



УДК 553.064.32 (553.311.2)

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-9

## МИНЕРАЛЫ ТИТАНА В РУДАХ И СКАРНАХ МАГНЕТИТ-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТАШ, ЗАПАДНЫЙ КАРАМАЗАР, ТАДЖИКИСТАН

У.А. Ятимов<sup>1</sup>, И.А. Блинов<sup>1</sup>, М.А. Рассомахин<sup>1</sup>, С.М. Лебедева<sup>1</sup>, Н.С. Сафаралиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., 456317, Россия; [umed1990@list.ru](mailto:umed1990@list.ru)

<sup>2</sup>Таджикский национальный университет, г. Душанбе, 734025 Республика Таджикистан

Статья поступила в редакцию 10.10.2024 г., после доработки 25.11.2024 г., принята к печати 01.12.2024 г.

**Аннотация.** В статье охарактеризованы минералы Ti из разных ассоциаций магнетит-полиметаллического месторождения Акташ (Западный Карамазар, Северный Таджикистан). В ходе исследований обнаружены анатаз, пирофанит (железистый), перовскит, кальциртит, цирконолит и титанит, большинство из которых считаются первой находкой не только для месторождения Акташ, но и для всей территории Карамазара. Их диагностика осуществлена с помощью оптических, электронно-микроскопических исследований с определением химического состава минералов. Присутствие анатаза, пирофанита, перовскита и титанита также подтверждено рамановской спектроскопией. В серпентин-флогопит-кальцитовых скарнах установлены перовскит и кальциртит, в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды – анатаз, пирофанит, перовскит, цирконолит и титанит, а в сульфидно-магнетитовых рудах выявлены пирофанит и титанит. В результате изучения минеральных ассоциаций и взаимоотношений минералов установлено, что, скорее всего, в начале скарного этапа образовались перовскит, кальциртит, цирконолит, по которым в дальнейшем развивались анатаз, пирофанит, титанит и циркон.

**Ключевые слова:** титановые минералы, анатаз, пирофанит, перовскит, кальциртит, цирконолит, титанит, скарны, спектры КР, месторождение Акташ, Западный Карамазар.

**Финансирование.** Работы выполнены в рамках государственной бюджетной темы Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (№ 122031600292-6) и поддержаны Российским научным фондом, грант № 22-17-00215.

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую признательность В.В. Масленникову за руководство исследованиями, Н.Р. Аюповой, Е.В. Белогуб и И.Ю. Мелекесцевой за обсуждение материала статьи и полезные замечания.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

**Вклад авторов.** У.А. Ятимов – разработка концепции, исследование; И.А. Блинов, М.А. Рассомахин, С.М. Лебедева – аналитические/экспериментальные работы; У.А. Ятимов, Н.С. Сафаралиев, М.А. Рассомахин – написание черновика рукописи, визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

**Для цитирования:** Ятимов У.А., Блинов И.А., Рассомахин М.А., Лебедева С.М., Сафаралиев Н.С. Минералы титана в рудах и скарнах магнетит-полиметаллического месторождения Акташ, Западный Карамазар, Таджикистан. Минералогия, 2024, 10(4), 172–185. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-9.

## Ti MINERALS IN ORES AND SKARNS OF THE AKTASH MAGNETITE-POLYMETALLIC DEPOSIT, WESTERN KARAMAZAR, TAJIKISTAN

U.A. Yatimov<sup>1</sup>, I.A. Blinov<sup>1</sup>, M.A. Rassomakhin<sup>1</sup>, S.M. Lebedeva<sup>1</sup>, N.S. Safaraliev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,

Miass, Chelyabinsk region, 456317, Russia; umed1990@list.ru

<sup>2</sup>Tajik National University, Dushanbe, 734025 Republic of Tajikistan

Received 10.10.2024, revised 25.11.2024, accepted 01.12.2024

**Abstract.** The article characterizes Ti minerals from different mineral assemblages of the Aktash magnetite-polymetallic deposit (Western Karamazar, Northern Tajikistan). Anatase, ferrous pyrophanite, perovskite, calzirtite, zirconolite and titanite are described in ores of the deposit and most of these minerals are found for the first time in both the Aktash deposit and the entire Karamazar region. The minerals are identified using optical and electron microscopy. The presence of anatase, pyrophanite, perovskite and titanite is also confirmed by Raman spectroscopy. Perovskite and calzirtite are found in serpentine-phlogopite-calcite skarns, anatase, pyrophanite, perovskite, zirconolite and titanite are determined in serpentine-garnet-pyroxene skarns, which host galena-sphalerite ores, and pyrophanite and titanite are identified in sulfide-magnetite ores. Based on mineral assemblages and relationships, it is concluded that perovskite, calzirtite, and zirconolite formed at the beginning of the skarn stage, which is followed by the formation of anatase, pyrophanite, titanite and zircon.

**Keywords:** Ti minerals, anatase, pyrophanite, perovskite, calzirtite, zirconolite, titanite, skarns, Raman spectra, Aktash deposit, Western Karamazar.

**Funding.** This work was supported by state contract of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS (no. 122031600292-6) and the Russian Science Foundation, project no. 22-17-00215.

**Acknowledgements.** We are grateful to V.V. Maslennikov for supervision of our study and N.R. Ayupova, E.V. Belogub and I.Yu. Melekestseva for constructive and useful comments, which allowed us to improve the manuscript.

**Conflict of interest.** The authors declare that they have no conflicts of interest.

**Author contribution.** U.A. Yatimov – conceptualization, investigation; I.A. Blinov, M.A. Rassomakhin, S.M. Lebedeva – analytical/experimental works; U.A. Yatimov, N.S. Safaraliev, M.A. Rassomakhin – writing – original draft, visualization, writing – review & editing. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

**For citation:** Yatimov U.A., Blinov I.A., Rassomakhin M.A., Lebedeva S.M., Safaraliev N.S. Ti minerals in ores and skarns of the Aktash magnetite-polymetallic deposit, Western Karamazar, Tajikistan. *Mineralogy*, 2024, 10(4), 172–185. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-9

### ВВЕДЕНИЕ

Титан является важным стратегическим элементом и спрос на него с каждым годом растет. С другой стороны, в железных рудах повышенные содержания и некоторые формы Ti часто создают технологические сложности получения кондиционных концентратов железа. В связи с этим изучение его минеральных форм в породах и рудах имеет важное практическое значение. Титансодержащие минералы в промышленных масштабах традиционно встречаются в ультраосновных и основных породах, а также в продуктах их изменения и перераспределения (Щербина, 1971). В последнее время много внимания уделяется формам нахождения Ti в эвапоритах (Чайковский и др. 2019) и продуктах

разложения гиалокластического материала в процессах гальмиролиза (Аюпова и др. 2022).

На территории Республики Таджикистан титансодержащие основные породы (Шахристанский базитовый комплекс) и другие генетически титаносодержащие типы – пегматитовые, скарновые и осадочные – развиты широко, но слабо изучены (Ёров и др., 2012). В пределах Западного Карамазара минералы Ti относятся к числу повсеместных, но акцессорных минералов. На этой территории Ti входит в рутил, анатаз, ильменит и титанит, а изоморфно – в состав слюд, амфиболов, везувиана, гранатов и других силикатов (Протождяконова, 1972).

При изучении руд и пород месторождения Акташ нами выявлен ряд минералов Ti. В данной работе приводится их минералогическое описание

и химический состав с целью дополнения кадастра минералов месторождения Акташ и рудного региона Кармазара, а также выяснения последовательности минеральных преобразований и источника титана. Некоторые минералы Ti (перовскит, пиррофанит (железистый), кальцитрит, цирконолит) для Кармазара обнаружены и охарактеризованы впервые. Предыдущими исследователями перовскит и пиррофанит, вероятно, при рутинных оптико-микроскопических исследованиях определялись как магнетит и ильменит из-за близкой отражательной способности.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Акташ расположено в Кансайском рудном поле Западно-Кармазарского рудного района (юго-западные отроги Кураминского хребта) в северной части Республики Таджикистан (рис. 1). Район месторождения сложен осадочными и изверженными породами и скарнами, образовавшимися по вулканогенно-осадочным отложениям (рис. 1). Осадочные толщи сформированы известняками и доломитами ( $D_3-C_1$ ), а также молассовыми отложениями (MZ–KZ), слагающими южную предгорную часть хребта Кармазар (Вольфсон, 1951; Рахимов, 1978). Интрузивные породы представлены гранодиоритами ( $C_2$ ), гранодиорит-порфирами ( $P_1$ ) и дайками долеритового и диоритового состава ( $P_2$ ), с первыми и связано развитие скарнов (Вольфсон, Титов, 1965).

