

УДК 553.064.32(553.311.2)

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В МАГНЕТИТЕ КАК ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТАШ, ЗАПАДНЫЙ КАРАМАЗАР, ТАДЖИКИСТАН

Ятимов Умед Абдурозикович¹,
umed1990@list.ru

Масленников Валерий Владимирович¹,
mas@mineralogy.ru

Аюпова Нурия Радитовна¹,
ayupova@mineralogy.ru

Артемьев Дмитрий Александрович¹,
artemyev@mineralogy.ru

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник.

Актуальность. В последние годы, благодаря появлению масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией, возрос интерес к изучению состава магнетита как индикатора условий формирования железорудных месторождений. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией для изучения магнетита особенно актуально в Западном Карамазаре, где сохранились магнетитовые месторождения, несущие полиметаллическую минерализацию. Несмотря на то, что стадийность магнетитовых месторождений изучалась многими исследователями, предложенные модели их формирования остаются до сих пор дискуссионными. Для решения этой проблемы нами изучены текстурно-структурные особенности магнетитовых руд и состав элементов-примесей (на 32 элемента) выделенных разновидностей магнетита.

Цель: получить новые минералого-геохимические данные по разновидностям магнетита для развития модели эволюции железных руд акташского типа.

Объектами исследования являются восемь разновидностей магнетита сульфидно-магнетитовых рудных тел месторождения Акташ Кансайского рудного поля Западного Карамазара, расположенного в северной части Республики Таджикистан.

Методы. Минеральный состав руд изучен в шлифах с помощью оптического микроскопа Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP12. Диагностика минералов проводилась на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 sbu (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Содержания элементов-примесей в магнетите определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией на масс-спектрометре Agilent 7700x с программным комплексом MassHunter и лазерным пробоотборником New Wave Research UP-213 (ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Для градуировки и расчета использовались международные стандарты: стекла USGS NIST-610 и USGS GSD-1g. Расчёт проводился в программе lalite с использованием ⁵⁶Fe в качестве внутреннего стандарта.

Результаты. На месторождении Акташ магнетит представлен следующими морфогенетическими разновидностями: обломковидные (Mt-1h), дендритовидные (Mt-1d), нитчатые (волокнистые) (Mt-1f), радиально-лучистые (Mt-1r) и колломорфно-почковидные (Mt-1c) агрегаты магнетита-1, зональные субгедральные зерна магнетита-2 (Mt-2s), удлиненные пластинчатые кристаллы магнетита-3 («мушкетовит», Mt-3m) и незональные эвгедральные метакристаллы магнетита-4 (Mt-4e). Предполагается, что разновидности магнетита-1 образовались на стадиях гальмиролиза и диагенеза известковистых вулканогенно-осадочных отложений в зонах газовых просачиваний и бактериального хемосинтеза. Обломковидная и колломорфно-почковидная разновидности магнетита образовались по гиалокластам, дендритовидные, нитчатые и радиально-лучистые – по биоморфным структурам. Реликтовые включения алюмосиликатов и акцессорных минералов в апогиалокластическом магнетите (Mt-1h) фиксируются по повышенным содержаниям Mg, Ti, Al, Zr, Cr и V относительно таковых в бактериоморфном магнетите (Mt-1d, 1f, 1r) при близких количествах As. Для раннедиагенетических разновидностей магнетита-1 (Mt-1d, 1f, 1c, 1r) характерны повышенные содержания As, Sb, Mo и W при низких Al, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Zn по сравнению с зональными субгедральными зёрнами магнетита-2s и эвгедральными кристаллами магнетита-4e. В стадию позднего диагенеза ранние агрегаты магнетита-1f, c, r обрасстали зональными кристаллами магнетита-2s. Магнетит-2s характеризуется самыми низкими содержаниями As, Sb, Mo и W. Магнетит-3m, образовавшийся по кристаллам гематита, подобно гематиту, концентрирует W, Zn и Mo. Магнетит-4e, в состав которого изоморфно входят максимальные количества Ti, V, Cr, Mn, Zn, при минимальных содержаниях Mo, свидетельствует об образовании его при высоких температурах.

Ключевые слова:

Элементы-примеси, магнетит, скарны, месторождение Акташ, Западный Карамазар.

Введение

Магнетит присутствует как в метаморфизованных, так и в неметаморфизованных рудных месторождениях и осадочных породах [1–8]. Химический состав магнетита детально исследован на многих железорудных месторождениях [6, 9–15]. Считается, что изоморфные элементы-примеси в магнетите, такие

как Al, Ti, V, Ca, Mn и Mg, могут использоваться в качестве индикаторов условий формирования железорудных месторождений [2, 3, 11, 12, 16]. Однако модели формирования железорудных месторождений все еще остаются дискуссионными. Применительно к одним и тем же месторождениям предлагаются магматические, гидротермально-метасоматические, гид-

ротермально-осадочные и гальмиролитические модели [17]. Параллельно с развитием первых трёх моделей появляется все больше данных в пользу гальмиролиза как основного фактора железнанакопления в осадочно-вулканогенных бассейнах [1, 18–22].

В Кармазаре железорудные залежи локализованы в пределах западной части Кураминской фациально-структурной зоны [23–25]. Среди них интересным объектом для создания минералого-геохимической модели железнанакопления являются сульфидно-магнетитовые залежи полиметаллического месторождения Акташ, где обнаружены многочисленные разновидности магнетита [26]. Однако типохимизм и последовательность образования морфогенетических разновидностей магнетита на этом месторождении до сих пор не определены. Для восполнения этого пробела нами изучены взаимоотношения минералов сульфидно-магнетитовых руд, выделены восемь морфогенетических разновидностей магнетита, последовательность их формирования, для каждой разновидности определены содержания элементов-примесей методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС).

Геологическое строение месторождения

Месторождение Акташ расположено в восточной части Кансайского рудного поля на участке, ограниченном с юга Южно-Окурдаванским разломом (Аль-

пийский надвиг), с запада, севера и востока – интрузивами гранитоидов Чокадамбулакского массива, прорвавшими карбонатные и эффузивно-осадочные толщи [25]. Интрузивные породы представлены гранодиоритами и гранодиорит-порфирами, диоритами и долеритами, образующими дайкообразные и штокообразные тела. На контакте с интрузивами эффузивно-осадочные породы андезитового и андезитацититового составов преобразованы в полосчатые скарны. Лишь на отдельных участках сохраняются реликтовые блоки эффузивов (Чокадамбулакское месторождение) [27].

В геологическом строении месторождения Акташ принимают участие карбонатные породы верхнего девона – нижнего карбона, интрузивные породы и полосчатые скарны, вероятно, так же как и на Чокадамбулакском месторождении, образовавшиеся по слоистым вулканогенно-осадочным породам (рис. 1, а) [25, 27, 28]. Карбонатные породы сложены известняками, доломитами и их смешанными разновидностями. На удалении от интрузивов в верхней части карбонатной толщи хребта Окуртау, к которой приурочено месторождение, отмечены первые признаки проявления вулканической деятельности [29]. Наблюдается переслаивание известняков, вулканокластитов андезитового и андезитацититового состава, песчаников, алевролитов и кремнистых пород [28].

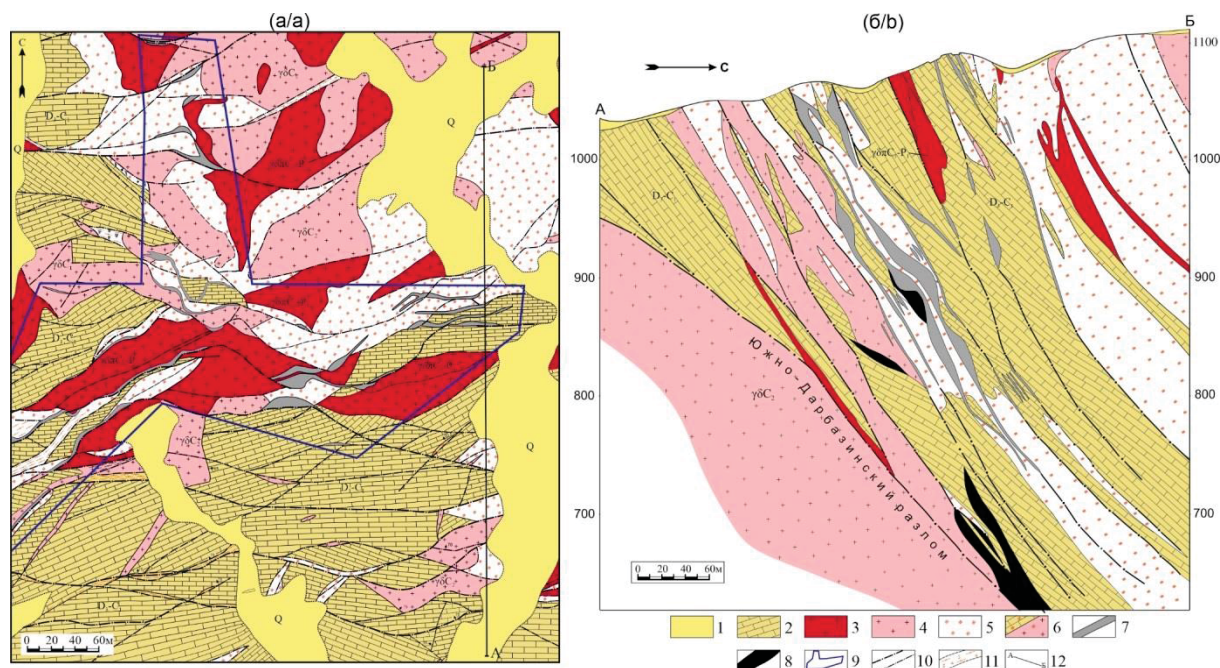


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Акташ (а) и разрез по линии А–Б (б), с упрощениями по [30]: 1 – четвертичные отложения; 2 – верхнедевонские-нижнекарбонные карбонатные породы; 3 – верхнекарбонно-нижнепермский вулканоплутонический комплекс (гранодиориты, граниты, диориты); 4 – гранодиориты среднего карбона; 5 – скарны нерасчлененные; 6 – скарнированные породы (а – по известнякам, б – по интрузивам); 7 – полиметаллические рудные тела; 8 – магнетитовые рудные тела; 9 – контур рудной зоны; 10 – разрывные нарушения; 11 – зоны дробления; 12 – линия геологического разреза

Fig. 1. Geological map of Aktash deposit (a) and A–B section (b) [30], simplified: 1 – Quaternary sediments; 2 – Upper Devonian–Lower Carboniferous carbonate rocks; 3 – Upper Carboniferous–Lower Permian volcanoplutonic complex (granodiorites, granites, diorites); 4 – Middle Carboniferous granodiorites; 5 – undissected skarns; 6 – skarn rocks: (a) limestones, (b) intrusives; 7 – polymetallic orebodies; 8 – magnetite orebodies; 9 – contour of ore zone; 10 – faults; 11 – crush zones; 12 – line of geological section

Несколько небольших линзообразных и пластообразных магнетитовых тел залегают как в скарнах вблизи контактов с интрузивами, так и на удалении, среди мраморизованных известняков (рис. 1, б) [30]. Главное сульфидно-магнетитовое тело, падающее под углом 50–60°, начиная с глубины 400 м, не перебурено.

Полосчатые магнетитовые руды перемежаются с полосчатыми скарнами и мраморизованными известняками.

Главными минералами скарнов являются пироксены ряда диопсид–геденбергит, амфиболы ряда актинолит–тремолит, гранаты ряда гроссуляр–андрадит, серпентин, эпидот и кальцит. Руды по минеральному составу подразделены на три типа: сульфидно-магнетитовые, галенит-сфалеритовые и халькопирит-пирротин-пиритовые [25, 26].

Материалы и методы исследования

Полевые работы на месторождении, включающие составление схемы распространения рудных тел в центральной части месторождения и отбор образцов для исследований, проводились в 2018–2021 гг. Всего изучено 40 образцов скарновых пород, магнетитовых и сульфидных руд. Минеральный состав руд изучен в аншлифах под микроскопом Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP12.

Состав минералов исследован с помощью растрового электронного микроскопа РЭММА-202М, оснащенного энергодисперсионным микроанализатором в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Количественный анализ проведен с использованием эталонов MINM-25-53 фирм «ASTIMEX Scientific Limited» (стандарт № 01-044) и «Microanalysis Consultants Ltd.» (стандарт № 1362).

Содержания элементов-примесей в магнетите определялись методом ЛА-ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7700х с программным комплексом MassHunter и лазерным пробоотборником New Wave Research UP-213 (ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик Д.А. Артемьев). Параметры лазера: Nd: YAG, длина волны излучения 213 нм, энергия пучка (fluence) 2,5–3,5 Дж/см², частота повторения импульсов 7–10 Hz, диаметр пятна абляции 30–110 мкм, несущий газ – He, скорость потока 0,65 л/мин. Время работы лазера 5 с (преабляция) + 25–30 с (холостой ход) + 50–60 с (время анализа). Время между преабляцией и анализом 15–25 с. Параметры масс-спектрометра: RF Power – 1550 Вт, рабочий газ – Ar, скорость несущего потока 0,95 л/мин, плазмообразующий поток Ar 15 л/мин, охлаждающий поток Ar 0,9 л/мин. Калибровка масс-спектрометра осуществлялась на калибровочных мультиэлементных растворах. Для градуировки и расчета использовались международные стандарты: стекла USGS NIST-610 и USGS GSD-1g. Расчет проводился в программе Iolite с использованием ⁵⁶Fe в качестве внутреннего стандарта.

