

Научная статья
УДК 553.9+553.21



СУЛЬФИДНО-РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЛОКАЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ ПРИ МЕТАМОРФИЗМЕ

С. Г. Ковалев¹, С. С. Ковалев²

Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, Россия, kovalev@ufaras.ru,

1 — <https://orcid.org/0000-0001-6753-7484>, 2 — <https://orcid.org/0000-0003-1780-6580>

В статье приводятся материалы об «экзотических» сульфидно-редкоземельных парагенезисах — монацит- (Ce) + пирит и алланит- (Ce) + ксенотим- (Y) + пирит обнаруженных в метаморфизованных углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена. Механизм образования данных ассоциаций обусловлен метаморфизмом пород при стрессовом давлении, P — T параметры которого реконструируются по составам метаморфогенных минералов. Наиболее высокотемпературным этапом является амфиболизация магматических пород (T = 500–600 °C и P = ~3–5 кбар), а процесс формирования светлых слюд в терригенных отложениях реализовывался при P ~2–10 кбар, — T — 390–490 °C. При этом химический состав флюидной фазы изменялся от CaCl₂+NaCl до FeCl₂. Стрессовое давление приводит к формированию трещин отрыва (зон разгрузки давления), в которых, при наличии кластогенных редкоземельных минералов, реализуется их растворении и локальное обогащение флюида редкоземельными элементами (РЗЭ). Так как снятие давления в локальной зоне делает систему резко неравновесной, то в этом объеме возможна совместная кристаллизация «несовместимых» минералов (сульфид+фосфат РЗЭ и сульфид+фосфат РЗЭ+силикат РЗЭ), образующих сложные сростания.

Ключевые слова: Южный Урал, редкоземельные минералы, сульфиды, метаморфизм, парагенезис
Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2025–0015.

Original article

SULFIDE-RARE EARTH ASSEMBLAGES AS AN INDICATOR OF THE LOCALITY OF MINERAL FORMATION PROCESSES DURING METAMORPHISM

S. G. Kovalev¹, S. S. Kovalev²

Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia, kovalev@ufaras.ru,

1 — <https://orcid.org/0000-0001-6753-7484>, 2 — <https://orcid.org/0000-0003-1780-6580>

This article presents data on «exotic» sulfide-rare earth assemblages—monazite- (Ce) + pyrite and allanite- (Ce) + xenotime- (Y) + pyrite—discovered in metamorphosed carbonaceous schists of the Ishly Graben. The formation mechanism of these assemblages is determined by stress-pressure meta-

Для цитирования: Ковалев С. Г., Ковалев С. С. Сульфидно-редкоземельные парагенезисы как показатель локальности процессов минералообразования при метаморфизме // Геологический вестник. 2026. № 1. С. 65–74. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2026-1-6>

For citation: Kovalev S. G., Kovalev S. S. (2026) Sulfide-rare earth assemblages as an indicator of the locality of mineral formation processes during metamorphism. *Geologicheskii vestnik*. 2026. No. 1. P. 65–74. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2026-1-6>

© С. Г. Ковалев, С. С. Ковалев, 2026

morphism, the P — T parameters of which are reconstructed from the compositions of metamorphic minerals. The highest-temperature stage is the amphibolization of igneous rocks ($T = 500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $P = \sim 3\text{--}5\text{ kbar}$), while the formation of light-colored micas in terrigenous sediments occurred at $P \sim 2\text{--}10\text{ kbar}$ and $T = 390\text{--}490\text{ }^{\circ}\text{C}$. During this process, the chemical composition of the fluid phase changed from $\text{CaCl}_2 + \text{NaCl}$ to FeCl_2 . Stress pressure leads to the formation of tensile fractures (pressure relief zones), in which, in the presence of clastogenic rare earth minerals, their dissolution and local enrichment of the fluid with rare earth elements (REEs) occur. Since the release of pressure in a local zone places the system in a state of sharp disequilibrium, the co-crystallization of «incompatible» minerals (sulfide + REE phosphate and sulfide + REE phosphate + REE silicate) is possible within this volume, forming complex intergrowths.

Keywords: Southern Urals, rare earth minerals, sulfides, metamorphism, paragenesis

Acknowledgements: The research was carried out on the subject № FMRS-2025–0015 of the state task to the Institute of Geology UFGC RAS.

Введение

В пределах Башкирского мегантиклинория находки редкоземельных минералов в терригенных породах отмечались еще в 60-х годах XX столетия [Орлова, 1960; Беккер, 1960]. Вероятно первым, кто начал систематическое изучение редкоземельной минерализации на западном склоне Южного Урала, был А. А. Алексеев, описавший редкоземельную минерализацию в породах суранской, юшинской, машакской и зигазино-комаровской свит нижнего и среднего рифея, а также в русловых и аллювиальных отложениях восточной подзоны Башкирского мегантиклинория [Алексеев, Тимофеева, 2007; Алексеев и др., 2009]. В последнее время нами получен новый материал по редкоземельной (РЗЭ) минерализации в структурно-вещественных комплексах различной природы [Ковалев и др., 2013; Ковалев и др., 2017 и др.]. При этом обнаружены своеобразные взаимоотношения между редкоземельными минералами и сульфидами не описанные в мировой литературе, которые расширяют наши представления о генезисе редкоземельных минералов.

