

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2026.1.8>

УДК 553.9+553.21

Редкоземельные фторкарбонаты в углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена (западный склон Южного Урала)

С.Г. Ковалев*, С.С. Ковалев
Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

Целью данной работы является характеристика фторкарбонатов редкоземельных элементов, впервые обнаруженных в углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена, расположенного на западном склоне Южного Урала.

Рифтогенные образования представлены переслаиванием терригенных пород (углеродсодержащие сланцы, алевросланцы, алевролиты) с вулcano-плутонической ассоциацией (габбродолериты, эффузивы основного состава с небольшим количеством пирокластического материала). Все породы метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации ($T = \sim 390\text{--}490\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = \sim 2,5\text{--}10\text{ кбар}$). В углеродсодержащих сланцах были обнаружены бастнезит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce), паризит-(Ce) и синхизит-(Ce), морфологически представленные единичными ксеноморфными выделениями, прожилками различной морфологии, микрозернистыми массами в зальбандах карбонатных и кварц-карбонатных прожилков, агрегатами, выполняющими пустоты в кристаллах пирита, и сферолитами, сложенными длиннопризматическими, игольчатыми кристаллами.

Показано, что генезис редкоземельных фторкарбонатов обусловлен гидротермальным метаморфизмом при изменении химического состава флюида: первичные включения – $\text{CaCl}_2 + \text{NaCl}$, вторичные включения – FeCl_2 . При этом одним из источников CO_2 явилось окисление органики углеродсодержащих сланцев, а Ca^{2+} – альбитизация плагиоклаза в метаморфизованных магматических породах.

На основе анализа индикаторных отношений редкоземельных элементов во фторкарбонатах из различных регионов мира установлено, что при их формировании большое значение имеет химический состав среды минералообразования и масштабность процессов перераспределения вещества (в случае их локальности следует ожидать большего разнообразия в химическом составе образующихся редкоземельных фторкарбонатов).

Ключевые слова: Южный Урал, редкоземельные фторкарбонаты, углеродсодержащие сланцы, гидротермальный метаморфизм, флюидные включения

Для цитирования: Ковалев С.Г., Ковалев С.С. (2026). Редкоземельные фторкарбонаты в углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена (западный склон Южного Урала). *Георесурсы*, 28(1), с. 138–148. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.1.8>

Введение

Редкоземельные фторкарбонаты являются распространенными минералами. В частности, руды крупнейших в мире месторождений редкоземельных элементов (Байюн-Обо, Китай и Маунтин-Пасс, США) представлены бастнезитовыми породами (Holloway, 2018). На Урале фторкарбонаты редкоземельных элементов были описаны в пределах Косьюского рудного поля (Средний Тиман), в рудах Талганского медно-цинково-колчеданного

месторождения на Южном Урале, в рудовмещающей толще Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения на Среднем Урале и в риодацитах шатакского вулканогенно-осадочного комплекса (Аюпова и др., 2019; Удуратина, Варламов, 2021; Сорока и др., 2023; Ковалев и др., 2023).

Целью данной работы является характеристика фторкарбонатов редкоземельных элементов, впервые обнаруженных в углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена (западный склон Южного Урала).

Материалы и методы

Составы минералов изучены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энерго-дисперсионным анализатором Xplorer Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа). Съёмка проведена при следующих

*Ответственный автор: Сергей Григорьевич Ковалев
e-mail: kovalev@ufaras.ru

© 2026 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

с небольшим количеством пирокластики. Минеральный состав пород включает авгит, замещенный амфиболом и зернистым агрегатом эпидота; альбитизированный плагиоклаз (рис. 2г) и титаномагнетит, замещающийся агрегатом тонкозернистого титанита. В качестве акцессорных минералов установлены циркон, апатит, рутил, сульфиды. В крайней степени изменения магматические породы представляют собой карбонат-эпидот-альбит-кварц-хлоритовые сланцы и эпидот-альбит-кварц-амфиболовые породы, которые трассируют тектонические нарушения, располагающиеся внутри габбродолеритового тела. В верхней части разреза присутствуют жилы альбититов мощностью до 20 см, состоящие из ксеноморфных зерен альбита, крупночешуйчатого (0,5–1,0 мм) мусковита и небольшого количества кварца и хлорита (Ковалев и др., 2013).

Для всех пород характерна значительная дислоцированность, которая выражается в смятии, гофрировании, микробудинаже, завальцовке кварцевых обломков с мозаичным, облачным погасанием и формированием текстур пластического течения (рис. 2а–в). Процесс перекристаллизации выражается в дорастании кварцевых обломков и укрупнении серицита с образованием крупночешуйчатого (до 10–15 мм по удлинению) мусковита.

Окварцевание представлено жильными телами и прожилками кварца, переменной мощности (от нескольких мм до 1,2 м). Они имеют сложную морфологию, взаимно пересекаются и часто будинированы. Кварц-карбонатные и карбонатные прожилки встречаются бессистемно и имеют различную мощность от первых мм, до первых см

(рис. 2д, 2е). Минеральный состав карбонатов разнообразен, установлены практически все их разновидности: кальцит, доломит, магнезит, сидерит и анкерит.

Рудные минералы представлены сульфидами и оксидами (магнетитом, гематитом, титаномагнетитом). Сульфиды являются самой распространенной группой рудных минералов. Их количество в среднем составляет 0,1–0,5 мас. %, повышаясь в горизонтах углеродсодержащих пород до 10–15 мас. %, где они образуют прожилково-вкрапленную минерализацию, морфологически представленную крупными (до 0,5–1,0 см) субидiomорфными и идиоморфными сингенетичными кристаллами, субсогласно смятыми и секущими слоистость прожилками и линзовидными выделениями, а также выполняющими микрокливажные трещины. Мощность сульфидизированных зон колеблется от 2–3 м до 15 м и в целом соответствует мощности горизонтов углеродсодержащих пород. Представлены они пиритом, пирротинном, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, пентландитом, борнитом, ковеллином, молибденитом и минералами ряда сфалерит–гринокит.

Содержание и распределение редкоземельных элементов в метаморфизованных терригенных породах обладают определенной спецификой, которая заключается в том, что максимальное их количество концентрируется в сульфидизированных разновидностях*. Так количество РЗЭ в углеродсодержащих сланцах составляет 5,3–12,2 г/т, в сульфидизированных разновидностях – 121,57–150,1 г/т

* Сульфидизированные разновидности – породы, в которых количество сульфидов составляет более 30–50% от объема образца.