Результаты

Характеристика сульфидно-магнетитовых руд

Сульфидно-магнетитовые руды слагают крутопадающие линзообразные рудные тела среди полосчатых скарнов серпентин-пироксен-гранатового состава.

Рудные тела прослеживаются по простиранию на 100–200 м, мощность их колеблется от 10 до 35 м.

Для сульфидно-магнетитовых руд характерна полосчатая текстура с чередованием магнетитовых, сульфидных и скарновых полос, согласных с общей слоистостью рудовмещающей толщи известняков (рис. 2, а–в). «Полосы» агрегатов магнетита нередко имеют асимметричное строение: в нижней части «полос» структуры более крупнозернистые, чем в верхней части; верхние границы ровные, нижние со знаками нагрузки. Это позволяет предполагать, что «полосы» первоначально были слоями, возможно, тефротурбидитов. В основании магнетитовых «полос» встречаются дендритовидные (Mt-1d), нитчатые (Mt-1f), радиально-лучистые (Mt-1r) и колломорфно-почковидные (Mt-1c) агрегаты магнетита, а также зональные субгедральные зерна (Mt-2s). Некоторые полосы магнетита сложены обломковидными обособлениями магнетита (рис. 2, б). Асимметрию, которая свидетельствует об исходно донном происхождении, можно определить и в некоторых серпентиновых и пироксеновых «полосках».

Удлиненные пластинчатые кристаллы («мушкетовит») (Mt-3m) и незональные эвгедральные метакристаллы (Mt-4e) магнетита чаще всего встречаются в жилах, пересекающих слои (рис. 2, а).

Выявленные разновидности магнетита различаются как по форме кристаллов, так и по микроструктуре агрегатов (рис. 3, а–з).

Обломковидный магнетит (Mt-1h) представляет собой обособления сгустково-зернистой и пористой структур размерами до 150 мкм в основной массе пироксена (рис. 3, а). В его агрегатах наблюдаются многочисленные включения нерудных минералов. Дендритовидный магнетит (Mt-1d) образует ветвящиеся агрегаты относительно крупного размера (до 500 мкм) в ассоциации с пироксеном и обломковидными агрегатами магнетита-1h (рис. 3, б). Нитчатый (волокнистый) магнетит (Mt-1f) состоит из плотно уложенных параллельных волокон размерами до 300 мкм (рис. 3, в). Вокруг нитчатых агрегатов магнетита часто наблюдается последовательное обрастание колломорфно-почковидным, а затем субгедральным магнетитом. Выделенные разновидности магнетита-1h, 1d, 1f распространены локально в незначительных количествах.

Основную массу магнетитовых руд слагают радиально-лучистый (Mt-1r), колломорфно-почковидный (Mt-1c), зональный субгедральный (Mt-2s), удлиненно-пластинчатый (мушкетовит Mt-3m) и эвгедральный (Mt-4e) магнетит. Радиально-лучистые агрегаты магнетита (Mt-1r) находятся обычно в ассоциации с пироксеном, гранатом и прожилками пироксена (рис. 3, в). Колломорфно-почковидный магнетит (Mt-1c) образует небольшие округлые зерна, ядра которых состоят из тонкозернистого магнетита (рис. 3, д). Размер его отдельных зерен доходит до 100 мкм. Зональный субгедральный магнетит (Mt-2s) широко распространен в сульфидно-магнетитовых рудах и часто встречается в ассоциации с сульфидами (рис. 3, е). В ядре зональных субгедральных кристаллов магнетита наблюдаются колломорфно-почковидные выделения магнетита-1c. Размер зональных субгедральных кристаллов магнетита не превышает 150–200 мкм. Удлиненно-пластинчатый магнетит широко распространен,

однако крупных скоплений не образует. В большинстве случаев пространство между его кристаллами выполнено кальцитом и сульфидами (рис. 3, ж). Размер кристаллов удлиненно-пластинчатого магнетита нередко достигает

400–500 мкм в длину. Эвгдральные метакристаллы магнетита незональные, изометричные, размер достигает 100 мкм (рис. 3, з, и). Обычно этот магнетит наблюдается в виде отдельных кристаллов в сульфидах и пироксене.

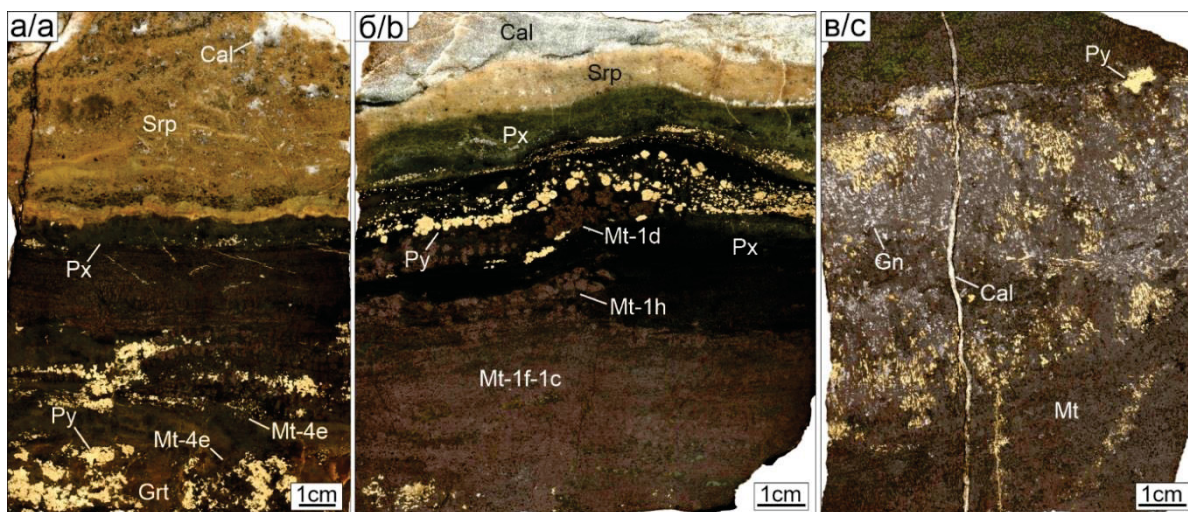


Рис. 2. Текстуры сульфидно-магнетитовых руд месторождения Акташ: а, б) массивно-полосчатая на контакте со скарнами; в) полосчато-вкрапленная. Mt – магнетит, Mt-1h – обломковидный магнетит, Mt-1d – дендритовидный магнетит, Mt-1f – нитчатый магнетит, Mt-1c – колломорфно-почковидный магнетит, Mt-3m – удлиненно-пластинчатый магнетит, Mt-4e – эвгдральный незональный магнетит, Px – пироксен, Srp – серпентин, Cal – кальцит, Grt – гранат, Py – пирит, Gn – галенит

Fig. 2. Textures of sulfide-magnetite ores of the Aktash deposit: a, b) massive banded at contact with skarns; c) banded-disseminated. Mt – magnetite, Mt-1h – apophyaloclastic magnetite, Mt-1d – dendritic magnetite, Mt-1f – filamentous magnetite, Mt-1c – collomorphic kidney-shaped magnetite, Mt-3m – elongated lamellar magnetite, Mt-4e – euhedral nonzonal magnetite, Px – pyroxene, Srp – serpentine, Cal – calcite, Grt – garnet, Py – pyrite, Gn – galena

Основным сульфидным минералом является пирит, который представлен ксеноморфными агрегатами и крупными эвгдральными кристаллами (до 300 мкм). Галенит в виде небольших скоплений размером до 300–400 мкм выполняет пространство между зернами магнетита и пирита, а иногда замещает субэвгдральные кристаллы магнетита-2s по зональности. В галенитовых агрегатах обнаружены многочисленные включения минералов висмута: самородный висмут, висмутин, галеновисмутин, виттихенит, эмплектит, айкинит, аргентоайкинит, Ag-содержащие виттихенит, фридрихит, зальцбургит, бисмит и заварицкит [31, 32]. В незначительных количествах встречается сфалерит с эмульсионной вкрапленностью халькопирита в виде анэвгдральных агрегатов в ассоциации с пиритом и галенитом. В магнетитовой массе изредка встречаются крупные ксеноморфные выделения халькопирита размером до 250 мкм. В ассоциации с магнетитом присутствуют агрегаты крупнозернистого граната (гроссуляр-андрадит) зеленого и белого пироксена (диопсид-геденбергит). В меньшем количестве установлены эпидот, амфибол, серпентин, хлорит, кальцит и кварц, замещающие гранат-пироксеновую ассоциацию, редко присутствуют шеелит, циркон, торит и титанистые минералы (пирофанит, титанит).

Типохимизм разновидностей магнетита

В качестве типоморфных особенностей, дающих возможность судить об условиях образования магнетитов, рассматриваются вариации содержания элементов-примесей в разных морфологических разно-

видностях магнетита месторождения Акташ. Статистические данные по элементам-примесям в разновидностях магнетита приведены в табл. 1.

Обломковидные агрегаты магнетита (Mt-1h) содержат более высокие концентрации K, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, W, Ni, Zr и U (рис. 4) по сравнению с другими разновидностями магнетита-1, очевидно, за счет присутствия реликтовых включений исходных алюмосиликатных минералов и аксессуариев. Содержания As и Sb в магнетите-1h ниже, чем в других ранних разновидностях магнетита-1, а концентрации Cu, Ga, Sr, Ba, Pb и Bi низкие по сравнению с поздними разновидностями магнетита. Sc, Co, Y, Nb, Mo, Ag, Sn, Au, Tl, Bi и U определены в ничтожных количествах (<1 г/т) (табл. 1).

Дендритовидные агрегаты магнетита (Mt-1d) характеризуются пониженными содержаниями Mg, Al, Si, Ca, Mn, W, V и повышенными Mo, Sb, As, Pb (табл. 1, рис. 4). В этом магнетите, в отличие от остальных разновидностей магнетита-1, содержится наименьшее количество Cr (рис. 4). Содержания Ti, Zn, Ga и Ba сопоставимы с таковыми в магнетите-1h (табл. 1, рис. 4).

Нитчатые (волокнистые) агрегаты магнетита (Mt-1f), предположительно, образовавшиеся за счет замещения бактериоморфных структур, содержат больше всего Mo. Содержания Ti, V, Cr на несколько порядков меньше, чем в дендритовидном магнетите-1d, а содержания других элементов-примесей такие же, как в дендритовидном магнетите-1d (рис. 4).

