

## Гидротермальные гематитовые жилы и брекчии с редкоземельной минерализацией аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский регион)

©2023 А. Н. Соловьева<sup>✉</sup>, Д. Р. Зозуля, Е. Э. Савченко

*Геологический институт КНЦ РАН, ул. Ферсмана, д. 14,  
184209, Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация*

### Аннотация

*Введение:* В статье приведены результаты геологических и минералогических исследований впервые обнаруженных железоксидных проявлений (гематитовые жилы и брекчии в песчаниках терской свиты) с попутной редкоземельной минерализацией на Терском побережье (Кольский регион) в восточной части аметистового месторождения Мыс Корабль.

*Методика:* Для исследования морфологии, внутреннего строения и составов минералов использовались методы электронно-зондового микроанализа и растровой электронной микроскопии.

*Результаты и обсуждение:* Были выделены три разновидности оксидных минералов железа (титаномагнетит, пористый и пластинчатый гематит). Титаномагнетит встречается исключительно во вмещающих песчаниках и по своим размерам сопоставим с породообразующими минералами (кварц, полевой шпат), что указывает на аллотигенную природу минерала. Диагенетический пористый гематит выполняет интерстиции между кварцем и полевым шпатом в роли цемента во вмещающих песчаниках. Гидротермальный пластинчатый гематит слагает гематитовые жилы и брекчии. REE оксиды, фосфаты и карбонаты в жилах, брекчиях и околорудных песчаниках представлены лопаритом-(Ce), монацитом-(Ce), паризитом-(Ce), бастнезитом-(Ce). Другие акцессорные минералы - барит, рутил. Предполагается гидротермально-метасоматическое образование гематитовых проявлений, связанное с пострифейской тектоно-термальной активизацией Кандалакшского авлакогена. По текстурно-структурным характеристикам и минеральному составу железоксидные проявления восточной части месторождения Мыс Корабль сходны с классическим железоксидно-золото-медным типом месторождения (IOCG) – Олимпик Дэм (Австралия), что позволяет предположить их сходный механизм формирования.

*Заключение:* Железо-насыщенные растворы формировались при растворении аутигенного пористого гематита во вмещающих песчаниках терской свиты гидротермальными флюидами. Диагенетический пористый гематит имеет повышенное содержание Ti, вероятно, в результате растворения аллотигенного титаномагнетита. Вследствие тектонической разгрузки формировались (мезо)эпитермальные жилы и брекчии почти мономинерального гематитового состава. Гидротермальный гематит имеет характерную пластинчатую морфологию, отличается отсутствием Ti и примесями W и V.

**Ключевые слова:** гематитовые жилы и брекчии; песчаники; терская свита; месторождение Мыс Корабль; Кандалакшский авлакоген; IOCG.

*Источник финансирования:* Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0053 и гранта Российского научного фонда № 22-17-20002 (<https://rscf.ru/project/22-17-20002/>).



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Соловьева Анна Николаевна, e-mail: a.soloveva@ksc.ru

Для цитирования: Соловьева А. Н., Зозуля Д. Р., Савченко Е. Э. Гидротермальные гематитовые жилы и брекчии с редкоземельной минерализацией аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский регион) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2023. № 4. С. 75–90. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/75-90>

### Введение

Гидротермальные месторождения жильного типа распространены вблизи крупномасштабных линейных элементов земной коры, рифтовых долин или несогласий чехла фундамента [1–8]. Гидротермальные флюорит-гематитовые и барит-гематитовые жилы представляют собой относительно редкий жильный тип, который иногда сочетается с более распространенными флюорит-барит-кварц-карбонатными жилами, содержащими полиметаллическую минерализацию.

Магматические (в том числе, с гидротермальной переработкой) флюорит-гематитовые месторождения довольно широко распространены в разных геологических обстановках. Например, такие проявления встречаются в гранитном магматическом комплексе Бушвельд, Вергеног [9, 10], карбонатитовом месторождении Баян-Обо [11], и месторождении Олимпик Дам, связанном с брекчиями [12, 13]. Лишь несколько предыдущих исследований были посвящены флюорит-гематитовой (например, жилы Бизиэль в Пиренеях [14] и рудного района Шварцвальд в Юго-Западной Германии [15]) и барит-гематитовой (месторождение Ахмадабад, Иран [16]) минерализации в гидротермальных месторождениях жильного типа, и, следовательно, их генезис слабо изучен.

С другой стороны, гематитовые брекчии являются заметными компонентами железокислотно-медно-золотых с попутными U и REE месторождений IOCG-типа. Такие месторождения формируются в результате комплексных магмато-генно-метасоматических и гидротермальных процессов [17].

Кварцевые (в том числе аметистовые), флюоритовые и баритовые жилы и штокверки гидротермального генезиса в песчаниках терской свиты (месторождение Мыс Корабль) хорошо известны и изучены в районе Терского побережья на юге Кольского полуострова [18–21]. Анхимономинеральные гематитовые жилы и брекчии были обнаружены и описаны на месторождении совсем недавно [22, 23]. Их уникальность заключается не только в необычном составе, но и в том, что такие жилы в мире ранее были не известны. Настоящая статья посвящена минералогии этих проявлений и низкотемпературным гидротермальным процессам их образования.

### Геологическая позиция

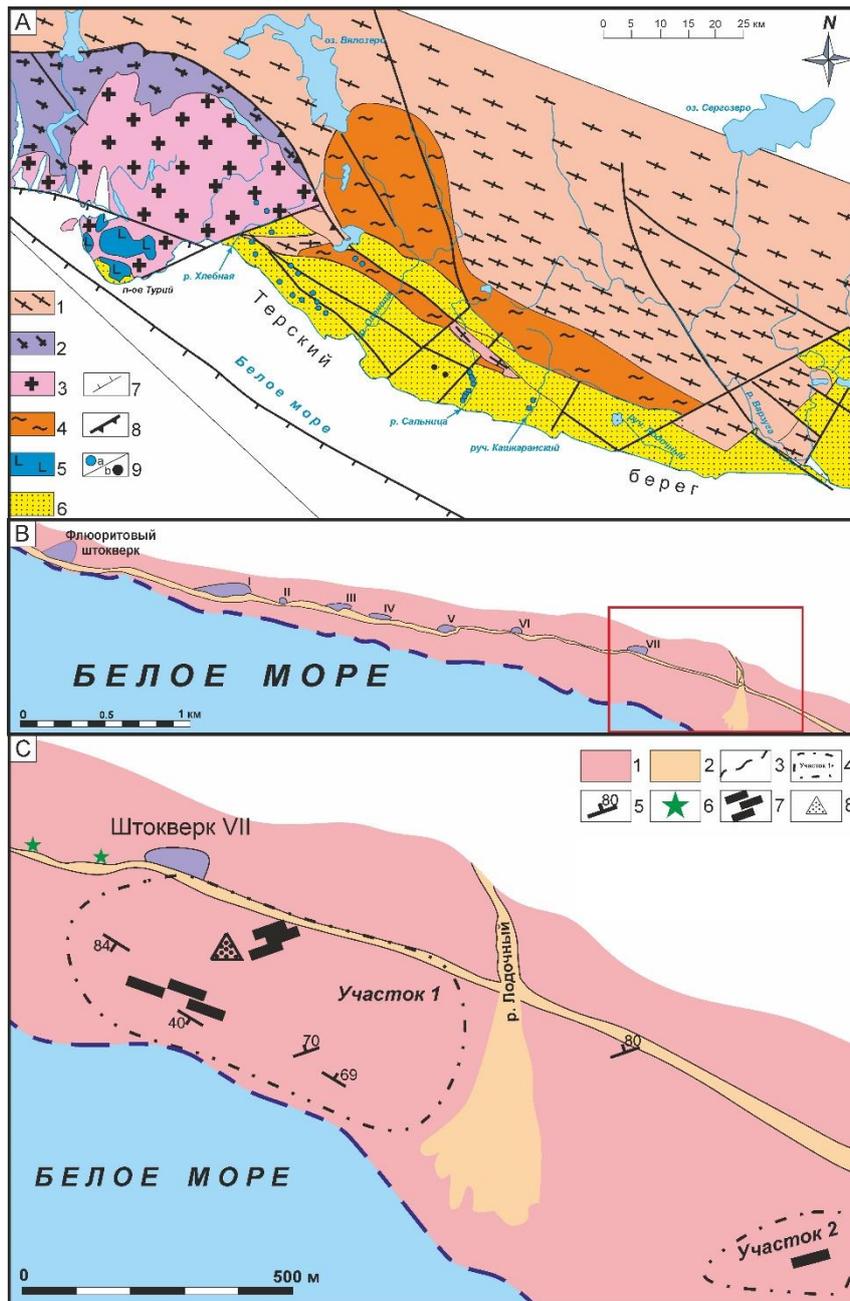
В южной части Кольского региона вдоль Терского побережья от мыса Турий до р. Чапома обнажаются породы терской свиты, которые трансгрессивно перекрывают архейские породы кольско-беломорского комплекса и палеопротерозойские гранитоиды

умбинского комплекса (рис. 1а). Терская свита сложена преимущественно среднесортированными аркозовыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами, которые приобретают характерный красно-коричневый цвет за счет развития гематитового пленочного цемента вокруг зерен кварца и полевого шпата. Для толщи характерно линзовидное строение. Различные литотипы пород (аргиллиты, алевролиты, песчаники) образуют линзы протяженностью 50–100 м при мощности до 3 м. Они залегают субгоризонтально с падением 5–10° слоев в южном направлении. Мощность свиты составляет около 500 м. Для отложений характерны различные осадочные текстуры – симметричная рябь волнения, трещины усыхания, косослоистые серии, свидетельствующие о мелководных условиях их формирования. Резкая фациальная изменчивость пород терской свиты, выражающаяся в уменьшении фаций алевролитов и аргиллитов в западном направлении, также является показателем мелководного генезиса пород свиты.

Отложения терской свиты по комплексу микрофосфориллий относятся к среднему рифею [24]. Определение изотопного возраста, выполненного калий-аргоновым методом для двух образцов алевролитов из отложений терской свиты, дали значения  $1263 \pm 40$  млн лет и  $1080 \pm 40$  млн лет [25]. Изотопный U-Pb возраст цирконов из песчаников терской свиты составляет  $1145 \pm 20$  млн лет [26], что подтверждает среднерифейский возраст терской свиты.

