



Роль галогенов и серы в апатите при оценке потенциальной рудоносности гранитоидов тигертышского комплекса (Кузнецкий Алатау)

Е. В. Наставко, Т. В. Лешуков, А. С. Слесарев, Г. А. Федосюк

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
evnastavko@yandex.ru, tvleshukov@mail.ru, l-e-s-h-k-a-h-s1@mail.ru, germanfedosyuk1002@gmail.com

Проведено исследование содержания галогенов (F и Cl) и серы в апатите из гранодиоритов и лейкогранитов тигертышского комплекса ($\gamma\text{C-O}_1\text{t}$), которое может указывать на потенциальную рудоносность гранитоидов. Апатиты гранодиоритов приурочены главным образом к зернам амфибола, реже располагаются в кварце и полевых шпатах, по составу соответствуют фторапатиту ($F = 2.45\text{--}2.76$ мас. %, $\text{Cl} = 0.02\text{--}0.03$ мас. %). В лейкогранитах апатит приурочен к полевым шпатам и биотиту, по составу отвечает гидроксил- и фторапатиту ($F = 1.50\text{--}1.80$ мас. %, $\text{Cl} = 0.33\text{--}0.52$ мас. %). В апатите из гранодиоритов содержание серы максимально в зернах, приуроченных к амфиболу, и составляет $0.05\text{--}0.11$ мас. %, тогда как в апатите из кварца и полевых шпатов ее не более 0.04 мас. %. Содержание серы в апатите лейкогранитов не зависит от причастности последнего к разным минералам и составляет $0.04\text{--}0.07$ мас. %. Исходя из содержаний F, Cl и S в апатитах гранитоидов тигертышского комплекса, можно предположить, что с гранодиоритами может быть связано золотосульфидно-кварцевое оруденение, с лейкогранитами – Cu-порфировое оруденение.

Ключевые слова: апатит, галогены, сера, гранитоиды, металлогения, Кузнецкий Алатау

The role of halogens and sulfur in apatite in assessing the potential ore content of granitoids of the Tigertysh complex (Kuznetsk Alatau)

E. V. Nastavko, T. V. Leshukov, A. S. Slesarev, G. A. Fedosyuk

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The study of the halogen (F and Cl) and sulfur contents in apatite from granodiorites and leucogranites of the Tigertysh complex ($\gamma\text{C-O}_1\text{t}$) was carried out, which may indicate the potential ore content of granitoids. Apatites of granodiorites are confined mainly to amphibole grains, less often located in quartz and feldspars, and correspond in composition to fluorapatite ($F = 2.45\text{--}2.76$ wt. %, $\text{Cl} = 0.02\text{--}0.03$ wt. %). In leucogranites, apatite is confined to feldspars and biotite, and corresponds in composition to hydroxyl- and fluorapatite ($F = 1.50\text{--}1.80$ wt. %, $\text{Cl} = 0.33\text{--}0.52$ wt. %). In apatite from granodiorites, the sulfur content is maximum in grains confined to amphibole and is $0.05\text{--}0.11$ wt. %, while in apatite from quartz and feldspars it is no more than 0.04 wt. %. The sulfur content in apatite from leucogranites does not depend on its confinement to different minerals and is $0.04\text{--}0.07$ wt. %. Based on the F, Cl and S contents in apatites of granitoids of the Tigertysh complex, it can be assumed that gold-sulfide-quartz mineralization may be associated with granodiorites, and Cu-porphyry mineralization with leucogranites.

Keywords: apatite, halogens, sulfur, granitoids, metallogeny, Kuznetsk Alatau

Введение

Наличие флюида и его состав оказывает существенное влияние на металлогеническую специфику и рудоносность габбродиорит-гранитовых и диорит-гранитовых комплексов (Холоднов, Бушляков, 2002; Belousova et al., 2002, O'Sullivan et al., 2020 и др.). Минералами — концентраторами флюидов в них являются слюда (биотит), амфибол и апатит.

В последние два десятилетия апатит привлекает к себе внимание исследователей благодаря широкому распространению в породах разного генезиса и состава, и одновременно он достаточно чувствителен к изменению среды и отражает рудную специфику пород, в состав которых входит (Холоднов, Бушляков, 2002; Chakhmouradian et al., 2017; O'Sullivan et al., 2020; и др.).

Уральскими исследователями проведена большая работа и сделан вывод о том, что F, Cl и S в составе апатита могут косвенно указывать на рудоносность содержащих его магматических пород (Коновалова и др.,

2013; Коровко и др., 2018; Холоднов, Бушляков, 2002; и др). В монографии (Холоднов, Бушляков, 2002) приведены содержания F, Cl и S в апатите, слюде и амфиболе из магматических пород с разным типом оруденения, также представлены диаграммы, позволяющие выделить апатиты из пород с разной металлогенической специализацией. Cl/F-соотношение в составе апатита является индикатором флюидного режима в петро- и рудогенезе (Бочарников и др., 2012; Palma et al., 2019 и др.). В последние годы появились работы по исследованиям флюидного режима на основе содержаний F, Cl и S в апатитах за пределами Урала (Веснин, 2024; Шардакова и др., 2023).

Обобщение исследователями данных по объектам Урала позволило предложить новую классификационную диаграмму соотношений содержаний F, Cl и S в апатитах магматических пород (Коровко и др., 2018) для предварительных оценок рудоперспективности магматических комплексов.

Для цитирования: Наставко Е. В., Лешуков Т. В., Слесарев А. С., Федосюк Г. А. Роль галогенов и серы в апатите при оценке потенциальной рудоносности гранитоидов тигертышского комплекса (Кузнецкий Алатау) // Вестник геонаук. 2025. 4(364). С. 32–39. DOI: 10.19110/geov.2025.4.3

For citation: Nastavko E. V., Leshukov T. V., Slesarev A. S., Fedosyuk G. A. The role of halogens and sulfur in apatite in assessing the potential ore content of granitoids of the Tigertysh complex (Kuznetsk Alatau). Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 32–39, doi: 10.19110/geov.2025.4.3



Содержание серы и галогенов флюидсодержащих минералов могут помочь в понимании рудной специфики гранитоидных интрузий.

В работе рассматривается содержание галогенов и серы в апатите как отражение рудогенерирующего потенциала гранитоидов тигертышского комплекса. Решение вопроса поведения галогенов и серы в апатитах может послужить дополнительным критерием оценки потенциальной рудоносности и промышленной значимости гранитоидов. Такая работа по апатитам магматитов Кузнецкого Алатау проводится впервые.