Методы исследования

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 параметрах: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 4 нА, время накопления спектра в точке 60 сек в режиме «Point&ID», диаметр пучка $\sim 3\text{ мкм}$. При анализе использован встроенный комплект эталонов Oxford Instruments Standards, представленный природными и синтетическими соединениями.

Концентрации РЗЭ определены методом ICP-MS в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Точность

измерения составила (в мкг/г): La — 0.01; Ce — 0.01; Pr — 0.01; Nd — 0.01; Sm — 0.005; Eu — 0.005; Gd — 0.01; Tb — 0.005; Dy — 0.01; Ho — 0.005; Er — 0.01; Tm — 0.005; Yb — 0.01; Lu — 0.005. Анализ подготовленных растворов проводился на приборах «ELAN-6100 DRC» и «Agilent 7700» с использованием компьютерной программы обработки данных «TOTALQUANT».

Результаты исследования

Отложения Ишлинского грабена располагаются в зоне Юрюзано-Зюраткульского разлома (западный склон Южного Урала), образуя полосу субмеридионального простиранья прослеженную на расстоянии около 15 км. Породы изучались как в естественных обнажениях, так и по скважинам двух разрезов: Улуелгинского и Кудашмановского (рис. 1).

Терригенные отложения представлены серицит-кварцевыми алевролитами, алевросланцами и углеродсодержащими сланцами. Основным отличием углеродсодержащих сланцев от алевролитов и алевросланцев является пелитовая размерность зерен кварца и присутствие углеродистого вещества, образующего послойно-полосовидные, шнурообразные и комковатые выделения. Содержание углерода в сланцах колеблется от 1.1 до 2.6 мас. %. Анализ термограмм показал, что углерод характеризуется сложным фазовым составом, включающим асфальтиты, керит, оксикерит и скрытокристаллический графит [Ковалев и др., 2013; Ковалев, Ковалев, 2017].

Магматические породы образуют вулканоплутоническую ассоциацию, которая представлена интрузивными телами габбродолеритов и эффузивами основного состава с небольшим количеством пирокластического материала. Породы метаморфизованы и в крайней степени изменения представляют собой карбонат-эпидот-альбит-