Отложения терской свиты слагают северный борт Кандалакшского авлакогена, заложение и развитие которого происходило в рифее. По структурно-текстурным и литологическим характеристикам породы терской свиты хорошо коррелируются с другими рифейскими отложениями авлакогенов, широко распространенных на Восточно-Европейской платформе. Вероятнее всего в позднепалеозойское время породы терской свиты испытали тектоно-термальную активизацию [27, 28].

Месторождение Мыс Корабль располагается в южной части Кольского региона на берегу Белого моря рядом с р. Лодочный и представляет собой серию штокверков (рис. 1б), приуроченных к крупному сбросу, ограничивающему с севера Кандалакшский авлакоген. Было выделено 8 участков, прослеживающиеся почти на 3 км и сложенных преимущественно гидротермальными проявлениями кварцевых, баритовых и флюоритовых жил пространственно связанных с трещиноватостью и брекчированием вмещающих пород. Последовательность формирования гидротермальных тел месторождения представляется следующей [20, 21]: 1 – кристаллизация раннего флюорита; 2 – формирование кварца происходило в несколько стадий (ранняя высокотемпературная ( $>400^\circ\text{C}$ ), «аметистовая» ( $200\text{--}300^\circ\text{C}$ ), низкотемпературная ( $160^\circ\text{C}$  и ниже с переотложением кварца); 3 – кристаллизация барита и поздних генераций флюорита. Кроме выявленных в коренном залегании вышеперечисленных жил, в пределах месторождения обнаружены крупные (до 3 м в диаметре)



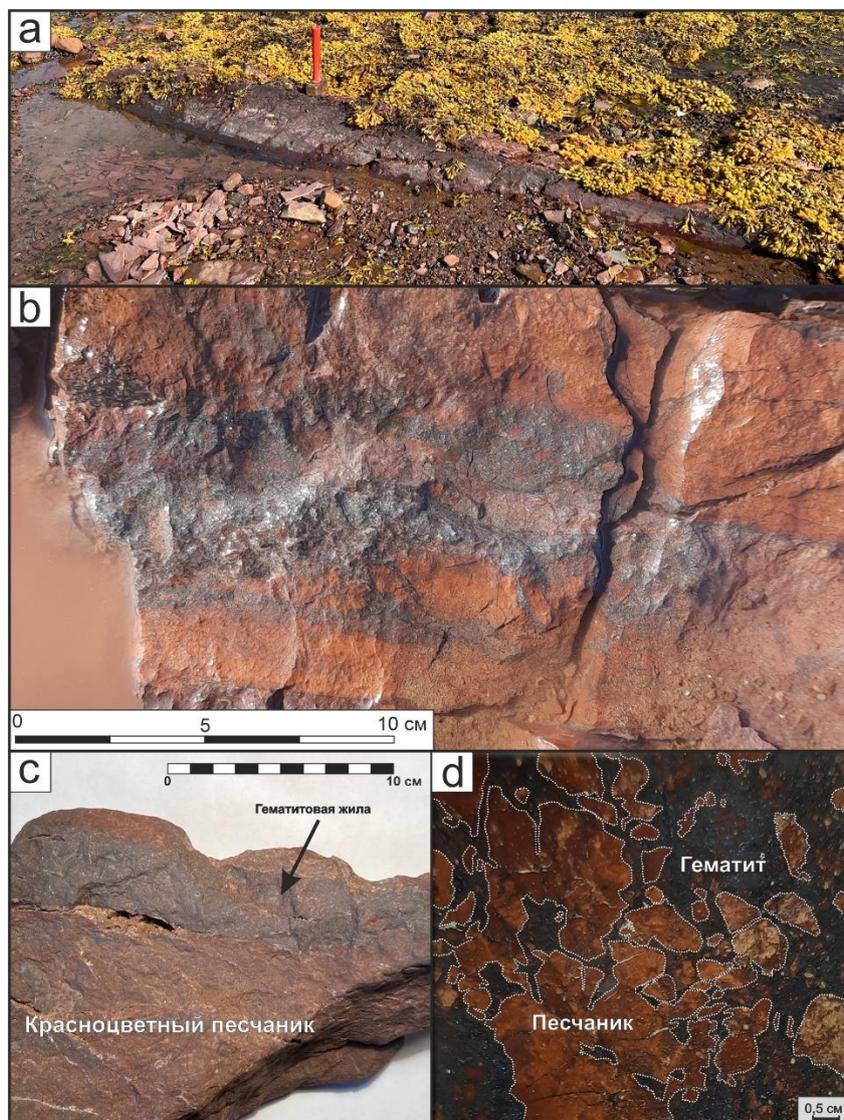
**Рис. 1.** (А) Геологическая схема Терского берега с использованием [26]: 1 – неархейский – палеопротерозойский гранитогнейсовый комплекс; 2 – палеопротерозойские кислые гранулиты порьегубского комплекса; 3 – палеопротерозойские (1.9 млрд лет) порфиридные гранитоиды умбинского комплекса; 4 – неархейский мигматит-гранитовый комплекс; 5 – среднепалеозойский комплекс щелочных ультрамафитов; 6 – терригенные образования терской свиты; 7 – сбросы; 8 – надвиги, взбросы; 9 – среднепалеозойские трубки взрыва (а – мелилитовые, б – кимберлитовые). (В) Геологическая карта-схема месторождения Мыс Корабль с показанными флюоритовыми и кварцевыми (амethystовыми) штокверками; выделен детальный участок Рисунка 1с. (С) Геологическое строение восточной части месторождения Мыс Корабль: 1 – красноцветные песчаники терской свиты; 2 – аллювиально-пляжевые отложения; 3 – граница береговой линии; 4 – участки проявлений гематитовых жил и брекчий (включают ореолы рассеяния их обломков); 5 – простирание и падение трещиноватости в песчаниках; 6 – участки проявления медной минерализации (ковеллин, халькозин и малахит); 7 – гематитовые жилы (вне масштаба); 8 – участки гематитовых брекчий (вне масштаба).

**[Fig. 1. (A)** Schematic geological map of the Tersky coast (based on [26]): (1) – Neoproterozoic-Paleoproterozoic granite-gneiss complex; (2) – Paleoproterozoic acidic granulites of the Porjya Guba complex; (3) – Paleoproterozoic (1.9 Ga) porphyry granitoids of the Umba complex; (4) – Neoproterozoic migmatite-granite complex; (5) – Middle Paleozoic complex of alkaline ultramafic rocks; (6) – terrigenous formations of the Tersky formation; (7) – normal faults; (8) – thrusts, reverse faults; (9) – Middle Paleozoic explosion pipes (a – melilitite, b – kimberlite). (B) Schematic geological map of the Cape Korabl' deposit with fluorite and quartz (amethyst) stockworks shown; detailed area of Figure 1c is highlighted. (C) Geological structure of the eastern part of the Cape Korabl': (1) – red sandstones of the Tersky formation; (2) – alluvial-beach deposits; (3) – coastline boundary; (4) – areas of occurrences of hematite veins and breccias (include halos of their fragments' dispersion); (5) – strike and dip of fracturing in sandstones; (6) – areas of copper mineralization (covellite, chalcocite and malachite); (7) – hematite veins (out of scale); (8) – hematite breccias (out of scale).]

глыбы, сложенные крупнокристаллическим кальцитом и второстепенным баритом. Глыбы содержат обломки песчаников терской свиты. В целом, гидротермальные проявления месторождения Мыс Корабль можно отнести к флюорит-барит-кварц-карбонатному минеральному типу. Отметим также наличие небогатой, но важной медной минерализации, представленной халькозином, ковеллином и развивающимся по нему малахитом. Минерализация приурочена к участкам развития поздних кварцевых жил.

В пределах месторождения недавно были впервые обнаружены проявления гематитовых жил и брекчий [22, 23], которые обнажаются в приливно-отливной зоне среди красноцветных песчаников в восточной части месторождения (рис. 1с). Жилы формируют кусты, реже представлены отдельными телами, и имеют мощность от 2 до 20 см. Протяженность их по

простирацию варьирует от 2 до 15 метров. Стоит отметить, что жилы приурочены к двум системам трещин в песчаниках: северо-восточного и субширотного простирания (рис. 1с). При этом, жилы субширотного простирания имеют резкие контакты с вмещающими породами и, в целом, большую мощность (рис. 2 а, с). Жилы северо-восточного простирания чаще представлены кустами, маломощные, с постепенными переходами в песчаники (рис. 2b). Зоны брекчирования развиты вблизи кустов жил северо-восточного простирания и имеют видимые площади выхода на поверхность около 1–2 м<sup>2</sup>, состоящие из угловатых обломков песчаников размеров 1–10 см и гематитового цемента (рис. 2d). Часто гематитовые жилы и брекчии секутся прожилками кварца, в некоторых случаях образуются миароловые пустоты, заполненные щетками кварца.



**Рис. 2.** Фотографии коренных обнажений и образцов пород: *a* – резкие контакты с вмещающими песчаниками; *b* – контакты с постепенным переход жил в песчаники; *c* – гематитовая жила во вмещающем песчанике; *d* – фото приполированного образца гематитовой брекчии.

[**Fig. 2.** Photographs of outcrops and rock samples: (*a*) – sharp contacts with host sandstones; (*b*) – contacts with a gradual transition of veins into sandstones; (*c*) – hematite vein in the host sandstone; (*d*) – photo of polished sample of hematite breccia.]