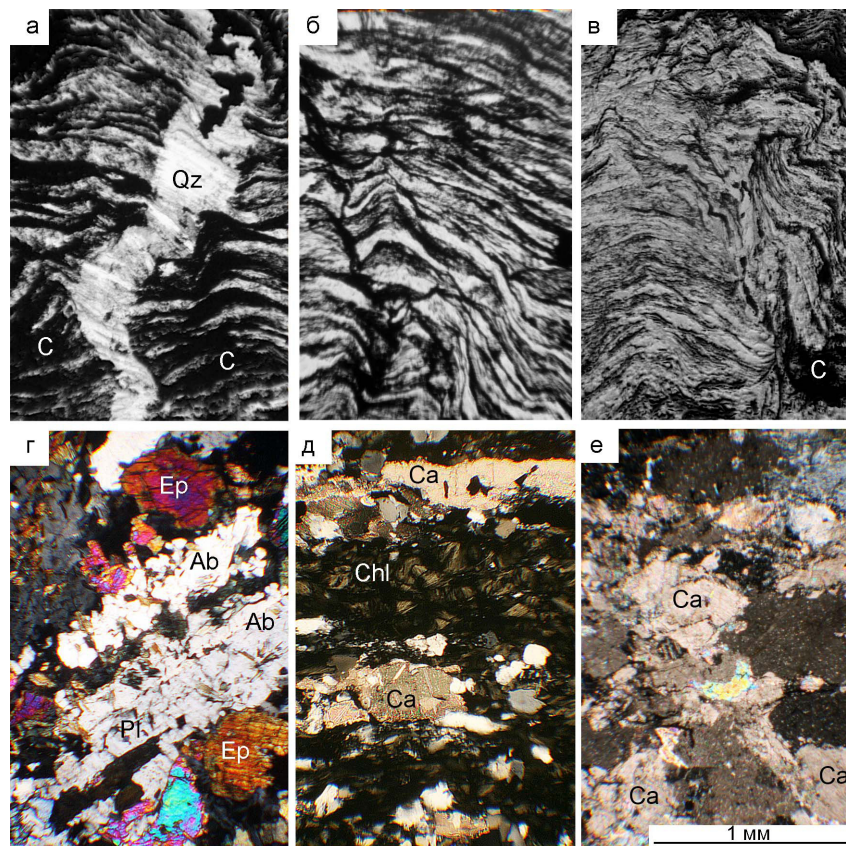


Рис. 2. Микрофотографии пород Ишлинского грабена: а–в – углеродсодержащие сланцы; г, д – метаморфизованный габбродолерит; е – карбонатные прожилки в алевролите. С – углеродистое вещество; Ca – карбонат; Ab – альбит; Pl – плагиоклаз; Ep – эпидот; Chl – хлорит.

и в алевросланцах с переменным количеством сульфидов – 46,92–85,96 г/т.

На графиках нормализованных содержаний РЗЭ (рис. 3) отчетливо наблюдаются различия и сходство в их количестве и распределении между углеродсодержащими сланцами и их сульфидизированными разностями. При том, что алевросланцы, характеризующиеся переменным количеством сульфидов, занимают промежуточное положение. Основные геохимические отношения элементов подчеркивают эти особенности. Так, степень фракционирования РЗЭ составляет (углеродсодержащие сланцы, их сульфидизированные разности и алевросланцы соответственно): La_n/Lu_n – 0,86–1,85, 1,93–3,06, 2,07–3,20; Ce_n/Yb_n – 0,67–3,60, 1,8–5,20, 1,67–5,23; La_n/Sm_n – 1,06–2,00, 1,05–3,01, 0,73–1,65; Gd_n/Yb_n – 0,38–1,10, 0,50–2,26, 1,26–2,26.

При этом необходимо подчеркнуть, что рассчитанные средние значения как для углеродсодержащих сланцев, так и для алевролитов практически полностью идентичны средним составам глинистого сланца и песчаника машакской свиты (рис. 3а, б). Таким образом, перераспределение редкоземельных элементов и сульфидной минерализации взаимосвязано и является результатом метаморфического преобразования пород.

Возраст отложений машакской свиты, к которой относятся породы Ишлинского грабена, соответствует среднему рифею ($1380,3 \pm 0,4$ млн лет) (Пучков, 2010), а возраст метаморфизма, определенный по содержанию радиогенного свинца в уранинитах из углеродсодержащих сланцев, – около 600 млн лет (Ковалев и др., 2013).

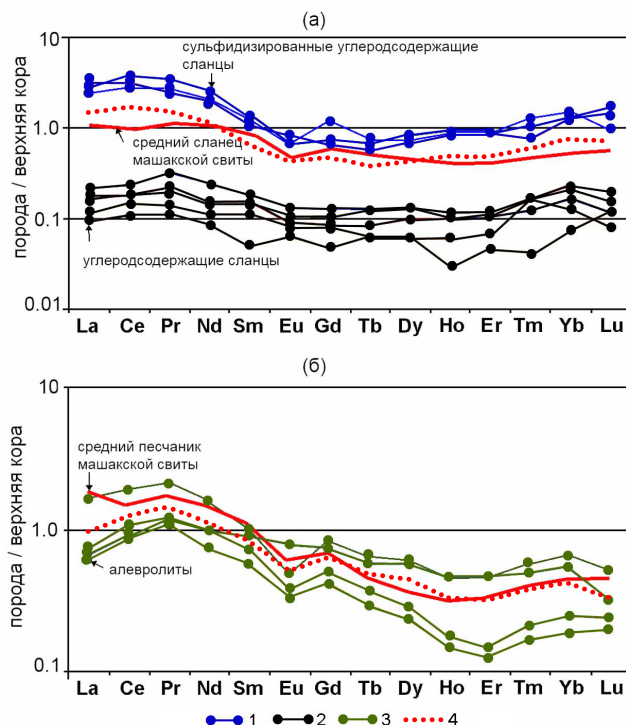


Рис. 3. Диаграммы нормализованных содержаний РЗЭ в углеродсодержащих сланцах (а) и алевролитах (б) Ишлинского грабена. Верхняя кора по (Rudnick, Gao, 2003). Средние составы глинистого сланца и песчаника машакской свиты по (Маслов и др., 2020). 1 – сульфидизированные углеродсодержащие сланцы; 2 – углеродсодержащие сланцы; 3 – алевролиты; 4 – средние составы сланцев и алевролитов соответственно.

В этот временной этап западный склон Южного Урала развивался в режиме сжатия, обусловленного вендской коллизией (Пучков, 2010), с формированием Белорецкого метаморфического (с эклогитами) комплекса (Алексеев и др., 2009), в «обрамлении» которого располагаются отложения Ишлинского грабена.

Результаты исследований

В породах Ишлинского грабена редкоземельные фторкарбонаты были обнаружены в углеродсодержащих сланцах и алевросланцах. Морфология выделений редкоземельных фторкарбонатов разнообразна. Они встречаются в виде единичных ксеноморфных выделений и их сростаний (рис. 4а, б), в зальбандах карбонатных и кварц-карбонатных прожилков (рис. 4в, г), в виде микропрожилков разнообразной формы и конфигурации (рис. 4д), а также в кавернах, пустотах и трещинах кристаллов пирита (рис. 4е–з).

Кроме того, в этих же породах были обнаружены сферолиты, выполненные длиннопризматическими, игольчатыми кристаллами фторкарбонатов РЗЭ (рис. 5). При этом необходимо подчеркнуть, что значительная часть обнаруженных фторкарбонатов наблюдается в ассоциации с сульфидами, что хорошо коррелирует с геохимическим материалом, приведенном выше (рис. 3).

По химическому составу среди фторкарбонатов установлены бастнезит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce), паризит-(Ce) и синхизит-(Ce). Содержания отдельных элементов в минералах подвержены значительным колебаниям (табл. 1, 2, 3). Особенности их химического состава выявляются на диаграмме REE_2O_3-CaO (рис. 6), на которой четко фиксируется обратная зависимость между кальцием и редкоземельными элементами в различных минеральных видах фторкарбонатов с коэффициентом аппроксимации 0,6. Данная ситуация обусловлена структурно-химическими свойствами фторкарбонатов, которые образуют полисоматический ряд, крайними членами которого являются бастнезит-(Ce) и синхизит-(Ce). Промежуточным членом ряда является паризит-(Ce), чья структура состоит из одного бастнезитового и одного синхизитового блока (Ciobanu et al., 2017; Schmandt et al., 2017).

Сфероиды сложены синхизитом-(Ce). Как видно из рисунка 5 и таблицы 3 максимальные вариации в их составе характерны для кальция (4,49–12,41 мас. %), притом, что остальные элементы в кристаллах распределены более или менее равномерно.