Скарны залегают в основном на контакте карбонатных пород с гранодиоритами или гранодиорит-порфирами. Соотношение между породообразующими минералами в скарнах широко варьирует. По минеральному составу выделяются магнезиальные и известковые скарны. Магнезиальные скарны, преимущественно, развиты на контакте доломитов и гранодиоритов. Их основные минералы – кальцит, флогопит, серпентин, титансодержащий андрадит и форстерит. Известковые скарны развиваются вдоль тектонических нарушений или вдоль контактов гранодиоритов и известняков, осложненных тектоническими подвижками. Главными минералами известковых скарнов являются пироксены ряда диопсид–геденберgit, гранаты ряда гроссуля–андрадит, амфиболы ряда актинолит–тремолит, серпентин, эпидот, хлорит и кальцит.

Руды по минеральному составу подразделены на три типа: сульфидно-магнетитовые, халь-

копирит-пирротитовые и галенит-сфалеритовые (Рахимов, 1978; Ятимов и др., 2023). В ассоциации со скарнами и мраморизованными карбонатными породами находится крупное линзообразное сульфидно-магнетитовое тело. Халькопирит-пирротитовые и галенит-сфалеритовые руды развиваются преимущественно по инфильтрационным скарнам пироксенового состава, а иногда накладываются на сульфидно-магнетитовые руды, образуя сложные минеральные ассоциации. Они в основном локализованы в трещинах субширотного направления в виде столбообразных, ветвящихся трубообразных тел до мелких линз и маломощных жил.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы для исследований были отобраны из отвалов месторождения Акташ в период с 2020 по 2023 г. Минеральный состав руд изучен в аншлифах под микроскопом Olympus BX51 с цифровой приставкой Olympus DP12. Химический состав минералов исследован с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act, ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.3 нА, для количественного анализа использованы эталоны MINM-25-53 фирм «ASTIMEX Scientific Limited», (стандарт № 01-044) и «Microanalysis Consultants Ltd.» (стандарт № 1362) (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН).

Спектры комбинационного рассеяния света (КР) получены на спектрометре iHR 320 LabRAM фирмы Horiba Jobin Yvon, снабженного микроскопом Olympus BX41, TV камерой и охлаждаемым CCD детектором (Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Возбуждающей служила линия 632.8 нм He-Ne лазера ( $P_{max} = 20$  мВт), спектральная ширина щели составляла  $2 \text{ см}^{-1}$ . Сбор рассеянного света осуществлен по схеме на отражение ( $180^\circ$ ) с зерен размером от 5 мкм со временем накопления 30 с. Запись спектров осуществлялась в программе Labspec v.5, спектры диагностированы с использованием базы данных RRUFF (<http://rruff.info>).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В магнезиальных серпентин-флогопит-кальцитовых скарнах и серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, а также в сульфидно-магнетитовых рудах обнаружены следующие минералы Ti: анатаз, пи-

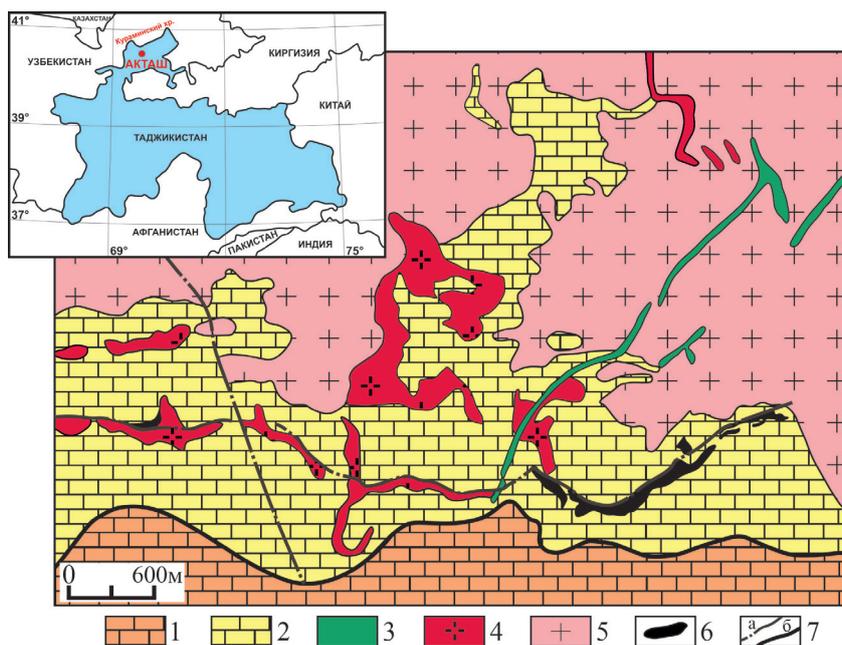


Рис. 1. Географическое положение (врезка) и схематическая геологическая карта месторождения Акташ по (Вольфсон, 1951, с упрощениями).

1 – карбонатные породы палеогена; 2 – карбонатные породы верхнего девона–нижнего карбона; 3 – диоритовые порфириды средней перми; 4 – гранодиорит-порфиры нижней перми; 5 – гранодиориты среднего карбона; 6 – скарны с сульфидным оруденением; 7 – разрывные нарушения: а – разрывы; б – Альпийский надвиг.

Fig. 1. Geographical position (inset) and schematic geological map of the Aktash deposit, simplified after (Vol'fson, 1951).

1 – Paleogene carbonate rocks; 2 – Upper Devonian–Lower Carboniferous carbonate rocks; 3 – Middle Permian porphyry diorites; 4 – Lower Permian porphyry granodiorites; 5 – Middle Carboniferous granodiorites; 6 – skarns with sulfide mineralization; 7 – faults: а – fractures; б – Alpine thrust.

### Распространение минералов Ti в скарнах и рудах месторождения Акташ

Таблица 1

Table 1

#### Distribution of Ti minerals in skarns and ores of the Aktash deposit

Руды и породы	Минералы	
	Второстепенные	Редкие
Серпентин -флогопит-кальцитовые скарны	Перовскит	Кальциртит
Серпентин-гранат-пироксеновые скарны, вмещающие галенит-сфалеритовые руды	Пирофанит, перовскит	Анализ, цирконолит и титанит
Сульфидно-магнетитовые руды	Пирофанит, титанит	–

рофанит, перовскит, кальциртит, цирконолит и титанит (табл. 1). Ниже минералы Ti описаны в соответствии с минералогической классификацией: от простых оксидов к сложным оксидам и силикатам.

Анализ  $TiO_2$  является редким минералом месторождения. Ранее он был отмечен только в искусственных шлихах из изверженных пород (Протодьяконова, 1972). Нами анализ обнаружен в виде включений только в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, в тесной ассоциации с перовскитом и пирофанитом в серпентине (рис. 2а, г). Отмечаются отчетливые признаки замещения анализа пирофа-

нитом (рис. 2а). В других случаях включения анализа обнаружены в перовските, который, в свою очередь, замещается пирофанитом (рис. 2г). Зерна анализа размером до 20 мкм имеют разведенные контуры. В химическом составе анализа постоянно присутствуют FeO,  $Nb_2O_5$ ,  $Ta_2O_5$  и  $WO_3$  (табл. 2).

КР спектры анализа из месторождения Акташ с полосами 157, 195, 396, 513, 635 и 795  $cm^{-1}$  сходны с эталонным спектром анализа № R060277 (база данных RRUFF) в области 100–1200  $cm^{-1}$  (рис. 2). В области 100–200  $cm^{-1}$  анализа месторождения Акташ отмечаются дополнительные полосы 128 и 157  $cm^{-1}$ , слегка смещенные от полосы 143  $cm^{-1}$  эталонного анализа.