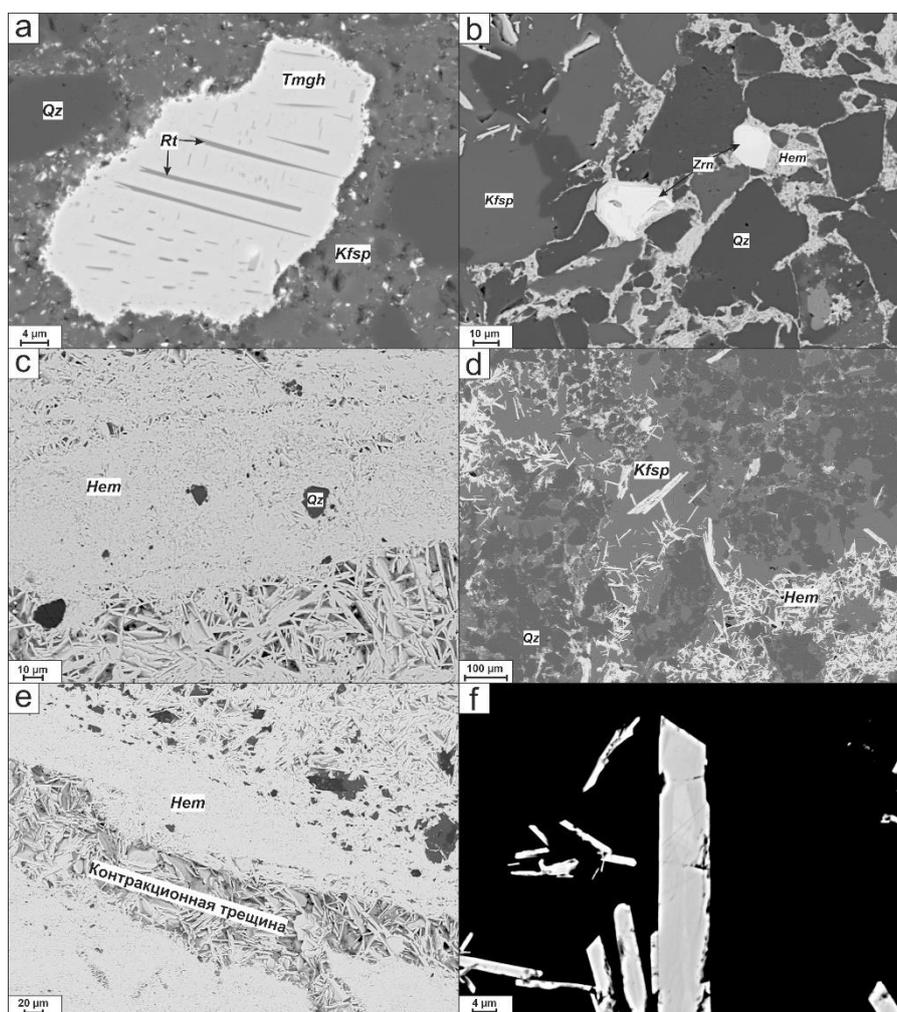
### Методика

Изучение минералов гематитовых жил и брекчий во вмещающих песчаниках проводилось на оптическом микроскопе AxioPlan в отраженном и проходящем поляризованном свете. Для исследования морфологии оксидных минералов железа (титаномагнетит, пористый и пластинчатый гематит), а также других минералов использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) LEO-1450 (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты), оснащенный энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Bruker XFlash 5010. Химический анализ пластинчатого гематита выполнен на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca MS-46 (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты). Химический анализ редкоземельных минералов, барита, апатита, рутила выполнен на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO-1450 (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты). Эталоны и аналитические линии: AlK $\alpha$  – YPO<sub>4</sub>; SiK $\alpha$  – волластонит; KК $\alpha$  – ортоклаз; TiK $\alpha$  – лоренцит; VK $\alpha$  – металл; MnK $\alpha$  – MnCO<sub>3</sub>; FeK $\alpha$  – гематит; WL $\alpha$  – LiPr(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

### Минералогия гематитовых жил и брекчий

В ходе исследования гематитовых жил и брекчий по морфологическим признакам были выделены три разновидности оксидных минералов железа.

*Первая разновидность* встречается в виде угловатых, неправильных зерен титаномагнетита, по размерам сопоставимых с породообразующими минералами песчаников (кварц, полевой шпат). Многие зерна имеют характерные структуры распада. В lamellaх присутствуют рутил и/или ильменит (рис. 3а). Титаномагнетит имеет, вероятней всего, аллотигенную природу. На стадии диагенеза титаномагнетит подвергался изменениям. Наблюдаются неровные, «изъеденные» края (рис. 3а), которые свидетельствуют о его частичном растворении. Титаномагнетит имеет следующий состав: SiO<sub>2</sub> – 0.47 мас.%; K<sub>2</sub>O – 0.06 мас.%; TiO<sub>2</sub> – 7.26 мас.%; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.05 мас.%; MnO – 0.25 мас.%; FeO<sub>общ.</sub> – 92.44 мас.%.



**Рис. 3.** Морфология и внутреннее строение титаномагнетита, пористого и пластинчатого гематита (BSE): *a* – титаномагнетит с lamellaми рутила; *b* – морфология и структура пористого гематита во вмещающем песчанике; *c* – скопление мелкокристаллического пластинчатого гематита из жилы; *d* – пластинчатый гематит во вмещающем околожильном песчанике; *e* – контракционная трещина, сложенная относительно более крупными зернами гематита; *f* – зональное строение гематита, связанное с различным содержанием W и V. Qz – кварц; Kfsp – калиевый полевой шпат; Hem – гематит; Tmgh – титаномагнетит; Rt – рутил; Zrn – циркон.

[Fig. 3. Morphology and internal structure of titanomagnetite, porous and lamellar hematite (BSE): (a) – titanomagnetite with lamellae of rutile; (b) – morphology and structure of porous hematite in the host sandstone; (c) – accumulation of fine-crystalline lamellar hematite from a vein; (d) – lamellar hematite in the host wall-vein sandstone; (e) – contraction crack composed of relatively larger grains of hematite; (f) – zonal structure of hematite, associated with different contents of W and V. Qz – quartz; Kfsp – potassium feldspar; Hem – hematite; Tmgh – titanomagnetite; Rt – rutile; Zrn – zircon.]

Вторая разновидность представлена гематитом во вмещающих песчаниках с пористой структурой и/или скоплениями зерен, возможно с примесью других минералов. Гематит выполняет интерстиции между кварцем и полевым шпатом, цементируя их (рис. 3b). Его образование происходило на стадии диагенеза. Для пористого гематита отмечены повышенные (до 2 мас. %) содержания TiO<sub>2</sub> [22].

Третья разновидность представляет собой мелкокристаллические пластинчатые зерна гематита, которые слагают основную массу жил и брекчий. На различных участках можно увидеть тенденцию изменения размеров зерен пластинчатого гематита. Так на участках скопления только одного гематита размеры зерен составляют несколько микрон (рис. 3с), в то время как на участках сложенных как гематитом, так и другими породообразующими минералами (кварц, калиевый полевой шпат) размер зерен увеличивается вплоть до 100 мкм (рис. 3d). Помимо этого, пластинчатый гематит заполняет контракционные трещины, где характеризуется более крупным размером (рис. 3е), что предполагает его свободный рост в пустотах трещин остывания. Для пластинчатого гематита обнаружено нерегулярное присутствие значительных примесей WO<sub>3</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (табл. 1). При более детальном изучении некоторых вытянутых зерен наблюдается зональность (рис. 3f), с увеличением содержания W и V в краевых частях зерен. Это свидетельствует о том, что гидротермальный раствор, из которого кристаллизовался гематит, изменял свой состав (железистый – на ранних стадиях, с примесью некоторых литофильных и сидерофильных элементов – на более поздних).

Следует отметить, что характерный пластинчатый гематит также встречается локально в виде редких отдельных зерен в обломках песчаников брекчий и в околожилных песчаниках. Это предполагает, что гидротермальный высокожелезистый раствор мог проникать через поры во вмещающие породы.

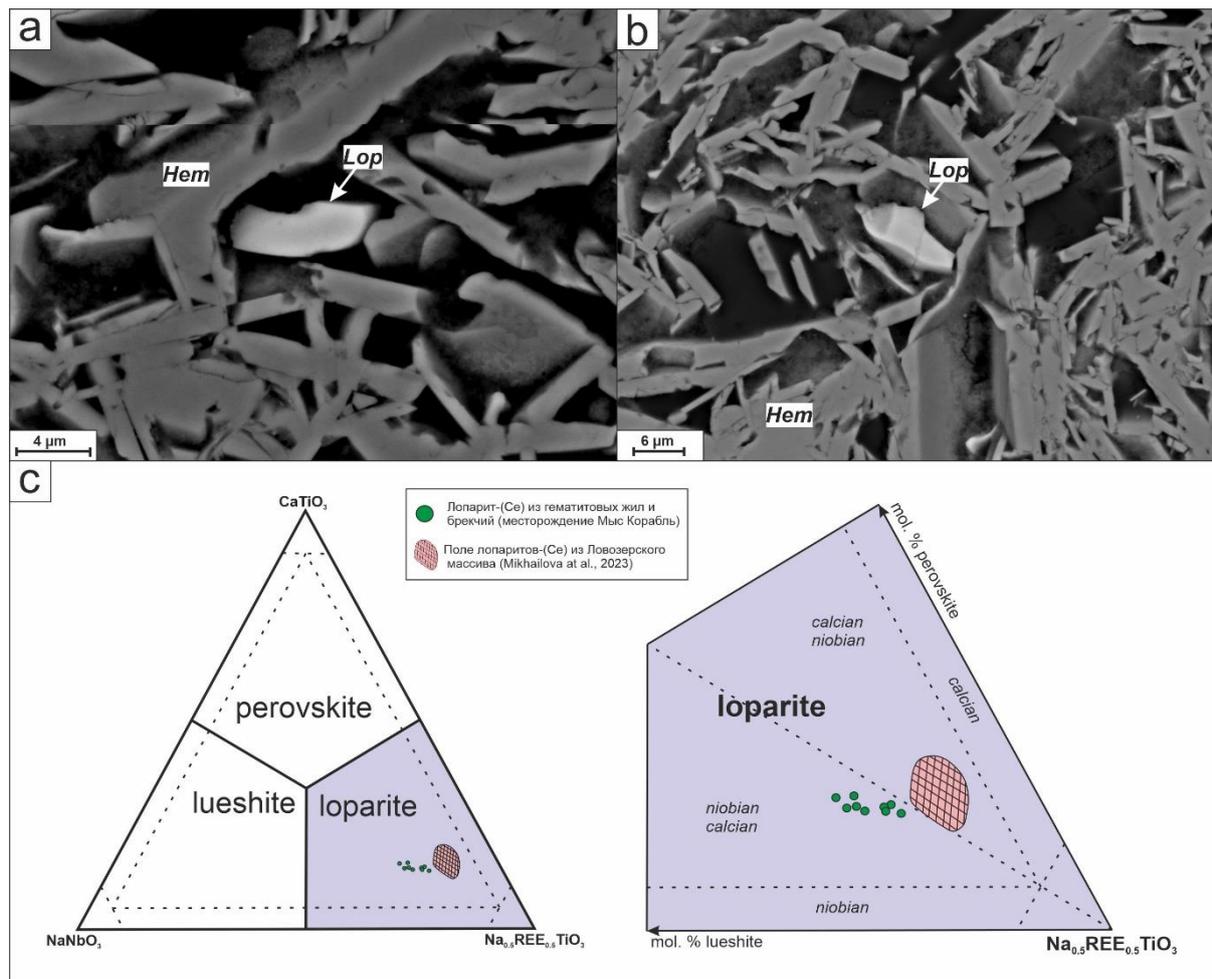
Важной особенностью гематитовых жил и брекчий является присутствие акцессорной редкоземельной минерализации, включающей лопарит-(Ce), монацит-(Ce), паризит-(Ce), бастнезит-(Ce).