Краткая геологическая характеристика тигертышского комплекса и его обрамления

Палеозойские гранитоидные комплексы Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) формировались на различных стадиях развития каледонского аккреционно-коллизийного орогена. Смена геодинамических режимов их становления от островодужных до внутримитных обстановок обусловила гетерогенность гранитообразования. Источником гранитообразования рассматривается материал разной природы: субдцируемая плита (слэб), ювенильная

континентальная кора каледонид и мантийные диапирсы (плюмы) (Владимиров и др., 1999; Ярмолюк и др., 2011 и др.).

Тигертышский гранитный комплекс ($\gamma\epsilon-O_{1t}$) составляет Тигертышский, Улень-Туимский и Уйбатский полихронные плутоны в юго-восточной части Кузнецкого Алатау и Батеневском кряже ЦАСП, административно располагается на территории Кемеровской области и Республики Хакасия (рис. 1, а). Строение комплекса двухфазное. Первая (главная) фаза сложена диоритами, кварцевыми диоритами, кварцевыми сиенитами, биотит-роговообманковыми гранодиоритами и гранитами, часто имеющими порфириовидную структуру. Вторая фаза представлена дополнительными интрузиями — мелкими штоками и дайкообразными телами лейкогранитов. К жильной серии относятся дайки аплитов и микрогранитов.

Петротипический Тигертышский массив площадью 500 км² расположен в междуречье Томь – Теренсуг – Большой Казыр (рис. 1, б), составляет центральную и южную части Тигертышского плутона, общая площадь которого около 2 000 км². Форма массива сложная, лополитообразная, обусловленная внедрением в межформационное пространство. Долины всех крупных рек представлены эффузивно-терригенно-карбонатными

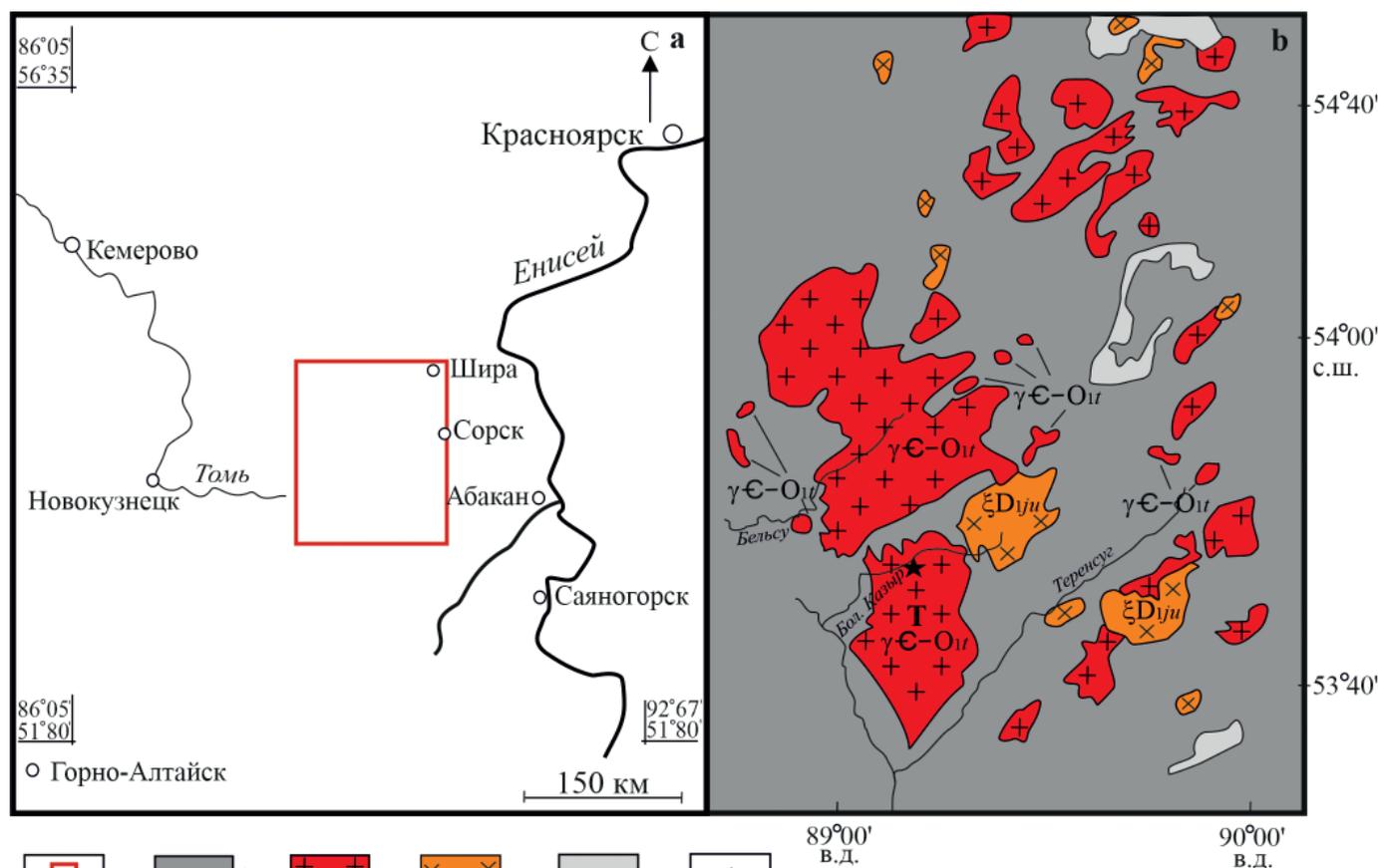


Рис. 1. Схема расположения района исследований (а); геологическая карта-схема района исследований (Геологическая..., 2007) (б): 1 — месторасположение объекта исследования; 2 — вулканогенные и терригенно-карбонатные образования (нерасчлененные) V- ϵ_1 ; 3 — тигертышский гранитный комплекс ($\gamma\epsilon-O_{1t}$); 4 — юлинский сиенит-граносиенитовый комплекс (ξD_{1ju}); 5 — вулканы бимодальной серии (D_1-D_2); 6 — место отбора проб; Т — Тигертышский массив ($\epsilon-O_1$)

Fig. 1. Location of the study area (а); geological schematic map of the research area (Geologicheskaya..., 2007) (б): 1 — location of the object of study; 2 — volcanogenic and terrigenous-carbonate formations (undivided) V- ϵ_1 ; 3 — Tigertysh granite complex ($\gamma\epsilon-O_{1t}$); 4 — Yulin syenite-granosyenite complex (ξD_{1ju}); 5 — volcanics of the bimodal series (D_1-D_2); 6 — sampling site; Т — Tigertysh massiv ($\epsilon-O_1$)

отложениями, а водораздельные пространства — интрузивными породами, прорывающими осадочные толщи. Основная часть интрузии (около 60–65 %) сложена породами первой фазы — биотитовыми, биотит-роговообманковыми гранитами и гранодиоритами, которые находятся в центральной части массива. Далее породы постепенно сменяются роговообманковыми кварцевыми диоритами и диоритами, которые слагают внешние зоны массива.