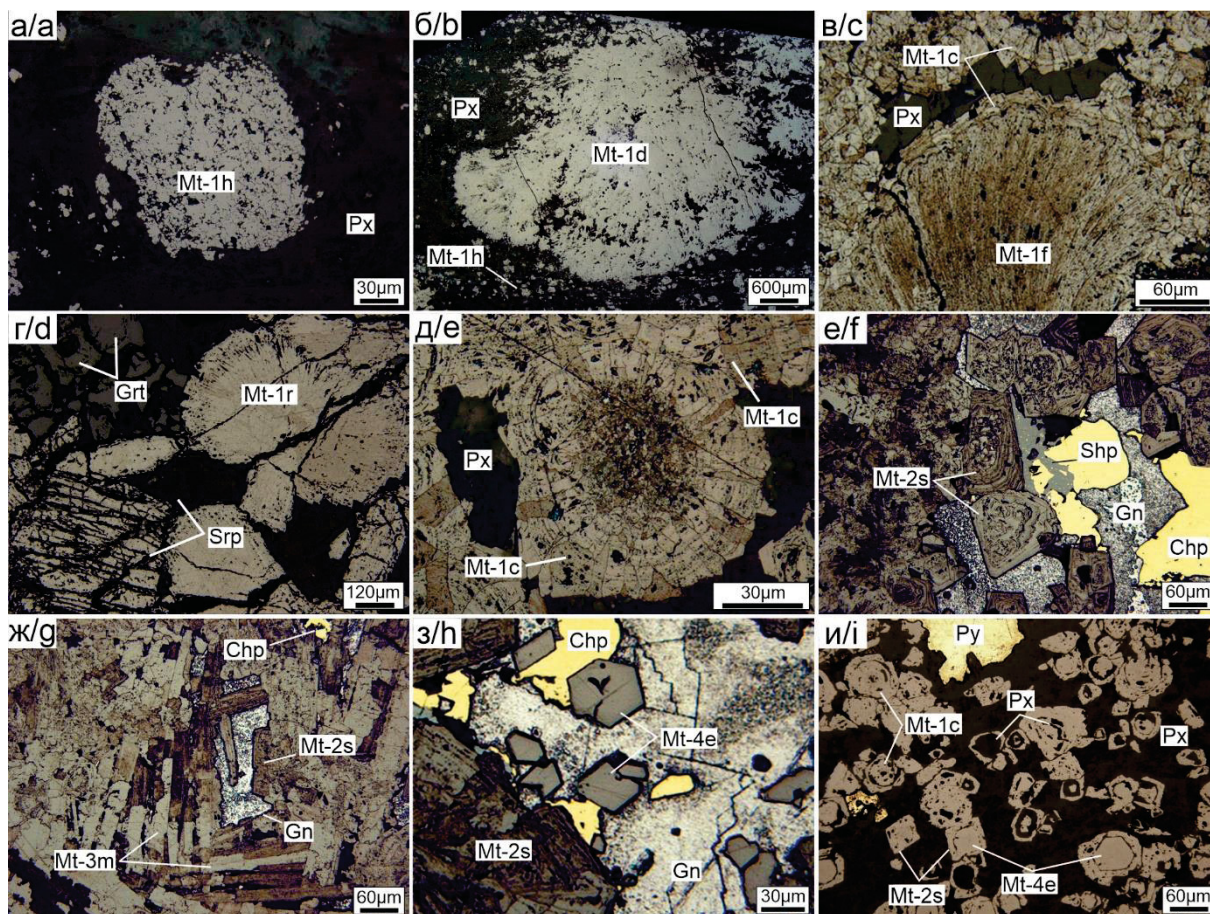


Рис. 3. Морфологические разновидности магнетита месторождения Акташ: а) обломковидные (Mt-1h) агрегаты магнетита в основной массе пироксена (Px); б) дендритовидные (Mt-1d) агрегаты магнетита в цементе пироксена; в) строматолитовая текстура нитчатого (Mt-1f) агрегата магнетита с обрастанием его колломорфно-почковидными (Mt-1c) и зонально-субгедральными (Mt-2s) агрегатами магнетита; г) колломорфно-почковидные агрегаты магнетита цементирует пироксен; д) радиально-лучистые (Mt-1r) агрегаты магнетита в ассоциации с пироксеном и гранатом (Grt) пересечены прожилками и трещинками, выполненными серпентином (Srp); е) зональные субгедральные зерна магнетита в ассоциации с галенитом (Gn), халькопиритом (Chp) и сфалеритом (Shp), сульфиды выполняют интерстиции между агрегатами магнетита; ж) пространство между агрегатами удлиненного пластинчатого магнетита (Mt-3m) заполняют галенит и халькопирит; з) срастание незональных эвгедральных (Mt-4e) зерен магнетита, галенита и халькопирита в интерстиции более ранних агрегатов магнетита; и) замещение колломорфно-почковидного магнетита нерудными минералами с последующим отложением незонального эвгедрального магнетита в ассоциации с пиритом (Py)

Fig. 3. Morphological types of magnetite from the Aktash deposit: a) apohyaloclastic (Mt-1h) magnetite in the pyroxene (Px) groundmass; b) dendritic (Mt-1d) magnetite in the pyroxene groundmass; c) stromatolite texture of a filamentous (Mt-1f) magnetite growths by colloform-kidney-shaped (Mt-1c) and zoned subhedral (Mt-2s) magnetite; d) colloform-kidney-shaped magnetite cemented by pyroxene; e) radial-radiant (Mt-1r) magnetite in assemblage with pyroxene and garnet (Grt) intersected by veins and cracks filled with serpentine (Srp); f) zoned subhedral grains of magnetite in association with galena (Gn), chalcopyrite (Chp), and sphalerite (Shp); sulfides fill interstices between magnetite aggregates; g) space between the aggregates of elongated lamellar (Mt-3m) magnetite is filled with galena and chalcopyrite; h) intergrowth of nonzoned euhedral grains (Mt-4e) of magnetite, galena, and chalcopyrite in the interstices of earlier magnetite aggregates; i) replacement of colloformic kidney-shaped magnetite by rock minerals with subsequent precipitation of nonzoned euhedral magnetite

Радиально-лучистые агрегаты магнетита (Mt-1r) содержат меньше Si, Ca, Mn, Mg, As, Sb, Zn, W, Mo, Ni и значительно больше Pb, Bi, Cr, Ba, Sc, Cu, чем колломорфно-почковидные агрегаты магнетита-1c (табл. 1, рис. 4). Низкие количества характерны для Co, Zr, Nb, U, Ag, Sn, Tl, Sc, Y и Au (<1 г/т) (табл. 1). Содержания подавляющего большинства этих элементов не варьируют и остаются такими же, как в колломорфно-почковидном магнетите.

Колломорфно-почковидные выделения магнетита (Mt-1c) по сравнению с магнетитом-1r характеризуются высокими содержаниями Ti, V, Cr, As, Sb, W, Mo и более низкими Sc, Cu (табл. 1, рис. 4). Также отмечаются повышенные концентрации Si, Ca, Mn, Mg, Al, K, Na и наблюдаются значимые содержания Zn, Pb, Ga, Ba, Sr. Остальные элементы-примеси (табл. 1) присутствуют в ничтожных количествах. Возможно, содержания большинства вышеупомянутых элемен-

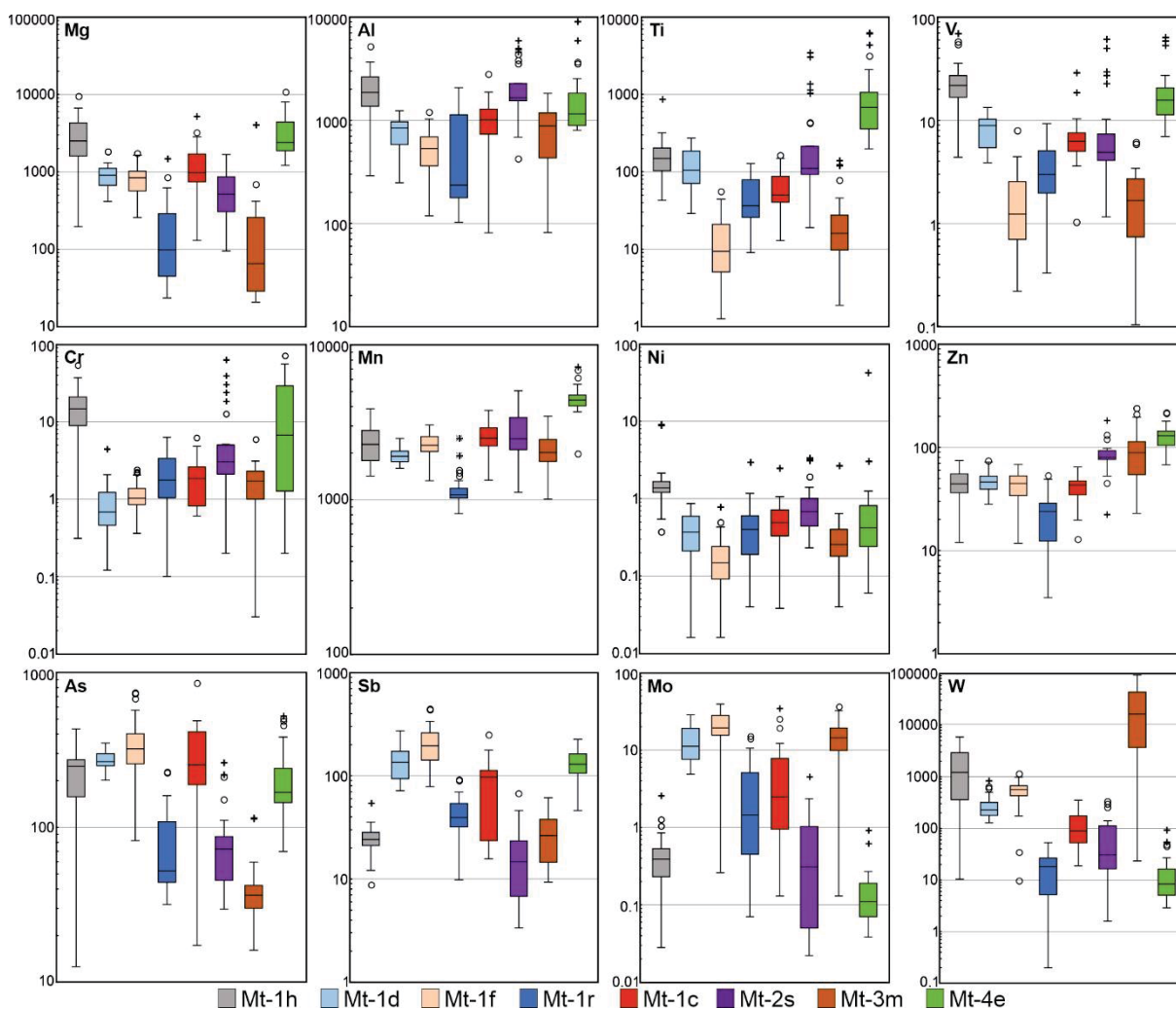


Рис. 4. Распределение элементов-примесей в разновидностях магнетита месторождения Акташ. Окрашенные прямоугольники ограничены по вертикали 25 % (нижняя граница) и 75 % (верхняя граница) квантилями, горизонтальная линия в прямоугольниках – значения медианы. Вертикальные линии, выходящие за пределы ящичков (усы) – минимальные и максимальные значения. Кружочки – аномальные значения за пределами усов, крестики – экстремальные выбросы. Здесь и на рис. 6, 7: Mt-1h – обломковидный магнетит, Mt-1d – дендритовидный магнетит, Mt-1f – нитчатый магнетит, Mt-1c – колломорфно-почковидный магнетит, Mt-1r – радиально-лучистый магнетит, Mt-2s – субгедральный зональный магнетит, Mt-3m – удлиненно-пластинчатый магнетит (мушкетовит), Mt-4e – эвгедральный незональный магнетит

Fig. 4. Distribution of trace elements in magnetite types from the Aktash deposit. The colored rectangles limited by 25 % (lower) and 75 % (upper) quartiles, the horizontal line in rectangles – median value. Vertical lines (whiskers) mark minimum and maximum values. Circles – anomalous values outside the whiskers, crosses – extreme outliers. Here and in Fig. 6, 7: Mt-1h – apophyaloclastic magnetite, Mt-1d – dendritic magnetite, Mt-1f – filamentous magnetite, Mt-1c – collomorphc kidney-shaped magnetite, Mt-1e – radial-radiant magnetite, Mt-2s – subhedral zoned magnetite, Mt-3m – elongated lamellar magnetite (mushketovite), Mt-4e – euhedral nonzonal magnetite

Зональные субгедральные зерна магнетита (Mt-2s) образуют более поздние обрастания вокруг агрегатов раннего колломорфно-почковидного магнетита (Mt-1c). Этот магнетит по сравнению с колломорфно-почковидным магнетитом обогащен большинством элементов-примесей: Al, Na, K, Mn, Ti, Pb, Zn, Bi, Ga, Sr, Cr, Sn, Ba, Ag, Sc, Cu, Zr и характеризуется относительно низкими содержаниями Si, Mg, Ca, As, Sb, W, Mo (табл. 1, рис. 4). Концентрации Co, Nb, Y, Tl, Au, U остаются почти неизменными и сопоставимы с таковыми в более ранних разновидностях магнетита-1. Высокие содержания Pb, Bi, Ag, Cu являются характерными для этого типа магнетита и связаны с мик-

ровключениями галенита и халькопирита. Обычно наблюдается замещение по зональности магнетита-2s галенитом. Аномальные концентрации Si, Mg, Al, Ca, Na, K могут быть связаны с присутствием включений нерудных минералов (гранаты, пироксены и кальцит).

Удлиненно-пластинчатые кристаллы магнетита (Mt-3m, мушкетовит) образованы за счет замещения субгедрального гематита на скарновой стадии. Для магнетита-3m, по сравнению с другими разновидностями магнетита, характерны пониженные содержания Si, Mg, Al, Ca, Na, K, Ti, V, As, Sb и относительно повышенные W, Mn, Mo (табл. 1, рис. 4). Только в магнетите-3m наблюдаются аномально высокие со-

держания W (среднее 3108 г/т), что отличает его от всех остальных разновидностей магнетита (рис. 4). Вероятно, этот магнетит наследовал высокие содержания W от субгедрального гематита.

Эвгедральные незональные метакристаллы магнетита (Mt-4e) образованы в процессе скарнирования при замещении раннего магнетита и, вероятно, железистых разновидностей пироксена и граната. Магнетит-4e, в отличие от других разновидностей, характеризуется высокими содержаниями Si, Mg, Al, Ca, Mn, Ti, V, Cr, Ga, Zn, Nb (табл. 1, рис. 4) и крайне низкими W, Pb и Bi. Аномальное количество Pb наблюдается в двух анализах, скорее всего оно связано с микровключениями галенита. Повышенные содержания Ti, V, Cr являются признаком высокотемпературного магнетита [9].

Обсуждение

Последовательность формирования разновидностей магнетита

Выделенные морфологические разновидности магнетита и взаимоотношения между ними позволяют судить о последовательных процессах преобразования магнетитовых руд.

Предполагается, что формирование магнетитовых руд месторождения Акташ происходило в две стадии: 1) доскарновую – D₃-C₁, соответствующую возрасту формирования карбонатных пород, и 2) скарновую – C₂, связанную с внедрением интрузивов Чокадамбулакского массива.