Лопарит-(Ce) является одним из самых распространенных редкоземельных минералов. Он образует отдельные зерна размером до 5 мкм изометричной формы в интерстициях между пластинчатым гематитом (рис. 4 а, b). Представительные анализы лопарита-(Ce) представлены в табл. 2. Он имеет промежуточный состав между четырьмя конечными членами ряда лопарит Na(REE)Ti<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (58–64 %), луешит NaNbO<sub>3</sub> (15–20 %),

Табл. 1. Представительные анализы пластинчатого гематита (мас. %) [Table 1. Representative analyzes of lamellar hematite (wt.%)]

№ точки анализа [№ analysis points]	3-1	12-1	12-3	13-2	16	17	22-1	19-1	26	2-2b	4-1a	8-2a	8-3a	1-1a	1-2a	1-4a	1-6a	2-1a	3b	4-1a	7-2a	8a
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.46	0.12	0.25	0.70	0.46	0.40	0.85	0.70	0.73	0.18	0.17	-	0.27	0.19	0.19	0.47	0.28	0.48	0.67	0.52	0.32	0.43
SiO <sub>2</sub>	0.43	-	0.17	0.28	-	0.33	0.18	0.24	0.42	0.19	0.26	0.20	0.54	0.44	0.35	0.42	0.28	0.29	0.40	0.32	0.30	0.62
K <sub>2</sub> O	0.12	0.07	0.06	0.03	-	0.03	-	0.09	0.04	-	0.08	0.04	0.04	0.05	0.05	0.03	-	-	0.02	-	-	0.03
TiO <sub>2</sub>	0.33	0.17	-	0.03	-	-	0.15	-	-	-	0.07	0.07	0.06	0.12	0.07	0.08	-	-	-	-	0.03	0.07
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-	-	0.05	0.81	0.07	0.08	-	0.19	0.05	-	-	-	0.04	0.14
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	98.73	99.76	99.00	98.19	99.52	98.67	98.66	98.23	98.73	99.73	99.07	98.88	99.09	98.01	99.34	98.23	98.77	99.03	99.18	98.26	99.12	98.00
WO <sub>3</sub>	-	0.14	-	0.36	-	0.36	0.11	0.27	0.18	-	-	-	-	0.89	0.15	0.54	0.54	0.15	0.06	-	0.46	0.15
Сумма [Total]	100.0	100.26	99.49	99.71	99.97	99.79	99.94	99.53	100.13	100.10	99.70	100.00	100.07	99.78	100.14	99.96	99.92	99.95	100.33	99.10	100.27	99.43

Примечание: Химический анализ пластинчатого гематита проводился на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca MS-46 (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты). Пределы обнаружения: W – 0,05%, V – 0,02%. [Note: Chemical analysis of lamellar hematite was carried out on a Cameca MS-46 electron probe microanalyzer (GI KSC RAS, Apatity). Detection limits: W – 0.05%, V – 0.02%.]



**Рис. 4.** (a, b) Выделения лопарита между зернами пластинчатого гематита (BSE): Hem – гематит; Lop – лопарит-(Ce). (c) Систематика CaTiO<sub>3</sub>—Na(REE)Ti<sub>2</sub>O<sub>6</sub>—NaNbO<sub>3</sub> для лопарита-(Ce) из гематитовых жил и брекчий. Поле лопаритов-(Ce) по [29].  
**[Fig. 4.** (a, b) Loparite occurrences between grains of lamellar hematite (BSE): Hem – hematite; Lop – loparite-(Ce). (c) CaTiO<sub>3</sub>—Na(REE)Ti<sub>2</sub>O<sub>6</sub>—NaNbO<sub>3</sub> systematic for loparite-(Ce) from hematite veins and breccias. Field of loparites-(Ce) according to [29].]

**Табл. 2.** Типичные составы лопарита-(Ce) в гематитовых жилах и брекчиях, мас. %  
**[Table 2.** Representative compositions of loparite-(Ce) in hematite veins and breccias, wt.%]

№ анализа [№ analysis]	2–2	2с	7–1	13–1	17–1	20–1	31–1
1	2	3	4	5	6	7	8
Na <sub>2</sub> O	9.33	11.00	9.46	9.13	8.67	8.56	8.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.39	-	-	-	0.17	0.16
SiO <sub>2</sub>	-	1.20	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0.13	0.08	-	-	-	0.09
CaO	4.00	3.68	4.08	4.41	4.54	4.30	4.32
TiO <sub>2</sub>	34.54	35.24	38.16	36.87	37.07	38.76	39.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.08	9.59	4.29	3.85	5.25	3.91	3.44
SrO	3.64	3.27	4.17	3.16	3.17	3.00	2.94
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	13.54	10.67	12.88	14.18	13.12	11.13	10.86
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.61	7.25	8.34	7.34	7.44	7.85	7.75
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.44	15.83	15.12	15.03	15.68	17.06	16.97
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.10	-	0.55	0.86	0.81	0.94	0.91
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10	3.24	2.81	2.80	3.04	3.39	3.51
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	-	-	0.01	0.05	0.08	0.16
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	-	0.07	0.06	0.07	0.12	0.18
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.91	-	0.96	0.95	0.51	0.42	0.61
ThO <sub>2</sub>	0.80	1.12	1.45	1.36	0.90	1.30	1.25
<b>Сумма</b> <b>[Total]</b>	99.19	102.61	102.42	100.01	100.32	100.99	100.36

Продолжение Табл. 2  
[Continued Table 2]

Расчёт формул по O=3 [Calculation of formulas on O=3]							
1	2	3	4	5	6	7	8
Na	0.52	0.61	0.51	0.50	0.47	0.46	0.45
Al	-	0.01	-	-	-	0.01	0.01
Si	-	0.03	-	-	-	-	-
Ca	0.12	0.11	0.12	0.13	0.14	0.13	0.13
Ti	0.74	0.76	0.79	0.78	0.78	0.82	0.83
Fe <sup>3+</sup>	0.13	0.21	0.09	0.08	0.11	0.08	0.07
Sr	0.06	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
Nb	0.17	0.14	0.16	0.18	0.17	0.14	0.14
La	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Ce	0.15	0.17	0.15	0.15	0.16	0.17	0.17
Pr	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Nd	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
Ta	0.01	-	0.01	0.01	-	-	-
Th	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Члены ряда (мол. %) [Members (mol. % )]							
лопарит [loparite]	60	63	59	58	60	64	64
луешит [lueshite]	20	16	18	20	18	15	15
перовскит [perovskite]	13	13	13	14	15	14	14
таусонит [tausonite]	7	6	7	6	6	5	5
ThTi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1	2	2	2	1	2	2

перовскит CaTiO<sub>3</sub> (13–15 %), таусонит SrTiO<sub>3</sub> (5–7 %), относится к подвиду ниобиево-кальциевый лопарит и отличается по составу от лопарита из Ловозерского массива [29], где он представлен кальциево-ниобиевой разновидностью (рис. 4с).

*Монацит-(Ce)* образует скопления спутано-волокнистых агрегатов размером до 10 мкм в сегрегациях гематита (в том числе, пластинчатого) во вмещающих околожильных песчаниках (рис. 5 а, b).

*Паризит-(Ce)* был обнаружен во вмещающих песчаниках между кварцем и полевым шпатом в виде мелких пластинчатых субидiomорфных зерен, размером до 5 мкм, которые находятся в тесной ассоциации с пластинчатым гематитом и рутилом (рис. 5с). Состав минерала, следующий: CO<sub>2</sub> (расч.) – 44.48 мас.%; F – 5.08 мас.%; SiO<sub>2</sub> – 0.70 мас.%; CaO – 12.01 мас.%; FeO – 1.88 мас.%; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.15 мас.%; LREE – 34.80 мас.%; ThO<sub>2</sub> – 0.28 мас.%.

*Бастнезит-(Ce)* образует небольшие единичные зерна размером до 4 мкм субидiomорфной формы, заполняя пустоты между пластинчатым гематитом (рис. 5d). Для данного минерала получен следующий состав: SiO<sub>2</sub> – 0.45 мас.%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.12 мас.%; SO<sub>3</sub> – 0.18 мас.%; CaO – 0.18 мас.%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5.98 мас.%; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.15 мас.%; LREE – 79.37 мас.%. Минерал не содержит фтора и, по-видимому, относится к гидроксильной разновидности.