Сравнительный анализ графиков нормализованных содержаний редкоземельных элементов во фторкарбонатах из различных структурно-вещественных комплексов Урала (рис. 7) показывает, что их конфигурация различается в значительной степени при практически идентичном минеральном составе. Особенно ярко отличия видны при сопоставлении La_n/Sm_n , которое составляет: в сульфидизированных углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена – 6,44; в щелочных метасоматитах Косьюского рудного поля – 7,97; в околорудной зоне пирит-карбонат-каолинит-серицит-кварцевого состава Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения – 2,85; в жиле нефелин-полевошпатового пегматита из Вишневых гор – 23,95.

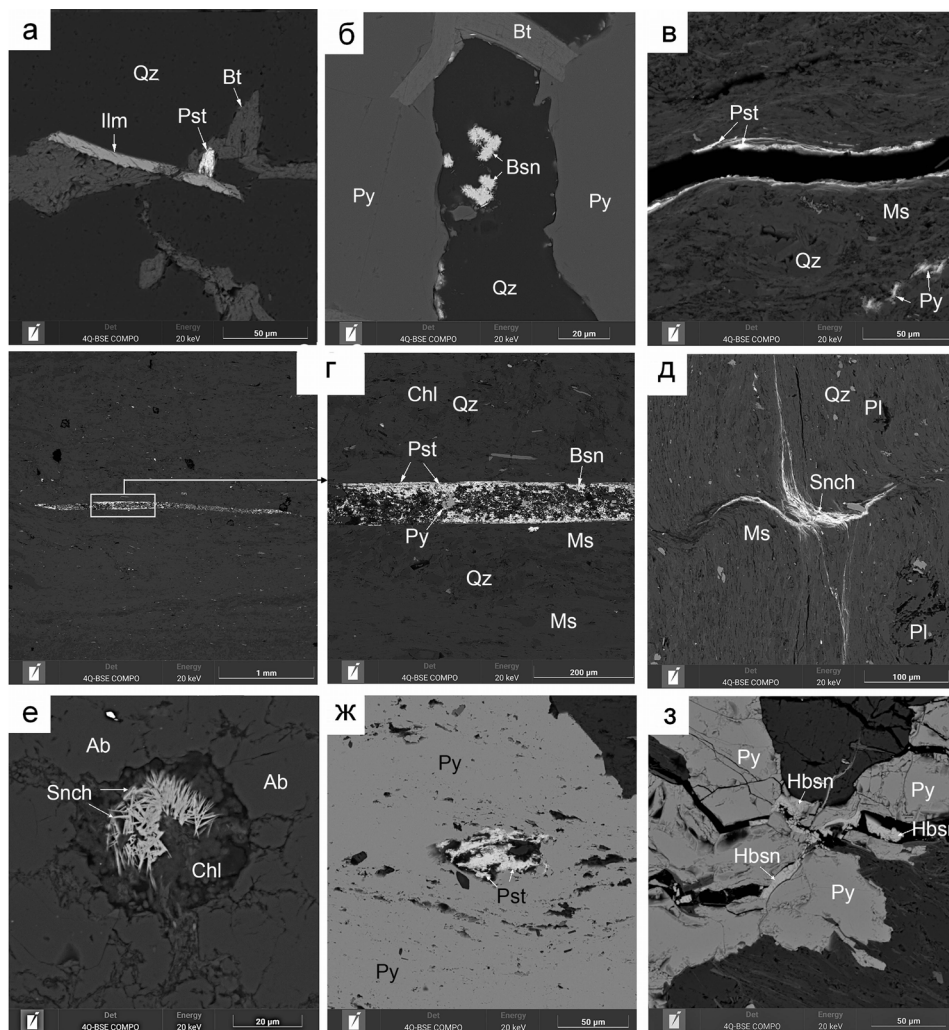


Рис. 4. Микрофотографии редкоземельных фторкарбонатов из углеродсодержащих сланцев Ишлинского грабена: Bsn – бастнезит; Hbsn – гидросилбастнезит; Pst – паризит; Snch – синхизит; Bt – биотит; Ilm – ильменит; Pl – плагиоклаз; Chl – хлорит; Ms – мусковит; Py – пирит; Ab – альбит; Qz – кварц

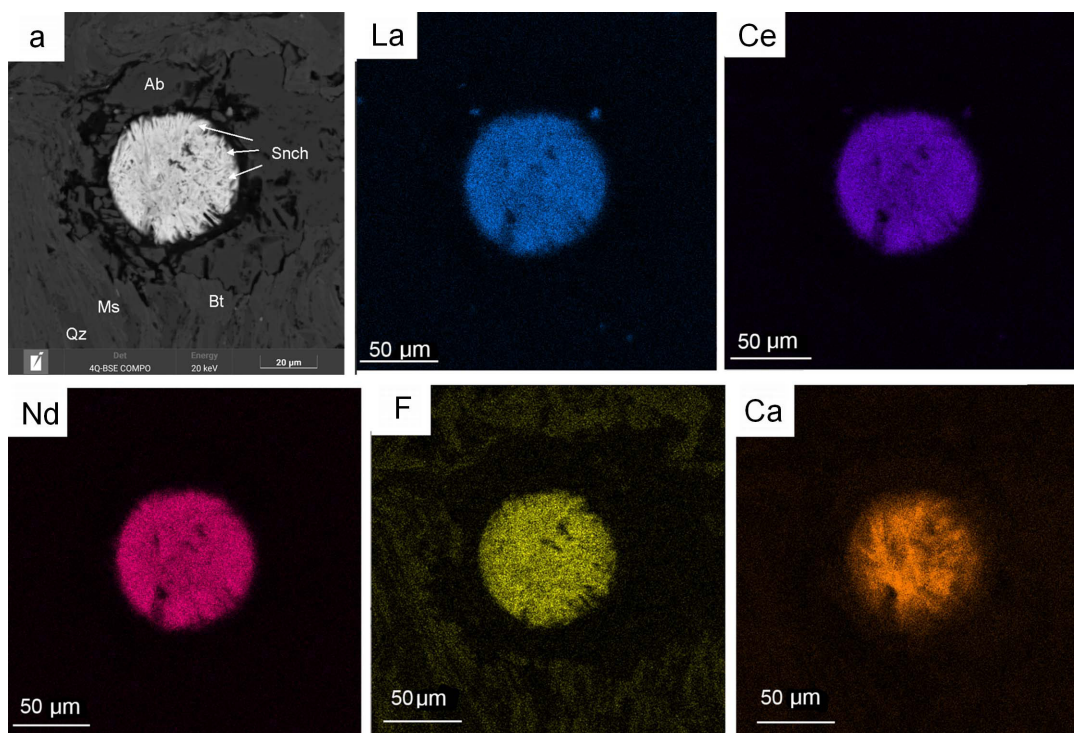


Рис. 5. Микрофотография сфероиды синхизита из углеродсодержащих сланцев Улуелгинско-Кудашмановской зоны и результаты съемки объекта «а» в характеристических лучах: Snch – синхизит; Bt – биотит; Ms – мусковит; Ab – альбит; Qz – кварц