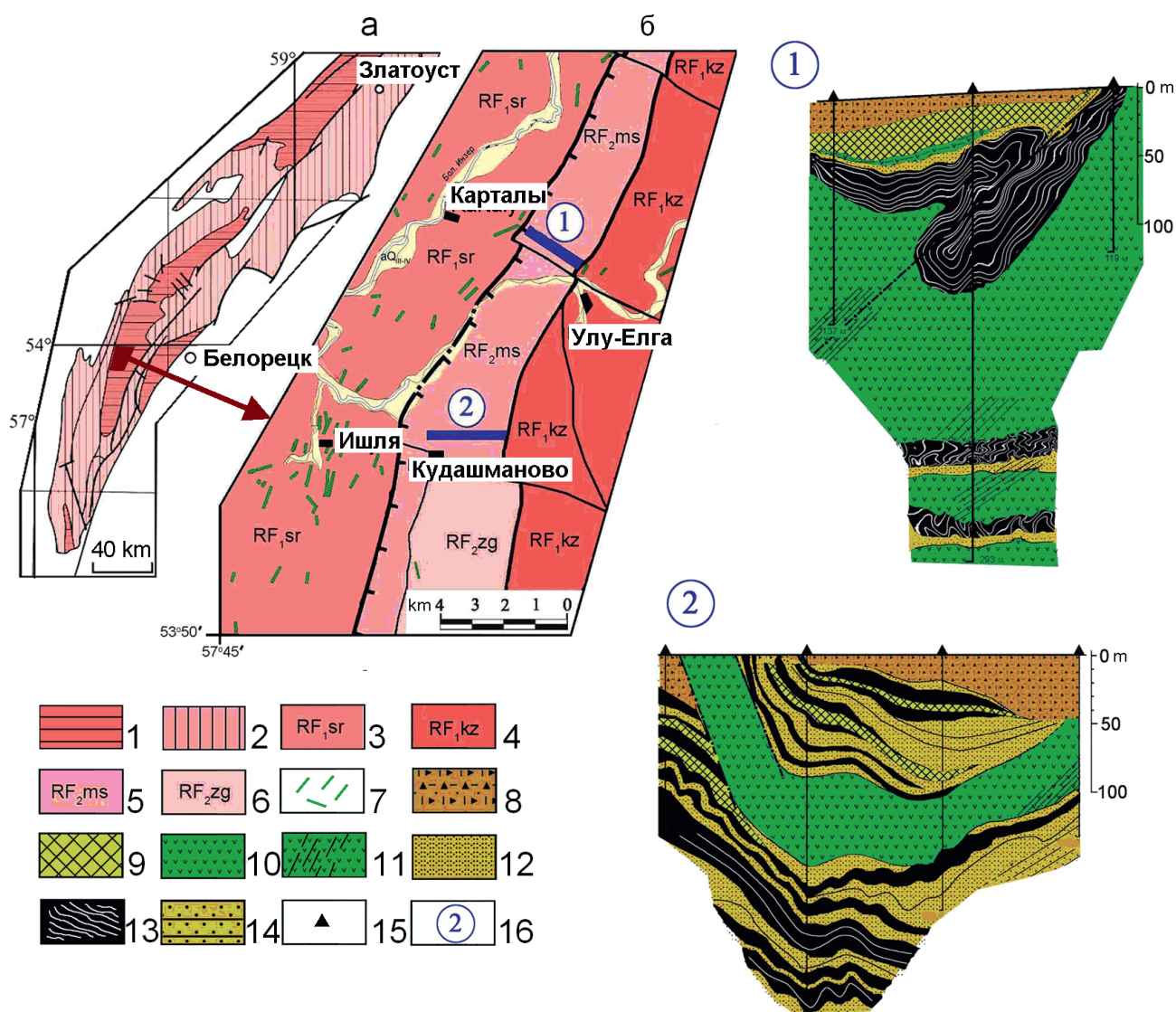


Рис. 1. Геологические схемы западного склона Южного Урала, Ишлинского грабена и его разрезы

Условные обозначения: а — схема западного склона Южного Урала; б — схема Ишлинского грабена и его разрезы; 1–6 разновозрастные отложения (1 — нижнерипейские нерасчлененные; 2 — среднерипейские нерасчлененные; 3 — суранская свита; 4 — кызылташская свита; 5 — машакская свита; 6 — зигальгинская свита); 7 — дайки габбро-долеритов; 8 — кора выветривания, осыпи; 9 — эпидот-кварц-хлоритовые сланцы; 10 — магматические породы основного состава; 11 — зоны расщепления; 12 — серицит-кварцевые алевросланцы; 13 — углеродсодержащие сланцы; 14 — кварцитопесчаники; 15 — скважины; 16 — номера разрезов (1 — Улуелгинский; 2 — Кудашмановский).

Fig. 1. Geological maps of the western slope of the Southern Urals, Ishlinsky graben and its sections

Legend: a — diagram of the western slope of the Southern Urals; б — diagram of the Ishlinsky graben and its sections; 1–6 sediments of different ages (1 — Lower Riphean undifferentiated; 2 — Middle Riphean undifferentiated; 3 — Suran suite; 4 — Kyzyltash suite; 5 — Mashak suite; 6 — Zigalga suite); 7 — gabbro-dolerite dikes; 8 — weathering crust, scree; 9 — epidote-quartz-chlorite schists; 10 — igneous rocks of basic composition; 11 — shear zones; 12 — sericite-quartz siltschists; 13 — carbonaceous shales; 14 — quartzite sandstones; 15 — wells; 16 — section numbers (1 — Uluelga; 2 — Kudashmanovo).

кварц-хлоритовые и эпидот-альбит-кварц-амфиболовые сланцы, трассирующие тектонические нарушения внутри габбро-долеритового тела. В верхней части разреза присутствуют жилы альбититов состоящие из ксеноморфных зерен альбита, крупночешуйчатого мусковита, небольшо-

го количества кварца и хлорита [Ковалев и др., 2013; Ковалев, Ковалев, 2017].

В породах широко развиты окварцевание и карбонатизация, которые выражаются в наличие прожилков различной формы и переменной мощности. Минеральный состав карбонатов раз-

нообразен, установлены практически все их разновидности: кальцит, доломит, магнезит, сидерит и анкерит. Для всех пород разрезов характерна значительная дислоцированность, которая в сланцах выражается в смятии, гофрировании, микробуднаже, завальцовке кварцевых обломков с мозаичным, облачным погасанием и формированием текстур пластического течения.

Физико-химические параметры метаморфизма реконструируются по составам метаморфогенных минералов. Наиболее высокотемпературным этапом является амфиболизация магматических пород ($T = 500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = \sim 3\text{--}5$ кбар), а процесс формирования светлых слюд в терригенных породах реализовывался при $P \sim 2\text{--}10$ кбар, — $T = 390\text{--}490\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Ковалев и др., 2018]. Состав флюидной фазы определен методом термокриометрии флюидных включений в кварце из жильных тел, приуроченных к углеродсодержащим сланцам. В результате изучения установлено присутствие первичных и вторичных двухфазных (жидкость+газ) включений с различными температурами гомогенизации. Для первых характерны высокие температуры гомогенизации ($180\text{--}408\text{ }^{\circ}\text{C}$), высокая соленость (13.4–16.3 экв. NaCl) с одинаковым составом солей, представленных $\text{CaCl}_2 + \text{NaCl}$. Кроме того, в 2 образцах установлено присутствие метана. Во вторичных включениях температура гомогенизации гораздо ниже ($121\text{--}248\text{ }^{\circ}\text{C}$), а состав солей соответствует FeCl_2 , то есть при метаморфизме химический состав флюида изменялся от $\text{CaCl}_2 + \text{NaCl}$ до FeCl_2 [Ковалев и др., 2016].

Содержание и распределение РЗЭ в метаморфизованных терригенных породах характеризуются определенной спецификой, которая заключается в том, что максимальное их количество концентрируется в сульфидизированных разновидностях^{1*}. Так, количество РЗЭ в углеродсодержащих сланцах составляет 5.3–12.2 г/т, в сульфидизированных разновидностях — 121.57–150.1 г/т и в алевросланцах с переменным количеством сульфидов — 46.92–85.96 г/т. 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. 2а, б). Таким образом, перераспределение РЗЭ и сульфидной минерализации взаимосвязаны и являются результатом метаморфического преобразования пород.

¹ * Сульфидизированные разновидности — породы, в которых количество сульфидов составляет более 30–50% от объема породы.