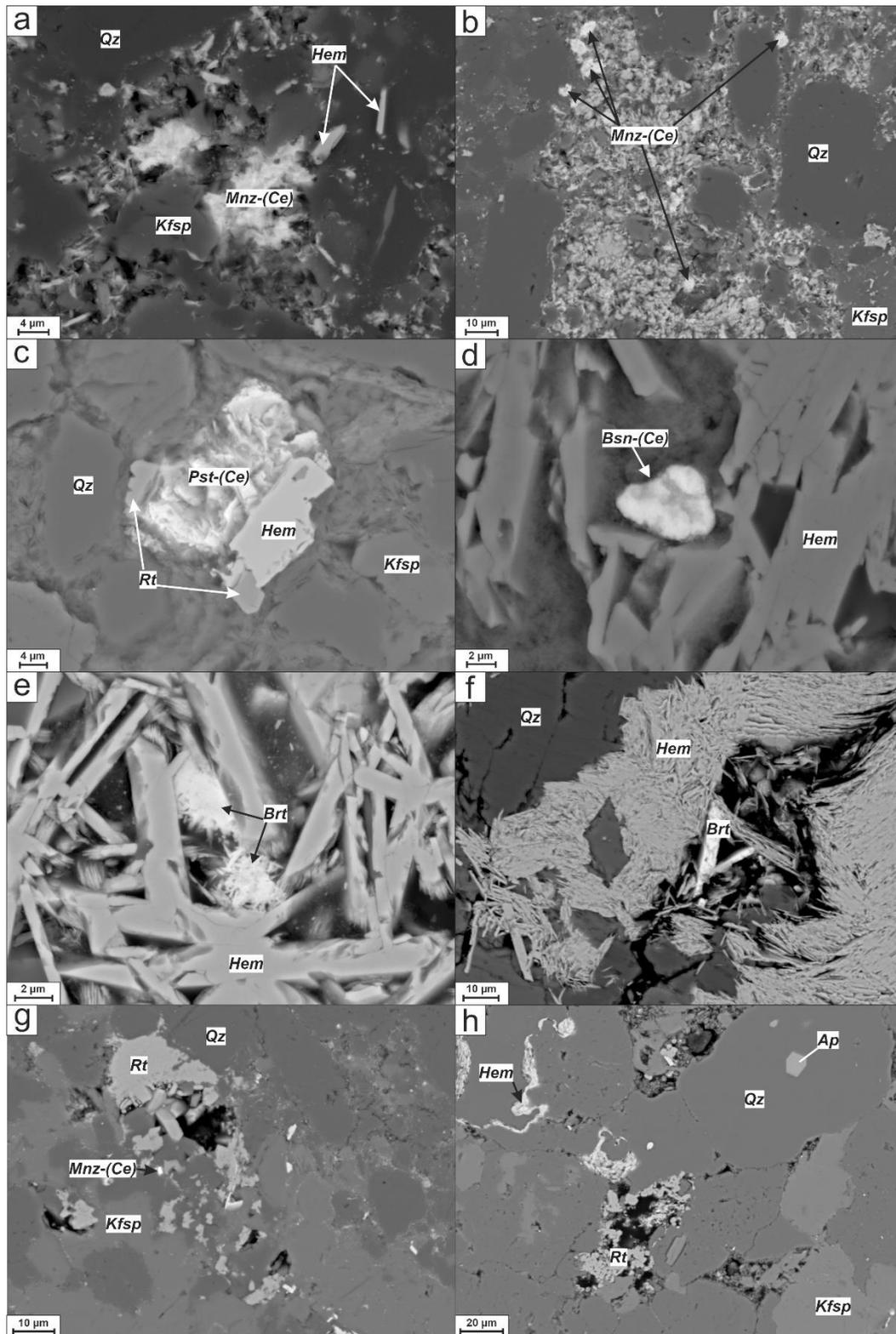
Немаловажным является присутствие в жилах и брекчиях *барита*. Так можно наблюдать мелкокристаллические спутано-волокнистые скопления размером 5–10 мкм, состоящих из вытянутых иголок размером до 1

мкм. Скопления находятся в интерстициях между зернами пластинчатого гематита (рис. 5е). В других случаях барит образует вытянутые зерна размером до 15–20 мкм в контракционных трещинах в ассоциации с крупными зернами пластинчатого гематита (рис. 5f).

*Рутил* (возможно, его низкотемпературная модификация – брукит) обнаружен во вмещающих околожильных песчаниках. Минерал образует две морфологические разновидности: первая – скопления сферулоподобных (рис. 5g, h) зерен, которые заполняют интерстиции или пустоты между кварцем и полевым шпатом, вторая – изометричные зерна, находящиеся в тесной ассоциации с пластинчатым гематитом и новообразованным паризитом-(Ce) (рис. 5с). Рутил имеет следующий химический состав: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.27 мас.%; SiO<sub>2</sub> – 0.84 мас.%; K<sub>2</sub>O – 0.05 мас.%; CaO – 0.11 мас.%; TiO<sub>2</sub> – 95.38 мас.%; FeO – 1.41 мас.%; ZrO<sub>2</sub> – 0.82 мас.%; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.16 мас.%.

#### Происхождение гематитовых жил и брекчий

Для образования изученных железоксидных проявлений на основании геолого-минералогических исследований предлагаются два возможных процесса. Первый, метасоматический, проявляется в формировании вкрапленников пластинчатого гематита во вмещающем песчанике под воздействием межпоровых флюидов (возможно, также образуются прожилки с неровными и постепенными контактами). Со вторым гидротермальным процессом связано формирование самих жил и брекчий из селективно железистых растворов с резкими контактами во вмещающих песчаниках.



**Рис. 5.** Парагенезис и морфология REE карбонатов, фосфатов и аксессуарных минералов (BSE): *a, b* – монацит-(Ce); *c* – паризит-(Ce); *d* – бастнезит-(Ce); *e* – скопления мелкокристаллического барита в интерстициях пластинчатого гематита; *f* – вытянутое зерно барита в контракционной трещине с гематитом; *g, h* – рутил сферулоподобной формы в интерстициях/пустотах между кварцем и полевым шпатом. *Qz* – кварц; *Kfsp* – калиевый полевой шпат; *Hem* – гематит; *Rt* – рутил; *Ap* – апатит; *Brt* – барит; *Mnz-(Ce)* – монацит-(Ce); *Pst-(Ce)* – паризит-(Ce); *Bsn-(Ce)* – бастнезит-(Ce).

[**Fig. 5.** Paragenesis and morphology of REE carbonates, phosphates and accessory minerals (BSE): (*a, b*) – monazite-(Ce); (*c*) – parisite-(Ce); (*d*) – bastnäsite-(Ce); (*e*) – accumulations of fine-crystalline barite in the interstices of lamellar hematite; (*f*) – elongated grain of barite in a contraction crack with hematite; (*g, h*) – spherule-like rutile in interstices/voids between quartz and feldspar. *Qz* – quartz; *Kfsp* – potassium feldspar; *Hem* – hematite; *Rt* – rutile; *Ap* – apatite; *Brt* – barite; *Mnz-(Ce)* – monazite-(Ce); *Pst-(Ce)* – parisite-(Ce); *Bsn-(Ce)* – bastnäsite-(Ce).]

Уникальный состав исследованных жил и брекчий месторождения Мыс Корабль не соответствует ни одному из вещественно-генетических типов в классификациях гидротермальных рудных месторождений [30–32]. При этом, их пространственная связь с кварц-флюорит-барит-карбонатной минерализацией позволяет предполагать температуры образования как мезотермальные и/или эпитеермальные [21]. Так, для гидротермальных флюорит-гематитовых жил рудного района Шварцвальд получены температуры гомогенизации газовой-жидких включений в интервале 150–155°C [15], а для гидротермального барит-гематитового месторождения Ахмадабад – 200–220°C [16]. Поскольку брекчии и жилы в терских песчаниках имеют сингенетическую природу, то температуры их образования близки.

В результате проведенных исследований можно предложить следующую генетическую модель железо-оксидных проявлений месторождения Мыс Корабль. На начальном этапе во время рифтогенеза осадки при диагенезе превращались в осадочные породы, сцементированные пористым гематитом. Для последнего характерно повышенное содержание титана, возможно, за счет перекристаллизации аллотигенного титаносодержащего магнетита в окислительных условиях. Далее при тектонической активизации Кандалакшского авлакогена, происходила перекристаллизация и/или частичное растворение пористого гематита. В результате его переотложения формировались вкрапленные руды новообразованного гематита в песчаниках. В отличие

от аутигенного пористого гематита, он имеет низкие содержания титана или не содержит его и повышенные W и V. Эта стадия характеризуется дальнейшим повышением активности кислорода в межпоровых гидротермальных растворах и привнесом в систему сидерофильных и литофильных элементов (Ba, W, REE, V). Стоит отметить, что менее «подвижный» титан осаждался в виде интерстиционного рутила (возможно, его низкотемпературной модификации – брукита). Далее в ходе тектонической разгрузки межпоровый железо-насыщенный раствор мигрирует в проницаемые зоны и образует жилы из пластинчатого гематита почти без кварца и калиевого полевого шпата. Кроме того, вероятно, гидротермальный раствор был обогащен редкоземельными элементами, что привело к кристаллизации REE фосфатов, карбонатов, оксидов.

Важно отметить, что для пластинчатого гематита на ранних стадиях имеет стехиометрический состав, а на поздних стадиях минерал содержит примеси W и V. В результате тектонической разгрузки и понижения давления в системе железо-насыщенный гидротермальный раствор вскипал, следствием чего явилось образование брекчий. При остывании жил и брекчий появлялись контракционные трещины, заполненные более крупнозернистым гематитом и кварцем. Дальнейшая циркуляция гидротермальных растворов по новообразованным жилам и брекчиям приводила к выщелачиванию и формированию миароловых пустот с щетками кварца. Последовательность минералообразования показана на рис. 6.

Стадия/минерал [Stage/mineral]	Седиментогенез [Sedimentogenesis]	Диагенез [Diagenesis]	Метасоматическая переработка песчаника [Metasomatic processing of sandstone]	Гидротермальная 1 [Hydrothermal 1]	Гидротермальная 2 [Hydrothermal 2]	Гипергенез [Hypergenesis]
Титаномagnetит [Titanomagnetite]						
Гематит пористый [Porous hematite]						
Гематит пластинчатый [Lamellar hematite]						
Монацит-(Ce) [Monazite-(Ce)]						
Лопарит-(Ce) [Loparite-(Ce)]						
REE карбонаты [REE carbonates]						
Барит [Barite]						
Рутил [Rutile]						
Кварц [Quartz]						
Халькозин [Chalcocite]						
Ковеллин [Covellite]						
Малахит [Malachite]						

Рис. 6. Схема последовательности выделения исследованных минералов в железооксидных проявлениях и вмещающих песчаниках месторождения Мыс Корабль. Гидротермальная стадия разделена на две подстадии: основная гидротермальная-1 (с формированием самих гематитовых жил и брекчий) и поздняя гидротермальная-2 (контракционные трещины, кварцевые прожилки и миароловые пустоты).