Граниты и гранодиориты данной фазы — розовато-серые средне- и крупнозернистые порфирированные породы с вкрапленниками микроклина размером до 4.0 см (до 15 % объема породы). Фемические минералы, амфибол и слюда, иногда образуют шпироподобные скопления, что придает породе такситовую текстуру. Состоят породы примерно из равного количества микроклина и плагиоклаза, которые суммарно составляют 60–70 %, кварца — 25–35 %, биотита и роговой обманки — 1–5 %; аксессуарных минералов — магнетита, титанита, апатита, циркона, иногда ортита.

Вторая фаза комплекса Тигертышского массива представлена мелкозернистыми лейкогранитовыми гранитами, реже гранит-порфирами с микропегматитовой основной массой. Непосредственные контакты с вмещающими биотитовыми порфирированными гранитами наблюдались в мелких прожилках, где на контакте развита полоска пегматита до 1 см, а внутренняя часть представлена аплитом. Лейкограниты слагают штокообразные тела площадью от 10–15 до 120 км² в пределах массива Гольцовый, горы Молния и ряд мелких крутопадающих дайкообразных тел в верховьях рек Амзас, Караташ, на правом берегу р. Теренсуг среди гранодиоритов тигертышского комплекса (Государственная..., 2019).

Дайковые тела лейкогранитов, широко развитые в северо-восточной части Уйбатского плутона, ранее рассматривались в составе самостоятельного сорского комплекса, а также выделялись под названием «каркасная интрузия». Макроскопически лейкограниты представляют собой розовато-светло-серые массивные мелко-, тонкозернистые породы, состоят из альбит-олигокла-

за и микроклин-пертита (до 65 %), кварца (32–35 %) и хлоритизированного биотита (Врублевский и др., 2016).

Вопрос о возрасте тигертышских гранитоидов в настоящее время однозначно не решен. Породы комплекса прорывают все известные в регионе стратифицированные и интрузивные образования вплоть до среднего кембрия, исключая гранитоиды мартайгинского комплекса (Є₂). Верхний возрастной предел пород тигертышского комплекса определяется прорыванием дайками и мелкими штоками сиенитов раннесилурийского субвулканического комплекса (Государственная..., 2019). Возраст умеренно щелочных порфирированных гранитов Тигертышского массива северо-восточнее пос. Балыксу, полученный уран-свинцовым методом по цирконам (U-Pb-метод, SHRIMP), соответствует позднему кембрию — 494.9 ± 5.1 млн лет. Возраст кварцевых сиенитов Каразасского массива бассейна р. Бискамба датирован также поздним кембрием — 493.3 ± 7.8 млн лет. Умеренно щелочные лейкограниты второй фазы северной части массива г. Карлыган в верховьях р. Ниня датированы поздним кембрием — 494.7 ± 8.4 млн лет (Врублевский и др., 2016). Радиологические датировки тигертышских гранитоидов Улень-Туимского массива и Солгонского выступа Тигертышского плутона U-Pb-методом по цирконам составили 500–527 млн лет, K-Ar-методом по биотиту и амфиболу — 483–515 млн лет, что соответствует кембрию — раннему ордовику (Государственная..., 2019).

Исходя из полученных датировок и прорывания пород тигертышского комплекса дайками и мелкими штоками сиенитов раннесилурийского субвулканического комплекса возраст тигертышского комплекса принят как кембрий — ранний ордовик (Государственная..., 2019).

К породам тигертышского комплекса приурочено гидротермальное оруденение молибден-медно-порфировой и молибден-порфировой рудных формаций, связанных с гранитами, а также жильные проявления золотосульфидно-кварцевой рудной формации, которые относятся к гранодиоритам комплекса (Государственная..., 2019).

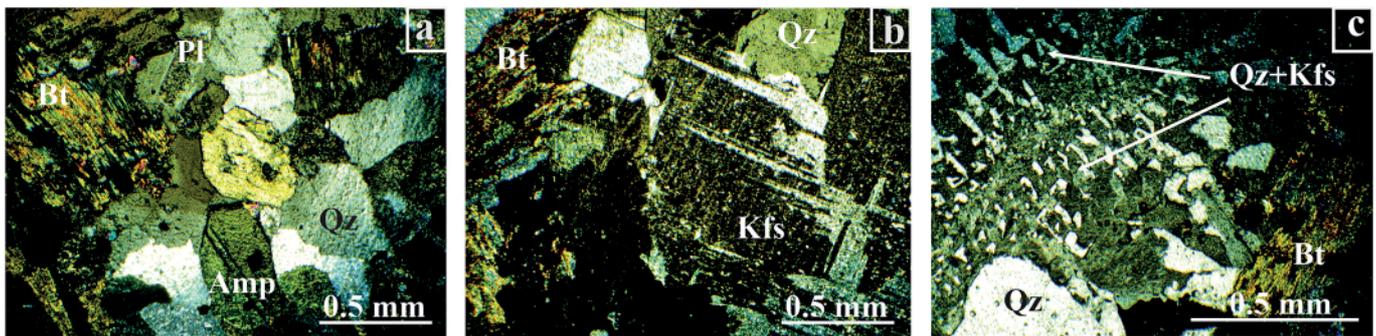


Рис. 2. Петрографические особенности гранодиоритов (а, б) и лейкогранитов (с, д). Фото с анализатором. Условные обозначения здесь и далее по тексту приводятся по: Whitney, Evans, 2010: Amp — амфибол, Bt — биотит, Kfs — калиевый полевой шпат, Pl — плагиоклаз, Qz — кварц

Fig. 2. Petrographic features of granodiorites (a, b) and leucogranites (c, d). Photo with analyzer. The symbols used here and throughout the text are given according to Whitney, Evans, 2010: Amp — amphibole, Bt — biotite, Kfs — potassium feldspar, Pl — plagioclase, Qz — quartz



Объект и методы исследования

Отбор проб (гранодиоритов и лейкогранитов) осуществлялся в ходе полевых исследований в 2023 г. и произведен из коренных выходов пород, прослеживающихся по левому берегу р. Большой Казыр (рис. 1, b), где гранодиориты секутся единичными маломощными (до 10 см) дайками лейкогранитов. Общее количество образцов — 6, из них 3 — гранодиориты и 3 — лейкограниты.