Возраст машакской свиты, к которой относятся породы Ишлинского грабена, соответствует среднему рифею (1380.3 ± 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]. 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.

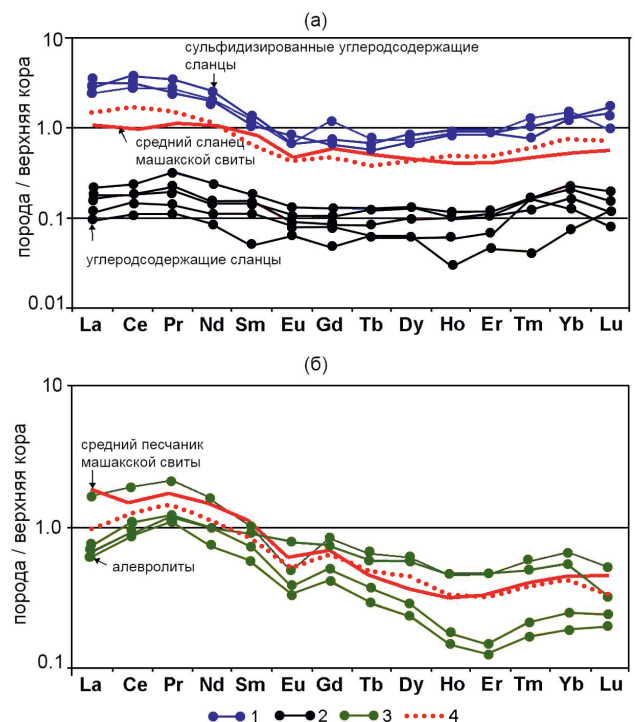


Рис. 2. Диаграммы нормализованных содержаний РЗЭ в метаморфизованных терригенных породах Ишлинского грабена

Верхняя кора по [Rudnick, Gao, 2003]. Средние составы глинистого сланца и песчаника машакской свиты по [Маслов и др., 2020].

Условные обозначения: 1 — сульфидизированные углеродсодержащие сланцы; 2 — углеродсодержащие сланцы; 3 — алевролиты; 4 — средние составы сланцев и алевролитов соответственно

Fig. 2. Diagrams of normalized REE contents in metamorphosed terrigenous rocks of the Ishlinsky graben

Upper crust according to [Rudnick, Gao, 2003]. Average compositions of shale and sandstone of the Mashak suite according to [Maslov et al., 2020].

Legend: 1 — sulfidized carbonaceous shales; 2 — carbonaceous shales; 3 — siltstones; 4 — average compositions of shales and siltstones, respectively

В результате проведенных исследований в породах грабена установлено широкое распространение редкоземельной минерализации, представленной алланитом- (Ce), алланитом- (La), РЗЭ-содержащим эпидотом, монацитом- (Ce), монацитом- (Nd), ксенотимом- (Y), чевкинитом- (Ce), фергусонитом- (Nb) и редкоземельными фторкарбонатами (бастнезитом- (Ce); гидроксилбастнезитом- (Ce), паризитом- (Ce); синхизитом- (Ce)). Морфология РЗЭ-минералов очень разнообразна. Они представлены единичными ксеноморфными и слабоограниченными 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.

Сульфиды являются самой распространенной группой рудных минералов в характеризующих породах. Их количество в среднем составляет 0.1–0.5 мас. %, повышаясь в горизонтах углеродсодержащих сланцев до 10–15 мас. %, где они образуют прожилково-вкрапленную минерализацию. Взаимоотношения сульфидов с вмещающими породами разнообразны: иногда они представлены субидiomорфными и идиоморфными порфиобластовыми кристаллами, образуют субсогласно смятые прожилки и выделения линзовидной формы, а также выполняют микрокливажные трещины. Мощность сульфидизированных зон переменчива (от 2–3 м до 15 м) и, в общем, соответствует мощности горизонтов углеродсодержащих пород. Представлены они пиритом, пирротинном, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, пентландитом, борнитом, ковеллином, молибденитом, сфалеритом, кадмиевым сфалеритом, гринокитом и цинковым гринокитом.

При детальном изучении минералогии пород обнаружены сульфидно-редкоземельные па-

рагенезисы, не описанные в мировой литературе (рис. 3). На рис. 3а приведена микрофотография срастания пирита с монацитом- (Ce). Необычность ситуации заключается в том, что создается впечатление замещения (с растворением) пирита монацитом- (Ce). При этом монацит- (Ce) имеет сложный химический состав (табл. 1), в котором в качестве примесей присутствуют в значимые количества сера (0.45–4.57 мас. %) и хлор (0.3–1.99 мас. %). Наличие последнего подтверждает выводы о том, что при метаморфизме транспортирующим РЗЭ агентом является хлор [Migdisov, Williams-Jones, 2014]. Состав пирита металлодефицитен ($Fe_{0.91} Ni_{0.04} S_{2.05}$; $Fe_{0.95} Ni_{0.01} S_{2.04}$; $Fe_{0.96} S_{2.04}$), в качестве примеси в нем установлен никель (0.29–1.78 мас. %).