[Fig. 6. Scheme of the formation sequence of the studied minerals in the iron oxide occurrences and host sandstones of the Cape Korabl' deposit. The hydrothermal stage is divided into two sub-stages: main hydrothermal-1 (formation of hematite veins and breccias themselves) and late hydrothermal-2 (contraction cracks, quartz veinlets and miarolitic voids).]

Гематитовые и кварцевые жилы с сопутствующей флюоритовой минерализацией Терского берега можно отнести к семейству флюорит-барит-кварц-карбонатных жил, образующихся в линейных зонах, рифтах и зонах несогласия между кристаллическим фундаментом и осадочным чехлом платформы. Классическим примером являются жилы Рейнского грабена [8, 15], где показано, что основным процессом рудообразования в гидротермальных системах является смешение флюидов: горячих рассолов фундамента (или бассейновых рассолов) и более холодных малоглубинных метеорных флюидов из осадков.

Для Терских гематитовых жил, появление глубинных флюидов связывается с палеозойской тектоно-термальной реактивизацией Кандалакшского авлакогена и масштабным проявлением щелочно-ультраосновного магматизма в регионе.

С другой стороны, текстурно-структурные характеристики, наличие редкоземельной минерализации, особенности состава гематита из жил и брекчий восточной части месторождения Мыс Корабль являются характерной особенностью железоксидно-золото-медных месторождений IOCG типа (например, Олимпик Дэм, Австралия [12, 13]), что даёт возможность предположить сходный механизм образования (табл. 3).

Однако помимо сходства типоморфных минералов и их составов, есть ряд отличий. Как правило, руды IOCG месторождений содержат богатую медную минерализацию и попутные полезные компоненты Au, Ag, U, не обнаруженные в гематитовых проявлениях месторождения Мыс Корабль. Возможно, это связано с тем, что руды месторождений типа IOCG полигенны и многостадийны, формируются при участии разнообразных магматических, гидротермальных и метасоматических процессов. Ранние стадии образования магнетита и сульфидов в месторождениях IOCG указывают на восстановительный характер флюидов, в то время как железоксидные проявления Мыса Корабль формировались в окислительных условиях.

**Табл. 3.** Сравнительная характеристика особенностей строения, состава и происхождения месторождения Олимпик Дэм (по [33–36;17]) и гематитовых жил и брекчий месторождения Мыс Корабль  
**[Table 3.** Comparative characteristics of the structural features, composition and origin of the Olympic Dam deposit (according to [33–36;17]) and hematite veins and breccias of the Cape Korabl' deposit]

Месторождение/ рудопоявление [Deposit/ore occurrence]	Олимпик Дэм [Olympic Dam]	Мыс Корабль [Cape Korabl']
Класс/тип [Class/type]	железоксидно-золото-медное с U и REE (IOCG-тип) [iron-oxide-gold-copper with U and REE (IOCG-type)]	железоксидное [iron oxide]
Генезис [Genesis]	магматогенно- метасоматический ± гидротермальный [Magmatic-metasomatic ± hydrothermal]	гидротермально-метасоматический [hydrothermal-metasomatic]
Оценка P-T параметров формирования [Estimation of P-T parameters]	200–500°C; от <1 кбар до 4 кбар [<1 kbar to 4 kbar]	до ~200°C; [up to ~200°C]; <1 кбар [<1 kbar]
Текстуры руд [Ore textures]	брекчиевые, жильные, вкрапленные [breccia, veins, disseminated]	брекчиевые, жильные, вкрапленные [breccia, veins, disseminated]
Основной минерально- текстурный тип руды [Main mineral texture type of ore]	гематитовая брекчия [hematite breccia]	гематитовые жилы и брекчии [hematite veins and breccias]
Оксиды Fe [Fe oxides]	гематит с повышенным содержанием U, W, Sn, V и низким Ti; магнетит [hematite with high contents of U, W, Sn, V and low Ti; magnetite]	гематит с повышенным содержа- нием W, V [hematite with high W, V content]
Cu минерализация [Cu mineralization]	халькопирит, борнит, халькозин [chalcopyrite, bornite, chalcocite]	Халькозин, ковеллин, малахит (во вмещающих песчаниках) [Chalcocite, covellite, malachite (in host sandstones)]
Самородные элементы [Native elements]	Au, Ag	-
Редкоземельная минерализация [Rare earth mineralization]	монацит, ксенотим, флоренсит, бритолит, бастнезит [monazite, xenotime, florencite, britholite, bastnäsite]	лопарит-(Ce), паризит-(Ce), мона- цит-(Ce), «гидроксидбастнезит» [loparite-(Ce), parisite-(Ce), mona- zite-(Ce), "hydroxybastnäsite"]

### Заключение

1. При образовании проявлений гематита в восточной части аметистового месторождения Мыс Корабль железо-насыщенные флюиды образовались при растворении аутигенного пористого гематита во вмещающих песчаниках терской свиты и последующего преотложения в виде жил и брекчий почти мономинерального гематитового состава.

2. Диагенетический пористый гематит характеризуется повышенным содержанием Ti, вероятно, при растворении аллотигенного титаномагнетита. В пластинчатом гематите из жил и брекчий отсутствуют примеси Ti, но отмечаются повышенные концентрации W и V до 1 мас. %.

3. Поскольку гематитовые жилы и брекчии пространственно связаны с кварцевой, флюоритовой и баритовой минерализацией, были установлены приближительные P-T условия их формирования. Они оцениваются как мезотермальные и/или эпитептермальные (до 200°C), и низкобарические (<1 кбар).

4. Циркуляция глубинных флюидов связывается с палеозойской тектоно-термальной активизацией Кандакшского авлакогена и масштабными проявлениями щелочно-ультраосновного магматизма. Исходя из этого, возраст жил и брекчий можно оценить как 350–360 млн лет.

5. По текстурно-структурным особенностям (брекчии, жилы), сходному характеру минерализации (редкоземельная и баритовая) и составу гематита (с примесями W и V) гематитовые жилы и брекчии восточной части месторождения Мыс Корабль близки к железооксидным золото-медным месторождениям ЮСГ-типа.

*Благодарности:* Авторы признательны д.г.-м.н., профессору К. А. Савко за внимательное прочтение рукописи и критические замечания, что способствовало ее улучшению.

*Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Aquilina L., Boulvais P., Mossman J.-R. Fluid migration at the basement/sediment interface along the margin of the Southeast basin (France): implications for Pb–Zn ore formation // *Mineral. Deposita*. 2011. Vol. 46. P. 959–979.
2. Banks D. A., Boyce A. J., Samson I. M. Constraints on the origins of fluids forming Irish Zn–Pb–Ba deposits: evidence from the composition of fluid inclusions // *Econ. Geol.* 2002. Vol. 97(3). P. 471–480.
3. Boiron M. C., Cathelineau M., Richard A. Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb–Zn–F–Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits // *Geofluids*. 2010. Vol. 10. P. 270–292.
4. Carignan J., Gariépy C., Hillaire-Marcel C. Hydrothermal fluids during Mesozoic reactivation of the St. Lawrence rift system, Canada: C, O, Sr and Pb isotopic characterization // *Chem. Geol.* 1997. Vol. 137. P. 1–21.
5. Grandia F., Canals A., Cardellach E., Banks D. A., Perona J. Origin of ore forming brines in sediment-hosted Zn–Pb deposits

of the Basque–Cantabrian basin, Northern Spain // *Econ. Geol.* 2003. Vol. 98. P. 1387–1411.

6. Leach D. L., Marsh E., Emsbo P., Rombach C. S., Kelley K. D., Anthony M. Nature of hydrothermal fluids at the shale-hosted red dog Zn–Pb–Ag deposits, Brooks Range, Alaska // *Econ. Geol.* 2004. Vol. 99 (7). P. 1449–1480.
7. Subías I., Fernández-Nieto C. Hydrothermal events in the Valle de Tena (Spanish Western Pyrenees) as evidenced by fluid inclusions and trace-element distribution from fluorite deposits // *Chem. Geol.* 1995. Vol. 124 (3–4). P. 267–282.
8. Walter B. F., Burisch M., Fusswinkel T., Marks M.A.W., Steele-MacInnis M., Wälle M., Apukhtina O., Markl G. Multi-reservoir fluid mixing processes in rift-related hydrothermal veins, Schwarzwald, SW-Germany // *Geochemical Exploration*. 2018. Vol. 186. P. 158–186.
9. Crocker I. T. Volcanogenic fluorite-hematite deposits and associated pyroclastic rock suite at Vergenoeg, Bushveld complex // *Econ. Geol.* 1985. Vol. 80. P. 1181–1200.
10. Graupner T., Mühlbach C., Schwarz-Schampera U., Henjes-Kunst F., Melcher F., Terblanche H. Mineralogy of high-field-strength elements (Y, Nb, REE) in the world-class Vergenoeg fluorite deposit, South Africa // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 64. P. 583–601.
11. Zhu X. K., Sun J., Pan C. Sm–Nd isotopic constraints on rare-earth mineralization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 64. P. 543–553.
12. Ehrig K., McPhie J., Kamenetsky V. S. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam Iron Oxide Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia // *Society of Economic Geologists*. 2012. Vol. 16. P. 237–267.
13. Ehrig K., Kamenetsky V. S., McPhie J., Macmillan E., Thompson J., Kamenetsky M., Maas R. Staged formation of the supergiant Olympic Dam uranium deposit, Australia // *Geology*. 2021. Vol. 49. P. 1312–1316. DOI: <https://doi.org/10.1130/G48930.1>.
14. Subías I., Fanlo I., Billström K. Ore-forming timing of polymetallic-fluorite low temperature veins from Central Pyrenees: a Pb, Nd and Sr isotope perspective // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 70. P. 241–251.
15. Walter B. F., Jensen J. L., Coutinho P., Laurent O. Formation of hydrothermal fluorite-hematite veins by mixing of continental basement brine and redbed-derived fluid: Schwarzwald mining district, SW Germany // *Geochemical Exploration*. 2020. Vol. 212. 106512.
16. Babaei A. H., Ganji A. Characteristics of the Ahmadabad hematite/barite deposit, Iran – studies of mineralogy, geochemistry and fluid inclusions // *Geologos*. 2018. Vol. 24(1). P. 55–68.
17. Skirrow R. G. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits - A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification // *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 140. 104569. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104569>.
18. Жиров Д. В. Месторождение аметиста Мыс Корабль. Серия Кольские самоцветы. СПб.: «Терра Байт», 2007. 33 с.
19. Киевленко Е. Я, Сенкевич Н. Н., Гаврилов А. П. Геология месторождений драгоценных камней. М.: Недра, 1982. 279 с.
20. Фришман Н. И. Аметистовый берег. СПб.: Русская коллекция, 2007. 96 с.
21. Фришман Н. И. Геолого-тектонические условия формирования и генезис месторождения аметиста «Мыс Корабль» (Мурманская область) // *Геология и разведка*. 2001. № 5. С. 156–158.
22. Зозуля Д. Р., Соловьёва А. Н., Чикирёв И. В. Уникальные гематитовые жилы Терского побережья, Кольский регион: состав, структурно-текстурные особенности и генезис. Труды Ферсмановской научной сессии. Апатиты, ГИ КНЦ РАН, 2021. № 18. С. 177–182.