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	–	1,50	1,50	2,18	1,28	0,44	1,83	–	–	–
Al ₂ O ₃	–	0,63	2,84	–	0,31	–	0,18	–	–	–
FeO	2,01	0,85	1,91	–	0,30	0,61	0,79	1,81	1,58	2,81
CaO	2,78	2,35	3,18	2,71	2,25	1,57	1,55	6,56	5,18	5,71
SrO	–	–	–	–	–	–	–	0,94	1,19	1,31
Y ₂ O ₃	0,64	2,11	1,88	1,01	–	–	–	–	–	–
La ₂ O ₃	16,36	13,25	13,54	14,76	22,94	24,65	22,26	16,34	16,05	15,33
Ce ₂ O ₃	30,84	28,24	27,58	28,76	30,79	32,09	31,70	30,21	31,98	28,64
Pr ₂ O ₃	3,69	3,33	3,40	3,28	2,95	2,64	2,96	2,93	3,33	2,77
Nd ₂ O ₃	13,21	14,63	13,34	14,11	10,98	11,26	11,17	9,83	9,65	9,26
Sm ₂ O ₃	2,31	2,94	2,52	1,95	0,67	–	–	0,74	0,87	0,92
Gd ₂ O ₃	0,96	1,82	1,85	1,41	–	–	–	–	–	–
ThO ₂	–	–	0,82	–	–	–	–	–	–	–
F	7,22	5,42	4,42	2,18	6,27	5,48	5,26	–	–	–
CO ₂	20,9	21,98	20,15	25,65	20,15	20,15	20,15	29,31	26,31	29,31
SO ₄	–	–	–	–	0,32	0,55	0,45	–	–	–
Сумма	97,98	93,62	94,5	95,82	92,94	93,98	93,03	98,67	96,14	96,06
Кристаллохимические коэффициенты										
Si	–	0,05	–	0,07	0,04	0,02	0,06	–	–	–
Al	–	0,02	0,11	–	0,01	–	0,01	–	–	–
Fe	0,06	0,02	0,05	–	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,08
Ca	0,1	0,08	0,11	0,09	0,08	0,06	0,06	0,23	0,19	0,20
Sr	–	–	–	–	–	–	–	0,01	0,03	0,02
Y	0,01	0,04	0,03	0,02	–	–	–	–	–	–
La	0,2	0,16	0,17	0,16	0,30	0,33	0,29	0,17	0,18	0,18
Ce	0,38	0,35	0,33	0,32	0,40	0,43	0,41	0,34	0,36	0,33
Pr	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03
Nd	0,16	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,09	0,10	0,10
Sm	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	–	–	0,01	0,01	0,01
Gd	0,01	0,02	0,02	0,01	–	–	–	–	–	–
Th	–	–	0,006	–	–	–	–	–	–	–
F	0,39	0,30	0,25	0,11	0,36	0,32	0,58	–	–	–
C	0,97	1,00	0,99	1,08	0,99	0,99	0,96	1,07	1,08	1,09
S	–	–	–	–	0,01	0,01	0,01	–	–	–
O(OH)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,50	3,50	3,50

Табл. 1. Химический состав бастнезита-(Ce) и гидроксилбастнезита-(Ce) из пород Ишлинского грабена (мас. %)

Сравнительный анализ индикаторных отношений редкоземельных элементов во фторкарбонатах из различных регионов мира показывает, что большая часть из них (включая фторкарбонаты из пород Ишлинского грабена) располагается в узком сегменте диаграммы (рис. 8), в границах 0,4–0,6 La/Ce и 1–2 La/Nd. При этом точки средних составов бастнезита из крупных объектов (Байян-Обо и Олимпик Дам) располагаются вне этих границ (рис. 8). По мнению авторов диаграммы, различия обусловлены физико-химическими условиями минералообразования (изменениям в составе флюида, температуре или pH) (Schmandt et al., 2017). К этому необходимо добавить химический состав среды минералообразования и масштабность самих процессов (в случае их локальности следует ожидать большего разнообразия в химическом составе формирующихся редкоземельных фторкарбонатов).

Обсуждение результатов

Как показали ранее проведенные исследования (Ковалев и др., 2013), а также анализ геохимических характеристик пород и морфологии минеральных ассоциаций, описанных в этой работе, генетические условия формирования фторкарбонатной минерализации в углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена в целом обусловлены гидротермальным метаморфизмом.

Термобарические параметры этого процесса были определены ранее (Ковалев и др., 2018) по химическому составу светлых слюдов ($T = \sim 390\text{--}490\text{ }^\circ\text{C}$, $P = \sim 2,5\text{--}10$ кбар).

Состав флюидной фазы реконструируется при изучении термокриометрии флюидных включений и флюидоносности в кварце из жильных тел, расположенных в породах грабена. В результате установлено, что в кварце присутствуют первичные и вторичные двухфазные (жидкость+газ) флюидные включения с различными температурами гомогенизации. Для первичных включений характерны высокие температуры гомогенизации (180–408 °C), высокая соленость (13,4–16,3 экв. NaCl) и CaCl₂+NaCl состав солей. Во вторичных включениях температура гомогенизации гораздо ниже (121–248 °C), а состав солей соответствует FeCl₂ (Ковалев и др., 2016). Анализ состава газов также свидетельствует о наличии 2 групп включений, которые различаются по концентрациям H₂O, CO₂ и сумме восстановленных газов. Для первой группы характерно высокое содержание H₂O (202–324 мкл/г), невысокие концентрации CO₂ (4–6,3 мкл/г) и восстановленных газов (4,1–11 мкл/г). Во второй группе, при схожих концентрациях H₂O (257–273 мкл/г), фиксируются более высокие содержания CO₂ (7,7–11,3 мкл/г), и отмечается большее количество восстановленных газов (43–75 мкл/г) (Ковалев и др., 2016).

№ п/п	1	2	3	4	5	6	8	10	11	12	13
SiO ₂	2,05	2,27	2,15	2,71	1,63	3,16	0,61	0,94	0,66	2,04	1,33
Al ₂ O ₃	1,08	1,26	0,78	1,69	0,77	1,18	–	0,36	0,24	1,21	0,75
FeO	1,87	1,48	1,82	1,66	1,43	1,26	2,70	2,10	0,62	1,24	0,89
CaO	4,71	4,20	4,50	3,02	4,63	3,39	3,24	4,49	4,88	6,67	5,76
Y ₂ O ₃	2,98	3,21	0,66	0,77	–	–	–	0,43	–	0,63	0,73
La ₂ O ₃	11,21	11,94	18,00	14,39	14,74	13,68	15,22	16,47	15,2	13,11	14,13
Ce ₂ O ₃	22,13	23,08	31,85	30,91	29,45	27,66	30,36	28,35	29,54	26,75	27,98
Pr ₂ O ₃	2,8	2,78	2,44	1,90	3,60	2,79	2,75	3,03	2,92	2,66	3,18
Nd ₂ O ₃	10,52	11,03	11,14	10,85	11,98	10,30	12,33	11,32	12,31	10,94	12,38
Sm ₂ O ₃	2,05	2,13	–	1,06	2,03	1,78	0,84	1,86	2,11	1,97	1,86
Gd ₂ O ₃	1,92	1,89	–	–	1,02	0,89	1,58	1,09	1,33	1,21	1,05
ThO ₂	1,12	1,11	–	–	2,73	3,22	1,96	–	–	–	–
F	3,62	3,65	6,03	5,51	4,60	3,91	5,07	6,50	5,30	5,62	5,23
CO ₂	21,98	22,02	23,6	22,56	23,21	23,00	21,46	21,6	21,3	23,6	22,99
Сумма	88,52	90,52	100,43	94,71	99,89	94,58	96,53	95,81	94,18	95,29	96,07
Кристаллохимические коэффициенты											
Si	0,20	0,22	0,20	0,26	0,15	0,31	0,06	0,09	0,07	0,19	0,13
Al	0,13	0,15	0,08	0,19	0,08	0,14	–	0,04	0,03	0,13	0,08
Fe	0,16	0,12	0,14	0,13	0,11	0,10	0,23	0,17	0,05	0,1	0,07
Ca	0,5	0,44	0,44	0,31	0,46	0,35	0,35	0,47	0,53	0,66	0,59
Y	0,16	0,17	0,03	0,04	–	–	–	0,02	–	0,03	0,04
La	0,41	0,43	0,60	0,51	0,51	0,49	0,57	0,59	0,57	0,45	0,50
Ce	0,81	0,83	1,06	1,08	1,01	0,99	1,12	1,01	1,09	0,9	0,97
Pr	0,10	0,10	0,08	0,07	0,12	0,1	0,10	0,11	0,11	0,09	0,11
Nd	0,37	0,39	0,36	0,37	0,40	0,36	0,44	0,39	0,44	0,36	0,42
Sm	0,07	0,07	–	0,04	0,07	0,06	0,03	0,06	0,07	0,06	0,06
Gd	0,06	0,06	–	–	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
Th	0,03	0,02	–	–	0,06	0,07	0,05	–	–	–	–
F	0,57	0,57	0,87	0,84	0,68	0,60	0,81	1,00	0,85	0,82	0,79
C	2,99	2,95	2,94	2,95	2,96	3,06	3,03	2,88	2,93	2,97	2,99
O(OH)	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00