На рис. 3б изображен более сложный парагенезис, состоящий из алланита- (Ce), ксенотима- (Y) и пирита, то есть силикат РЗЭ + фосфат РЗЭ + сульфид. Алланит- (Ce) насыщен микроскопическими выделениями пирита разнообразной формы, распространенными по всей площади минерала, что выражается в его химическом составе (содержание серы в алланите- (Ce) составляет 3.84–8.03 мас. %). Состав пирита стехиометричен ($Fe_{1.00} S_{2.00}$; $Fe_{0.99} Ni_{0.01} S_{2.00}$). В качестве примесей в нем также установлен никель (0.31 мас. %) (табл. 2, 3).

Обсуждение результатов

Как показано выше, генетические условия формирования сульфидных и редкоземельных минеральных ассоциаций в углеродсодержащих сланцах Ишлинского грабена в целом обусловлены метаморфизмом, который реализовывался в условиях стрессового давления. Р — Т параметры образования сульфидной минерализации, рассчитанные ранее, свидетельствуют о том, что пирит-пирротинная ассоциация сформировалась в температурном интервале ≈ 330 –500 °С,

Таблица 1. Химический состав монацита из парагенезиса монацит+пирит (мас. %)
Table 1. Chemical composition of monazite from the monazite+pyrite paragenesis (wt. %)

№ п/п	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	P ₂ O ₅	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Cl	SO ₂	Сумма
1	0.22	2.07	6.42	30.04		9.92	31.46	3.45	12.27	1.71		1.99	0.45	98.01
2		1.94	6.30	30.96		10.83	31.27	3.24	12.09	1.49		0.53	1.35	99.47
3	0.68	1.64	5.16	26.55	0.97	10.22	28.00	3.05	10.95	1.63	0.95	0.15	4.57	94.36
4	0.48	1.26	5.84	31.01		11.31	29.22	3.27	12.26	1.93	0.99	0.30	2.15	99.70
5	0.49	1.18	6.00	30.18		9.71	31.12	3.56	12.21	1.56	1.13		2.85	100.00

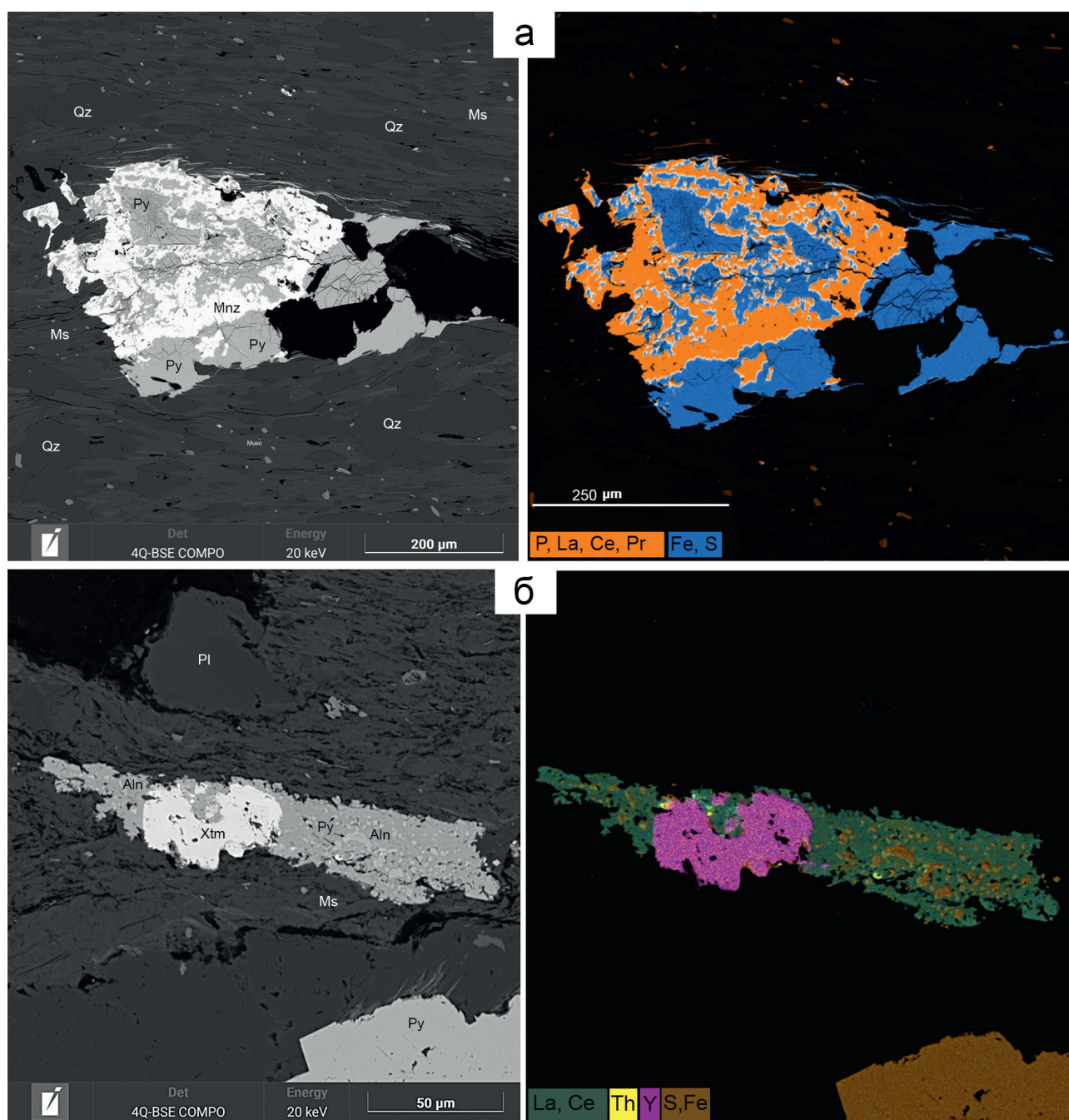


Рис. 3. Микрофотографии парагенезисов сульфид + редкоземельный минерал из пород Ишлинского грабена
Условные обозначения: All — алланит; Mnz — монацит; Xnt — ксенотим; Py — пирит; Ms — мусковит; Pl — плагиоклаз; Qz — кварц.