Состав первично-магматического апатита, находящегося в виде включений в биотите, амфиболе и кварц-полевошпатовой основной массе, проанализирован в полированных шлифах гранитоидов комплекса. В гранодиоритах зерна апатита приурочены к амфиболу и кварц-полевошпатовой основной массе, в лейкогранитах — к лейстам биотита и полевым шпатам.

Размер зерен апатита гранодиоритов, относящихся к амфиболу, достигает 70–80 мкм, из кварц-полевошпатовой основной массы — 100 мкм. В лейкогранитах, наоборот, максимального размера в 100 мкм достигает апатит, приуроченный к лейстам биотита, тогда как размер апатита из полевых шпатов не превышает 60 мкм, преимущественно составляя 40 мкм.

В целом проанализирован состав 40 зерен, по 20 зерен в каждом типе пород.

Химический состав апатита изучался в полированных шлифах с углеродным напылением на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 (Чехия) с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) Oxford Instruments (исследования выполнены в АНО «Развитие человеческого капитала» при ИОК «Техноград», Москва). Ускоряющее напряжение для СЭМ-съемки и анализа составило 20 кВ, предел обнаружения элементов 0.01 %.

Минералого-петрографическая характеристика гранодиоритов и лейкогранитов тигертышского комплекса

Гранодиориты первой фазы внедрения представляют собой слюдисто-роговообманковые равномерно-зернистые, чаще среднезернистые, реже крупнозернистые породы с массивной текстурой. По идиоморфизму зерен структура гипидиоморфнозернистая, гранитная. Текстура массивная; иногда за счет того, что фемические минералы (амфибол и слюда) слагают фрагменты близка к такситовой. Основная часть породы сложена полевыми шпатами, амфиболом и кварцем, их сумма достигает 90–95 %. Плаггиоклаз составляет 35–40 %, амфибол — 25–35 %, кварц — до 15–20 %, калиевый полевой шпат — 5–10 %, слюда от 2–3 до 5 %, оставшиеся 2–5 % приходятся на акцессории, представленные цирконом, апатитом, титанитом, ильменитом и магнетитом.

Минералого-петрографические особенности породы показаны на рисунке 2.

Таблитчатые зерна плаггиоклаза, размер которых варьирует от 0.5 до 8 мм, идиоморфны относительно калиевого полевого шпата. Вторичные преобразования представлены сосюритизацией. По составу плаггиоклаз соответствует андезину, реже олигоклазу — An_{29-38} .

Амфибол представлен темно-зелеными, почти черными короткопризматическими зернами, размер которых достигает 5–6 мм. Состав амфибола из центральных частей зерен отвечает эдениту, краевых частей — магниальной роговой обманке и актинолиту.

Кварц представлен субизометричными ксеноморфными зернами размером до 2–3 мм.

Калиевый полевой шпат (микроклин) светло-розового цвета встречается в виде таблитчатых зерен

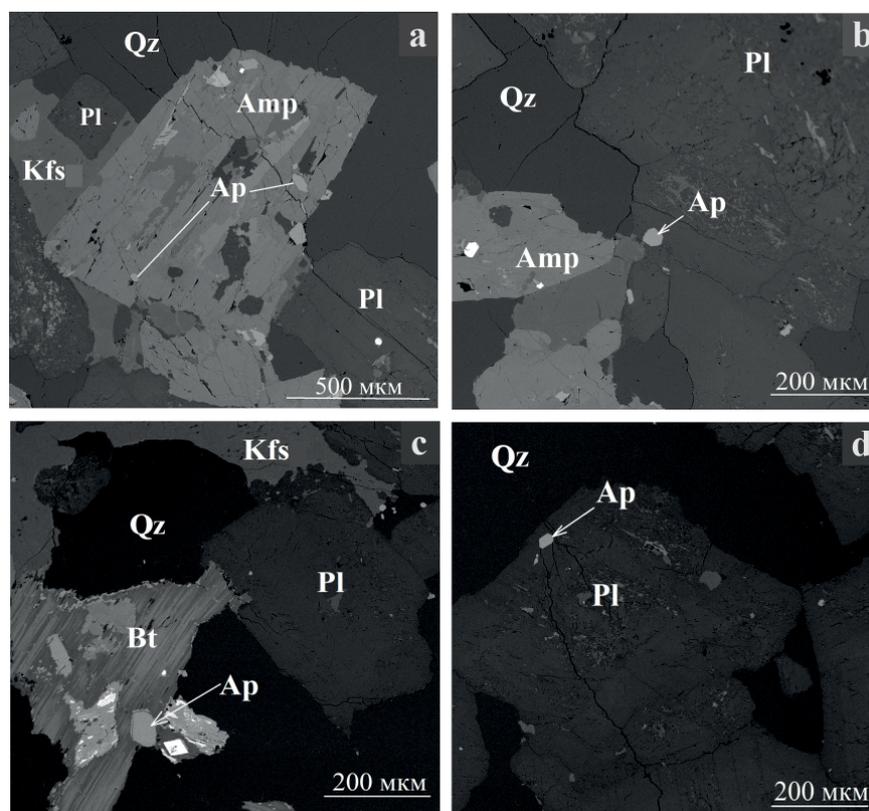


Рис. 3. BSE-изображение апатита в гранодиорите (a, b) и плагиограните (c, d). Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 3. BSE image of apatite in granodiorite (a, b) and plagiogranite (c, d). See legend in Fig. 2



Таблица 1. Химический состав апатита гранитоидов тигертышского комплекса (мас. %)

Table 1. Chemical composition of apatite from granitoids of the tigertysh complex (wt. %)