Табл. 2. Химический состав паризита-(Ce) из пород Ишлинского грабена (мас. %)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	1,19	1,50	1,50	0,24	0,29	0,30	0,33
Al ₂ O ₃	0,70	8,82	1,89	–	–	–	–
FeO	2,47	7,07	1,55	1,66	1,64	2,28	2,31
CaO	12,41	9,12	15,00	13,44	14,55	10,95	9,83
Y ₂ O ₃	0,94	–	3,23	0,35	0,59	–	–
La ₂ O ₃	14,00	8,65	8,06	12,52	11,41	12,86	14,41
Ce ₂ O ₃	21,58	17,20	17,15	24,26	23,37	25,13	25,67
Pr ₂ O ₃	2,55	2,26	2,41	2,92	2,93	2,94	3,01
Nd ₂ O ₃	10,51	9,22	9,69	12,38	12,34	13,65	13,31
Sm ₂ O ₃	2,09	1,89	2,24	2,25	2,26	2,42	2,32
Gd ₂ O ₃	1,13	1,05	1,74	1,29	1,57	1,38	1,31
ThO ₂	–	0,44	–	–	–	–	–
SO ₃	–	–	–	0,24	0,26	0,81	0,59
F	5,28	3,48	5,31	5,93	5,65	6,51	6,56
CO ₂	24,36	29,31	29,31	21,98	21,98	18,32	18,32
Сумма	92,61	96,52	93,77	93,53	93,21	91,02	91,41
Кристаллохимические коэффициенты							
Si	0,06	–	0,08	0,01	0,02	0,02	0,02
Al	0,04	0,51	0,11	–	–	–	–
Fe	0,11	0,29	0,07	0,08	0,08	0,13	0,13
Ca	0,72	0,48	0,83	0,87	0,93	0,77	0,70
Y	0,03	–	0,09	0,01	0,02	–	–
La	0,28	0,16	0,15	0,28	0,25	0,31	0,35
Ce	0,43	0,31	0,32	0,53	0,51	0,61	0,63
Pr	0,05	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07
Nd	0,2	0,16	0,18	0,27	0,26	0,32	0,32
Sm	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Gd	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Th	–	0,005	–	–	–	–	–
S	–	–	–	0,01	0,01	0,04	0,03
F	0,45	0,27	0,43	0,56	1,06	1,36	1,38
C	1,81	1,98	2,04	1,80	1,78	1,65	1,67
O(OH)	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00

Табл. 3. Химический состав синхизита-(Ce) из пород Ишлинского грабена (мас. %)

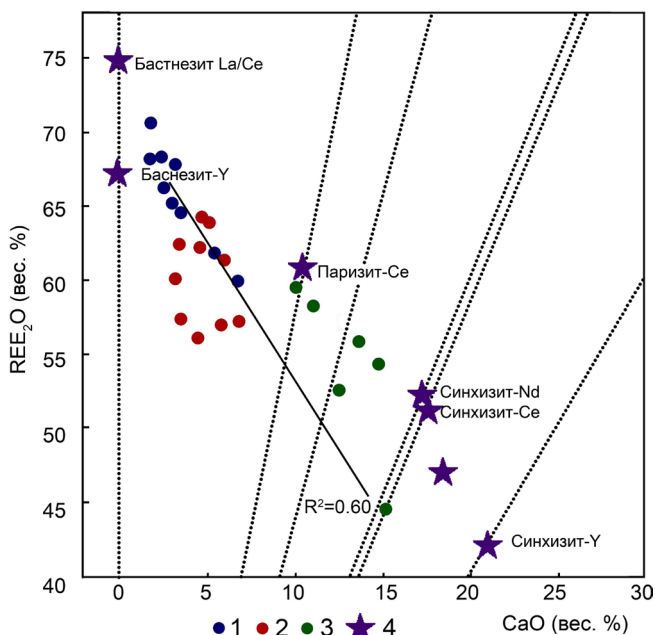


Рис. 6. Диаграмма сумма REE_2O_3 –CaO для фторкарбонатов из пород Ишлинского грабена по (Alles et al., 2019) с изменениями: 1 – бастнезит; 2 – паризит; 3 – синхизит; 4 – стехиометрические составы минералов

Полученные результаты свидетельствуют об изменении химического состава флюида в процессе метаморфизма: первичные включения – $CaCl_2 + NaCl$, вторичные включения – $FeCl_2$.

В последнее время появилась серия публикаций, в которых показано, что главным транспортирующим агентом РЗЭ при метаморфизме является хлор, в то время как фтор служит лигандом при осаждении редкоземельных элементов и формировании минерализации (Migdisov, Williams-Jones, 2014; Di, Ding, 2024). Приведенный выше материал свидетельствует, что в нашем случае, состав флюида и температурный режим гидротермального

процесса вполне соответствовали возможностям транспортировки РЗЭ в виде хлоридных комплексов (Zhenga et al, 2021). При этом источником редкоземельных элементов являлись, вероятнее всего, минералы группы рабдофана (водные редкоземельные фосфаты – $(REE)(PO_4) \times H_2O$), которые были обнаружены в неметаморфизованных глинистых сланцах и алевролитах рифея центральной части Башкирского мегантиклинория (Алексеев и др., 2009).

Для формирования карбонатов редкоземельных элементов необходимо определенное количество углерода (в виде CO_2) и кальция. Если с CO_2 проблем не существует из-за наличия органики, окисление которой ($C + O_2 = CO_2$) приводит к образованию углекислоты, то карбонатные породы в разрезах, как стратиграфические подразделения, которые могли бы быть источником кальция в Ишлинском грабене, отсутствуют. По нашему мнению, одним из источников кальция явился процесс альбитизации плагиоклаза (рис. 2г), при котором высвобождается и переходит во флюид определенное количество Ca^{2+} . При этом необходимо подчеркнуть, что наличие полисоматического ряда бастнезит-(Ce) – синхизит-(Ce) с промежуточным соединением – паризит-(Ce) свидетельствует о непрерывном процессе формирования редкоземельных фторкарбонатов в породах Ишлинского грабена в направлении синхизит-(Ce) → паризит-(Ce) → бастнезит-(Ce), то есть в сторону уменьшения количества кальция в составе минерала, что в целом соответствует изменению химического состава флюида (исчезновение кальция и преобладание хлорида железа).