Fig. 3. Microphotographs of sulfide + rare earth mineral assemblages from the Ishlinsky graben rocks

Legend: All — allanite; Mnz — monazite; Xnt — xenotime; Py — pyrite; Ms — muscovite; Pl — plagioclase; Qz — quartz

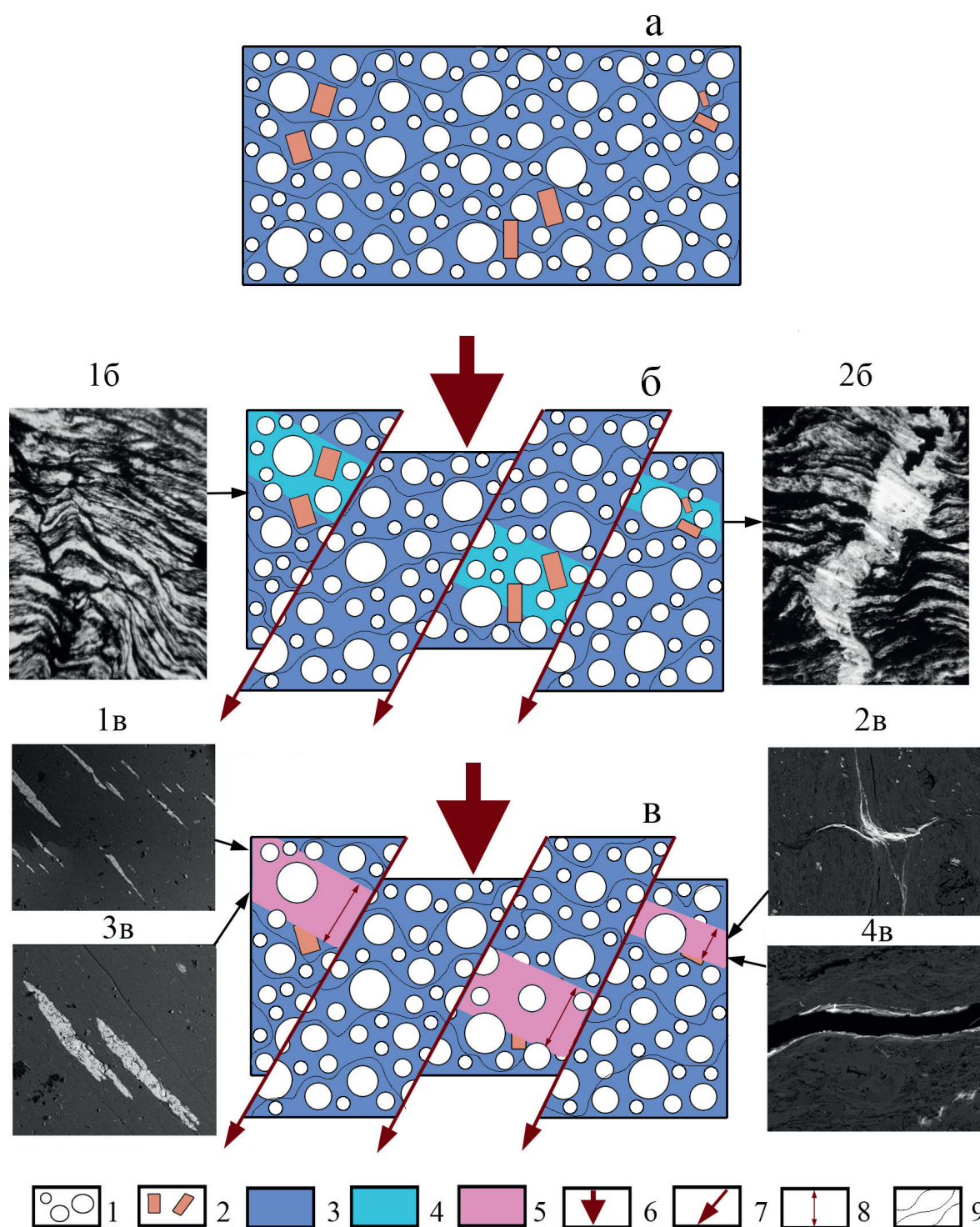


Рис. 4. Упрощенная схема формирования «экзотических» минеральных парагенезисов

Условные обозначения: 1 — кварцевые обломки различной степени окатанности; 2 — кластогенные минералы РЗЭ; 3 — флюидная фаза; 4 — трещины отрыва (зоны разгрузки давления); 5 — флюидная фаза в неравновесном состоянии; 6 — направление стрессового давления; 7 — сколовые трещины; 8 — направление раскрытия трещин отрыва; 9 — пликативные деформации. Пояснения в тексте.