Предполагается, что на ранней стадии железонакпления (гальмиролиза и диагенеза) образовались обломковидные агрегаты магнетита (Mt-1h) за счет замещения гиалокластитов (рис. 3, а), а дендритовидные, нитчатые и радиально-лучистые агрегаты магнетита образовались за счет замещения бактериоморфных структур (рис. 3, б, в, д).

Обломковидные гематитовые, гематит-магнетитовые и магнетитовые псевдоморфозы по вулканокластам встречаются на многих магнетитовых месторождениях. Особенно хорошо они изучены на колчеданно-магнетитовых месторождениях Южного Урала [1].

Дендритовидные агрегаты магнетита (Mt-1d) похожи на структуру микрофлоры и, возможно, образовались за счет замещения биоморфных структур. Похожие структуры встречаются у биогенного наномангнетита в кирасе бокситоносной коры выветривания базальтов Южного Вьетнама [33].

Нитчатые или волокнистые структуры магнетита (Mt-1f) напоминают структуру фоссилезированных железобактерий в железных рудах [34]. Обильные бактерии сохранились в гематит-магнетитовых гальмиролититах некоторых колчеданных месторождений Урала [1].

Радиально-лучистые агрегаты магнетита (Mt-1r), вероятно, также образуются на ранней стадии железонакпления за счет микроорганизмов. Сходные сфероидално-лучистые структуры железобактерий встречаются в железорудных формациях [35].

На этой же стадии образовались колломорфно-почковидные агрегаты магнетита (Mt-1c) (рис. 3, е).

Аналогичные колломорфные агрегаты магнетита обнаружены на железорудном Чокадамбулакском месторождении (Западный Карамазар), для образования которых предполагается участие коллоидных растворов [27, 36].

Зональные субгедральные кристаллы магнетита (Mt-2s) нарастали на агрегаты колломорфного магнетита, вероятно, уже на стадии позднего диагенеза (рис. 3, е). Аналогичные зональные кристаллы магнетита широко представлены на магнетитовых месторождениях, не ассоциирующих со скарнами [22]. Такие же зональные кристаллы магнетита выросли на псевдоморфозы магнетита по пиритовым рудокластам неметаморфизованного Сибайского месторождения [37]. Вероятно, одновременно с образованием магнетита-2s формировались пластинчатые кристаллы гематита.

На стадии скарнообразования сформировались пластинчатые псевдоморфозы магнетита (Mt-3m) по кристаллам гематита (мушкетовит), причем близодновременно с процессом мушкетовизации происходило замещение магнетита-2s сульфидами и скарнами с образованием незональных эвгедральных метакристаллов магнетита-4e из рудных растворов (рис. 3, ж, з). В зональных субгедральных зернах магнетита-2s наблюдается последовательное замещение колломорфного магнетита-1c нерудным минералом и затем более плотным магнетитом-4e без включений (рис. 3, и).

Вероятные минералого-геохимические ассоциации

Методом максимального корреляционного пути по матрице коэффициентов корреляции [38] для каждой разновидности магнетита определены минералого-геохимические ассоциации, которые могут, предположительно, интерпретироваться как собственные минеральные формы и как изоморфная примесь в минералах (табл. 2). В первом приближении предлагается рассмотреть некоторые минералого-геохимические ассоциации, которые поддаются вероятной интерпретации.

Сам по себе магнетит может содержать изоморфные примеси Ti, Mn, V, Cr, Mg, Al, Co, Ni, Ga и Sc [3]. При вариациях содержаний этих элементов в магнетите после расчетов корреляционных связей они представляются в виде единой или нескольких ассоциаций, например, (Mg+Cr+Sc), (V+Co), (Zn+Sc+Cr), (Ni+Co+Sc), (Mg+Ni), (Sc+Co) и (Al+Mn). Ассоциация (Co+Ni) более характерна для пирита.

Ассоциации (Zn+Mn), (Zn+Ga), (Ti+Cu+Zn) и (Zn+Sn) предполагают наличие сфалерита, а также присутствие изоморфной примеси этих элементов в магнетите. Ассоциации (Na+K+Ga) и (Na+K+Al+Si+Ga), скорее всего, связаны с иллитом, а ассоциации (Si+Ca+Mg) и (Si+Al+Ca+Mg) характерны для включений диопсида, серпентина и гроссуляра. (Na+Sr+K+Ba), (Ga+K+Na+Sr+Ba), (Ba+Sr+Bi), (Sr+Ba+Na+K+Al+Si+Ga), (Na+Sr+K+Ba), (Al+Ti+Ga) и (Ti+Ba+Sr) ассоциации элементов могут быть обязаны реликтам полевых шпатов и гидрослюдов, поскольку барит в рудах не обнаружен.

Положительные корреляции элементов с V, U и Mo могут отражать сорбцию на гидроксидах железа, окисляющихся сульфидах и органическом веществе

[39, 40]. Предполагается, что часть элементов, адсорбированных из морской воды органическим веществом и гидроксидами железа, зафиксирована в магнетите в виде следующих ассоциаций: (Mo+Mn), (As+Sb), (Sb+Mo+As+Pb), (W+Mo+Pb+Bi), (Zn+Cr+Bi+W), (W+Mo+Ag), (Cr+Sb+V), (Ca+U), (Sb+Mo), (Y+As+Sb+Mo), (Zn+Cr+Bi+W), (Y+As+Nb-U), (Y+As+V), (Sc+V+U+W) и (Y+Sb+As+Na+Ti+Sr).

Корреляция Ca и W, характерная для магнетита-4е, выявляет включения шеелита.

Группы ассоциаций (Pb+Bi), (Ag+Bi) и (Pb+Ag) принадлежат парагенезису галенита и Bi-Ag-минерализации. В галенитовых агрегатах обнаруже-

ны многочисленные сростания минералов висмута, таких как: самородный висмут, висмутин, галеновисмутин, виттихенит, эмплектит, айкинит, аргентоайкинит, Ag-содержащие виттихенит, фридрихит, залцбургит, бисмит и заварицит [31, 32]. Ассоциация (Bi+Cu+Co+Ni) отражает пирит-халькопиритовый парагенезис с минералами висмута в магнетите-4е.

Ассоциация (Ca+Si+Mg+Al) соответствует включениям эпидота в магнетите-4е. Ассоциации (Ti+Nb+Zr), (Nb+Ti+Zr+V+Ni), (Ni+Y+V+Ti+Nb+Zr), (Nb+Ti+Zr+Sc) и (Nb+Zr+Ti+Mn), вероятно, отражают парагенезис циркона и ниобийсодержащего пиррофанита [41].

Таблица 2. Ассоциации химических элементов в разновидностях магнетита месторождения Акташ

Table 2. Assemblages of chemical elements in magnetite types from the Aktash deposit

Тип магнетита Type of magnetite	Ассоциация/Assemblage
Обломковидный Apothyaloclastic	I(Nb+Ti+Zr+Sc)+II(Mo+Mn)+III(Mg+Si+Ca+W)+IV(Ga+Al)+V(Sr+Na+Ba)+VI(As+Sb)+VII(V+Co)-VIII(Zn+Sn)-IX(Cr+Y+K)-Au-X(Ti+Cu)-U-XI(Ag+Bi)-Pb-Ni
Дендритовидный Dendritic	I(Si+Al+Ca+Mg)+II(Ni+Y+V+Ti+Nb+Zr)+III(Na+K+Ga)+IV(Ba+Sr+Bi)-TI-Au-V(Zn+Mn)-Ag-VI(Sb+Mo+As+Pb)+W-Sn-Cu-VII(Sc+Co)-U-Cr
Нитчатый Filamentous	I(W+Mo+Pb+Bi)+II(As+Sb)+III(Zn+Mn)+IV(Sr+Ba)+V(Na+K+Al+Si+Ga)+VI(Ca+U)+VII(Nb+Ti+Zr+V+Ni)-Cu-VIII(Mg+Cr+Sc)+Y-IX(Au+Sn)-X(Ag+Ti)-Co
Радиально-лучистый Radial-radiant	I(Na+Sr+K+Ba)+II(Al+Ti+Ga)+III(V+U+Nb)+Ag-IV(Ni+Co)+V(Au+Ti+Cu+Mn)+VI(Mg+Si+Ca)+VII(Zn+Cr+Bi+W)+VIII(Y+As+Sb+Mo)-Sc-Zr-Sn-Pb
Колломорфно-почковидный Collomorphic kidney-shaped	I(Ni+Co+Sc)+II(Cu+Au)-III(Tl+Ba+Sr)+IV(Na+K+Ga)+V(Si+Ca+Mg)+VI(Bi+Al+Ti+Zr)+VII(Y+As+Nb-U)-VIII(Cr+Sb+V)-IX(Zn+Mn)-X(W+Mo+Ag)-XI(Sn-Pb)
Субгедральный Subhedral	I(Ti+V+Sn+Cr)+II(Sc+Zr+Al+Mn)+III(Mg+Ni)-IV(Tl+Cu+Zn)-Bi-Au+V(Ca+Si)+VI(Nb+Y+Ga)+VII(K+Na+Sr+Ba)-VIII(Pb+Ag)+As-IX(Sb+Mo)-U-W-Co
Удлиненно-пластинчатый Elongated lamellar	I(Na+K+Ga)+II(Ti+Nb+Zr)+III(U+W+Sr+Ba)+IV(Al+Mn)+V(Ca+Si+Mg+Ti)-VI(Ag+Bi)-VII(Zn+Sc+Cr+Au)-VIII(Ni+Cu)-Co-IX(Sb+Mo)-X(Y+As+V)-Sn-Pb
Эвгедральные метакристаллы Euhedral metacrystals	I(Nb+Zr+Ti+Mn)+II(Sc+V+U+W)+III(Ca+Si+Mg+Al)-Ag-IV(Cr+K+Ba)+V(Y+Sb+As+Na+Ti+Sr)-Au-Sn-VI(Bi+Cu+Co+Ni)-VII(Pb+Mo)-VIII(Zn+Ga)

Примечание. В скобки заключены ассоциации элементов с повышенными по сравнению с соседними в ряду коэффициентами корреляции. Разделение плюсом означает значимые связи, тире – отсутствие значимых связей.

Note. In parentheses are the assemblages of elements with higher correlation coefficients compared to neighboring ones in the series. A plus means significant connections; a dash means the absence of significant connections.

Формы нахождения элементов-примесей в магнетите

Концентрации большинства элементов-примесей в разновидностях магнетита не сильно отличаются друг от друга, кроме некоторых элементов (табл. 1). Большинство магнетитов, особенно высокотемпературных, характеризуется сложным химическим составом и содержит изоморфные примеси различных элементов – Mg, Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn и Ga, которые чаще всего занимают в решетке магнетита места шестерной координации, замещая в зависимости от заряда двухвалентное или трехвалентное железо [3, 9, 11, 16, 42, 43]. Изоморфные замещения в магнетитах в основном протекают при высоких температурах [9]. При медленном понижении температуры магнетит стремится очиститься от элементов-примесей, в первую очередь от Mg, Al, и Ti, и приблизиться к обычному для умеренных температур структурному состоянию $Fe^{3+}[4](Fe^{2+}, Fe^{3+})_2[6]O_4$. Вышеуказанные элементы, первоначально содержащиеся в магнетите в состоянии твердого раствора, выделяются при этом в виде самостоятельных минеральных фаз – ульвешпинели, ильменита, плеонаста, герцинита, магнезиоферрита с образованием своеобразных сетчатых, изометричных, пластинчатых и других структур рас-

пада твердого раствора [9]. Таких структур на месторождении Акташ не обнаружено.

Наши исследования подтверждают сделанные ранее выводы о том, что минеральные включения в агрегатах магнетита широко распространены и их присутствие может отражать минералогию и геохимию вмещающих пород [9, 44, 45].

В магнетите обычно содержатся минеральные включения и их легко можно захватить во время химического анализа, поэтому важно различать элементы, которые встречаются в твердом растворе в магнетите, и те, которые можно отнести к минеральным включениям, такие как силикаты и сульфиды. На диаграммах зависимостей Si с Al и Si с Mg демонстрируют положительную корреляцию (рис. 5, а, б), которая предполагает наличие силикатов и алюмосиликатных включений в магнетите. Полученные соотношения содержаний этих элементов соответствуют стехиометрическим данным по гроссуляру, серпентину, хлориту, диопсиду.

Титан и алюминий в магнетите могут отображать среду образования магнетита [3, 4, 11, 16, 46]. В гидротермальных условиях эти элементы малоподвижны, и их содержания в магнетите в значительной степени контролируются температурой – чем больше темпе-

ратура формирования магнетита, тем больше концентрации [47, 48]. Максимальные содержания Al и Ti, характерные для эвгдрального магнетита (Mt-4e) скарновой стадии, подтверждают этот вывод (табл. 1, рис. 4). Титан показывает положительную корреляцию с V и Cr, что свидетельствует о тесной связи этих элементов в структуре магнетита (рис. 5, в, з).

Отрицательная корреляция Ti по отношению к Mo наблюдается в дендритовидном (Mt-1d), нитчатом (Mt-1f) и пластинчатом (Mt-3m) магнетите, в которых отмечаются повышенные содержания Mo до 20,82 г/т (табл. 1, рис. 5, д). Вероятно, предшествующие оксигидроксиды железа сорбировали Mo из морской воды [49]. Относительно высокие содержания Mo, вероятно, отражают влияние морской воды на состав исходного гематита, колломорфно-почковидного и биоморфного магнетита-1d, 1f, 1r.