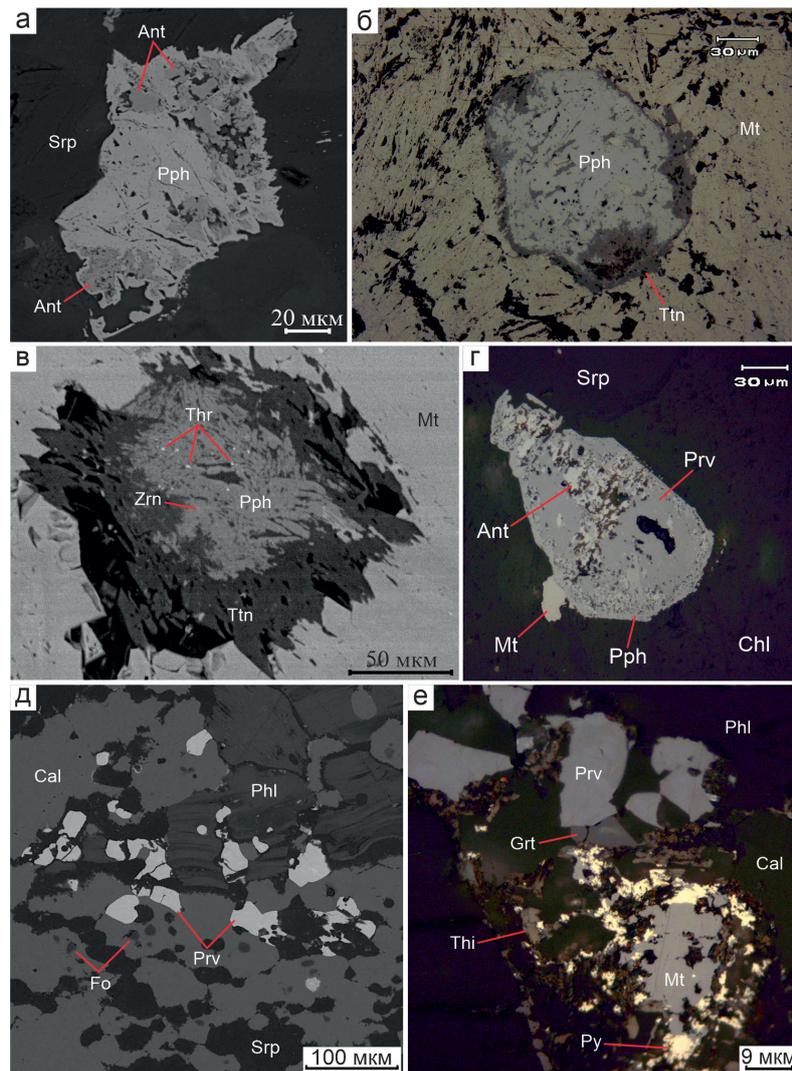


Рис. 2. Морфологические особенности оксидов Ti месторождения Акташ: а – замещение анатаза (Ant) пирофанитом в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды; б – замещение пирофанита титанитом (Ttn) в магнетите (Mt); в – микровключения торита (Thr) и циркона (Zrn) в пирофаните; г – пирофанит и анатаз замещают перовскит в хлорит-серпентиновой (Chl, Srp) массе; д – перовскит в ассоциации с флогопитом (Phl), серпентином и форстеритом (Fo) в кальцитовой массе (Cal); е – перовскит в ассоциации с гранатом (Grt), магнетитом, пиритом (Py) и точилинитом (Thi) в кальците между зернами флогопита.

Фото а, в, д – BSE-фото, б, г, е – отраженный свет.

Fig. 2. Morphological features of Ti oxides from the Aktash deposit: а – replacement of anatase (Ant) by pyrophanite (Pph) in serpentine-garnet-pyroxene skarns with galena-sphalerite ores; б – replacement of pyrophanite by titanite (Ttn) in magnetite (Mt); в – microinclusions of thorite (Thr) and zircon (Zrn) in pyrophanite; г – pyrophanite and anatase replace perovskite in chlorite-serpentine (Chl, Srp) aggregate; д – perovskite in assemblage with phlogopite (Phl), serpentine and forsterite (Fo) in calcite (Cal); е – perovskite in assemblage with garnet (Grt), magnetite, pyrite (Py) and toichilinite (Thi) in calcite between phlogopite grains.

Images а, в, д – BSE photo, б, г, е – reflected light.

Пирофанит  $MnTiO_3$  – минерал группы ильменита, наиболее распространен среди титановых минералов и выявлен в сульфидно-магнетитовых рудах и серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды. По составу пирофанит месторождения Акташ является

промежуточным членом ряда пирофанит-ильменит и относится к железистому пирофаниту (табл. 2).

В сульфидно-магнетитовых рудах минерал встречается в виде отдельных обособлений (размер до 150 мкм в длину) и реликтовых агрегатов пластинчатых кристаллов в титаните (рис. 2б, в). Ино-

Таблица 2

Table 2

**Химический состав (мас. %) анатаза и пирофанита месторождения Акташ**

**Chemical composition (wt. %) of anatase and pyrophanite of the Aktash deposit**

№ п/п	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	WO <sub>3</sub>	Сумма
Анатаз								
1	–	96.83	–	1.70	0.33	0.50	0.47	99.83
2	–	96.91	–	1.80	0.25	0.45	0.44	99.85
3	–	94.84	–	2.10	0.94	0.94	0.64	99.46
Пирофанит								
4	–	50.35	24.72	23.14	0.06	0.49	0.52	99.28
5	–	51.28	27.05	20.28	0.20	0.29	0.52	99.63
6	0.26	48.88	25.94	24.07	–	0.05	0.45	99.65
7	0.13	51.43	27.01	20.68	–	0.29	–	99.54
8	1.66	51.43	26.02	19.23	–	0.44	0.74	99.52
9	1.59	51.37	26.32	19.55	–	0.36	0.65	99.84
10	0.75	52.60	26.16	20.09	0.49	–	0.54	100.62
11	0.86	52.28	30.27	15.54	–	0.28	–	99.23
Формула								
1	(Ti <sub>0.98</sub> Fe <sub>0.02</sub> Nb <sub>0.002</sub> Ta <sub>0.002</sub> W <sub>0.002</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>2</sub>							
2	(Ti <sub>0.98</sub> Fe <sub>0.02</sub> Nb <sub>0.002</sub> Ta <sub>0.002</sub> W <sub>0.002</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>2</sub>							
3	(Ti <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.03</sub> Nb <sub>0.01</sub> Ta <sub>0.003</sub> W <sub>0.002</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>2</sub>							
4	(Mn <sub>0.54</sub> Fe <sub>0.50</sub> ) <sub>1.04</sub> (Ti <sub>0.98</sub> Nb <sub>0.001</sub> Ta <sub>0.003</sub> W <sub>0.003</sub> ) <sub>0.99</sub> O <sub>3</sub>							
5	(Mn <sub>0.58</sub> Fe <sub>0.43</sub> ) <sub>1.01</sub> (Ti <sub>0.98</sub> Nb <sub>0.002</sub> Ta <sub>0.002</sub> W <sub>0.003</sub> ) <sub>0.99</sub> O <sub>3</sub>							
6	(Mn <sub>0.57</sub> Fe <sub>0.52</sub> Ca <sub>0.01</sub> ) <sub>1.10</sub> (Ti <sub>0.95</sub> Ta <sub>0.001</sub> W <sub>0.003</sub> ) <sub>0.95</sub> O <sub>3</sub>							
7	(Mn <sub>0.58</sub> Fe <sub>0.44</sub> Ca <sub>0.004</sub> ) <sub>1.02</sub> (Ti <sub>0.98</sub> Ta <sub>0.002</sub> ) <sub>0.98</sub> O <sub>3</sub>							
8	(Mn <sub>0.56</sub> Fe <sub>0.41</sub> Ca <sub>0.05</sub> ) <sub>1.02</sub> (Ti <sub>0.98</sub> W <sub>0.005</sub> Ta <sub>0.003</sub> ) <sub>0.99</sub> O <sub>3</sub>							
9	(Mn <sub>0.57</sub> Fe <sub>0.41</sub> Ca <sub>0.04</sub> ) <sub>1.02</sub> (Ti <sub>0.98</sub> W <sub>0.005</sub> Ta <sub>0.003</sub> ) <sub>0.99</sub> O <sub>3</sub>							
10	(Mn <sub>0.55</sub> Fe <sub>0.42</sub> Ca <sub>0.02</sub> ) <sub>0.99</sub> (Ti <sub>0.99</sub> Nb <sub>0.006</sub> W <sub>0.004</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>3</sub>							
11	(Mn <sub>0.65</sub> Fe <sub>0.33</sub> Ca <sub>0.02</sub> ) <sub>1.00</sub> (Ti <sub>1.00</sub> Ta <sub>0.002</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>3</sub>							

*Примечание.* Здесь и далее, все железо (FeO) условно принято, как Fe<sup>2+</sup>; прочерк – не обнаружено. Формульные коэффициенты для анатаза и пирофанита рассчитаны на два и три атома кислорода соответственно. Пирофанит: ан. 4–7 – сульфидно-магнетитовые руды; ан. 8–11 – скарны, вмещающие галенит-сфалеритовые руды.