Разнообразие морфологических типов фторкарбонатной минерализации (рис. 4, 5) и их распространение в породах Ишлинского грабена свидетельствует о том, что миграция редкоземельных элементов при метаморфизме не была значительной. Она определялась их локальным перераспределением. Подтверждением этому заключению служат многочисленные экспериментальные исследования, в результате которых было установлено, что морфология, структура и размер выделений фторкарбонатов

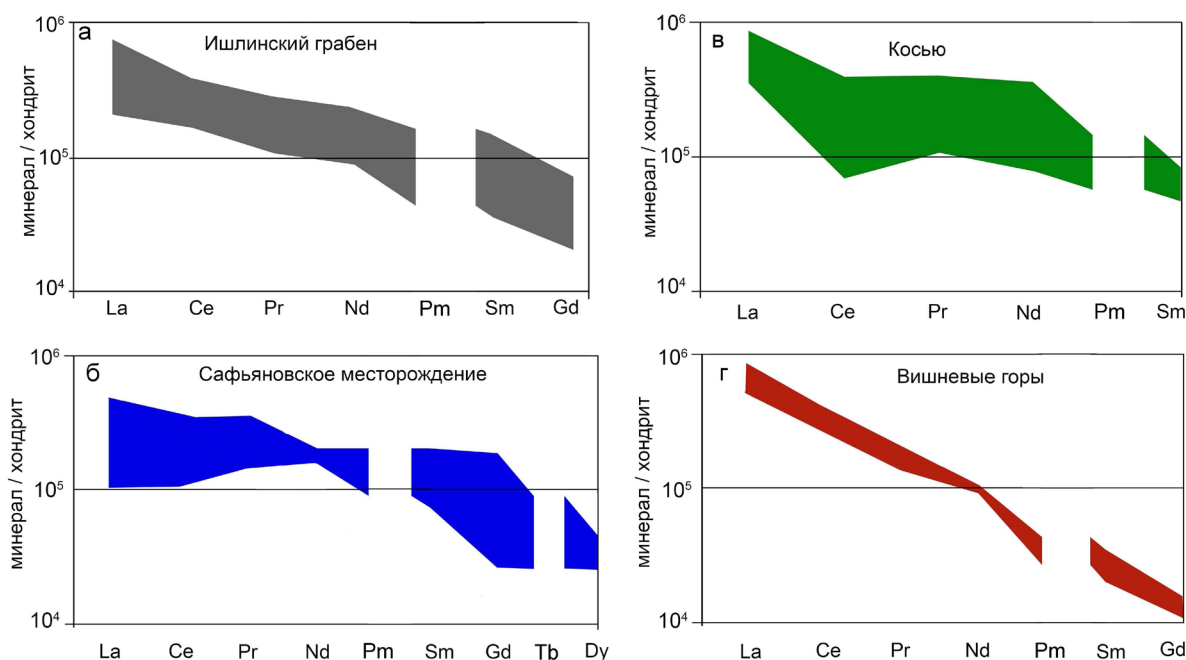


Рис. 7. Нормализованное распределение редкоземельных элементов во фторкарбонатах из различных пород Урала

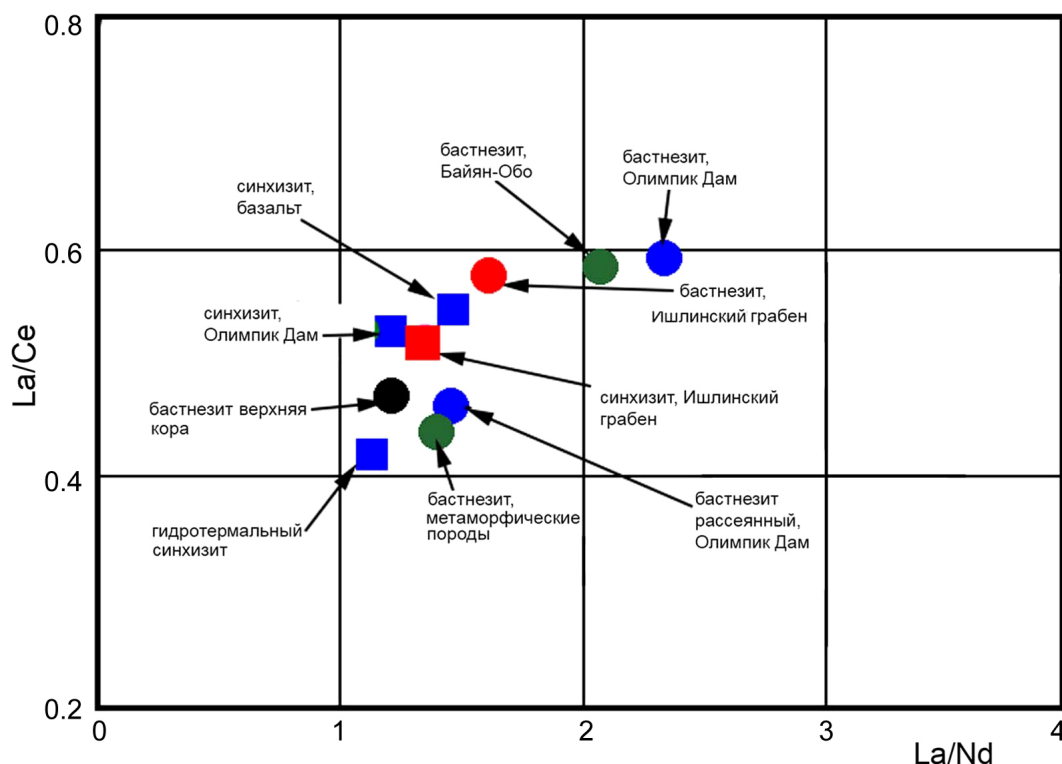


Рис. 8. Диаграмма La/Ce–La/Nd для средних составов редкоземельных фторкарбонатов из объектов различных регионов мира по (Schmandt et al., 2017) с изменениями

очень чувствительны к изменению различных параметров эксперимента: концентрации компонентов, типу используемых реагентов, времени реакции, интервалу температур, использовании атмосферы CO₂, присутствию органических лигандов, скорости перемешивания раствора и т.п. (Ikuma et al., 2002; Rodriguez-Blanco et al., 2014; Zhang et al., 2009; Vallina et al., 2014; Shang et al., 2009 и др.). То есть, в природной системе многообразие факторов свидетельствует о локальности минералообразующих процессов, которые во многом обусловлены химическим составом среды минералообразования.

Выводы

1. В углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена впервые были обнаружены редкоземельные фторкарбонаты (бабнезит-(Ce), гидроксилбабнезит-(Ce), паризит-(Ce) и синхизит-(Ce)), морфологически представленные единичными ксеноморфными выделениями, прожилками различной морфологии, микрозернистыми массами в зальбандах карбонатных и кварц-карбонатных прожилков, агрегатами, выполняющими пустоты в кристаллах пирита, и сферолитами, сложенными длиннопризматическими, игольчатыми кристаллами.

2. Предлагаемый механизм формирования редкоземельных фторкарбонатов обусловлен гидротермальным метаморфизмом. Показано, что одним из источников CO₂ явилось окисление органики углеродсодержащих сланцев, а одним из возможных источников Ca²⁺ – альбитизация плагиоклаза метаморфизованных магматических пород.

Наличие полисоматического ряда бабнезит-(Ce) – синхизит-(Ce) с промежуточным соединением – паризит-(Ce) может свидетельствовать о непрерывном процессе формирования редкоземельных фторкарбонатов в породах

Ишлинского грабена в направлении синхизит-(Ce) → паризит-(Ce) → бабнезит-(Ce), то есть в сторону уменьшения количества кальция в составе минерала, что в целом соответствует изменению химического состава флюида: первичные включения – CaCl₂ + NaCl, вторичные включения – FeCl₂.

Финансирование/Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема № FMRS-2025-0015).

Авторы выражают благодарность рецензентам за тщательное прочтение статьи и ценные замечания, которые привели к улучшению материала статьи.

