nedosekova I. L., Koroteev V. A., Bayanova T. B., Serov P. A., Popova V. I., Chervikovskaya M. V. On the age of pyrochlore carbonatites from the Ilmeno-Vishnevogorsky alkaline complex, the Southern Urals (insights from Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data). *Lithosphere*. **2020**. Vol. 20. N 4. P. 486—498 (in Russian).

Nedosekova I. L., Pribavkin S. V., Serov P. A., Ronkin Y. L., Lepikhina O. P. Sr-Nd-C-O isotope data and geochemistry of carbonatites of the Ilmeno-Vishnevogorsky alkaline complex and Kurtinskaya zone. *Year book-2005*. Ekaterinburg, **2006**. P. 235—245 (in Russian).

Nedosekova I. L., Vladykin N. V., Pribavkin S. V., Bayanova T. B. Ilmeno-Vishnevogorsky miaskite-carbonatite complex: origin, ore-bearing, sources of matter (Ural, Russia). *Geol. Ore Deposits*. **2009**. Vol. 51. N 2. P. 157—181 (in Russian).

Nedosekova I. L., Vladykin N. V., Udoratina O. V., Ronkin Y. L. Carbonatites of the Chetlas complex (Middle Timan): geochemical and isotopic data. In: *Proc. Inst. Geol. Geochem. named after acad. A. N. Zavaritsky*. **2013**. N 160. C. 150—158 (in Russian).

Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Krupenin M. T., Gorokhov I. M., Kaurova O. K., Maslov A. V., Gorokhovskiy B. M. U-Pb systematics of proterozoic magnesites of the Satka deposit (South Urals): The source of the fluid and age. *Doklady Earth Sci.* **2014**. Vol. 456. N 1. P. 590—593.

Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Krupenin M. T., Vasilieva I. M., Kaurova O. K. Pb-Pb age of the Bakal ore field Riphean magnesite. *Doklady Earth Sci.* **2018**. Vol. 481. N 2. P. 1040—1044.

Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Vasilieva I. M., Gorokhov I. M., Krupenin M. T., Maslov A. V., Turchenko T. L. Pb-Pb age of sedimentary phosphorite reworking in Lower Riphean carbonate sediments, the Satka Formation of Southern Urals. *Stratigraphy and Geological Correlation*. **2008**. Vol. 16. N 2. P. 138—142.

Popov V. A., Rassomakhin M. A. Polymineral pseudomorphoses on large crystals of epidote from the Zelentsovskaya mine in the Southern Urals. In: *Bull. Ural Branch Russian Miner. Soc.* Ekaterinburg: IGG Ural Branch RAS, **2022**. N 19. P. 115—124 (in Russian).

Salimgaraeva L. I., Berezin A. V., Sergeev S. A., Gubanov N. V., Stetskaya E. V. Zircon from the eclogite-associated rocks of Marun-Keu complex, Polar Urals: Trace elements, U-Pb dating. *Geosciences*. **2023**. Vol. 14(8). Paper 206..

Semikhatov M. A., Kuznetsov A. B., Maslov A. V., Gorokhov I. M., Ovchinnikova G. V. Stratotype of the Lower Riphean, the Burzyan Group of the Southern Urals: Lithostratigraphy, paleontology, geochronology, Sr- and C-isotopic characteristics of its carbonate rocks. *Stratigraphy and Geological Correlation*. **2009**. Vol. 17. N 6. P. 574—601.

Shapovalov Yu. B., Gorbachev N. S., Kostyuk A. V., Sultanov D. M. Geochemical features of carbonatites of the Fennoscandian shield. *Doklady Earth Sci.* **2015**. Vol. 463. P. 833—838.

Shardakova G. Yu. Granitoids and basites of different stages of geodynamic evolution of the western slope of the southern Urals: geochemical and isotopic differences, sources, questions. In: *Ural Mineralogical School*. **2017**. N 23. P. 238—245 (in Russian).

Skublov S. G., Levashova E. V., Mamykina M. E., Gusev N. I., Gusev A. I. The polyphase Belokurikhinsky granite massif, Gorny Altai: Isotope-geochemical study of zircon. *J. of Mining Institute*. 2024. Vol. 268. P. 552—575.

Skublov S. G., Petrov D. A., Galankina O. L., Levashova E. V., Rogova I. V. Th-rich zircon from a pegmatite vein hosted in the Wiborg rapakivi granite massif. *Geosciences*. **2023**. Vol. 13(12). P. 362.

Stativko V. S., Skublov S. G., Smolensky V. V., Kuznetsov A. B. Trace and rare-earth elements in garnets from silicate-carbonate formations of the Kusa-Kopan complex (Southern Urals). *Lithosphere*. **2023**. Vol. 23. N 2. P. 225—246 (in Russian).

Stepanov S. Yu., Puchkov V. N., Palamarchuk R. S., Popov V. A., Lepekhina E. N., Sharpenok L. N., Antonov A. V. The first evidence for Paleozoic endogenous activity on the western slope of the Southern Urals. *Doklady Earth Sci.* **2020**. Vol. 493. P. 499—503.

Verhulst A., Balaganskaya E., Kirnarsky Y., Demaijfe D. Petrological and geochemical (trace elements and Sr-Nd isotopes) characteristics of the Paleozoic Kovdor ultramafic, alkaline and carbonatite intrusion (Kola Peninsula, NW Russia). *Lithos*. **2000**. Vol. 51. N 1—2. P. 1—25.

Vladykin N. V., Pirajno F. Types of carbonatites: Geochemistry, genesis and mantle sources. *Lithos*. **2021**. Vol. 386—387. 105982. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.105982>

Woolley A. R., Kempe D. R. C., Bell K. Carbonatites: Nomenclature, average compositions, and element distribution. In: *Carbonatites: Genesis and Evolution*. London: Unwin Hyman, **1989**. P. 1—14.