№ образца Порода Sample No. Rock	Позиция апатита Position of apatite	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	SO ₃	Cl	F	Сумма Total
А-1 гранодиорит granodiorite SiO ₂ 63.67 K ₂ O 2.24	Амф Amp	40.30	56.89	0.19	0.08	0.02	2.52	100.00
		39.92	57.17	0.23	0.06	0.02	2.60	100.00
		40.06	57.22	0.18	0.07	0.02	2.45	100.00
		40.11	56.98	0.22	0.08	0.03	2.58	100.00
		39.98	57.12	0.24	0.07	0.03	2.56	100.00
	КВ-ПШ Qz-Fsp	40.12	56.88	0.26	0.06	0.03	2.65	100.00
		39.94	57.32	0.18	0.04	0.03	2.49	100.00
		40.12	57.08	0.22	0.01	0.02	2.55	100.00
		40.18	56.95	0.25	0.01	0.02	2.59	100.00
		40.02	57.00	0.20	0.05	0.03	2.70	100.00
А-2 гранодиорит granodiorite SiO ₂ 63.88 K ₂ O 2.37	Амф Amp	39.89	57.11	0.26	0.06	0.03	2.65	100.00
		39.89	57.23	0.20	0.05	0.03	2.60	100.00
		40.02	57.00	0.20	0.05	0.03	2.70	100.00
	КВ-ПШ Qz-Fsp	40.20	56.76	0.24	0.02	0.02	2.76	100.00
		40.01	57.07	0.19	0.02	0.02	2.69	100.00
		39.58	57.45	0.23	0.07	0.02	2.65	100.00
А-3 гранодиорит granodiorite SiO ₂ 63.72 K ₂ O 2.29	Амф Amp	39.95	56.98	0.21	0.11	0.03	2.72	100.00
		39.90	57.02	0.25	0.08	0.02	2.73	100.00
		40.03	57.13	0.18	0.06	0.02	2.58	100.00
		39.79	57.21	0.18	0.04	0.03	2.75	100.00
	КВ-ПШ Qz-Fsp	39.85	57.23	0.24	0.01	0.02	2.65	100.00
		40.66	57.02	0.23	0.06	0.41	1.62	100.00
А-4 лейкогранит leucogranite SiO ₂ 73.68 K ₂ O 4.12	Бт Bt	40.38	56.95	0.22	0.05	0.52	1.88	100.00
		40.56	57.02	0.24	0.06	0.44	1.68	100.00
		40.37	57.07	0.22	0.07	0.47	1.80	100.00
		40.46	57.06	0.15	0.06	0.46	1.81	100.00
		39.97	57.77	0.21	0.05	0.35	1.65	100.00
	ПШ Fsp	40.01	57.76	0.13	0.06	0.37	1.67	100.00
		40.37	57.48	0.09	0.06	0.38	1.62	100.00
		40.34	57.63	0.15	0.05	0.33	1.50	100.00
		40.52	57.19	0.18	0.05	0.40	1.66	100.00
		39.99	57.68	0.16	0.07	0.42	1.68	100.00
А-5 лейкогранит leucogranite SiO ₂ 74.47 K ₂ O 4.25	Бт Bt	41.58	56.25	0.18	0.06	0.39	1.54	100.00
		40.77	57.11	0.21	0.05	0.36	1.50	100.00
	ПШ Fsp	40.65	57.22	0.21	0.06	0.35	1.51	100.00
		40.48	57.27	0.25	0.05	0.38	1.57	100.00
		39.97	57.69	0.19	0.05	0.41	1.69	100.00
А-6 лейкогранит leucogranite SiO ₂ 73.97 K ₂ O 4.26	Бт Bt	40.05	57.58	0.15	0.06	0.44	1.72	100.00
		40.50	57.40	0.07	0.04	0.38	1.61	100.00
	Пш Fsp	40.49	57.32	0.13	0.05	0.39	1.62	100.00
		40.88	56.98	0.14	0.05	0.36	1.59	100.00

размером 1–2 мм, редко встречаются вкрапленники размером 6–7 мм. Под микроскопом устанавливается микроклиновидная решетка (рис. 2, а, б). В виде примеси в микроклине всегда встречается BaO в количестве 0.54–1.68 мас. %.

Лейсты биотита черного цвета достигают 2 мм, к ним приурочены включения титанита и рудных минералов. Плеохроирует биотит от светло-желтого до оливково-зеленого цвета.

Зерна апатита встречаются в виде включений преимущественно в амфиболе (рис. 3, а), реже в кварце, калиевом полево шпате и плагиоклазе (рис. 3, б). Максимальный размер зерен составляет 70–75 мкм.

Лейкограниты второй фазы внедрения — светлые, розовато-серые породы, структура которых изменяется от тонко- до мелкозернистой, по взаимоот-

ношению зерен гранитная, местами пегматитовая, текстура массивная. Минеральный состав (%): кварц (35–40), калиевый полевой шпат (30–35), плагиоклаз (25–35), и хлоритизированный биотит (1–2). Акцессорные минералы суммарно составляют около 5 % и представлены апатитом, титанитом, магнетитом и цирконом.

Кварц выполняет интерстиции, размер зерен составляет 0.2–1.0 мм.

Калиевый полевой шпат (микроклин) представлен светло-бежевыми таблитчатыми зернами, размер которых варьирует от 0.1 до 1 мм. Под микроскопом у калиевого полевого шпата устанавливается микроклиновидная решетка (рис. 2, с, d). Минерал ксеноморфен относительно зерен плагиоклаза, часто образует графические сростания с кварцем (рис. 2, с и d), иногда встречается микроклин-пертит. В виде примеси в микро-

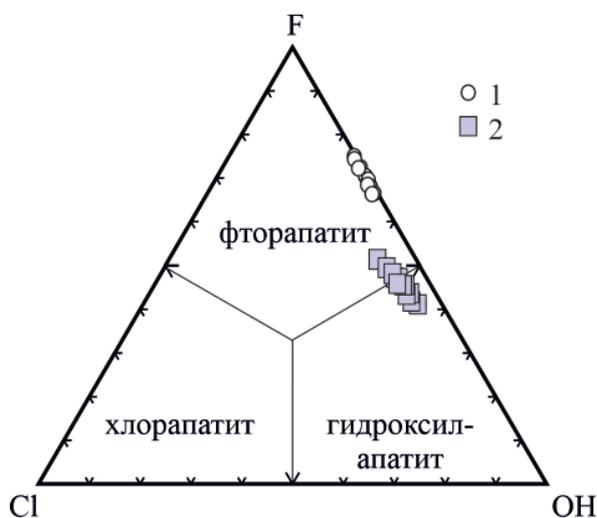


Рис. 4. Тройная диаграмма F-Cl-OH-апатитов. Условные обозначения: 1 – апатит из гранодиоритов, 2 – апатит из лейкогранитов

Fig. 4. Ternary diagram F-Cl-OH of apatites. Legend: 1 – apatite from granodiorites, 2 – apatite from leucogranites

клине присутствует BaO в количестве 0.20–1.20 мас. %.