*Note.* Hereinafter, all iron (FeO) is conventionally accepted as Fe<sup>2+</sup>; dash – not detected. Formula coefficients for anatase and pyrophanite are recalculated to 2 and 3 oxygen atoms, respectively. Pyrophanite: an. 4–7 – sulfide-magnetite ores; an. 8–11 – skarns hosting galena-sphalerite ores.

гда в пирофаните наблюдаются микровключения (размер до 1–3 мкм) торита и циркона (рис. 2в). Цвет в отраженном свете серый с изменчивым слегка синеватым оттенком. Отражательная способность пирофанита по сравнению с магнетитом немного меньше и для него характерна слабая анизотропия. Из примесей в составе пирофанита присутствуют (мас. %): Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.05–0.49), WO<sub>3</sub> (0.00–0.52), Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.00–0.20), CaO (0.00–0.26) (табл. 2).

Пирофанит в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, встречается в ассоциации с перовскитом, анатазом, магнетитом, диопсидом и хлоритом (рис. 2а, г). Форма зерен пирофанита неправильная и таблитчатая с извилистыми очертаниями, их размер достигает 150 мкм в длину. Пирофанит развивается по перовскиту (иногда по анатазу), часто замещая

и окаймляя его зерна (рис. 2а, г). Химический состав пирофанита из этой ассоциации отличается более высоким содержанием CaO 0.75–1.66 мас. % (табл. 2).

Диагностика пирофанита подтверждается данными рамановской спектроскопии (рис. 3б). Все основные полосы совпадают со спектрами из базы данных RRUFF (№ R070211), кроме полосы 262 см<sup>-1</sup>. Вместо этой полосы, в пирофаните месторождения Акташ наблюдаются хорошо выраженная полоса 227 см<sup>-1</sup> (рис. 3б).

Перовскит CaTiO<sub>3</sub> обнаружен в серпентин-флогопит-кальцитовых скарнах и серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды. В серпентин-флогопит-кальцитовых скарнах зерна перовскита ассоциируют с флогопитом, серпентином, гранатом, магнетитом, пиритом и точилинитом в кальците (рис. 2д, е).

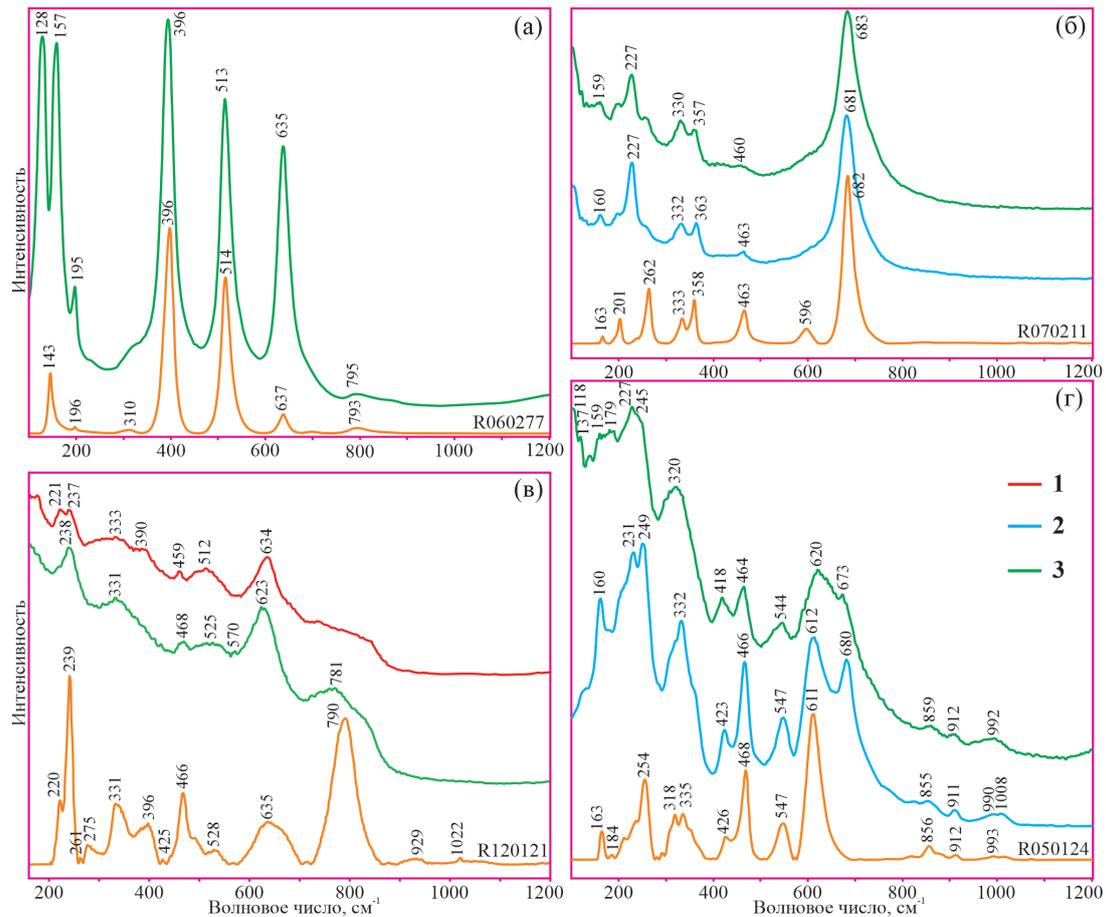


Рис. 3. Сравнение спектров КР анатаза (а), пирофанита (б), перовскита (в) и титанита (г) месторождения Акташ со спектрами из базы данных RRUFF.

Минералы Ti из: 1 – серпентин-флогопит-кальцитовых скарнов; 2 – сульфидно-магнетитовых руд; 3 – серпентин-гранат-пироксеновых скарнов, вмещающих галенит-сфалеритовые руды.

Fig. 3. Comparison of Raman spectra of anatase (a), pyrophanite (б), perovskite (в) and titanite (г) from the Aktash deposit with spectra from the RRUFF database.

Ti minerals from: 1 – serpentine-phlogopite-calcite skarns; 2 – sulfide-magnetite ores; 3 – serpentine-garnet-pyroxene skarns hosting galena-sphalerite ores.

Форма зерен перовскита ангедральная, округлая, иногда сглажено-угловатая, размер до 130 мкм. Цвет в отраженном свете серый с темно-голубоватым оттенком. По цвету перовскит сложно отличить от магнетита, но при больших увеличениях можно наблюдать анизотропию (рис. 2е). В химическом составе минерала установлены (мас. %): FeO (0.39–1.10),  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (0.42–1.70),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.00–0.48),  $\text{V}_2\text{O}_5$  (0.30–1.01), SrO (0.00–0.27),  $\text{ThO}_2$  (0.00–0.49) (табл. 3).

Перовскит в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, встречается в ассоциации с пирофанитом, анатазом, цирконолитом, магнетитом, хлоритом и диопсидом в серпентине. Обычно перовскит замещает пирофанит и анатаз (рис. 2г). В некоторых

случаях перовскит присутствует только в виде реликтов в пирофаните. Он отмечается в виде субгедральных и ангедральных зерен размером до 200 мкм. В отличие от перовскита из серпентин-флогопит-кальцитовых скарнов, перовскит из серпентин-гранат-пироксеновых скарнов, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, содержит (мас. %):  $\text{WO}_3$  (0.39–0.49),  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (до 0.77),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (до 0.61) и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (до 0.49) (табл. 3).

Полученные спектры КР перовскита совпадают со спектрами из базы данных RRUFF (№ R050124), но имеют более низкую интенсивность (рис. 3в). КР спектры перовскита из серпентин-флогопит-кальцитовых и серпентин-гранат-пироксеновых скарнов сходны.