Обогащение W является одной из отличительных особенностей магнетита месторождения Акташ (табл. 1, рис. 4). Максимальные содержания W характерны для пластинчатого магнетита-3m, среднее содержание в котором составляет 3022 г/т. На диаграмме наблюдается относительно прямая корреляция W с Ca во всех разновидностях магнетита, но только соотношения содержаний этих элементов в пластинчатых агрегатах магнетита-3m соответствуют стехиометрическим данным по шеелиту (рис. 5, е). Повышенное содержание W в обломковидных агрегатах магнетита, возможно, связано с микровключениями этого минерала. Ранее повышенные содержания W были обнаружены в пластинчатых кристаллах магнетита полиметаллического месторождения Нетаопинг (Китай) [14], что свидетельствует о характерной особенности этой разновидности магнетита.

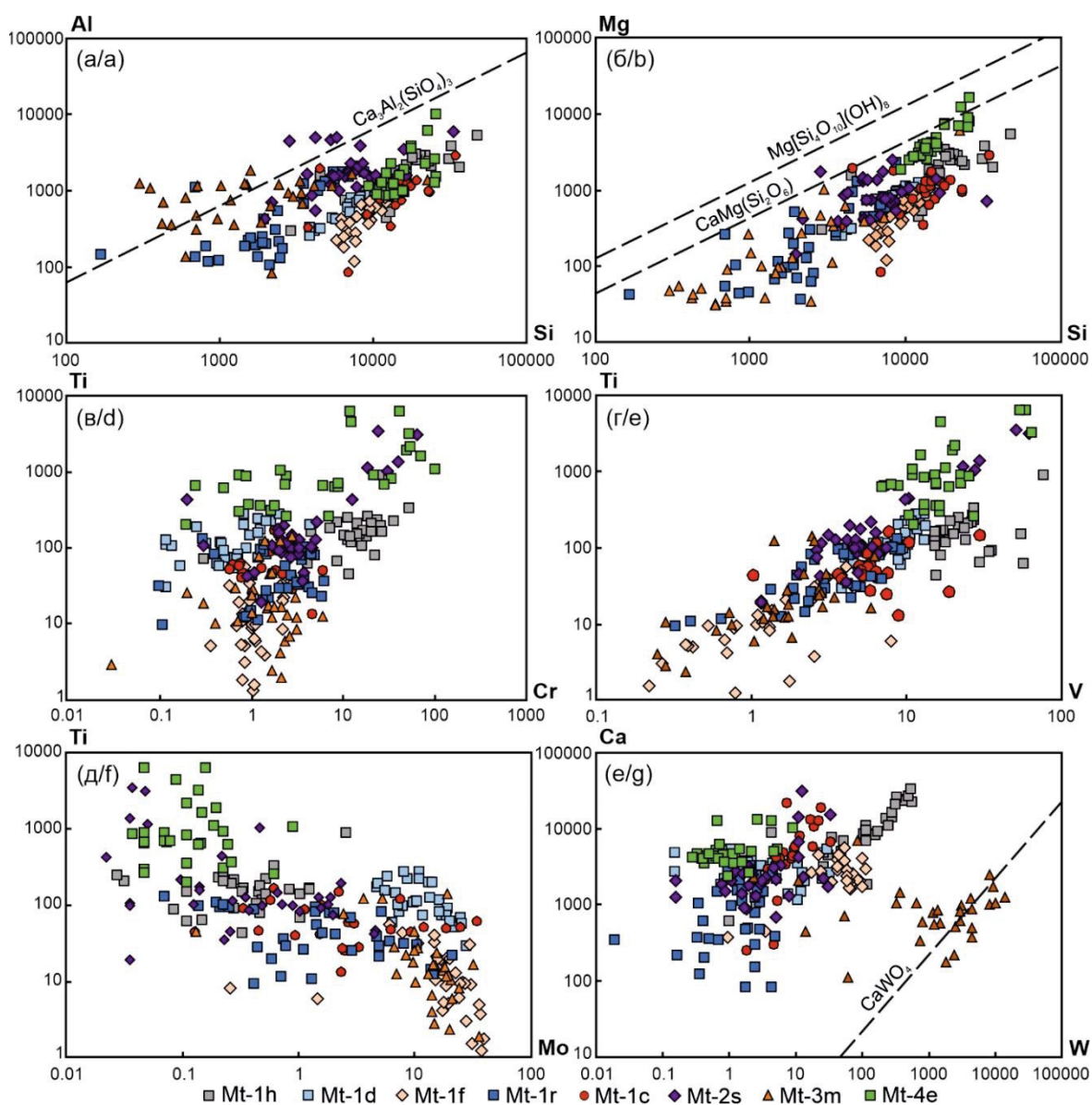


Рис. 5. Диаграммы зависимостей содержаний элементов-примесей Al–Si (а), Mg–Si (б), Ti–Cr (в), Ti–V (з), Ti–Mo (д), Ca–W (е) в разновидностях магнетита по данным ЛА-ИСП-МС (з/т)

Fig. 5. Plots of trace element contents of Al–Si (a), Mg–Si (b), Ti–Cr (c), Ti–V (d), Ti–Mo (e), Ca–W (f) of magnetite types according to LA-ICP-MS (ppm)

Другой отличительной особенностью магнетита месторождения Акташ являются высокие содержания As и Sb. Самые высокие из них зафиксированы в нитчатых агрегатах магнетита (Mt-1c) со средним содержанием As 394 и Sb 207 г/т (табл. 1, рис. 4), что, вероятно, указывает на биофильные свойства этих элементов при железнакоплении. Самые низкие содержания As (среднее 40 г/т) характерны для удлиненно-пластинчатых кристаллов магнетита (Mt-3m), а самые низкие концентрации Sb отмечаются в субгидральных кристаллах магнетита (Mt-2s) (среднее 19 г/т).

Генезис железорудных месторождений

Скарновые железорудные месторождения являются объектами сложного генезиса и до сих пор остаются предметом острых дискуссий. В целом как в мировой, так и в отечественной литературе отчетливо прослеживается тенденция интерпретировать генезис скарново-магнетитовых руд как контактово-метасоматический [50–54] либо относить их к вулканогенно-осадочным отложениям, испытавшим последующий контактовый метаморфизм [55–59]. Действительно, с одной стороны, в железных рудах отмечаются признаки замещения вулканокластиков гематитом или магнетитом, с другой стороны – переслаивание железных руд с вулканокластическим материалом. Эти факты могут быть объяснены с позиции гальмиролитической модели железнакопления, предлагавшейся ранее, но почти забытой. Предполагалось, что образование железных руд, например, района Лан-Дилль в Германии, происходило в результате гальмиролиза-диагенеза базальтовых вулканокластиков [18] с участием гидротермальных растворов, сопровождающих вулканическую деятельность [60–62]. Некоторыми исследователями предполагалось, что взаимодействие вулканического пепла и морской воды является основным процессом формирования южноуральских яшм [63]. Палагонитовая природа сульфидно-магнетитовых руд рассмотрена на примере ряда колчеданных месторождений Южного Урала [19–21, 64]. В последние годы к модели железнакоп-

ления привлекаются процессы биогальмиролиза вулканогенно-осадочных отложений в зонах газовых и гидротермальных просачиваний [1, 65]. Признаки гальмиролиза гиалокластитов некоторых магнетитовых месторождений Тургайского железорудного пояса показаны в работе [22]. На месторождении Акташ тонкодисперсный гематит, отражающий стадию гальмиролиза, пока не обнаружен. Однако замещение гиалокластов магнетитом, вероятно, происходило в более щелочных и восстановительных условиях, чем те, которые типичны для формирования гематита [66].

Ранее для диагностики генетических типов железорудных месторождений были предложены три дискриминационные диаграммы [3, 4, 11, 16, 46].

На дискриминационной диаграмме зависимости содержаний Ti+V и Ca+Al+Mn [11] все изученные нами разновидности магнетита занимают поле скарновых месторождений, только радиально-лучистый магнетит попадает в поле полосчатых железорудных формаций и, очевидно, отличается от магнетита, образовавшегося в апатит-магнетитовых месторождениях типа Кируна-Ваара, Ti-Fe магматических и Au-Cu порфировых месторождениях (рис. 6, а). Другие разновидности магнетита-1 и большинство значений субгидрального магнетита-2s располагаются между полями полосчатых железорудных формаций и скарновых месторождений, что показывает последовательное расположение разновидностей магнетита по мере возрастания температур: более ранние разновидности месторождения Акташ ближе к области полосчатых железорудных формаций, а более поздние подходят ближе к полю скарновых месторождений.

Все разновидности магнетита месторождения Акташ показывают низкие значения Ni/(Cr+Mn) на дискриминационной диаграмме Ti+V–Ni/(Cr+Mn) (рис. 6, б) по сравнению с магнетитом других генетических типов месторождений. Содержания этих элементов (в основном, Mn) в магнетите-4e совпали с полем магнетита скарновых месторождений.

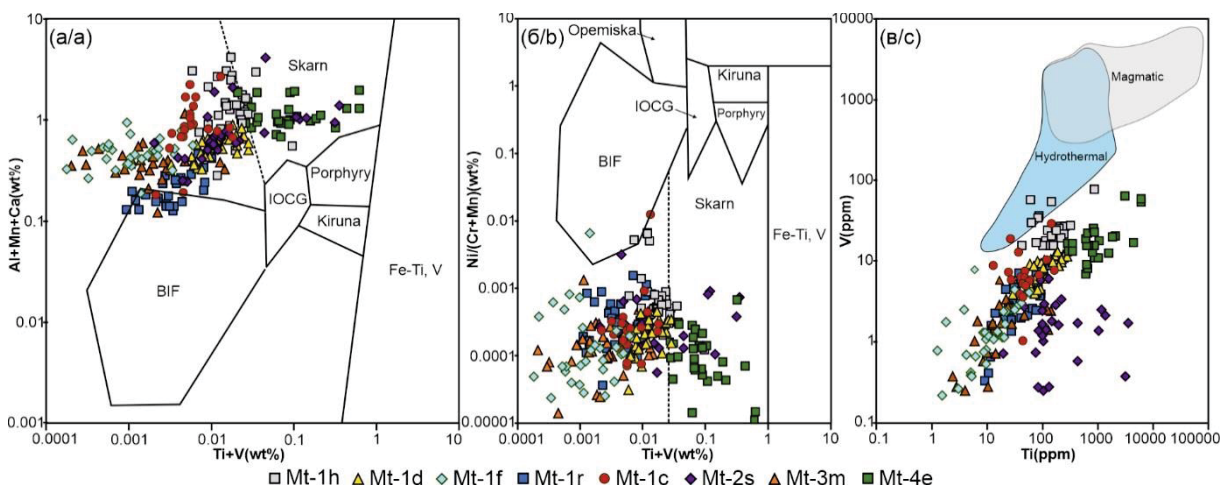


Рис. 6. Магнетитовые дискриминационные диаграммы (а) Al+Mn+Ca и Ti+V, (б) Ni/(Cr+Mn) и Ti+V [3, 11], (в) V и Ti [4, 16] с дополнениями штриховой границы, отделяющей поле скарнов

Fig. 6. Magnetite discrimination diagrams (a) Al+Mn+Ca and Ti+V, (b) Ni/(Cr+Mn) and Ti+V [3, 11], (c) V and Ti [4, 16] with dashed additions border separating the field of skarns

Кроме того, на дискриминационной диаграмме V–Ti разновидности магнетита месторождения Акташ с относительно низкими содержаниями V и изменчивым содержанием Ti, по сравнению с гидротермальным и магматическим магнетитом, образуют отдельное поле (рис. 6, в). В целом наблюдается прямая корреляционная зависимость между содержаниями Ti и V: они возрастают от ранних к поздним разновидностям магнетита, что указывает на образование при различных температурах [2, 13, 16].

Таким образом, результаты ЛА-ИСП-МС исследований различных разновидностей магнетита на месторождении Акташ показывают, что известные дискриминационные диаграммы [3, 4, 11, 16] нуждаются в более детальных уточнениях и дополнениях с использованием данных из других месторождений.