Плагиоклаз встречается в виде идиоморфных таблитчатых зерен размером 0.1–1.0 мм. На контакте с биотитом ксеноморфен. Вторичные преобразования, так же как и в гранодиоритах, представлены соссюритизацией.

Лейсты черного биотита достигают размера 0.2–0.5 мм, к ним приурочены включения циркона и апатита. Плеохроирует биотит от светло-желтого до оливково-зеленого.

Апатит встречается в биотите (рис. 3, с) и в полевых шпатах, главным образом в плагиоклазе (рис. 3, d). Максимальный размер зерен минерала составляет 90–100 мкм.

Обсуждение результатов

Сводный химический состав апатита по 40 определениям приведен в таблице 1.

Для апатита гранитоидов тигертышского комплекса характерно общее резкое преобладание F над Cl и S (таблица 2). При этом состав апатитов из разных типов пород существенно отличается. Также установлено, что в зависимости от приуроченности к разным минералам состав апатита даже из одной породы отличается, главным образом по содержанию серы и хлора.

Апатит гранодиоритов. Апатит из данного типа пород по своему составу соответствует фторапатиту (табл. 2, рис. 4). Содержание фтора в нем варьирует от 2.49 до 2.73 мас. %, хлор не превышает 0.03 мас. %. Основное отличие апатита, приуроченного к амфиболу, от апатита в кварц-полевошпатовой основной массе заключается в более высоких содержаниях серы в первом (0.05–0.11 мас. %) против 0.01–0.04 мас. % во втором.

Апатит лейкогранитов. Содержание фтора в апатите составляет 1.50–1.88 мас. %, хлора – 0.33–0.52 мас. %. Апатит по своему составу соответствует фторапатиту и гидроксилapatиту (табл. 2, рис. 4), при этом фторапатит приурочен исключительно к биотиту, тогда как гидроксилapatит встречается и в биотите, и в полевых шпатах. Апатит из данного вида пород содержит заметно более высокие содержания хлора по сравнению с апатитом из гранодиоритов.

Из примесей в апатите тигертышского комплекса отмечается постоянное присутствие двуокиси кремния (0.07–0.26 мас. %) и серы (0.01–0.11 мас. %). Примесь S в апатите обусловлена изоморфизмом аниона $(\text{PO}_4)^{5-}$ и компенсирующей его заряд группы анионов $(\text{SO}_4)^{2-}$ и $(\text{SiO}_4)^{4-}$ по гетеровалентной схеме изоморфизма $\text{S}^{6+} + \text{Si}^{4+} = 2\text{P}^{5+}$ (Peng et al., 1997).

На классификационных диаграммах состава апатита, позволяющих определить потенциальную рудоносность пород (рис. 5), апатит гранодиоритов и лейкогранитов также отчетливо разделился на две груп-

Таблица 2. Средний состав и вариации содержаний в апатите галогенов и серы (мас. %)
 Table 2. Average composition and variations of halogen and sulfur contents in apatite (wt. %)

Элемент Element	Гранодиориты Granodiorite		Лейкограниты Leucogranite	
	Приуроченность зерен апатита / Confinement of apatite grains			
	Кв-Пш / Qz-Fsp (7)	Амф / Amp (13)	Пш / Fsp (11)	Бт / Bt (9)
S ₀₃	$\frac{0.01 - 0.04}{0.02}$	$\frac{0.05 - 0.11}{0.07}$	$\frac{0.04 - 0.06}{0.05}$	$\frac{0.05 - 0.07}{0.06}$
Cl	$\frac{0.02 - 0.03}{0.02}$	$\frac{0.02 - 0.03}{0.03}$	$\frac{0.33 - 0.39}{0.37}$	$\frac{0.40 - 0.52}{0.44}$
F	$\frac{2.49 - 2.76}{2.64}$	$\frac{2.45 - 2.73}{2.61}$	$\frac{1.50 - 1.67}{1.58}$	$\frac{1.62 - 1.88}{1.73}$

Формулы апатита рассчитаны методом по зарядам / The formulas are calculated using the charge method:

1. $\text{Ca}_{5.12-5.17}(\text{P}_{2.82-2.86}\text{Si}_{0.02})\Sigma_{2.84-2.88}(\text{F}_{0.68-0.75}\text{OH}_{0.25-0.32})\Sigma_{1.00}$ – фторапатит
2. $\text{Ca}_{5.11-5.15}(\text{P}_{2.83-2.86}\text{Si}_{0.02}\text{S}_{0.01})\Sigma_{2.85-2.89}(\text{F}_{0.67-0.75}\text{OH}_{0.25-0.33})\Sigma_{1.00}$ – фторапатит
3. $\text{Ca}_{5.04-5.16}(\text{P}_{2.82-2.94}\text{Si}_{0.01-0.02})\Sigma_{2.84-2.96}(\text{OH}_{0.49-0.54}\text{F}_{0.41-0.46}\text{Cl}_{0.05-0.06})\Sigma_{1.00}$ – гидроксилapatит
4. $\text{Ca}_{5.10-5.16}(\text{P}_{2.82-2.88}\text{Si}_{0.01-0.02})\Sigma_{2.84-2.90}(\text{F}_{0.44-0.51}\text{OH}_{0.43-0.50}\text{Cl}_{0.06-0.08})\Sigma_{1.00}$ – фторапатит и гидроксилapatит

Примечание. Формулы апатита из гранодиоритов: 1 – из кварца и полевых шпатов, 2 – из амфибола; из лейкогранитов: 3 – из полевых шпатов, 4 – из биотита.

Note. Formulas of apatite from granodiorites: 1 – from quartz and feldspars; 2 – from amphibole; from leucogranites: 3 – from feldspars, 4 – from biotite.