Fig. 4. Simplified diagram of the formation of "exotic" mineral parageneses

Legend: 1 — quartz fragments of varying degrees of roundness; 2 — clastogenic REE minerals; 3 — fluid phase; 4 — tensile fractures (pressure relief zones); 5 — fluid phase in a nonequilibrium state; 6 — stress pressure direction; 7 — shear fractures; 8 — tensile fracture opening direction; 9 — plicative deformations. Explanations in the text.

Таблица 2. Химический состав алланита из парагенезиса ксенотим+алланит+пирит (мас. %)
Table 2. Chemical composition of allanite from the paragenesis xenotime+allanite+pyrite (wt. %)

№ п/п	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	SO ₂	Сумма
1	17.72	14.81	10.01	25.26	5.66	10.96	1.27	4.64	1.00	8.03	99.37
2	17.69	13.20	10.40	29.54	5.87	11.31	1.24	4.96	0.90	3.84	98.96

Таблица 3. Химический состав ксенотима из парагенезиса ксенотим+алланит+пирит (мас. %)
Table 3. Chemical composition of xenotime from the paragenesis xenotime+allanite+pyrite (wt. %)

№ п/п	P ₂ O ₅	Y ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	U ₂ O ₅	Сумма
1	35.59	45.96	1.60	4.42	1.04	4.36		4.59		0.88	98.45
2	34.90	46.24	1.34	4.06	1.19	4.48		4.82		1.47	98.50
3	35.82	47.57	1.26	4.20	1.16	4.89	1.10	4.94			100.94
4	36.32	45.75	0.80	3.69	1.48	5.03	0.95	5.64	0.95		100.61

а поздняя — пирит-халькопиритовая ассоциация при $T \leq 245$ °С. При этом давление соответствовало 6–7 кбар [Ковалев и др., 2013].

Опираясь на приведенный выше материал можно предложить качественную модель формирования «экзотических» сульфидно-редкоземельных парагенезисов. Начальный, относительно высокотемпературный и низкobarный ($T = 500\text{--}600$ °С и $P = \sim 3\text{--}5$ кбар) этап характеризовался формированием высококонцентрированного флюида и пликативными деформациями субстрата (рис. 4а) на фоне амфиболитизации магматических пород. Следующий этап — относительно низкотемпературный высокobarный ($P \sim 10$ кбар, — $T = 390\text{--}490$ °С).

Процессы минералообразования в субстрате под воздействием стрессового давления характеризуются определенной спецификой. Проведенными ранее экспериментальными исследованиями [Ставрогин, 1969; Томашевская, 1966] было показано, что возникающие трещинные деформации в упругохрупких системах представляют собой змейковые комбинации микроплощадок сдвига и отрыва, а происходящие по сдвиговым площадкам подвижки приводят к раскрытию микрополостей (зон локальной разгрузки давления) вдоль трещин отрыва (см. рис. 4: б, 1б, 2б). В этих зонах происходит разгрузка высококонцентриро-

ванного флюида (см. рис. 4: в, 1в — 4в). При этом химический состав флюидной фазы не является гомогенным в объеме всего метаморфизируемого субстрата. Его локальная неоднородность обусловлена первичным минеральным составом пород. В частности, в не метаморфизованных глинистых сланцах и алевролитах рифея центральной части Башкирского мегантиклинория были описаны мелкие (до 0.5–0.7 мм) эллипсоидальные стяжения рабдофана [Сердюченко, 1985].

Таким образом, в зонах разгрузки давления, в случае наличия в них редкоземельных минералов первичной (кластогенной) природы, реализуется локальное обогащение флюида РЗЭ. Так как снятие давления в локальной зоне делает систему резко неравновесной, то в этом объеме возможна совместная кристаллизация «несовместимых» минералов (сульфид+фосфат РЗЭ и сульфид+фосфат РЗЭ+силикат РЗЭ), образующих сложные сростания.

Список литературы

Алексеев А. А., Ковалев С. Г., Тимофеева Е. А. Бело-рецкий метаморфический комплекс. Уфа: ИГ УНЦ РАН, ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2009. 208 с.

Алексеев А. А., Тимофеева Е. А. Редкоземельно-фосфатная минерализация в метатерригенных толщах рифея Башкирского мегантиклинория // Геологический сборник. 2007. № 6. С. 251–257. http://ig.ufaras.ru/File/E2007/30_01_07.pdf

Беккер Ю. Р. Литологические особенности олигомиктовых пород девона алмазонасных районов Южного Урала // Геология и полезные ископаемые Урала и Тургай. Л.: ВСЕГЕИ, 1960. С. 73–102.

Орлова М. Т. Акцессорные минералы древних немых толщ западного склона Южного Урала // Геология и полезные ископаемые Урала. Л.: ВСЕГЕИ, 1960. С. 31–43.

Ковалев С. Г., Ковалев С. С., Высоцкий С. И. Th — REE минерализация в докембрийских породах Башкирского мегантиклинория: видовое разнообразие и генезис // Записки Российского минералогического общества. 2017. № 5. С. 59–79.

Ковалев С. Г., Высоцкий И. В., Мичурин С. В., Ковалев С. С. Геология, минералогия и металлогеническая специализация углеродсодержащих толщ Улуелгинско-Кудашмановской зоны (западный склон Южного Урала) // Литосфера. 2013. № 3. С. 67–88.