Литература

- Алексеев А.А., Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А. (2009). Белорецкий метаморфический комплекс. Уфа: ИГ УНЦ РАН, ООО «ДизайнПолиграфСервис», 208 с.
- Алопова Н.Р., Масленников В.В., Филиппова К.А. (2019). Геохимия и минералогия редкоземельных элементов в рудах Талганского медно-цинково-колчеданного месторождения, Южный Урал. *ДАН*, 487(6), с. 659–662. DOI: 10.31857/S0869-56524876659-662
- Булах А.Г. (1967). Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М.: Недра, 141 с.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В., Мичурин С.В., Ковалев С.С. (2013). Геология, минералогия и металлогенетическая специализация углеродсодержащих толщ Улуелгинско-Кудашмановской зоны (западный склон Южного Урала). *Литосфера*, (3), с. 67–88.
- Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Шарипова А.А. (2023). Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, 23(5), с. 910–929. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
- Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Ковалев С.Г., Высоцкий С.И. (2018). Первые данные о количественной оценке параметров вендского метаморфизма восточной части Башкирского мегантиклинория. *ДАН*, 483(3), с. 301–305.

Ковалев С.С., Мичурин С.В., Канипова З.А., Крупенин М.Т. (2016). Термокриметрия и флюидоносность жильного кварца из рифейских углеродсодержащих сланцев Башкирского мегантиклинория). *Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ*, (22), с. 28–37.

Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. (2022). Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов. *Записки РМО, CLI(1)*, с. 114–124. DOI: 10.31857/S0869605522010087

Маслов А.В., Гареев Э.З., Подковыров В.Н., Ковалев С.Г. (2020). Литогeoхимия обломочных пород машакской свиты (западный склон Южного Урала): в поисках «камуфлированной» пирокластике. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (1), 121–145. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.107>

Пучков В.Н. (2010). Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис. 280 с.

Сорока Е.И., Притчин М.Е., Леонова Л.В., Булатов В.А. (2023). Редкоземельные фторкарбонаты в породах Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал). *ДАН. Науки о Земле*, 508(1), с. 50–57. DOI: 10.31857/S2686739722600552

Удoratина О.В., Варламов Д.А. (2021). Редкоземельные и редкие карбонаты фенитов Косьюского рудного поля (Средний Тиман). *Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, (18), с. 382–386. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.072

Alles J., Ploch A.M., Schirmer T., Nolte N., Liessmann W., Lehmann B. (2019). Rare-earth-element enrichment in post-Variscan polymetallic vein systems of the Harz Mountains, Germany. *Mineralium Deposita*, (54), pp. 307–328. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0847-8>

Ciobanu C.L., Kontonikas-Charos A., Slattery A., Cook N.J., Ehrig K., Wade B.P. (2017). Short-range stacking disorder in mixed-layer compounds: A HAADF STEM study of bastnaesite-parisite intergrowths. *Minerals*, (7), p. 227. <https://doi.org/10.3390/min7110227>

Di J., Ding X. (2024). Complexation of REE in Hydrothermal Fluids and Its Significance on REE Mineralization. *Minerals*, (14), p. 531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>

Holloway M. (2018). An experimental study of REE carbonate and uorocarbonate synthesis as a basis for understanding hydrothermal REE mineralization. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy The University of Edinburgh.

Ikuma Y., Oosawa H., Shimada E., and Kamiya M. (2002). Effect of microwave radiation on the formation of Ce₂O(CO₃)₂.H₂O in aqueous solution. *Solid State Ionics*, 151(1–4), pp. 347–352. [https://doi.org/10.1016/s0167-2738\(02\)00538-6](https://doi.org/10.1016/s0167-2738(02)00538-6)

Migdisov A., Williams-Jones A. (2014). Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by uorine-bearing aqueous liquids. *Mineralium Deposita*, 49, pp. 987–997. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0554-z>

Rodriguez-Blanco J., Vallina B., Blanco J., Benning L. (2014). The role of REE³⁺ in the crystallization of lanthanites. *Mineralogical Magazine*, 78(6), pp. 1373–1380. <https://doi.org/10.1180/minmag.2014.078.6.03>

Rudnick R.L., Gao S. (2003). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, pp. 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>

Schmandt D.S., Cook N.J., Ciobanu C.L., Ehrig K., Wade B.P., Gilbert S., Kamenetsky V.S. (2017). Rare Earth Element Fluorocarbonate Minerals from the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag Deposit, South Australia. *Minerals*, 7(10), p. 202. <https://doi.org/10.3390/min7100202>

Shang X., Lu W., Yue B., Zhang L., Ni J. (2009). Synthesis of three-dimensional hierarchical dendrites of NdOHCO₃ via a facile hydrothermal method. *Crystal growth and design*, 9(3), pp. 1415–1420. <https://doi.org/10.1021/cg800730s>

Vallina B., Rodriguez-Blanco J., Blanco J., Benning L. (2014). The effect of heating on the morphology of crystalline neodymium hydroxycarbonate, NdCO₃OH. *Mineralogical Magazine*, 78(6), pp. 1391–1397. <https://doi.org/10.1180/minmag.2014.078.6.05>

Warr L.N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, pp. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>

Zhang Y., Gao M., Han K., Fang Z., Yin X., Xu Z. (2009). Synthesis, characterization and formation mechanism of dumbbell-like YOHCO₃ and rod-like Y₂(CO₃)₃·2.5H₂O. *Journal of Alloys and Compounds*, 474(1–2), pp. 598–604. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.07.007>

Zhenga X., Liub Y., Zhangd L. (2021). The role of sulfate-, alkali-, and halogen-rich fluids in mobilization and mineralization of rare earth elements: Insights from bulk fluid compositions in the Mianning-Dechang carbonate-related REE belt, southwestern China. *Lithos*, pp. 386–387, pp. 106008. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106008>

Сведения об авторах

Сергей Григорьевич Ковалев – доктор геол.-минерал. наук, директор, Институт геологии УФИЦ РАН
Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2
e-mail: kovalev@ufaras.ru

Сергей Сергеевич Ковалев – старший научный сотрудник, кандидат геол.-минерал. наук, Институт геологии УФИЦ РАН

Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2

Статья поступила в редакцию 01.04.2025;
Принята к публикации 02.09.2025; Опубликована 30.03.2026

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Rare Earth Fluorocarbonates in Carbonaceous Shales of the Ishlya Graben (Western Slope of the Southern Urals)

*S.G. Kovalev**, *S.S. Kovalev*

Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

**Corresponding author: Sergey G. Kovalev, e-mail: kovalev@ufaras.ru*

Abstract. The aim of this work is to characterize rare earth fluorocarbonates, first discovered in carbonaceous shales of the Ishlya graben, and to develop an acceptable genetic model of their formation.

Riftogenic formations are represented by interbedding of terrigenous rocks (carbonaceous shales, siltstones, siltstones) with a volcano-plutonic association (gabbrodolerites, basic effusives with a small amount of pyroclastic material). All rocks are metamorphosed under epidote-amphibolite facies conditions ($T = \sim 390\text{--}490\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = \sim 2.5\text{--}10\text{ kbar}$).

Bastnaesite-(Ce), hydroxylbastnaesite-(Ce), parisite-(Ce) and synchysite-(Ce) were found in carbonaceous shales, morphologically represented by single xenomorphic segregations, veinlets of various morphologies, microgranular masses in selvages of carbonate and quartz-carbonate veinlets, aggregates filling voids in pyrite crystals and spherulites composed of long-prismatic, needle-shaped crystals. It is shown that the genesis of rare-earth fluorocarbonates is caused by hydrothermal metamorphism with a change in the chemical composition of the fluid ($\text{CaCl}_2 + \text{NaCl} \rightarrow \text{FeCl}_2$).