Заключение

На месторождении Акташ распространены сульфидно-магнетитовые руды со слоисто-полосчатой текстурой и широко развитой поздней скарновой силикатной и сульфидной минерализацией. Магнетит в рудах образует следующие морфологические разновидности: обломковидные (Mt-1h), дендритовидные (Mt-1d), нитчатые (Mt-1f), колломорфные (Mt-1c) и лучистые (Mt-1r) агрегаты, зональные субгедральные зерна (Mt-2s), удлиненные пластинчатые кристаллы (Mt-3m, мушкетовит) и незональные эвгедральные метакристаллы (Mt-4e). Большинство элементов-примесей в магнетите унаследованы от ранней разновидности, но при скарнировании в несколько раз увеличиваются концентрации Ti, V, Cr, Mn, Zn, Zr, Sc и уменьшаются содержания Mo и W. Микропористые обломковидные, дендритовидные, нитчатые, колломорфные и лучистые агрегаты магнетита-1 относятся

к первичному магнетиту и, возможно, образовались в процессах гальмиролиза и диагенеза вулканогенно-осадочных отложений с участием микроорганизмов, о чем свидетельствует обнаружение различных биогенных структур магнетита-1 (Mt-1f, 1d и 1r). В них накопились пониженные количества Al, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Zn и высокие содержания As, Mo, W. Более ранние агрегаты магнетита на стадии позднего диагенеза подвергаются изменениям, что приводит к формированию субгедральных зональных зерен магнетита с значительно повышенными содержаниями Al, Ti, Cr, Mn, Ni, Zn и пониженными As, Sb, Mo, W. В мушкетовите скарновой стадии содержания Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, As, Sb относительно низкие, но количества Mo и W довольно высокие. Вероятно, содержания Mo и W унаследованы от первичного гематита. Последовательное замещение колломорфного магнетита нерудными минералами с последующим отложением метакристаллов магнетита, вероятно, связано с контактово-метаморфическими процессами. Метакристаллы магнетита скарновой стадии обогащены значительно больше содержаниями Ti, V, Cr, Mn, Zn, что свидетельствует об их образовании при высоких температурах.

Таким образом, железные руды месторождения Акташ, возможно, образовались при различных условиях рудообразования. Об этом свидетельствуют многообразные морфологические признаки разновидностей магнетита и изменчивые содержания элементов-примесей в них.

Минералого-геохимические исследования проведены при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-17-00215). Полевые работы выполнялись в рамках госбюджетной темы Института минералогии ЮВ ФНЦ МиГ УрО РАН (№ 122031600292-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals / V.V. Maslennikov, N.R. Ayupova, R.J. Herrington, L.V. Danyushevskiy, R.R. Large // *Ore Geology Reviews*. – 2012. – V. 47. – P. 5–41.
2. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States / P. Nadoll, J.L. Mauk, T.S. Hayes, A.E. Koenig, S.E. Box // *Economic Geology*. – 2012. – V. 107. – P. 1275–1292.
3. The chemistry of hydrothermal magnetite: a review / P. Nadoll, T. Angerer, J. Mauk, D. French, J. Walshe // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 61. – P. 1–32.
4. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States / P. Nadoll, J.L. Mauk, R.A. Leveille, A.E. Koenig // *Mineralium Deposita*. – 2015. – V. 50. – P. 493–515.
5. Geochemistry of magnetite from Proterozoic Fe-Cu deposits in the Kangdian metallogenic province, SW China / W.T. Chen, M.-F. Zhou, J.-F. Gao, R. Hu // *Mineralium Deposita*. – 2015. – V. 50. – P. 1–15.
6. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: the late Paleoproterozoic Sokoman Iron Formation in the Labrador Trough, Canada / D. Chung, M.-F. Zhou, J.-F. Gao, W.T. Chen // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 65. – P. 917–928.
7. Magnetite chemistry and implications for the magmatic-hydrothermal ore-forming process: an example from the Devonian Yuleken porphyry Cu system, NW China / C. Wu, H. Chen, W. Hong, D. Li, P. Liang, J. Fang, L. Zhang, C. Lai // *Chemical Geology*. – 2019. – V. 522. – P. 1–15.
8. Hydrothermal origin of the Naojiao Fe deposit in Lingxiang district, Eastern China: Evidence from in-situ LA-ICP-MS magnetite trace element analysis / H. Yan, J. Tian, D. Yu, J. Di, J. Li, Z. Liu // *Solid Earth Sciences*. – 2021. – V. 6. – № 3. – P. 268–282.
9. Чернышева Н.Е., Смелянская Г.А., Зайцева Г.Н. Типоморфизм магнетита и его использование при поисках и оценке рудных месторождений. – М.: Недра, 1981. – 236 с.
10. McQueen K.G., Cross A.J. Magnetite as a geochemical sampling medium: application to skarn deposits // *The State of the Regolith* / Ed. by R.A. Eggleton. – Australia: Brisbane Geological Society of Australia, 1998. – P. 194–199.
11. Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types // *Mineralium Deposita*. – 2011. – V. 46. – P. 319–335.
12. Dissolution reprecipitation process of magnetite from the Chengchao iron deposit: Insights into ore genesis and implication for in-situ chemical analysis of magnetite / H. Hu, J.W. Li, D. Lentz, Z. Ren, X.F. Zhao, X.D. Deng, D. Hall // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 57. – P. 393–405.
13. In-situ LA-ICP-MS trace elements analysis of magnetite: the Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, Tongling, Eastern China / X. Huang, J. Gao, L. Qi, Y. Meng, Y. Wang, Z. Dai // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – V. 72. – P. 746–759.
14. LA-ICP-MS trace element analysis of magnetite and pyrite from the Hetaoping Fe-Zn-Pb skarn deposit in Baoshan block, SW China: implications for ore-forming processes / F. Chen, J. Deng, Q. Wang, J.M. Huizenga, G. Li, Y. Gu // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – V. 117. – № 3. – 103309. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103309.
15. Genesis, geochemical evolution and metallogenic implications of magnetite: perspective from the giant Cretaceous Atlas Porphyry

- Cu-Au deposit (Cebu, Philippines) / J. Tian, Y. Zhang, L. Gong, D. Francisco, A. Berardor // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 133. – 104084. DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104084.
16. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators / S.A.S. Dare, S.J. Barnes, G. Beaudoin, J. Méric, E. Boutroy, C. Potvin-Doucet // *Mineralium Deposita*. – 2014. – V. 49. – P. 785–796.
17. Масленников В.В. Проблемы моделей рудообразования // *Металлогения древних и современных океанов-2022*. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2022. – Т. 28. – С. 3–8.
18. Hümmler K. Die Entstehung eisenreicher Gesteine durch Halmlyrolyse (=submarine Gesteinszersetzung) // *Geologische Rundschau*. – 1922. – V. 13. – P. 40–136.
19. Пуркин А.В., Денисова Т.А. Геологические критерии прогнозирования и поисков на Урале скрытых стратиформных медноколчеданных месторождений, сформированных по продуктам субмаринного выветривания базальтов. – Свердловск: Уралгеология, 1987. – 190 с.
20. Злотник-Хоткевич А.Г. Железистые и кремнисто-железистые осадки колчеданных месторождений // *Кремнисто-железистые отложения колчеданоносных районов*. – Свердловск: УрО АН СССР, 1989. – С. 45–52.
21. Масленников В.В. Гальмиролиз и железнакопление // *Топорковские чтения: Материалы XI Междунар. науч. горно-геол. конф.* – Рудный: РИИ, 2004. – С. 33–45.
22. The formation of magnetite ores of the Glubochenskoe deposit, Turgai iron belt, Russia: new structural, mineralogical, geochemical, and isotopic constraints / N.R. Ayupova, K.A. Novoselov, V.V. Maslennikov, I.Yu. Melekestseva, S.P. Hollis, D.A. Artemyev, S.G. Tessalina // *Mineralium Deposita*. – 2021. – V. 56. – P. 103–123.
23. Вольфсон Ф.И., Титов В.Н. Основные особенности геологического строения Кансайского рудного поля // *Геология свинцово-цинковых месторождений Кансайского рудного поля*. – М.: Наука, 1965. – С. 21–29.
24. Моисеева М.И. Минералогия рудных месторождений северо-восточной части Кураминского хребта и сопредельных районов. – Ташкент: Фан, 1969. – 204 с.
25. Рахимов Ш.Х. Геолого-структурные условия локализации скарново-полиметаллических месторождений Карамазара. – Ташкент: Фан, 1978. – 142 с.
26. Золото-теллуридная минерализация в рудах Pb-Zn-Fe скарнового месторождения Акташ (Западный Карамазар, Таджикистан) / У.А. Ятимов, Н.Р. Аюпова, В.В. Масленников, В.А. Котляров, В. В. Шилловских // *Геология рудных месторождений*. – 2022. – Т. 64. – № 4. – С. 362–381.
27. Геология и рудоносности рудного района / М.И. Власова, М.Д. Котенев, В.П. Матяш, В.М. Мясников // *Геология и минеральные комплексы Западного Карамазара*. – М.: Недра, 1972. – С. 192–229.
28. Геология и рудоносности рудного района / Ю.С. Шихин, В.Н. Байков, Е.Н. Ищенко, Ж.Н. Кузнецов, В.В. Михайлов, А.А. Починок, П.А. Шехтман // *Геология и минеральные комплексы Западного Карамазара*. – М.: Недра, 1972. – С. 18–105.
29. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 212 с.
30. Белоусов В.А., Полотов В.С. Отчет о доразведке нижних горизонтов рудной зоны № 9 месторождения Акташ. – Кайраккум: Фонды Кайраккумской ГРЭ, 1981. – 145 с.
31. Висмутовые минералы сульфидно-магнетитовых руд месторождения Акташ (Западный Карамазар, Таджикистан) / У.А. Ятимов, Н.Р. Аюпова, И.А. Блинов, В.А. Котляров // *Минералогия*. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 39–51.
32. Заварицкит из сульфидно-магнетитовых руд скарнового месторождения Акташ, Западный Карамазар, Северный Таджикистан / У.А. Ятимов, Е.В. Белогуб, В.В. Шилловских, И.А. Блинов // *Записки Российского минералогического общества*. – 2021. – Т. 150. – № 1. – С. 92–100.
33. Биогенный наноматгнетит в кирасе бокситоносной коры выветривания базальтов Южного Вьетнама / Н.С. Бортников, В.М. Новиков, А.П. Жухлистов, Н.М. Боева, С.В. Соболева, Е.А. Жегалло // *Доклады Академии наук*. – 2013. – Т. 451. – № 2. – С. 207–210.
34. Цианобактерии(?) в железистых кварцитах Курской магнитной аномалии / А.Ю. Розанов, М.М. Астафьева, Л.В. Зайцева, Н.А. Алфимова, С.Б. Фелицын // *Доклады Академии наук*. – 2016. – Т. 470. – № 3. – С. 360–362.
35. Чухров Ф.В. Некоторые вопросы генезиса осадочных железных руд // *Гипергенные окислы железа в геологических процессах*. – М.: Наука, 1975. – С. 91–111.
36. Онтоев Д.О. О колломорфных образованиях магнетита и о своеобразных пластинчатых и таблитчатых выделениях пирита в магнетитовых рудах // *Труды минералогического музея*. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1959. – Вып. 9. – С. 74–86.
37. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (руды меди, цинка, свинца) / Д.Н. Салихов, В.В. Масленников, И.Б. Серавкин, Г.И. Беликова, Б.Г. Галиуллин, В.Н. Никонов. – Уфа: Изд-во «Гилем», 2010. – 376 с.
38. Смирнов В.И. Корреляционные методы при парагенетическом анализе. – М.: Недра, 1981. – 174 с.
39. Butler I.B., Nesbitt R.V. Trace element distribution in the chalcopyrite wall of a black smoker chimney: insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1999. – V. 167. – P. 335–345.
40. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 359 с.
41. Ятимов У.А., Сафаралиев Н.С., Котляров В.А. Пиррофанит из скарново-сульфидно-магнетитовых руд месторождения Акташ (Западный Карамазар) // *Уральская минералогическая школа*. – Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2020. – № 26. – С. 138–140.
42. Lindsley D.H. The crystal chemistry and structure of oxide minerals as exemplified by the Fe-Ti oxides // *Oxide minerals* / Ed. by D. Rumble. – Washington DC: Mineralogical Society of America, 1976. – P. 1–60.
43. Wechsler B.A., Lindsley D.H., Prewitt C.T. Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites (Fe_{3-x}Ti_xO₄) // *American Mineralogist*. – 1984. – V. 69. – P. 754–770.
44. Tracy R.J. Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals // *Characterization of metamorphism through mineral equilibria (Reviews in Mineralogy Vol 10)* / Ed. by J.M. Ferry. – Washington: Mineralogical Society of America, 1982. – P. 355–397.
45. La Tourette T.Z., Burnett D.S., Bacon C.R. Uranium and minor element partitioning in Fe-Ti oxides and zircon from partially melted granodiorite, Crater Lake, Oregon // *Geochim Cosmochim Acta*. – 1991. – V. 55. – P. 457–469.
46. Trace element geochemistry of magnetite from the giant Beiya gold polymetallic deposit in Yunnan Province, Southwest China and its implications for the ore forming processes / X.M. Sun, H. Lin, Y. Fu, D.F. Li, P. Hollings, T.J. Yang, Z.R. Liu // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 91. – P. 477–490.
47. Major- and trace-element magnetite-melt equilibria / R.L. Nielsen, L.M. Forsythe, W.E. Gallahan, M.R. Fisk // *Chemical Geology*. – 1994. – V. 117. – P. 167–191.
48. Toplis M.J., Carroll M.R. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems // *Journal of Petrology*. – 1995. – V. 36. – P. 1137–1170.
49. Molecular-scale mechanisms of distribution and isotopic fractionation of molybdenum between seawater and ferromanganese oxides / T. Kashiwabara, Y. Takahashi, M. Tanimizu, A. Usui // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – V. 75. – № 19. – P. 5762–5784.
50. Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов // *Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях*. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – С. 335–456.
51. Овчинников Л.Н. Контактво-метасоматические месторождения Среднего и Среднего Урала. – Свердловск: Изд-во УФАИ АН СССР, 1960. – 495 с.
52. Жариков В.А. Скарновые месторождения // *Генезис эндогенных рудных месторождений*. – М.: Недра, 1968. – С. 220–302.
53. Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J. Skarn deposits. *Econ Geol. 75th Anniversary Volume*. – Littleton: Society of Economic Geologists, 1981. – V. 75. – P. 317–391.
54. Meinert L.D. Igneous petrogenesis and skarn deposits // *Geol Assoc Can Special paper* / Ed. by R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, J.M. Duke. – 1993. – V. 40. – P. 569–583.
55. Дербиков И.В. К проблеме генезиса железо-скарновых месторождений Западной Сибири (о вулканогенно-осадочном генезисе некоторых месторождений Казской группы). – Новосибирск: Труды СНИИГТимСа, 1964. – Вып. 35. – С. 82–100.