23. Соловьева А. Н., Зозуля Д. Р., Савченко Е. Э., Чикирев И. В. Особенности формирования гематитовых брекчий мыса Корабль (Кольский регион) по минералогическим данным. Труды Ферсмановской научной сессии. Апатиты, ГИ КНЦ РАН, 2023. № 20. С. 459–467.
24. Сергеева Э. И., Тимофеев Б. В., Сергеев А. С. Литобio-стратиграфическая характеристика турьинской и терской свит // *Микрофоссилии протерозоя и раннего палеозоя СССР*. Л., 1974. С. 24–27.
25. Любцов В. В., Михайлова Н. С., Предовский А. А. Литостратиграфия и микрофоссилии позднего докембрия Кольского полуострова. Апатиты: АН СССР. Кольский фил., 1989. 130 с.
26. Кузнецов Н. Б., Балуев А. С., Терехов Е. Н., Колодяжный С. Ю., Пржиялговский Е. С., Романюк Т. В., Дубенский А. С., Шешуков В. С., Ляпунов С. М., Баянова Т. Б., Серов П. А. О времени формирования Кандалакшского и Керецкого грабенов палеорифтовой системы Белого моря в свете новых данных изотопной геохронологии // *Геодинамика и тектонофизика*. 2021. Т. 12. № 3. С. 570–607. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0540>.
27. Балуев А. С., Журавлев В. А., Терехов Е. Н., Пржиялговский Е. С. Отв. ред. М. Г. Леонов. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий» масштаба 1:1500000). М.: ГЕОС, 2012. 104 с.
28. Нерадовский Ю. Н. Реконструкция условий формирования красноцветных песчаников Терского берега на основе сравнительного анализа структуры древних и современных отложений (Кольский полуостров) // *Вестник МГТУ*. 2023. Т. 26. № 2. С. 180–190. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-180-190>.
29. Mikhailova J. A., Pakhomovsky, Y. A., Selivanova E. A., Kompanchenko A. A. Polymineralic Inclusions in Loparite-(Ce) from the Lovozero Alkaline Massif (Kola Peninsula, Russia): Hydrothermal Association in Miniature // *Minerals*. 2023. Vol. 13. P. 715. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13060715>.
30. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1982. 668 с.
31. Авдонин В. В., Старостин В. И. Геология полезных ископаемых. М.: Академия, 2010. 384 с.
32. Barnes H. L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: Wiley Inc. 1979. 798 p.
33. Barton M. D. Iron Oxide (–Cu–Au–REE–P–Ag–U–Co) Systems // *Treatise on Geochemistry*. 2014. Vol. 13. P. 515–540. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>.
34. Courtney-Davies L., Ciobanu C. L., Verdugo-Ihl M.R., Dmitrijeva M., Cook N. J., Ehrig K., Wade B. P. Hematite geochemistry and geochronology resolve genetic and temporal links among iron-oxide copper gold systems, Olympic Dam district, South Australia // *Precambrian Research*. 2019. Vol. 335. 105480.
35. McPhie J., Kamenetsky V. S., Chambefort I., Ehrig K., Green N. Origin of the supergiant Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia: Was a sedimentary basin involved? // *Geology*. 2011. Vol. 39 (8). P. 795–798. DOI: <https://doi.org/10.1130/G31952.1>.
36. Skirrow R. G., Murr J., Schofield A., Huston D. L., van der Wielen S., Czarnota K., Coghlan R., Highet L. M., Connolly D., Doublier M., Duan J. Mapping iron oxide Cu–Au (IOCG) mineral potential in Australia using a knowledge-driven mineral systems-based approach // *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 113. 36 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103011>.

## Hydrothermal hematite veins and breccias with rare earth elements mineralization at the Cape Korabl' amethyst deposit (Kola region)

©2023 A. N. Solovjova<sup>✉</sup>, D. R. Zozulya, Ye. E. Savchenko

*Geological Institute KSC RAS, 14 Fersman St.,  
184209, Apatity, Murmansk region, Russian Federation*

### Abstract

*Introduction:* The article presents the results of geological and mineralogical studies of the first discovered iron oxide occurrences (hematite veins and breccias in the sandstones of the Tersky formation) with associated rare earth mineralization on the Tersky coast (Kola region) in the eastern part of the Cape Korabl' amethyst deposit.

*Methodology:* A scanning electron microscope was used to study the morphology and internal structure of minerals. Chemical analysis of hematite was performed using an electron probe microanalyzer. Chemical analysis of rare earth minerals, barite, apatite, and rutile was performed using a scanning electron microscope.

*Results and discussion:* Three varieties of iron oxide minerals have been identified (titanomagnetite, porous and lamellar hematite). Titanomagnetite was found exclusively in host sandstones and was comparable in size to rock-forming minerals (quartz, feldspar), which indicates the allotigenic nature of the mineral. Porous hematite formed during the diagenesis stage, had a porous structure and filled the interstices between quartz and feldspar and acts as cement in the host sandstones. Lamellar hematite formed during hydrothermal processes, made up the bulk of hematite veins and breccias, and also occurs as single grains in the host wall sandstones. REE oxides, phosphates and carbonates were found in veins, breccias and wall-bearing sandstones and are represented by loparite-(Ce), monazite-(Ce), parisite-(Ce), bastnaesite-(Ce). Other accessory minerals were barite and rutile. According to preliminary data, a hydrothermal-metasomatic method of formation of iron oxide manifestations that occurred during the post-Riphean tectonothermal activation of the Kandalaksha aulacogen could be suggested. Based on the data obtained, a model for the formation of hematite veins and breccias was proposed. According to textural characteristics and mineral composition, the iron oxide occurrences in the eastern part of the Cape Korabl' deposit were similar to the classic iron oxide gold-copper deposit type (IOCG) - Olympic Dam (Australia), which suggests a similar mechanism of their formation.

*Conclusions:* Iron-saturated solutions were formed during the dissolution of authigenic porous hematite in the host sandstones of the Tersk formation by hydrothermal fluids. Porous hematite, the formation of which occurred at the stage of diagenesis, was characterized by an increased content of Ti, which probably entered the mineral-forming system during the dissolution of allotigenic titanomagnetite. During tectonic unloading, (meso)epithermal veins and breccias of anchimonineral hematite composition were formed. Hydrothermal hematite has a characteristic lamellar morphology and was characterized by the absence of Ti and an increased content of W and V.

**Keywords:** hematite veins and breccias; sandstones; Tersk formation; Cape Korabl' deposit; Kandalaksha aulacogen; IOCG.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>✉</sup> Anna N. Solovjova, e-mail: [a.soloveva@ksc.ru](mailto:a.soloveva@ksc.ru)

**Funding:** The work was carried out within the framework of the research project No. 0226-2019-0053 and the Russian Science Foundation grant No. 22-17-20002 (<https://rscf.ru/project/22-17-20002/>).

**For citation:** Solovjova A. N., Zozulya D. R., Savchenko Ye. E. Hydrothermal hematite veins and breccias with rare earth elements mineralization at the Cape Korabl' amethyst deposit (Kola region) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 75–90. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/75-90>

**Acknowledgments:** The authors are grateful to Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor K. A. Savko for his careful reading of the manuscript and critical comments, which contributed to its improvement.