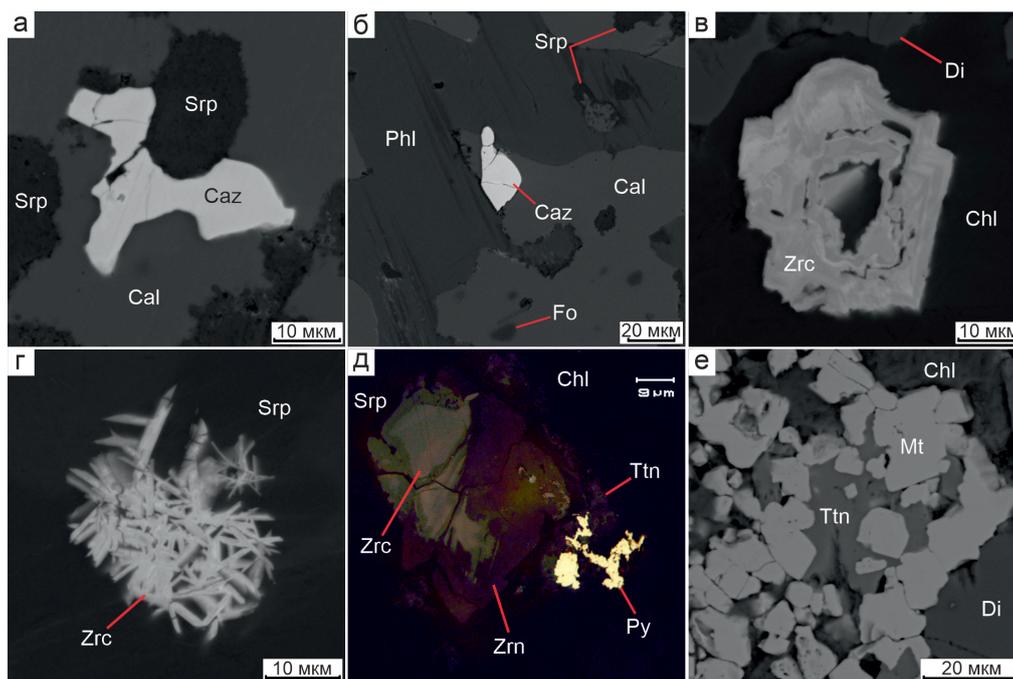


Рис. 4. Морфологические особенности сложных оксидов Ti и титанита месторождения Акташ: а, б – кальциртит (Caz) в ассоциации с серпентином (Srp) и флогопитом (Phl) в кальците (Cal); в – зональное зерно цирконолита (Zrc) в хлорите (Chl) в ассоциации с диопсидом (Di); г – игольчатые кристаллы цирконолита в матрице серпентина; д – замещение цирконолита цирконом (Zrn) и титанитом (Ttn) в ассоциации с хлоритом и серпентином; е – титанит в интерстициях между зернами магнетита (Mt).

Фото а–г, е – BSE фото, д – отраженный свет.

Fig. 4. Morphological features of complex Ti oxides and titanite from the Aktash deposit: а, б – calzirtite (Caz) in assemblage with serpentine (Srp) and phlogopite (Phl) in calcite (Cal); в – zoned zirconolite grain (Zrc) in chlorite (Chl) in assemblage with diopside (Di); г – acicular zirconolite crystals in serpentine matrix; д – replacement of zirconolite by zircon (Zrn) and titanite (Ttn) in assemblage with chlorite and serpentine; е – interstitial titanite between magnetite (Mt) grains.

Images а–г, е – BSE-photo, д – reflected light.

Химический состав (мас. %) перовскита месторождения Акташ

Таблица 3

Chemical composition (wt. %) of perovskite from the Aktash deposit

Table 3

№ п/п	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	WO <sub>3</sub>	SrO	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	Сумма
1	–	41.35	56.86	0.53	1.10	–	–	–	–	0.27	0.42	–	100.51
2	0.48	39.54	56.03	1.01	0.88	–	–	–	–	–	1.70	0.49	100.14
3	0.25	40.50	58.41	0.30	0.41	–	–	–	–	–	0.84	–	100.72
4	0.20	40.05	57.88	0.74	0.39	–	–	–	–	–	1.43	–	100.68
5	–	40.20	57.05	0.62	0.96	–	–	–	–	–	1.65	–	100.50
6	–	39.26	56.85	0.98	0.60	–	–	–	–	–	1.46	–	99.15
7	–	41.82	57.29	–	0.62	–	0.49	–	0.36	–	–	–	100.58
8	–	38.64	59.39	–	0.57	0.61	–	0.77	0.79	–	–	–	100.77
Формула (рассчитана на три атома кислорода)													
1	(Ca <sub>1.01</sub> Ce <sub>0.003</sub> Sr <sub>0.003</sub> ) <sub>1.02</sub> (Ti <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.02</sub> V <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>3</sub>												
2	(Ca <sub>0.97</sub> Ce <sub>0.003</sub> Th <sub>0.003</sub> ) <sub>0.98</sub> (Ti <sub>0.96</sub> Al <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.02</sub> V <sub>0.02</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>3</sub>												
3	(Ca <sub>0.98</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>0.99</sub> (Ti <sub>0.99</sub> Al <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.01</sub> V <sub>0.004</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>3</sub>												
4	(Ca <sub>0.97</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (Ti <sub>0.98</sub> Al <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.01</sub> V <sub>0.01</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>3</sub>												
5	(Ca <sub>0.98</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>0.99</sub> (Ti <sub>0.98</sub> Fe <sub>0.02</sub> V <sub>0.01</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>3</sub>												
6	(Ca <sub>0.97</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (Ti <sub>0.98</sub> Fe <sub>0.01</sub> V <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>3</sub>												
8	Ca <sub>1.02</sub> (Ti <sub>0.98</sub> Fe <sub>0.01</sub> Nb <sub>0.01</sub> W <sub>0.002</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>3</sub>												
9	(Ca <sub>0.94</sub> Y <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (Ti <sub>1.01</sub> Fe <sub>0.01</sub> W <sub>0.005</sub> Ta <sub>0.01</sub> ) <sub>1.03</sub> O <sub>3</sub>												

Примечание. Перовскит: ан. 1–6 – серпентин-флогопит-кальцитовые скарны; ан. 7, 8 – скарны, вмещающие галенит-сфалеритовые руды.

Note. Perovskite: an. 1–6 – serpentine-phlogopite-calcite skarns; 7, 8 – skarns hosting galena-sphalerite ores.

## Химический состав (мас. %) кальцитрита месторождения Акташ

## Chemical composition (wt. %) of calzirtite from the Aktash deposit

№ п/п	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	Сумма
1	12.97	17.26	–	67.07	1.17	0.98	99.45
2	13.28	17.58	–	66.29	1.20	0.87	99.21
3	15.65	17.85	–	65.32	0.11	0.56	99.51
4	13.14	17.44	–	66.76	1.29	1.23	99.86
5	12.02	18.33	0.44	65.52	1.03	1.70	99.04
Кальцитрит (рассчитана на 16 атомов кислорода)							
1	$Ca_{2.09}(Zr_{4.92}Hf_{0.05})_{4.97}(Ti_{1.95}U_{0.03})_{1.98}O_{16}$						
2	$Ca_{2.14}(Zr_{4.86}Hf_{0.05}Ti_{0.02})_{4.93}(Ti_{1.99}U_{0.03})_{2.00}O_{16}$						
3	$Ca_{2.49}(Zr_{4.73}Ti_{0.02}Hf_{0.005})_{4.75}(Ti_{1.98}U_{0.02})_{2.00}O_{16}$						
4	$Ca_{2.11}(Zr_{4.88}Hf_{0.06}Ti_{0.01})_{4.95}(Ti_{1.96}U_{0.04})_{2.00}O_{16}$						
5	$Ca_{1.94}(Zr_{4.82}Ti_{0.20}Hf_{0.04})_{5.06}(Ti_{1.88}Fe_{0.06}U_{0.06})_{2.00}O_{16}$						

Кальцитрит  $Ca_2Zr_5Ti_2O_{16}$  обнаружен впервые в серпентин-флогопит-кальцитовых скарнах. Он образует ксеноморфные и субгедральные зерна со сглаженными углами (рис. 4а, б) размером 5–30 мкм. Минерал обычно наблюдается на контакте кальцита с серпентином и флогопитом (рис. 4б). В составе кальцитрита постоянно присутствуют HfO<sub>2</sub> (0.11–1.29 мас. %) и UO<sub>2</sub> (0.56–1.70 мас. %) (табл. 4). В одном анализе установлена примесь FeO (0.44 мас. %). Химический состав минерала не стехиометричен, что характерно для природного кальцитрита, но в целом, формула соответствует теоретической (табл. 4). КР спектры кальцитрита получить не удалось, что, возможно, связано с метамиктизацией минерала из-за высокого содержания UO<sub>2</sub>.