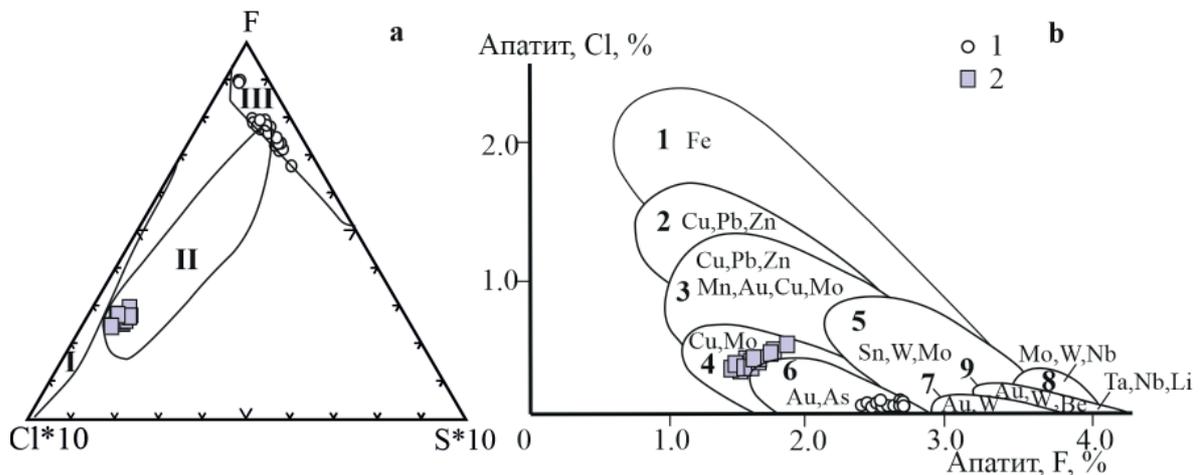


Рис. 5. Диаграммы состава апатитов, позволяющие определить потенциальную рудоносность пород. Позиции полей для диаграммы F – Cl – S (а) приведены по данным: Коровко и др., 2018, для диаграммы F – Cl (б) по данным: Холоднов, Бушляков, 2002. Условные обозначения: 1 – апатит из гранодиоритов, 2 – апатит из лейкогранитов. Поля пород, специализированных на оруденение: I – титаномагнетитовое и скарново-магнетитовое; II – медно-порфировое; III – золотосульфидно-кварцевое и золоторедкомметалльное

Fig. 5. Apatite composition diagrams allowing to determine the potential ore content of rocks. The positions of the fields for the F – Cl – S diagram (a) are given according to Korovko et al., 2018, for the F–Cl diagram (b) according to Kholodnov, Bushlyakov, 2002. Legend: 1 – apatite from granodiorites, 2 – apatite from leucogranites. Fields of rocks specialized in mineralization: I – titanomagnetite and skarn-magnetite; II – copper-porphyry; III – gold-sulfide-quartz and gold-rare metal

пы. На диаграмме соотношений F – Cl – S (рис. 5, а) точки состава апатита из гранодиоритов лежат в поле пород продуктивных на золотосульфидно-кварцевое оруденение, диаграмма F – Cl (рис. 5, б) также это подтверждает.

Точки состава апатита из лейкогранитов на обеих диаграммах (рис. 5, а и б) располагаются в поле пород продуктивных на медно-порфировое оруденение.

Известно, что кристаллизующийся интрузив выделяет гидротермальные флюиды, однако высокая степень окисления фракционирующей магмы может притормозить кристаллизацию сульфидов (Richards, 2003). Сера в апатите замещает Р в валентности +6, поэтому высокое содержание S указывает на более высокую фугитивность кислорода (Wang et al., 2022). Это подтверждается экспериментальными данными, в которых концентрация SO_3 в апатите увеличивается с ростом фугитивности кислорода (Peng et al., 1997).

Выводы

В результате проведенных исследований установлено наличие несольких типов апатита в гранитоидах разных фаз внедрения тигертышского комплекса. Апатиты гранодиоритов первой фазы внедрения по составу соответствуют фторапатиту ($F = 2.45–2.76$ мас. %, $Cl = 0.02–0.03$ мас. %, $S = 0.01–0.11$ мас. %). В лейкогранитах второй фазы апатит отвечает гидроксил- и фторапатиту ($F = 1.50–1.80$ мас. %, $Cl = 0.33–0.52$ мас. %, $S = 0.04–0.07$ мас. %). Содержание галогенов и серы указывает на потенциальную рудоносность гранитоидов разных фаз внедрения тигертышского комплекса. С гранодиоритами может быть связано золотосульфидно-кварцевое, а с лейкогранитами – Су-порфировое оруденение.

Находки жильных проявлений золотосульфидно-кварцевой рудной формации, приуроченные к гранодиоритам, и молибден-медно-порфировой и молиб-

ден-порфировой рудных формаций, связанные с лейкогранитами тигертышского комплекса, подтверждают результаты проведенных исследований.

Литература / References

- Бочарникова Т. Д., Холоднов В. В., Шагалов В. Е. Галогены в апатите как отражение флюидного режима в петро- и рудоогенезе Магнитогорского рудно-магматического комплекса (Южный Урал) // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. 2012. № 9. С. 28–33.
- Bocharnikova T. D., Kholodnov V. V., Shagalov V. E. Halogens in apatite as a reflection of the fluid regime in the petro- and oreogenesis of the Magnitogorsk ore-magmatic complex (Southern Urals). Bulletin of the Ural Branch of the Russian Mineralogical Society, 2012, No. 9, pp. 28–33. (in Russian)
- Веснин В. С., Неволько П. А., Светлицкая Т. В., Фоминых П. М., Бондарчук Д. В. Состав апатита как инструмент оценки рудоносности порфировых систем (на примере Шахтаминского Мо-порфирового и Быстринского Cu-Au-Fe-порфирово-скарнового месторождений, Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2024. Т. 66. № 1. С. 113–132. DOI: 10.31857/S0016777024010068
- Vesnin V. S., Nevolko P. A., Svetlitskaya T. V., Fominykh P. M., Bondarchuk D. V. Apatite composition as a tool for assessing the ore content of porphyry systems (using the Shakhtama Mo-porphyry and Bystrinsky Cu-Au-Fe-porphyry-skarn deposits, Eastern Transbaikalia, Russia as an example). Geology of ore deposits, 2024, V. 66, No. 1, pp. 113–132. (in Russian)
- Владимиров А. Г., Гибиер А. С., Изох А. Э., Руднев С. Н. Раннепалеозойские гранитоидные батолиты Центральной Азии: масштабы, источники и геодинамические условия формирования // Доклады Академии наук. 1999. Т. 369. № 6. С. 795–798.