**Conflict of interests:** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## REFERENCES

- Aquilina L., Boulvais P., Mossmann J.-R. Fluid migration at the basement/sediment interface along the margin of the South-east basin (France): implications for Pb–Zn ore formation. *Mineral. Deposita*, 2011, vol. 46, pp. 959–979.
- Banks D. A., Boyce A. J., Samson I. M. Constraints on the origins of fluids forming Irish Zn–Pb–Ba deposits: evidence from the composition of fluid inclusions. *Econ. Geol.*, 2002, vol. 97(3), pp. 471–480.
- Boiron M. C., Cathelineau M., Richard A. Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb–Zn–F–Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits. *Geofluid*, 2010, vol. 10, pp. 270–292.
- Carignan J., Gariépy C., Hillaire-Marcel C. Hydrothermal fluids during Mesozoic reactivation of the St. Lawrence rift system, Canada: C, O, Sr and Pb isotopic characterization. *Chem. Geol.*, 1997, vol. 137, pp. 1–21.
- Grandia F., Canals A., Cardellach E., Banks D. A., Perona J. Origin of ore forming brines in sediment-hosted Zn–Pb deposits of the Basque-Cantabrian basin, Northern Spain. *Econ. Geol.*, 2003, vol. 98, pp. 1387–1411.
- Leach D. L., Marsh E., Emsbo P., Rombach C. S., Kelley K. D., Anthony M. Nature of hydrothermal fluids at the shale-hosted red dog Zn–Pb–Ag deposits, Brooks Range, Alaska. *Econ. Geol.*, 2004, vol. 99 (7), pp. 1449–1480.
- Subías I., Fernández-Nieto C. Hydrothermal events in the Valle de Tena (Spanish Western Pyrenees) as evidenced by fluid inclusions and trace-element distribution from fluorite deposits. *Chem. Geol.*, 1995, vol. 124 (3–4), pp. 267–282.
- Walter B. F., Burisch M., Fusswinkel T., Marks M.A.W., Steele-MacInnis M., Wälle M., Apukhtina O., Markl G. Multi-reservoir fluid mixing processes in rift-related hydrothermal veins, Schwarzwald, SW-Germany. *Geochemical Exploration*, 2018, vol. 186, pp. 158–186.
- Crocker I. T. Volcanogenic fluorite-hematite deposits and associated pyroclastic rock suite at Vergenoeg, Bushveld complex. *Econ. Geol.*, 1985, vol. 80, pp. 1181–1200.
- Graupner T., Mühlbach C., Schwarz-Schampera U., Henjes-Kunst F., Melcher F., Terblanche H. Mineralogy of high-field-strength elements (Y, Nb, REE) in the world-class Vergenoeg fluorite deposit, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 64, pp. 583–601.
- Zhu X. K., Sun J., Pan C. Sm–Nd isotopic constraints on rare-earth mineralization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 64, pp. 543–553.
- Ehrig K., McPhie J., Kamenetsky V. S. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam Iron Oxide Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia. *Society of Economic Geologists*, 2012, vol. 16, pp. 237–267.
- Ehrig K., Kamenetsky V. S., McPhie J., Macmillan E., Thompson J., Kamenetsky M., Maas R. Staged formation of the supergiant Olympic Dam uranium deposit, Australia. *Geology*, 2021, vol. 49, pp. 1312–1316. DOI: <https://doi.org/10.1130/G48930.1>
- Subías I., Fanlo I., Billström K. Ore-forming timing of polymetallic-fluorite low temperature veins from Central Pyrenees: a Pb, Nd and Sr isotope perspective. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 70, pp. 241–251.
- Walter B. F., Jensen J. L., Coutinho P., Laurent O. Formation of hydrothermal fluorite-hematite veins by mixing of continental basement brine and redbed-derived fluid: Schwarzwald mining district, SW Germany. *Geochemical Exploration*, 2020, vol. 212, 106512.
- Babaei A. H., Ganji A. Characteristics of the Ahmadabad hematite/barite deposit, Iran – studies of mineralogy, geochemistry and fluid inclusions. *Geologos*, 2018, vol. 24(1), pp. 55–68.
- Skirrow R. G. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits - A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 140, 104569. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104569>.
- Zhirov D. V. *Mestorozhdenie ametista Mys Korabl'. Seriya Kol'skie samotsvety* [Amethyst deposit Cape Ship. Kola Gems Series]. Saint Petersburg, «Terra BaiT» publ., 2007, 33 p. (In Russ.)
- Kievlenko E. YA, Senkevich N. N., Gavrilov A. P. *Geologiya mestorozhdenii dragotsennykh kamnei* [Geology of gem deposits]. Moscow, Nedra publ., 1982, 279 p. (In Russ.)
- Frishman N. I. *Ametistovyi bereg* [Amethyst Coast]. Saint Petersburg, Russian collection publ., 2007, 96 p. (In Russ.)
- Frishman N. I. Geologo-tektonicheskie usloviya formirovaniya i genezis mestorozhdeniya ametista «Mys Korabl'» (Murmanskaya oblast') [Geological and tectonic conditions of formation and genesis of the “Cape Korabl'” amethyst deposit (Murmansk region)]. *Geologiya i razvedka – Geology and exploration*, 2001, no. 5, pp. 156–158 (In Russ.)
- Zozulya D. R., Solovjova A. N., Chikiryov I. V. Unikal'nye gematitovye zhily Terskogo poberezh'ya, Kol'skii region: sostav, strukturno-teksturnye osobennosti i genezis [Unique hematite veins of Tersky Coast, Kola region: composition, structural-textural features and genesis]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTS RAN* [Proceeding of Fersman scientific session of GI KSC RAS], Apatity, GI KSC RAS publ., 2021, vol. 18, pp. 177–182 (In Russ.)
- Solovjova A.N., Zozulya D.R., Savchenko Ye.E., Chikiryov I.V. Osobennosti formirovaniya gematitovykh brekchii mysa Korabl' (Kol'skii region) po mineralogicheskim dannym [Formation features of hematite breccias of Cape Korabl' (Kola region) according to mineralogical data]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii* [Proceeding of Fersman scientific session of GI

- KSC RAS], Apatity, GI KSC RAS publ., 2023, vol.20, pp. 459–467 (In Russ.)
24. Sergeeva E.H. I., Timofeev B. V., Sergeev A. S. Litobiostратиграфическая характеристика турьинской и терской свит [Литобиостратиграфическая характеристика турьинской и терской свит]. *Mikrofossilii proterozoya i rannego paleozoya SSSR – Microfossils of the Proterozoic and Early Paleozoic of the USSR*. Leningrad, 1974, pp. 24–27 (In Russ.)
25. Lyubtsov V. V., Mikhailova N. S., Predovskii A. A. *Litostратиграфия i mikrofossilii pozdnego dokembriya Kol'skogo poluostrova* [Lithostratigraphy and microfossils of the Late Precambrian of the Kola Peninsula]. Apatity, AN SSSR. Kola branch. publ., 1989, 130 p. (In Russ.)
26. Kuznetsov N. B., Baluev A. S., Terekhov E. N., Kolodyazhnyi S. Yu., Przhivalgovskii E. S., Romanyuk T. V., Dubensky A. S., Sheshukov V. S., Lyapunov S. M., Bayanova T. B., Serov P. A. O vremeni formirovaniya Kandalakshskogo i Keretskogo grabenov paleoriftovoi sistemy Belogo morya v svete novykh dannykh izotopnoi geokhronologii [Time constraints on the formation of the Kandalaksha and Keretski grabens of the White Sea paleo-rift system from new isotopic geochronological data]. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2021, vol. 12(3), pp. 570–607 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0540>.
27. Baluev A. S., Zhuravlev V. A., Terekhov E. N., Przhivalgovskiy E. S. Responsible Editor Dr M. G. Leonov. *Tektonika Belogo morya i prilegayushchikh territorii (Ob "yasnitel'naya zapiska k «Tektonicheskoi karte Belogo morya i prilegayushchikh territorii» masshtaba 1:1500000)* [Tectonics of the White Sea and adjacent areas (The explanatory notes to “The Tectonic Map of the White S and Adjacent Areas”, at a Scale of 1:1500 000)]. Moscow, GEOS publ., 2012, 104 p. (In Russ.)
28. Neradovsky Yu. N. Rekonstruktsiya uslovii formirovaniya krasnotsvetnykh peschanikov Terskogo berega na osnove sravnitel'nogo analiza struktury drevnykh i sovremennykh otlozhenii (Kol'skii poluostron) [Reconstruction of the conditions for the formation of red-colored sandstones of the Tersky coast based on a comparative analysis of the structure of ancient and modern deposits (Kola Peninsula)]. *Vestnik MGTU – Proceedings of MSTU*, 2023, vol. 26(2), pp. 180–190. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-180-190>.
29. Mikhailova J. A., Pakhomovsky, Y. A., Selivanova E. A., Kompanchenko A. A. Polyminerale Inclusions in Loparite-(Ce) from the Lovozero Alkaline Massif (Kola Peninsula, Russia): Hydrothermal Association in Miniature. *Minerals*, 2023, vol. 13, 715 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13060715>.
30. Smirnov V. I. *Geologiya poleznykh iskopaemykh* [Geology of minerals]. Moscow, Nedra publ., 1982, 668 p. (In Russ.)
31. Avdonin V. V., Starostin V. I. *Geologiya poleznykh iskopaemykh* [Geology of minerals]. Moscow, Academy publ., 2010, 384 p. (In Russ.)
32. Barnes H. L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: Wiley Inc, 1979, 798 p.
33. Barton M. D. Iron Oxide (–Cu–Au–REE–P–Ag–U–Co) Systems. *Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 13, pp. 515–540. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>.
34. Courtney-Davies L., Ciobanu C. L., Verdugo-Ihl M. R., Dmitrijeva M., Cook N. J., Ehrig K., Wade B. P. Hematite geochemistry and geochronology resolve genetic and temporal links among iron-oxide copper gold systems, Olympic Dam district, South Australia. *Precambrian Research*, 2019, vol. 335, 105480.
35. McPhie J., Kamenetsky V. S., Chambefort I., Ehrig K., Green N. Origin of the supergiant Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia: Was a sedimentary basin involved? *Geology*, 2011, vol.39 (8), pp. 795–798. DOI: <https://doi.org/10.1130/G31952.1>.
36. Skirrow R. G., Murr J., Schofield A., Huston D. L., van der Wielen S., Czarnota K., Coghlan R., Hight L. M., Connolly D., Doublier M., Duan J. Mapping iron oxide Cu–Au (IOCG) mineral potential in Australia using a knowledge-driven mineral systems-based approach. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 113, 36 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103011>.

Соловьёва Анна Николаевна, инженер 2 категории, аспирант, Геологический институт Кольского научного центра, Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.soloveva@ksc.ru; ORCID 0009-0004-0156-1341.

Зозуля Дмитрий Ростиславович, к.г.-м.н., в.н.с., Геологический институт Кольского научного центра, Апатиты, Российская Федерация; e-mail: d.zozulya@ksc.ru; ORCID 0000-0003-2846-5865.

Савченко Евгений Эланович, н.с., Геологический институт Кольского научного центра, Апатиты, Российская Федерация; e-mail: ye.savchenko@ksc.ru; ORCID 0000-0002-5639-1907.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Anna N. Solovjova, Engineer 2nd category, Post-Graduate Student, Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.soloveva@ksc.ru; ORCID 0009-0004-0156-1341.

Dmitry R. Zozulya, PhD in Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, Russian Federation; e-mail: d.zozulya@ksc.ru; ORCID 0000-0003-2846-5865.

Evgeniy El. Savchenko, Researcher, Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, Russian Federation; e-mail: ye.savchenko@ksc.ru; ORCID 0000-0002-5639-1907.

Authors have read and approved the final manuscript.