Цирконолит  $CaZrTi_2O_7$  встречается реже остальных титановых минералов. Он установлен в виде ангедральных зерен, субгедральных и игольчатых кристаллов размером до 30 мкм в ассоциации с хлоритом, серпентином, диопсидом, пирофанитом, перовскитом, титанитом, цирконом, пиритом и апатитом в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды (рис. 4в–д). В большинстве случаев зерна цирконолита зональны с чередованием светлых и темных зон; иногда цирконолит замещается цирконом и титанитом (рис. 4в, д). Зональность обусловлена распределением как основных компонентов, так и примесей в составе минерала (табл. 5). В светлой зоне (анализ 1) по сравнению с темной (анализ 2) отмечается повышенное содержание MnO, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ThO<sub>2</sub> и UO<sub>2</sub> и пониженное – TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, CaO и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В светлой зоне также присутствуют SiO<sub>2</sub>, SrO, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а в тем-

ной – MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 5). Содержания примесей в цирконолите варьируют в следующих пределах (мас. %): MgO до 0.61, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0.30, SiO<sub>2</sub> 2.24–2.29, MnO 0.70–4.28, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.67–4.49, SrO до 0.39, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 1.18, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.83–4.22, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0.00–0.76, ThO<sub>2</sub> 1.78–6.36, UO<sub>2</sub> 0.37–12.35. Качественные КР спектры цирконолита не получились из-за высокого содержания радиоактивных элементов в составе минерала.

Титанит  $CaTiSiO_5$  встречается в небольших количествах в сульфидно-магнетитовых рудах, где образует пластинчатые, ромбические и клиновидные выделения в ассоциации с пирофанитом, замещающая пирофанит и магнетит (рис. 2б, в). В большинстве случаев минерал образует каймы толщиной до 30 мкм вокруг зерен пирофанита (рис. 2б, в) и реже выполняет пространство между зернами магнетита вместе с хлоритом в ассоциации с диопсидом (рис. 4е). Под микроскопом имеет низкое отражение. В химическом составе титанита постоянно присутствуют FeO (3.43–5.13 мас. %) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.34–4.01 мас. %), а, иногда, MnO (до 0.33 мас. %) (табл. 6).

Титанит редко встречается в ассоциации с цирконолитом, цирконом, хлоритом, серпентином, диопсидом, апатитом и пиритом в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды (рис. 4д). Тонкие амебовидные зерна титанита совместно с цирконом образуют кайму вокруг цирконолита (рис. 4д). Видимо, он образуется при замещении цирконолита, так как наблюдается разложение и коррозия цирконолита на фоне циркона, вокруг которого развит титанит. Размер зерен этой разновидности титанита состав-

Таблица 5

Химический состав (мас. %) цирконолита месторождения Акташ

Table 5

Chemical composition (wt. %) of zirconolite from the Aktash deposit

№ п/п	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	SrO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	Сумма
1	–	–	2.96	7.42	28.67	–	4.28	4.18	0.39	0.69	25.63	2.51	0.76	6.36	11.24	95.11
2	0.19	0.30	–	12.93	37.65	–	0.70	4.49	–	1.18	28.19	1.83	–	2.74	4.37	94.57
3	–	–	2.24	10.01	28.83	–	2.23	2.66	–	–	22.62	4.22	–	4.03	12.35	89.19
4	0.61	–	–	15.17	44.64	–	–	0.87	–	–	34.10	1.90	–	2.06	0.52	99.88
5	–	–	–	15.16	45.02	0.55	–	0.67	–	–	34.47	2.29	–	1.78	0.37	100.34
6	–	–	–	11.88	35.09	–	1.43	4.12	–	–	28.55	2.39	–	2.41	8.05	93.92
Формула (рассчитана на семь атомов кислорода)																
1	$(Ca_{0.88}Mn_{0.25}Ce_{0.02}U_{0.06}Th_{0.04}Y_{0.03}Sr_{0.01})_{1.13}Zr_{0.86}(Ti_{1.49}Fe_{0.22}Si_{0.20}Nb_{0.05})_{1.96}O_7$															
2	$(Ca_{0.88}U_{0.06}Th_{0.04}Y_{0.04}Mn_{0.04}Mg_{0.02})_{1.08}Zr_{0.87}(Ti_{1.80}Fe_{0.21}Nb_{0.04}Al_{0.02})_{2.08}O_7$															
3	$(Ca_{0.78}U_{0.20}Mn_{0.14}Th_{0.07})_{1.19}Zr_{0.80}(Ti_{1.58}Si_{0.16}Fe_{0.15}Nb_{0.10})_{1.99}O_7$															
4	$(Ca_{0.94}Mg_{0.05}Th_{0.03}U_{0.01})_{1.03}Zr_{0.96}(Ti_{1.94}Fe_{0.04}Nb_{0.03})_{2.01}O_7$															
5	$(Ca_{0.93}Th_{0.02}U_{0.005})_{0.99}Zr_{0.97}(Ti_{1.95}Nb_{0.04}Fe_{0.03}V_{0.03})_{2.04}O_7$															
6	$(Ca_{0.84}U_{0.12}Mn_{0.08}Th_{0.04})_{1.08}Zr_{0.92}(Ti_{1.75}Nb_{0.05}Fe_{0.21})_{2.01}O_7$															

Примечание. \* – здесь и в табл. 6, все железо условно принято, как Fe<sup>3+</sup>.

Таблица 6

Химический состав (мас. %) титанита месторождения Акташ

Table 6

Chemical composition (wt.%) of titanite from the Aktash deposit

№ п/п	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Сумма
1	2.64	31.71	29.29	33.66	3.23	–	100.53
2	4.01	31.39	29.24	31.14	3.42	–	99.20
3	3.41	31.39	28.62	30.88	4.82	–	99.12
4	3.34	30.73	29.03	31.17	5.13	–	99.40
5	0.73	29.86	27.94	35.55	4.86	0.15	99.09
6	3.65	31.35	29.07	30.68	4.27	–	99.02
7	5.74	31.67	28.88	28.56	3.97	0.33	99.15
Формула (рассчитана на пять атомов кислорода)							
1	$Ca_{1.02}(Ti_{0.82}Al_{0.10}Fe_{0.08})_{1.00}Si_{1.03}O_5$						
2	$Ca_{1.03}(Ti_{0.77}Al_{0.16}Fe_{0.08})_{1.01}Si_{1.03}O_5$						
3	$Ca_{1.01}(Ti_{0.77}Al_{0.13}Fe_{0.12})_{1.02}Si_{1.04}O_5$						
4	$Ca_{1.03}(Ti_{0.78}Al_{0.13}Fe_{0.13})_{1.04}Si_{1.02}O_5$						
5	$Ca_{1.00}(Ti_{0.89}Fe_{0.12}Al_{0.03})_{1.04}Si_{1.00}O_5$						
6	$Ca_{1.03}(Ti_{0.76}Al_{0.14}Fe_{0.11})_{1.01}Si_{1.04}O_5$						
7	$(Ca_{1.02}Mn_{0.01})_{1.03}(Ti_{0.71}Al_{0.22}Fe_{0.10})_{1.03}Si_{1.04}O_5$						

ляет 5 мкм. Химический состав этого титанита не проанализирован из-за мелких размеров зерен.

Высокое содержание Ti установлено в измененных зернах циркона, ассоциирующих с бадделитом, серпентином, хлоритом, диопсидом, титанитом и цирконолитом в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые

руды (рис. 4д). В химическом составе циркона отмечается следующие примеси (мас. %): TiO<sub>2</sub> 2.53–13.71, UO<sub>2</sub> 2.89–6.86, ThO<sub>2</sub> 2.46–8.35, CaO 2.10–5.14, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.98–4.28, FeO 0.95–5.28, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.91–1.42, MgO 0.00–0.64, MnO 0.00–1.41, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.00–2.04, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.00–1.46, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.00–0.41, Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.00–0.65, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.00–1.46 (табл. 7).