In this case, the source of CO₂ was the oxidation of organic matter in carbonaceous shales, and Ca²⁺ was the albitization of plagioclase. Based on the analysis of indicator ratios of rare earth elements in fluorocarbonates from different regions of the world, it has been established that the chemistry of the mineral formation environment and the scale of the substance redistribution processes are of great importance during their formation (in the case of their locality, greater diversity in the chemical composition of the resulting rare earth fluorocarbonates should be expected).

Keywords: Southern Urals, rare earth fluorocarbonates, carbonaceous shales, hydrothermal metamorphism, fluid inclusions

Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the State Assignment (subject No. FMRS-2025-0015).

Recommended citation: Kovalev S.G., Kovalev S.S. (2026). Rare Earth Fluorocarbonates in Carbonaceous Shales of the Ishlya Graben (Western Slope of the Southern Urals). *Georesursy = Georesources*, 28(1), pp. 138–148. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.1.8>

References

- Alekseev A.A., Kovalev S.G., Timofeeva E.A. (2009). Beloretsk metamorphic complex. Ufa: IG Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, OOO DesignPoligrafServis, 208 p. (In Russ.)
- Alles J., Ploch A.M., Schirmer T., Nolte N., Liessmann W., Lehmann B. (2019). Rare-earth-element enrichment in post-Variscan polymetallic vein systems of the Harz Mountains, Germany. *Mineralium Deposita*, (54), pp. 307–328. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0847-8>
- Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Filippova K.A. (2019). Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in ores of the Talgan copper-zinc-pyrite deposit, South Urals. *DAN*, 487(6), pp. 659–662. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869-56524876659-662
- Bulakh A.G. (1967). Guide and tables for calculating mineral formulas. Moscow: Nedra, 141 p. (In Russ.)
- Ciobanu C.L., Kontonikas-Charos A., Slattery A., Cook N.J., Ehrig K., Wade B.P. (2017). Short-range stacking disorder in mixed-layer compounds: A HAADF STEM study of bastnäsite-parisite intergrowths. *Minerals*, (7), p. 227. <https://doi.org/10.3390/min7110227>
- Di J., Ding X. (2024). Complexation of REE in Hydrothermal Fluids and Its Significance on REE Mineralization. *Minerals*, (14), p. 531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>
- Holloway M. (2018). An experimental study of REE carbonate and urocarbonate synthesis as a basis for understanding hydrothermal REE mineralization. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy The University of Edinburgh.
- Ikuma Y., Oosawa H., Shimada E., and Kamiya M. (2002). Effect of microwave radiation on the formation of Ce₂O(CO₃)₂·H₂O in aqueous solution. *Solid State Ionics*, 151(1–4), pp. 347–352. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(02\)00538-6](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(02)00538-6)
- Kovalev S.G., Kovalev S.S., Sharipova A.A. (2023). First data on rare earth mineralization in acidic varieties of rocks of the Shatak complex (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 23(5), pp. 910–929. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
- Kovalev S.G., Puchkov V.N., Kovalev S.G., Vysotsky S.I. (2018). First data on the quantitative assessment of the parameters of the Vendian metamorphism of the eastern part of the Bashkir mega-anticlinorium. *DAN*, 483(3), pp. 301–305. (In Russ.)
- Kovalev S.G., Vysotsky I.V., Michurin S.V., Kovalev S.S. (2013). Geology, mineralogy and metallogenic specialization of carbon-bearing strata of the Uluelginsko-Kudashmanovskaya zone (western slope of the Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, (3), pp. 67–88. (In Russ.)
- Kovalev S.S., Michurin S.V., Kanipova Z.A., Krupenin M.T. (2016). Thermocryometry and fluid content of vein quartz from Riphean carbonaceous shales of the Bashkir megaanticlinorium). *Geology. News of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, (22), pp. 28–37. (In Russ.)
- Krivovichev V.G., Gulbin Yu.L. (2022). Recommendations for the calculation and presentation of mineral formulas based on chemical analysis data. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, CLI(1), pp. 114–124. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869605522010087
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Podkovyrov V.N., Kovalev S.G. (2020). Lithogeochemistry of clastic rocks of the Mashak Formation (western slope of the Southern Urals): in search of “camouflaged” pyroclastics. *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*, 65(1), 121–145. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.107>
- Migdisov A., Williams-Jones A. (2014). Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by uorine-bearing aqueous liquids. *Mineralium Deposita*, 49, pp. 987–997. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0554-z>
- Rodriguez-Blanco J., Vallina B., Blanco J., Benning L. (2014). The role of REE3+ in the crystallization of lanthanites. *Mineralogical Magazine*, 78(6), pp. 1373–1380. <https://doi.org/10.1180/minmag.2014.078.6.03>
- Puchkov V.N. (2010). Geology of the Urals and the Urals (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa: DesignPoligrafService. 280 p. (In Russ.)
- Rudnick R.L., Gao S. (2003). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, pp. 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Schmandt D.S., Cook N.J., Ciobanu C.L., Ehrig K., Wade B.P., Gilbert S., Kamenetsky V.S. (2017). Rare Earth Element Fluorocarbonate Minerals from the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag Deposit, South Australia. *Minerals*, 7(10), p. 202. <https://doi.org/10.3390/min7100202>
- Shang X., Lu W., Yue B., Zhang L., Ni J. (2009). Synthesis of three-dimensional hierarchical dendrites of Nd(OHCO₃) via a facile hydrothermal method. *Crystal growth and design*, 9(3), pp. 1415–1420. <https://doi.org/10.1021/cg800730s>
- Soroka E.I., Pritchinn M.E., Leonova L.V., Bulatov V.A. (2023). Rare earth fluorocarbonates in rocks of the Safyanovsky copper-zinc-pyrite deposit (Middle Urals). *Doklady Earth Sciences*, 508(1), pp. 50–57. (In Russ.) DOI: 10.31857/S2686739722600552
- Udoratina O.V., Varlamov D.A. (2021). Rare earth and rare carbonates of fenites of the Kosyu ore field (Middle Timan). *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS*, (18), pp. 382–386. (In Russ.) DOI: 10.31241/FNS.2021.18.072
- Vallina B., Rodriguez-Blanco J., Blanco J., Benning L. (2014). The effect of heating on the morphology of crystalline neodymium hydroxycarbonate, NdCO₃OH. *Mineralogical Magazine*, 78(6), pp. 1391–1397. <https://doi.org/10.1180/minmag.2014.078.6.05>
- Warr L.N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, pp. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Zhang Y., Gao M., Han K., Fang Z., Yin X., Xu Z. (2009). Synthesis, characterization and formation mechanism of dumbbell-like YOHCO₃ and rod-like Y₂(CO₃)₃·2.5H₂O. *Journal of Alloys and Compounds*, 474(1–2), pp. 598–604. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.07.007>
- Zhenga X., Liub Y., Zhanga L. (2021). The role of sulfate-, alkali-, and halogen-rich fluids in mobilization and mineralization of rare earth elements: Insights from bulk fluid compositions in the Mianning-Dechang carbonate-related REE belt, southwestern China. *Lithos*, pp. 386–387, pp. 106008. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106008>

About the Authors

Sergey G. Kovalev – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Director, Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
16/2 Karl Marx St., Ufa, 450077, Russian Federation
e-mail: kovalev@ufaras.ru

Sergey S. Kovalev – Senior Researcher, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
16/2 Karl Marx St., Ufa, 450077, Russian Federation

Manuscript received 1 April 2025;

Accepted 2 September 2025; Published 30 March 2026

© 2026 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)