56. Дымкин А.М., Пругов В.П. Стратиформный тип железоруденения и его генетические особенности. – М.: Наука, 1980. – 200 с.
57. Новые данные о вулканогенно-осадочной природе некоторых магнетитовых руд Урала / Ю.Л. Булашевич, А.М. Дымкин, Б.А. Попов, А.К. Юрков // Доклады Академии наук СССР. – 1981. – Т. 261. – № 6. – С. 1188–1191.
58. О вулканогенно-осадочном происхождении магнетитовых руд Урала / Я.Н. Белевцев, В.П. Бухарев, В.В. Науменко, А.Ф. Гончарук, Б.А. Попов, В.А. Степанов, А.И. Усенко // Геология рудных месторождений. – 1982. – № 1. – С. 53–75.
59. Ивлев А.И. Качарское месторождение железа – новый взгляд на геологическое строение // Топорковские чтения: Материалы XI Междунар. науч. горно-геол. конф. – Рудный: РИИ, 2004. – С. 62–82.
60. Hentschel H. Zur Frage der Bildung der Eisenerze vom Lahn-Dill-Typ // Freib. Forschungsh. – 1960. – V. 79. – P. 82–105.
61. Rösler H.J. Genetische Probleme der Erze des sogenannten erweiterten Lahn-Dill-Typus // Ber. Geol. Des. DDR. – 1964. – V. 9. – P. 445–454.
62. Flick H., Nesbor H.D., Behnisch R. Iron ore of the Lahn-Dill type formed by diagenetic seeping of pyroclastic sequences – a case study on the Schalstein section at Gänsberg (Weilburg) // Geol. Rundschau. – 1990. – V. 79. – № 2. – P. 401–415.
63. Либрович Л.С. Геологическое строение Кизило-Уртазымского района на Южном Урале // Труды ЦНИГРИ. – М.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 208 с.
64. Рыкус М.В., Рыкус Н.Г., Кондручина Л.С. Магнетитовая минерализация Акжарского колчеданного рудного поля // Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Урала. – Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1992. – С. 23–34.
65. Масленников В.В. О возможной роли сипового биогальмиролиза в формировании субмаринных месторождений // Металлогения древних и современных океанов-2021. Сингенез, эпигенез, гипергенез. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2021. – С. 5–9.
66. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М.: Мир, 1968. – 368 с.

Поступила 19.09.2022 г.

Прошла рецензирование 07.10.2022 г.

Информация об авторах

Ятимов У.А., младший научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Масленников В.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Аюпова Н.Р., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Артемьев Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

UDC 553.064.32(553.311.2)

TRACE ELEMENTS IN MAGNETITE AS INDICATORS OF FORMATION CONDITIONS OF IRON ORE OF AKTASH DEPOSIT, WESTERN KARAMAZAR, TAJIKISTAN

Umed A. Yatimov¹,
umed1990@list.ru

Valery V. Maslennikov¹,
mas@mineralogy.ru

Nuriya R. Ayupova¹,
ayupova@mineralogy.ru

Dmitry A. Artemyev¹,
artemyev@mineralogy.ru

¹ South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Ilmensky reserve, Miass, 456317, Russia.

The relevance. In recent years, the interest in study of the magnetite composition as an indicator of the conditions for forming iron ore deposits has increased due to the mass spectrometry with inductively coupled plasma and laser ablation. The application of mass spectrometry with inductively coupled plasma and laser ablation analysis for the study of magnetite is especially important in Western Karamazar, where magnetite deposits bearing polymetallic mineralization were preserved. The models of the origin of these deposits are still debatable. To solve this problem, we studied the textural and structural features of magnetite ores and the composition of trace elements (per 32 elements) of magnetite types.

The aim of the research is to obtain new mineralogical and geochemical data of magnetite types to develop a model for the evolution of Aktash type iron ores.

The objects of study are eight morphological varieties of magnetite in sulfide-magnetite ore bodies of the Aktash deposit at the Kansai ore field from Western Karamazar.

Methods. The mineral composition of ores was studied in polished sections using an Olympus BX51 optical microscope equipped with an Olympus DP12 digital camera. Minerals were examined using a Tescan Vega 3 sbu scanning electron microscope (Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS). The contents of trace elements in magnetite were determined by the mass spectrometry with inductively coupled plasma and laser ablation on an Agilent 7700x mass spectrometer with the MassHunter software package and a New Wave Research UP-213 laser (Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS). International standards were used for calibration and calculation: USGS NIST-610 and USGS GSD-1g glasses. The calculation was carried out in the Lolite program using ⁵⁶Fe as an internal standard.

Results. At the Aktash deposit, magnetite is subdivided into several morphological varieties: apohyaloclastic (Mt-1h), dendritic (Mt-1d), filamentous (Mt-1f), collomorphic kidney-shaped (Mt-1c) and radial-radiant (Mt-1r) magnetite-1 aggregates, zonal subhedral grains of magnetite-2 (Mt-2s), elongated lamellar crystals of magnetite-3 («mushketovite», Mt-3m), and nonzonal euhedral metacrystals of magnetite-4 (Mt-4e). We assumed that the magnetite-1 types were formed at the stages of halmyrolysis and diagenesis of calcareous volcanic-sedimentary deposits in the zones of gas seeps and bacterial chemosynthesis. The apohyaloclastic and collomorphic magnetites were formed after hyaloclasts, the other three types – by bacteriomorphic structures. Relict inclusions of aluminosilicates and accessory minerals are identified by elevated contents of Mg, Al, Zr, Cr, and V in apohyaloclastic magnetite-1h relative to those in bacteriomorphic magnetite (Mt-1d, 1f, 1r) at similar amounts of As. Bacteriomorphic magnetite is characterized by elevated contents of As, Sb, Mo, and W and low contents of Al, Ti, V, Cr, Mn, Ni, and Zn compared to magnetite-2s and -4e. At the stage of late diagenesis, the early aggregates of magnetite-1f, c, r were overgrown with zoned crystals of magnetite-2s. Magnetite-2s is characterized by the lowest contents of As, Sb, Mo, W with increasing concentrations of Al, Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, and Bi due to partial replacement of skarn carbonates, aluminosilicates, sulfides, and pyrophanite with corroding aggregates. Similar to hematite, magnetite-3m formed after hematite crystals and concentrates W, Zn, and Mo. The replacement of early magnetite types by skarn minerals resulted in the formation of magnetite-4e, which isomorphically implied by the maximum amounts of Ti, V, Cr, Mn, Zn, that indicates the high temperature formation.

Key words:

Trace elements, magnetite, skarns, Aktash deposit, Western Karamazar.

Mineralogical and geochemical studies were supported by the Russian Science Foundation (Project no. 22-17-00215). Field work was carried out within the framework of the State Contract of the Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS (no. 122031600292-6).

REFERENCES

- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R. Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geology Reviews*, 2012, vol. 47, pp. 5–41.
- Nadoll P., Mauk J.L., Hayes T.S., Koenig A.E., Box S.E. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States. *Economic Geology*, 2012, vol. 107, pp. 1275–1292.
- Nadoll P., Angerer T., Mauk J., French D., Walshe J. The chemistry of hydrothermal magnetite: a review. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 61, pp. 1–32.
- Nadoll P., Mauk J.L., Leveille R.A., Koenig A.E. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. *Mineralium Deposita*, 2015, vol. 50, pp. 493–515.

5. Chen W.T., Zhou M.-F., Gao J.-F., Hu R. Geochemistry of magnetite from Proterozoic Fe-Cu deposits in the Kangdian metallogenic province, SW China. *Mineralium Deposita*, 2015, vol. 50, pp. 1–15.
6. Chung D., Zhou M.-F., Gao J.-F., Chen W.T. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: the late Paleoproterozoic Sokoman Iron Formation in the Labrador Trough, Canada. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 65, pp. 917–928.
7. Wu C., Chen H., Hong W., Li D., Liang P., Fang J., Zhang L., Lai C. Magnetite chemistry and implications for the magmatic-hydrothermal ore-forming process: an example from the Devonian Yuleken porphyry Cu system, NW China. *Chemical Geology*, 2019, vol. 522, pp. 1–15.
8. Yan H., Tian J., Yu D., Di J., Li J., Liu Z. Hydrothermal origin of the Naojiao Fe deposit in Lingxiang district, Eastern China: Evidence from in-situ LA-ICP-MS magnetite trace element analysis. *Solid Earth Sciences*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 268–282.
9. Chernysheva N.E., Smelyanskaya G.A., Zaytseva G.N. *Tipomorfizm magnetita i ego ispolzovanie pri poiskakh i otsenke rudnykh mestorozhdeniy* [Magnetite typomorphism and its use in prospecting and evaluation of ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 236 p.
10. McQueen K.G., Cross A.J. Magnetite as a geochemical sampling medium: application to skarn deposits. *The State of the Regolith*. Ed. by R.A. Eggleton. Brisbane, Geological Society of Australia, 1998. pp. 194–199.
11. Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 2011, vol. 46, pp. 319–335.
12. Hu H., Li J.W., Lentz D., Ren Z., Zhao X.F., Deng X.D., Hall D. Dissolution reprecipitation process of magnetite from the Chengchao iron deposit: insights into ore genesis and implication for in-situ chemical analysis of magnetite. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 57, pp. 393–405.
13. Huang X., Gao J., Qi L., Meng Y., Wang Y., Dai Z. In-situ LA-ICP-MS trace elements analysis of magnetite: The Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, Tongling, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 746–759.
14. Chen F., Deng J., Wang Q., Huizenga J.M., Li G., Gu Y. LA-ICP-MS trace element analysis of magnetite and pyrite from the Hetaoping Fe-Zn-Pb skarn deposit in Baoshan block, SW China: Implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 117, 103309. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103309.
15. Tian J., Zhang Y., Gong L., Francisco D., Berador A. Genesis, geochemical evolution and metallogenic implications of magnetite: perspective from the giant Cretaceous Atlas Porphyry Cu-Au deposit (Cebu, Philippines). *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 133, 104084. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104084.
16. Dare S.A.S., Barnes S.J., Beaudoin G., Méric J., Boutroy E., Potvin-Doucet C. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. *Mineralium Deposita*, 2014, vol. 49, pp. 785–796.
17. Maslennikov V.V. Problemy modelej rudoobrazovaniya [Problems of ore formation models]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2022* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2022]. Miass, SU FRC of MG of UB RAS, 2022. pp. 3–8.
18. Hümmel K. Die Entstehung eisenreicher Gesteine durch Halmyrolyse (=submarine Gesteinszersetzung) [Formation of iron-rich rocks through Halmyrolyse (=submarine rock decomposition)]. *Geologische Rundschau*, 1922, vol. 13, pp. 40–137.
19. Purkin A.V., Denisova T.A. *Geologicheskie kriterii prognozirovaniya i poiskov na Urale skrytykh stratiformnykh med-nokolchedannykh mestorozhdeniy, sformirovannykh po produktam submarinnogo vyvetrivaniya bazaltov* [Geological criteria for prediction and prospecting of hidden stratiform copper sulfide deposits formed after products of submarine weathering of basalts at the Urals]. Sverdlovsk, Uralgeologiya Publ., 1987. 190 p.
20. Zlotnik-Khotkevich A.G. Zhelezistyie i kremnisto-zhelezistyie osadki kolchedannykh mestorozhdeniy [Ferruginous and siliceous-ferruginous sediments of massive sulfide deposits]. *Kremnisto-zhelezistyie otlozheniya kolchedanonosnykh raionov* [Siliceous-Ferruginous Deposits of the Sulfide-Bearing Districts]. Sverdlovsk, UB USSR AS Publ., 1989. pp. 45–52.
21. Maslennikov V.V. Galmirolyz i zhelezonakoplenie [Halmyrolysis and iron accumulation]. *Toporkovskie chteniya. Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchnoy gorno-geologicheskoy Konferentsii* [Toporkov readings. Proceedings of the XI International scientific mining and geological conference]. Rudny, Rudny Industrial Institute, 2004. pp. 33–45.
22. Ayupova N.R., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Melekestseva I.Yu., Hollis S.P., Artemyev D.A., Tesselina S.G. The formation of magnetite ores of the Glubochenskoe deposit, Turgai iron belt, Russia: new structural, mineralogical, geochemical, and isotopic constraints. *Mineralium Deposita*, 2021, vol. 56, pp. 103–123.
23. Volfson F.I., Titov V.N. Osnovnye osobennosti geologicheskogo stroeniya Kansayskogo rudnogo polya [The main features of the geological structure of the Kansai ore field]. *Geologiya svintsovo-sinkovykh mestorozhdeniy Kansayskogo rudnogo polya* [Geology of lead-zinc deposits of the Kansai ore field]. Moscow, Nauka Publ., 1965. pp. 21–29.
24. Moiseeva M.I. *Mineralogiya rudnykh mestorozhdeniy severo-vostochnoy chasti Kuraminskogo khrebtia i soprodelnykh rayonov* [Mineralogy of ore deposits in the north-eastern part of the Kuraminsky Range and adjacent areas]. Tashkent, Fan Publ., 1969. 204 p.
25. Rakhimov Sh.H. *Geologo-strukturnye usloviya lokalizatsii skarno-polimetallicheskiykh mestorozhdeniy Karamazara* [Geological and structural conditions of localization of skarn-polymetallic deposits of Karamazar]. Tashkent, Fan Publ., 1978. 142 p.
26. Yatimov U.A., Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Shilovskikh V.V. Gold-telluride mineralization of the Aktash Pb-Zn-Fe skarn deposit (Western Karamazar, Tajikistan). *Geology Ore Deposits*, 2022, vol. 64, no. 4, pp. 362–381. In Rus.
27. Vlasova M.I., Kotenev M.D., Matyash V.P., Myasnikov V.M. Geologiya i rudonosnosti rudnogo rayona [Geology and ore content of the ore region]. *Geologiya i mineralnye komplekсы Zapadnogo Karamazara* [Geology and mineral complexes of Western Karamazar]. Moscow, Nedra Publ., 1972. pp. 192–229.
28. Shikhin Yu.S., Baikov V.N., Ishchenko E.N., Kuznetsov Zh.N., Mikhailov V.V., Pochinok A.A., Shekhtman P.A. Geologiya i rudonosnosti rudnogo rayona [Geology and ore content of the ore region]. *Geologiya i mineralnye komplekсы Zapadnogo Karamazara* [Geology and mineral complexes of Western Karamazar]. Moscow, Nedra Publ., 1972. pp. 18–105.
29. Strakhov N.M. *Osnovy teorii litogeneza* [Fundamentals of the theory of lithogenesis]. Moscow, Acad. Sciences of the USSR Publ., 1962. 212 p.
30. Belousov V.A., Polotov V.S. *Otchet o dorazvedke nizhnikh gorizontov rudnoy zony № 9 mestorozhdeniya Aktash* [Report on the additional exploration of the lower horizons of the ore zone No. 9 of the Aktash deposit]. Kairakkum, Funds of the Kairakkum EE, 1981. 145 p.
31. Yatimov U.A., Ayupova N.R., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Bismuth minerals of sulfide-magnetite ores from the Aktash deposit (Western Karamazar, Tajikistan). *Mineralogy*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 39–51. In Rus.
32. Yatimov U.A., Belogub E.V., Shilovskikh V.V., Blinov I.A. Zavaritskite from sulfide-magnetite ores of the Aktash Skarn deposit (Western Karamazar). *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, 2021, vol. 150, no. 1, pp. 92–100. In Rus.
33. Bortnikov N.S., Novikov V.M., Zhukhlistov A.P., Boeva N.M., Soboleva S.V., Zhegallo E.A. Biogenic nanomagnetite in cuirass of the bauxite-bearing crust of weathering in basalt from South Vietnam. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 451, no. 1, pp. 754–757.
34. Rozanov A.Y., Astafieva M.M., Zaitseva L.V., Alfimova N.A., Felitsyn S.B. Cyanobacteria(?) in iron banded formations of the Kursk magnetic anomaly. *Doklady Biological Sciences*, 2016, vol. 470, no 1, pp. 231–233.
35. Chukhrov F.V. Nekotorye voprosy genezisa osadochnykh zheleznykh rud [Some questions of the genesis of sedimentary iron ores]. *Gipergennye okisly zheleza v geologicheskikh processakh* [Hypergene oxides of iron in geological processes]. Moscow, Nedra Publ., 1975. pp. 91–111.
36. Ontoev D.O. O kolloformnykh obrazovaniyakh magnetita i o svoebraznykh plastinchatykh i tablitschatykh vydeleniyakh pirita v magnetitovykh rudakh [On colloform formations of magnetite and peculiar lamellar and tabular pyrite segregations in magnetite ores]. *Trudy mineralogicheskogo muzeya* [Proceedings of the Mineralogical Museum]. Moscow, AS of the USSR Publ., 1959. pp. 74–86.
37. Salikhov D.N., Maslennikov V.V., Seravkin I.B., Belikova G.I., Galiullin B.G., Nikonov V.N. *Poleznye iskopaemye Respubliki*