Химический состав (мас. %) циркона месторождения Акташ  
Chemical composition (wt. %) of zircon from the Aktash deposit

№ п/п	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	Сумма	
1	–	21.56	2.10	2.53	–	0.96	3.09	34.91	1.73	1.42	1.46	–	0.65	–	8.35	5.73	84.48	
2	0.64	16.42	2.26	10.57	1.41	5.28	0.98	30.29	–	0.91	–	–	–	–	5.24	4.85	78.85	
3	0.35	16.99	5.14	13.71	0.47	1.05	2.53	36.03	1.67	1.31	1.31	–	–	–	2.46	2.89	85.91	
4	0.32	21.42	2.18	3.66	–	0.95	3.40	38.27	1.55	1.15	0.96	0.41	–	–	4.14	4.15	82.56	
5	0.41	24.03	2.48	3.94	–	1.44	4.28	39.85	2.04	1.33	1.38	–	–	1.46	3.94	6.86	93.44	
Формула (рассчитана на четыре атома кислорода)																		
1	$(Zr_{0.70}Ca_{0.09}Ti_{0.08}Th_{0.03}Y_{0.07}U_{0.05}Fe_{0.03}Nb_{0.03}Ce_{0.02}Nd_{0.02}Eu_{0.01})_{1.19}Si_{0.89}O_4$																	
2	$(Zr_{0.63}Ti_{0.34}Fe_{0.19}Ca_{0.10}U_{0.05}Th_{0.05}Mn_{0.05}Mg_{0.04}Y_{0.02}Ce_{0.01}Eu_{0.01})_{1.49}Si_{0.71}O_4$																	
3	$(Zr_{0.67}Ti_{0.39}Ca_{0.21}Y_{0.05}Fe_{0.03}Nb_{0.03}Th_{0.02}U_{0.02}Ce_{0.02}Nd_{0.02}Mg_{0.02}Mn_{0.02})_{1.50}Si_{0.65}O_4$																	
4	$(Zr_{0.76}Ti_{0.11}Ca_{0.09}Y_{0.07}Th_{0.04}U_{0.04}Fe_{0.03}Nb_{0.03}Mg_{0.02}Ce_{0.02}Nd_{0.01}Sm_{0.01})_{1.23}Si_{0.87}O_4$																	
5	$(Zr_{0.71}Ti_{0.11}Ca_{0.10}Y_{0.08}U_{0.06}Fe_{0.04}Th_{0.03}Nb_{0.03}Ce_{0.02}Nd_{0.02}Yb_{0.02}Mg_{0.02})_{1.23}Si_{0.87}O_4$																	

## ОБСУЖДЕНИЕ

Нами установлено, что минералы Ti на месторождении Акташ встречаются и в скарнах, и в рудах. Возможно, в начале скарнового этапа в магнезиальных серпентин-флогопит-кальцитовых и серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, образовались перовскит, кальцитит и цирконолит. В дальнейшем при замещении более ранних минералов Ti возникли пирофанит, титанит, анатаз и циркон.

В сульфидно-магнетитовых рудах пирофанит и титанит, скорее всего, образовались последовательно. Микроскопические исследования показывают, что зерна пирофанита располагаются между зернами ранних разновидностей магнетита, которые могли образоваться при замещении ранее существовавших Ti фаз, отложение которых предположительно происходило одновременно с ранними разновидностями магнетита на стадии гальмиролиза-диагенеза (Ятимов и др., 2022). Известно, что процессы гальмиролиза-диагенеза карбонатно-гиалокластических осадков приводят к высвобождению Ti из гиалокластов и отложению его собственных минералов при формировании кремнисто-железистых образований (Аюпова и др., 2022). Первичные железистые породы и Ti фазы на месторождении Акташ не сохранились из-за сильного контактного метаморфизма при внедрении интрузивных пород. С другой стороны, при скарнировании пирофанит мог образоваться вместе со скарновым магнетитом и сульфидами, хотя в сульфидно-магнетитовых рудах пирофанит в тесной ассоциации со скарновым магнетитом и сульфидами не наблюдается. Кроме того, в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, пирофанит и анатаз в ассоциации с серпентином образуются в результате замещения перовскита. Пирофанит обогащен CaO по сравнению с пирофанитом из сульфидно-магнетитовых руд, а содержание остальных примесей сопоставимо. Видимо, пирофанит наследует Ca от перовскита. Это свидетельствует о том, что пирофанит из сульфидно-магнетитовых руд мог образоваться за счет ранее существовавших Ti фаз. В дальнейшем, пирофанит замещается титанитом одновременно или после образования скарнового магнетита, а в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, титанит вместе с цирконом развивается по цирконолиту. Скарновый

магнетит значительно обогащен Ti (199–6230 г/т) по сравнению с более ранними разновидностями (Ятимов и др., 2022). Титансодержащий магнетит также наблюдается в серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, в парагенетической ассоциации с перовскитом и цирконолитом.

В общем виде последовательность минералообразования можно представить следующим образом: (1) первичные Ti фазы в ассоциации с ранним волокнистым, радиально-лучистым, колломорфно-почковидным и зональным субгедральным магнетитом → (2) перовскит + кальцитрит + цирконолит в ассоциации со скарновым магнетитом, флогопитом, пироксеном, гранатом и кальцитом → (3) пирофанит + титанит + анатаз в ассоциации с сульфидами, цирконом, серпентином, хлоритом и кальцитом.

Минералы Ti характерны для известковых и магнезиальных скарнов в скарнированных железорудных месторождениях (Aleksandrov, 1998; Александров, 2002). Обычно источником Ti считаются магматогенные флюиды при подчиненной роли аутигенного титана, содержащегося в карбонатных породах (Александров, Тронева, 2003). Несмотря на то, что содержание Ti в осадочных породах относительно магматических пород невелико, осадочные породы также могут быть его источником для образования минералов Ti в скарнах. В осадочных породах самое высокое содержание Ti отмечается в глинистых породах: кларковые содержания Ti  $0.46 \pm 0.06$  % (Беус, 1981). Титан в глинах может присутствовать как примесь в глинистых слоистых силикатах (Щербина, 1971), а также в виде аутигенных собственных минералов – анатаза, брукита и рутила (Закруткин, Швецова, 1974; Liu et al., 2019; Чайковский и др., 2019).

При контактовом метасоматозе доломитовые толщи и заключенные в них глинистые слои могут преобразоваться в слои скаполита и флогопита (Сердюченко, 1985). На месторождении Акташ среди слоев известковых и доломитовых пород встречаются слои и прослои глин и мергелей, а также эвапоритов (Вольфсон, Титов, 1965; Виноградов и др., 1969). Вероятно, серпентин-флогопит-кальцитовые скарны образовались при скарнировании доломит-известняковых пород с глинистыми прослоями и флогопит месторождения Акташ, содержащий от 0.27 до 0.38 мас. % Ti, унаследовал его из глин.

Наличие Zr в некоторых минералах Ti, а также присутствие титансодержащего циркона, возможно, указывает на сонахождение этих элементов в протолите скарнов. В осадочных породах Zr в основном связан с детритовым цирконом, но может присутствовать и в глинистых минералах (Закруткин, Швецова, 1974). Тем не менее основным источником Zr в скарнах являются магматические породы, из которых он привносится гидротермальными флюидами (Жариков и др., 1998).

## ВЫВОДЫ

Накопление Ti в породах и рудах месторождения Акташ (Таджикистан) происходило в результате многостадийных процессов, начиная от осадконакопления до скарнообразования. Эти процессы привели к образованию собственных минералов титана и его изоморфному вхождению в другие минералы. Предполагается, что Ti и, возможно, частично Zr при скарнировании переходят из глинистых минералов во флогопит и собственные минералы. Из первичного оксида Ti, который, вероятно, сформировался вместе с ранними разновидностями магнетита, также могли образоваться более сложные оксиды. Впервые нами обнаружены и диагностированы анатаз, железистый пирофанит, перовскит, кальцитрит, цирконолит и титанит, большинство из которых найдено впервые не только на месторождении Акташ, но и на всей территории Западного Карамазара. Для серпентин-флогопит-кальцитовых скарнов характерны только перовскит и кальцитрит, а для сульфидно-магнетитовых руд – пирофанит и титанит. В серпентин-гранат-пироксеновых скарнах, вмещающих галенит-сфалеритовые руды, выявлены анатаз, пирофанит, перовскит, цирконолит и титанит. Титановые минералы сформировались последовательно. В начале скарнового этапа, скорее всего, образовались перовскит, кальцитрит, цирконолит, по которым впоследствии развивались пирофанит, титанит, анатаз и циркон.

## ЛИТЕРАТУРА

- Александров С.М. (2002) Генезис и минеральный состав известковых скарнов прогрессивного и регрессивного этапов метасоматизма. *Геохимия*, 3, 281–297.
- Александров С.М., Тронева М.А. (2003) Геохимия титана и формы его нахождения в метасоматитах скарновых месторождений. *Геохимия*, 1, 25–42.

- Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Шиловских В.В. (2022) Аутигенная титановая минерализация как отражение гальмиролиза карбонатно-сульфидно-гиалокластитовых осадков на колчеданосных полях Урала. *Литосфера*, 22(6), 847–858. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-847-858>
- Беус А.А. (1981) Геохимия литосферы. М., Недра, 296 с.
- Виноградов В.И., Бадалов С.Т., Туресебеков А. (1969) О возможной роли осадочных сульфатов в эндогенном рудообразовании Карамазара. *Геология рудных месторождений*, 11(1), 67–77.
- Вольфсон Ф.И. (1951) Структура и генезис свинцово-цинковых месторождений Западного Карамазара. М., АН СССР, 245 с.
- Вольфсон Ф.И., Титов В.Н. (1965) Основные особенности геологического строения Кансайского рудного поля / Геология свинцово-цинковых месторождений Кансайского рудного поля. М., Наука, 21–29.
- Ёров Ё., Кабиров Ш.О., Муродиён А., Сироджев Н.М. (2012) Минерально-сырьевая база химико-металлургической промышленности Таджикистана. Душанбе-Истанбул, Мега басым, 413 с.
- Жариков В.А., Русинов В.Л., Маракушев А.А., Зарайский Г.П., Маракушев А.А., Омеляненко Б.И., Перцев Н.Н., Подлесский К.В., Расс И.Т., Русинов В.Л. (1998) Метасоматизм и метасоматические породы. М., Научный мир, 490 с.
- Закруткин В.Е., Швецова И.В. (1974) Цирконий в бокситах Южного Тимана. *Литология и полезные ископаемые*, 5, 32–41.
- Протожьяконова З.М. (1972) Минералогия месторождений / Геология и минеральные комплексы Западного Карамазара. М., Недра, 147–148.
- Рахимов Ш.Х. (1978) Геолого-структурные условия локализации скарново-полиметаллических месторождений Карамазара. Ташкент, Фан, 142 с.
- Сердюченко Д.П. (1985) Биогенно-эвапоритовые рудные месторождения и породы докембрия. М., Наука, 176 с.
- Чайковский И.И., Чайковская Е.В., Коротченкова О.В., Чиркова Е.П., Уткина Т.А. (2019) Аутигенные минералы титана и циркония Верхнекамского месторождения солей. *Геохимия*, 64(2), 182–194.
- Щербина В.В. (1971) К геохимии титана. *Геохимия*, 3, 302–309.
- Ятимов У.А., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Артемьев Д.А. (2022) Элементы-примеси в магнетите как индикаторы условий образования железных руд месторождения Акташ, Западный Карамазар, Таджикистан. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 333(12), 151–167. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3847>
- Ятимов У.А., Масленников В.В., Артемьев Д.А. (2023) Типохимизм сульфидов магнетит-полиметаллического месторождения Акташ, Западный Карамазар, Таджикистан (данные ЛА-ИСП-МС). *Минералогия*, 2023, 9(3), 50–69. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-3-4>.
- Aleksandrov S.M. (1998) *Geochemistry of skarns and ore formation in dolomites*. Utrecht, VSP, 300 p.
- Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N. (2015) The power of databases: the RRUFF project. <http://rruff.info>.
- Liu Z.-R.R., Zhou M.-F., Williams-Jones A.E., Wang W., Gao J.-F. (2019) Diagenetic mobilization of Ti and formation of brookite/anatase in early Cambrian black shales, South China. *Chemical Geology*, 506(20), 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.022>

## REFERENCES

Aleksandrov S.M. (1998) *Geochemistry of skarns and ore formation in dolomites*. Utrecht, VSP, 300 p.

Aleksandrov S.M. (2002) Genesis and mineralogy of calc skarns of the prograde and retrograde metasomatic stages. *Geochemistry International*, 40(3), 244–259.

Aleksandrov S.M., Troneva M.A. (2003) Geochemistry of titanium and its modes of occurrence in metasomatically altered rocks at skarn deposits. *Geochemistry International*, 41(1), 21–37.

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Shilovskikh V.V. (2022) Authigenic Ti mineralization as an indicator of halmyrolysis of carbonate-sulfide-hyaloclastite sediments in Urals massive sulfide deposits. *Litosfera (Lithosphere)*, 22(6), 847–858. (in Russian) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-847-858>.

Beus A.A. (1981) *Geochemistry of the lithosphere*. Moscow, Nedra, 296 p. (in Russian)

Chaikovskiy I.I., Chaikovskaya E.V., Korotchenkova O.V., Chirkova E.P., Utkina T.A. (2019) Authigenic minerals of titanium and zirconium of the Verkhnekamskoye salt deposit. *Geochemistry International*, 57(2), 184–196. <https://doi.org/10.1134/S0016702919020046>

Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N. (2015) The power of databases: the RRUFF project. <http://rruff.info>.

Liu Z.-R.R., Zhou M.-F., Williams-Jones A.E., Wang W., Gao J.-F. (2019) Diagenetic mobilization of Ti and formation of brookite/anatase in early Cambrian black shales, South China. *Chemical Geology*, 506(20), 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.022>

Protod'yakonova Z.M. (1972) Mineralogy of deposits. In: *Geologiya svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy Kansayskogo rudnogo polya (Geology of Pb-Zn Deposits of the Kansai Ore Field)*. Moscow, Nedra, 147–148. (in Russian)

Rakhimov Sh.Kh. (1978) *Geological and structural setting of skarn-polymetallic deposits of the Karamazar region*. Tashkent, Fan, 142 p. (in Russian)

Serdyuchenko D.P. (1985) *Biogenic evaporite ore deposits and Precambrian rocks*. Moscow, Nauka, 176 p. (in Russian)

- Shcherbina V.V. (1971) Geochemistry of titanium. *Geohimiya (Geochemistry)*, 3, 302–309. (in Russian)
- Vinogradov V.I., Badalov S.T., Turesebekov A. (1969) Possible role of sedimentary sulfates in endogenic ore formation of Karamazar. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii (Geology of Ore Deposits)*, 11(1), 67–77. (in Russian)
- Vol'fson F.I. (1951) *Structure and genesis of Pb–Zn deposits of Western Karamazar*. Moscow, AN SSSR, 245 p. (in Russian)
- Vol'fson F.I., Titov V.N. (1965) Main features of geological structure of the Kansai ore field. In: *Geologiya svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy Kansayskogo rudnogo polya (Geology of Pb–Zn Deposits of the Kansai Ore Field)*. Moscow, Nauka, 21–29. (in Russian)
- Yatimov U.A., Maslennikov V.V., Artem'ev D.A. (2023) Geochemical features of sulfides of the Aktash magnetite-polymetallic deposit, Western Karamazar, Tajikistan (LA-ICP-MS data). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 9(3), 50–69. (in Russian) <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-3-4>.
- Yatimov U.A., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Artem'ev D.A. (2022) Trace elements in magnetite as indicators of formation conditions of iron ore of Aktash deposit, Western Karamazar, Tajikistan. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov (Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering)*, 333(12), 151–167. (in Russian) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3847>
- Yorov E., Kabirov S.O., Murodiyov A., Sirodzhiev N.M. (2012) *Mineral resource base of chemical and metallurgical industry of Tajikistan*. Dushanbe-Istanbul, Mega Basim, 413 p. (in Russian)
- Zakrutkin V.E., Shvetsova I.V. (1974) Zirconium in bauxites of Southern Timan. *Litologiya i poleznye iskopaemye (Lithology and Mineral Resources)*, 5, 32–41. (in Russian)
- Zharikov V.A., Rusinov V.L., Marakushev A.A., Zharaisky G.P., Marakushev A.A., Omel'yanenko B.I., Pertsev N.N., Podlessky K.V., Rass I.T., Rusinov V.L. (1998) *Metasomatism and metasomatic rocks*. Moscow, Nauchny mir, 490 p. (in Russian)

---

### Информация об авторах

Ятимов Умед Абдурозикович – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; [umed1990@list.ru](mailto:umed1990@list.ru)

Блинов Иван Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; [ivan\\_a\\_blinov@mail.ru](mailto:ivan_a_blinov@mail.ru)

Рассомахин Михаил Анатольевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; [miha\\_rassomahin@mail.ru](mailto:miha_rassomahin@mail.ru)

Лебедева Светлана Михайлова – кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; [lebedeva@mineralogy.ru](mailto:lebedeva@mineralogy.ru)

Сафаралиев Носир Сайджалолович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан, [chokadambulak@mail.ru](mailto:chokadambulak@mail.ru)

### Information about the authors

Umed A. Yatimov – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; [umed1990@list.ru](mailto:umed1990@list.ru)

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; [ivan\\_a\\_blinov@mail.ru](mailto:ivan_a_blinov@mail.ru)

Mikhail A. Rassomakhin – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; [miha\\_rassomahin@mail.ru](mailto:miha_rassomahin@mail.ru)

Svetlana M. Lebedeva – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; [lebedeva@mineralogy.ru](mailto:lebedeva@mineralogy.ru)

Nosir S. Safaraliev – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Associate Professor, Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan, [chokadambulak@mail.ru](mailto:chokadambulak@mail.ru)