Ковалев С. С., Мичурин С. В., Канипова З. А. Термобарогеохимия жильного кварца из углеродсодержащих сланцев Башкирского мегантиклинория // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2016. № 22. С. 28–37.

Ковалев С. С., Пучков В. Н., Ковалев С. Г., Высоцкий С. И. Первые данные о количественной оценке параметров вендского метаморфизма восточной части Башкирского мегантиклинория // ДАН. 2018. Т. 483. № 3. С. 301–305.

Маслов А. В., Гареев Э. З., Подковыров В. Н., Ковалев С. Г. Литогеохимия обломочных пород машакской свиты (западный склон Южного Урала): в поисках «камуфлированной» пирокластике // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 1. С. 121–145. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.107>

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

Сердюченко Д. П. Метаосадочные монациты на последовательных этапах метаморфических преобразований // Проблемы экзогенного и метаморфогенного поро- и рудообразования. М.: Наука, 1985. С. 187–197.

Ставрогин А. Н. Исследования предельных состояний и деформаций горных пород // Известия АН СССР. Физика Земли. 1969. № 12. С. 3–17.

Томашевская И. С. Определение скоростей продольных волн в образцах горных пород при испытании на сжатие до разрушения при различном всестороннем давлении // Проблемы механики горных пород. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1966. С. 407–412.

Migdisov A., Williams-Jones A. Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by uronine-bearing aqueous liquids // Mineralium Deposita. 2014. V. 49. No. 8. P. 987–997. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0554-z>

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. 2003. V. 3. P. 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>

References

Alekseev A. A., Kovalev S. G., Timofeeva E. A. (2009) Beloretsk metamorphic complex. Ufa: IG UC RAS, DesignPoligraphService LLC. 208. p. (In Russian).

Alekseev A. A., Timofeeva E. A. (2007) Rare earth-phosphate mineralization in metaterrigenous strata of the Riphean Bashkir meganticlinorium. Geological collection. (6), 251–257. http://ig.ufaras.ru/File/E2007/30_01_07.pdf (In Russian).

Becker Yu. R. (1960) Lithological features of Devonian oligomictic rocks in the diamond-bearing regions of the Southern Urals. Geology and minerals of the Urals and Turgai. L.: VSEGEI. 73–102. (In Russian).

Orlova M. T. (1960) Accessory minerals of ancient barren strata on the western slope of the Southern Urals. Geology and mineral resources of the Urals. L.: VSEGEI. 31–43. (In Russian).

Kovalev S. G., Kovalev S. S., Vysotsky S. I. (2017) Th — REE mineralization in Precambrian rocks of the Bashkir meganticlinorium: species diversity and genesis. Notes of the Russian Mineralogical Society. (5), 59–79. (In Russian).

Kovalev S. G., Vysotsky I. V., Michurin S. V., Kovalev S. S. (2013) Geology, mineralogy, and metallogenic specialization of carbonaceous strata of the Uluelginsko-Kudashmanovskaya zone (western slope of the Southern Urals). Lithosphere. (3), 67–88. (In Russian).

Kovalev S. S., Michurin S. V., Kanipova Z. A. (2016) Thermobarogeochemistry of vein quartz from carbonaceous shales of the Bashkir mega-anticlinorium. Geology. Bulletin of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Belarus. (22), 28–37. (In Russian).

Kovalev S. S., Puchkov V. N., Kovalev S. G., Vysotsky S. I. (2018) First data on the quantitative assessment of the parameters of Vendian metamorphism in the eastern part of the Bashkir mega-anticlinorium. DAN. 483 (3), 301–305. (In Russian).

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. (In Russian). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.107>

Puchkov V. N. (2010) Geology of the Urals and the Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics, and metallogeny). Ufa: DesignPoligrafServis. 280. p. (In Russian).

Serdyuchenko D. P. (1985) Metasedimentary monazites at successive stages of metamorphic transformations. Problems of exogenous and metamorphogenic rock and ore formation. Moscow: Nauka. 187–197. (In Russian).

Stavrogin A. N. (1969) Studies of limit states and deformations of rocks. Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth. (12), 3–17. (In Russian).

Tomashevskaya I. S. (1966) Determination of longitudinal wave velocities in rock specimens during compression tests to failure under different uniform pressures. *Problems of Rock Mechanics*. Alma-Ata: Publishing House of the Kazakh SSR Academy of Sciences. 407–412. (In Russian).

Migdisov A., Williams-Jones A. (2014) Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by uron-

bearing aqueous liquids. *Mineralium Deposita*. 49 (8), 987–997. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0554-z>

Rudnick R. L., Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. 3, 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>

Сведения об авторах:

Ковалев Сергей Григорьевич, доктор геол.-минерал. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа, Россия, kovalev@ufaras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6753-7484>

Ковалев Сергей Сергеевич, кандидат геол.-минерал. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-1780-6580>

About the authors:

Kovalev Sergei Grigor'evich, Dr. Sci. (Geol., Mineral.), Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russia, kovalev@ufaras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6753-7484>

Kovalev Sergei Sergeevich, Ph. D. (Geol., Mineral.), Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1780-6580>

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 09.02.2026; принята к публикации 02.03.2026

The article was submitted 12.01.2026; approved after reviewing 09.02.2026; accepted for publication 02.03.2026