- Bashkortostan (rudy medi, tsinka, svintsya)* [Mineral resources of the Republic of Bashkortostan (ores of copper, zinc, lead)]. Ufa, Gilem Publ. house, 2010. 376 p.
38. Smirnov V.I. *Korrelatsionnye metody pri parageneticheskom analize* [Correlation methods in paragenetic analysis]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 174 p.
 39. Butler I.B., Nesbitt R.V. Trace element distribution in the chalcopyrite wall of a black smoker chimney: insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, vol. 167, pp. 335–345.
 40. Dubinin A.V. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v okeane* [Geochemistry of rare earth elements in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 359 p.
 41. Yatimov U.A., Safaraliev N.S., Kotlyarov V.A. Pirofanit iz skarnovo-sulfidno-magnetitovykh rud mestorozhdeniya Aktash (Zapadny Karamazar) [Pyrophanite from skarn-sulfide-magnetite ores from the Aktash deposit (Western Karamazar)]. *Uralskaya mineralogicheskaya shkola* [Ural Mineralogical School]. Ekaterinburg, IGG of UB RAS Publ., 2020. pp. 138–140.
 42. Lindsley D.H. The crystal chemistry and structure of oxide minerals as exemplified by the Fe-Ti oxides. *Oxide minerals*. Ed. by D. Rumble. Washington DC, Mineralogical Society of America, 1976. pp. 1–60.
 43. Wechsler B.A., Lindsley D.H., Prewitt C.T. Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites (Fe₃-xTi_xO₄). *American Mineralogist*, 1984, vol. 69, pp. 754–770.
 44. Tracy R.J. Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals. *Characterization of metamorphism through mineral equilibria (Reviews in Mineralogy Vol 10)*. Ed. by J.M. Ferry. Washington, Mineralogical Society of America, 1982. pp. 355–397.
 45. La Tourrette T.Z., Burnett D.S., Bacon C.R. Uranium and minor element partitioning in Fe-Ti oxides and zircon from partially melted granodiorite, Crater Lake, Oregon. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, vol. 55, pp. 457–469.
 46. Sun X.M., Lin H., Fu Y., Li D.F., Hollings P., Yang T.J., Liu Z.R. Trace element geochemistry of magnetite from the giant Beiya gold polymetallic deposit in Yunnan Province, Southwest China and its implications for the ore forming processes. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91 pp. 477–490.
 47. Nielsen R.L., Forsythe L.M., Gallahan W.E., Fisk M.R. Major and trace-element magnetite-melt equilibria. *Chemical Geology*, 1994, vol. 117, pp. 167–191.
 48. Toplis M.J., Carroll M.R. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems. *Journal of Petrology*, 1995, vol. 36, pp. 1137–1170.
 49. Kashiwabara T., Takahashi Y., Tamimizu M., Usui A. Molecular-scale mechanisms of distribution and isotopic fractionation of molybdenum between seawater and ferromanganese oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, no. 19, pp. 5762–5784.
 50. Korzhinskiy D.S. Ocherk metasomaticheskikh protsessov [Essay on metasomatic processes]. *Osnovnye problemy v uchienii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh* [Main problems in the study of magmatogenic ore deposits]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ. House, 1953. pp. 335–456.
 51. Ovchinnikov L.N. *Kontaktovo-metasomaticheskie mestorozhdeniya Srednego i Severnogo Urala* [Contact-metasomatic deposits of the Middle and Northern Urals]. Sverdlovsk, Ufa Academy of Sciences of the USSR Publ. House, 1960. 495 p.
 52. Zharikov V.A. Skarnovye mestorozhdeniya [Skarn deposits]. *Genезis endogennykh rudnykh mestorozhdenii* [Genesis of Endogenous Ore Deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1968. pp. 220–302.
 53. Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J. Skarn deposits. *Econ. Geol. 75th Anniversary Volume*. Littleton, Society of Economic Geologists, 1981. vol. 75. pp. 317–391.
 54. Meinert L.D. Igneous petrogenesis and skarn deposits. *Geol Assoc Can Special paper*. Eds. R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, J.M. Duke. Littleton, Society of Economic Geologists, 1993. Vol. 40. pp. 569–583.
 55. Derbikov I.V. K probleme genezisa zhelezo-skarnovykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri (o vulkanogenno-osadochnom genezise nekotorykh mestorozhdeniy Kazskoy gruppy) [On the problem of the genesis of iron-skarn deposits in Western Siberia (on the volcanogenic-sedimentary genesis of some deposits of the Kaz group)]. *Proceedings of SNIIGiMS*, 1964, Iss. 35, pp. 82–100.
 56. Dymkin A.M., Prugov V.P. *Stratiformny tip zhelezo-urudneniya i ego geneticheskie osobennosti* [Stratiform type of iron ore and its genetic features]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 200 p.
 57. Bulashevich Yu.L., Dymkin A.M., Popov B.A., Yurkov A.K. Novye dannye o vulkanogenno-osadochnoy prirode nekotorykh magnetitovykh rud Urala [New data on the volcanogenic-sedimentary nature of some magnetite ores in the Urals]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1981, vol. 261, no. 6, pp. 1188–1191.
 58. Belevtsev Ya.N., Bukharev V.P., Naumenko V.V., Goncharuk A.F., Popov B.A., Stepanov V.A., Usenko A.I. O vulkanogenno-osadochnom proiskhozhdenii magnetitovykh rud Urala [On the volcanogenic-sedimentary origin of the magnetite ores of the Urals]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1982, no. 1, pp. 53–75.
 59. Ivlev A.I. Kacharskoe mestorozhdenie zheleza – novyy vzglyad na geologicheskoe stroenie [Kachar iron deposit – a new look at the geological structure]. *Toporkovskie chteniya. Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchnoy gorno-geoljgicheskoy konferentsii* [Toporkov Readings. Proceedings of the XI International scientific mining and geological conference]. Rudny, Rudny, Rudny Industrial Institute, 2004. pp. 62–82.
 60. Hentschel H. Zur Frage der Bildung der Eisenerze vom Lahn-Dill-Typ [On the question of the formation of iron ores of the Lahn-Dill type]. *Freib. Forschungsh.*, 1960, vol. 79, pp. 82–105.
 61. Rösler H.J. Genetische Probleme der Erze des sogenannten erweiterten Lahn-Dill-Typus [Genetic problems of ores of the so-called extended Lahn-Dill type]. *Ber. Geol. Des. DDR*, 1964, vol. 9, pp. 445–454.
 62. Flick H., Nesbor H.D., Behnisch R. Iron ore of the Lahn-Dill type formed by diagenetic seeping of pyroclastic sequences – a case study on the Schalstein section at Gännsberg (Weilburg). *Geol. Rundschau*, 1990, vol. 79, no 2, pp. 401–415.
 63. Librovich L.S. *Geologicheskoe stroenie Kizilo-Urtazym'skogo rayona na Yuzhnom Urale* [Geological structure of the Kizilo-Urtazym region in the Southern Urals]. Moscow, ONTI NKTP USSR Publ., 1936. 208 p.
 64. Rykus M.V., Rykus N.G., Kondruchina L.S. Magnetitovaya mineralizatsiya Akzharskogo kolchedannogo rudnogo polya [Magnetite mineralization of the Akzhar pyrite ore field]. *Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Urala* [Mineralogy, geochemistry and minerals of the Urals]. Ufa, BNC UB USSR AN Publ., 1992. pp. 23–34.
 65. Maslennikov V.V. O vozmozhnoy roli sipovogo biogalmyroliza v formirovaniy submarinnykh mestorozhdeniy [On the possible role of vulture biohalmyrolysis in the formation of submarine deposits]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2021. Singenez, epigenez, gipergenez* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2021. Syngeneses, epigeneses, hypergenesis]. Miass, SU FRC of MG of UB RAS, 2021. pp. 5–9.
 66. Garrels R.M., Christ C.L. *Rastvory, mineraly, ravnovesiya* [Solutions, Minerals, Equilibria]. Moscow, Mir Publ., 1968. 368 p.

Received: 19 September 2022.

Reviewed: 7 October 2022.

Information about the authors

Umed A. Yatimov, junior researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS.

Valery V. Maslennikov, Dr. Sc., professor, correspondent member RAS, chief researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS.

Nuriya R. Ayupova, Cand. Sc., leading researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS.

Dmitry A. Artemyev, Cand. Sc., researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of UB RAS.