- Vladimirov A. G., Gibsher A. S., Izokh A. E., Rudnev S. N. Early Paleozoic granitoid batholiths of Central Asia: scales, sources, and geodynamic conditions of formation. *Doklady Earth Sciences*, 1999, V. 369, No. 6, pp. 795–798. (in Russian)
- Врублевский В. В., Котельников А. Д., Руднев С. Н., Крупчатников В. И. Эволюция палеозойского гранитоидного магматизма Кузнецкого Алатау: новые геохимические и U-Pb (SHRIMP-II) изотопные данные // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 2. С. 287–311. DOI: 10.15372/GiG20160202
- Vrublevsky V. V., Kotelnikov A. D., Rudnev S. N., Krupchatnikov V. I. Evolution of Paleozoic granitoid magmatism in the Kuznetsk Alatau: new geochemical and U-Pb (SHRIMP-II) isotopic data. *Geology and Geophysics*, 2016, V. 57, No. 2, pp. 287–311. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Алтай-Саянская. Лист № 45 — Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. 665 с.
- State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1 : 1 000 000. The third generation. The Altai-Sayan series. Sheet № 45 — Novokuznetsk. Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2007, 665 p. (In Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Минусинская. Лист N–45–XXIV (Балыкса). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019. 187 с.
- State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. The Minusinskaya series. Sheet № 45–XXIV (Balyksa). Explanatory note. Moscow: Moscow branch of VSEGEI, 2019, 187 p. (in Russian)
- Коновалова Е. В., Холоднов В. В., Прибавкин С. В., Замятин Д. А. Элементы-минерализаторы (сера и галогены) в апатитах Шарташского гранитного массива и Березовского золоторудного месторождения // Литосфера. 2013. № 6. С. 65–72.
- Konvalova E. V., Kholodnov V. V., Podladkin S. V., Zamyatin D. A. Mineralizing elements (sulfur and halogens) in apatites of the Shartash granite massif and the Berezhovskiy gold deposit. *Lithosphere*, 2013, No. 6, pp. 65–72. (in Russian)
- Коровко А. В., Холоднов В. В., Прибавкин С. В., Коновалова Е. В., Михеева А. В. Галогены и сера в гидроксилсодержащих минералах Восточно-Верхотурского диорит-гранодиоритового массива с минерализацией в виде самородной меди (Средний Урал) // Труды Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого. 2018. № 165. С. 189–193.
- Korovko A. V., Kholodnov V. V., Podladkin S. V., Konvalova E. V., Mikheeva A. V. Halogens and sulfur in hydroxyl-containing minerals of the Vostochno-Verkhoturkskiy diorite-granodiorite massif with mineralization in the form of native copper (Middle Urals). *Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry named after Academician A. N. Zavaritskiy*. 2018, No. 165, pp. 189–193. (in Russian)
- Холоднов В. В., Бушляков И. Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 390 с.
- Kholodnov V. V., Bushlyakov I. N. Halogens in endogenous ore formation. Yekaterinburg: UB RAS, 2002, 390 p. (in Russian)
- Шардакова Г. Ю., Коровко А. В., Антонишин Н. А. Условия образования и преобразования, особенности флюидного режима рудно-магматической системы Южно-Сарышаганской гранитной интрузии (Западное Прибалхашье) // Литосфера. 2023. Т. 23. № 5. С. 887–909. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-5-887-909
- Shardakova G. Yu., Korobko A. V., Antonishin N. A. Conditions of formation and transformation, features of the fluid regime of the ore-magmatic system of the South Saryshagan granite intrusion (Western Balkhash region). *Lithosphere*, 2023, V. 23, No. 5, pp. 887–909. (In Russian)
- Ярмолюк В. В., Ковач В. П., Коваленко В. И., Сальникова Е. Б., Козловский А. М., Котов А. Б., Яковлева С. З., Федосенко А. М. Состав, источники и механизмы формирования континентальной коры Озерной зоны каледонид Центральной Азии: I. Геологические и геохронологические данные // Петрология. 2011. Т. 19. № 1. С. 56–79.
- Yarmolyuk V. V., Kovach V. P., Kovalenko V. I., Salnikova E. B., Kozlovsky A. M., Kotov A. B., Yakovleva S. Z., Fedoseenko A. M. Composition, sources and mechanisms of formation of the continental crust of the Caledonian Lake zone of Central Asia: I. Geological and geochronological data. *Petrology*, 2011, V. 19, No. 1, pp. 56–79. (in Russian)
- Belousova E. A., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Fisher N. I. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace element compositions and their relationship to host rock type // *Journal of Geochemical Exploration*, 2002. Vol. 76. № 1. P. 45–69.
- Chakhmouradian A. R., Reguir E. P., Yang P., Zaitsev A. N., Couëslan C., Xu C., Kynicky J., Mumin A. H. Apatite in carbonatitic rocks: Compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. *Lithos*, 2017, Vol. 274–275. P. 188–213. DOI: 10.1016/j.lithos.2016.12.037.
- Palma G., Barra F., Reich M., Valencia V., Simon A. C., Vervoort J., Leisen M., Romero R. Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019. Vol. 246. P. 515–540. DOI: 10.1016/j.gca.2018.12.019.
- O'Sullivan G., Chew D., Kenny G., Henrichs I., Mulligan D. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies // *Earth-Science Reviews*, 2020. Vol. 201. P. 103044. DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2019.103044.
- Peng G., Luhr J. F., McGee J. J. Factors controlling sulfur concentrations in volcanic apatite // *American Mineralogist*, 1997. Vol. 82. P. 1210–1224.
- Richards J. P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation // *Economic Geology*, 2003. Vol. 98. № 8. P. 1515–1533. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.8.1515.
- Wang Y. M., Yang X. Y., Kang X. N., Tang C., Sun J. D., Cao J. Y. Geochemical and mineralogical studies of zircon, apatite, and chlorite in the giant Dexing porphyry Cu-Mo-Au deposit, South China: Implications for mineralization and hydrothermal processes // *Journal of Geochemical Exploration*, 2022. Vol. 240. P. 107042. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.107042
- Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*, 2010. Vol. 95. № 1. P. 185–187. DOI:10.2138/am.2010.3371