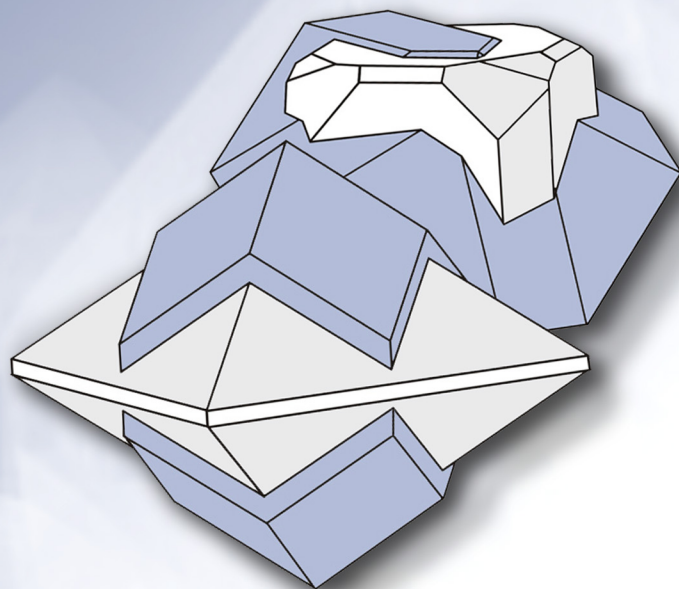


ISSN 2313-545X (print)  
ISSN 2782-2044 (online)

# МИНЕРАЛОГИЯ MINERALOGY

**Том 9 № 2**

*Специальный выпуск,  
посвященный 35-летию  
Института минералогии*



**2023**

---

ISSN 2313-545X (print)  
ISSN 2782-2044 (online)

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии  
Уральского отделения Российской академии наук

# МИНЕРАЛОГИЯ

Том 9 № 2 2023 г. Июнь

Основан 2014 г.  
Выходит 4 раза в год

---

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology,  
Urals Branch, Russian Academy of Sciences

# MINERALOGY

Volume 9 No 2 2023 June

Founded 2014  
Issued 4 times a year

---

*Учредитель:* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук

Тематика журнала охватывает широкий спектр направлений минералогии, включая глобальную и региональную минералогию и минерагению, минералогию полезных ископаемых, технологическую минералогию, онтогению минералов и топоминералогию, эко- и биоминералогию, археологическую минералогию. Главной особенностью журнала является тесная связь результатов минералогических исследований с приоритетным направлением развития науки в РФ: «Рациональное природопользование».

Журнал «Минералогия» наследует традиции издававшегося в Институте минералогии УрО РАН – Уральского минералогического сборника.

*Главный редактор:*

В.В. Маслеников, член-корр. РАН, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН

*Зам. главного редактора:*

Е.В. Белогуб, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН; В.А. Попов, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН

*Редакционная коллегия:*

В.Н. Анфилов, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия), А.М. Асхабов, ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия), А.И. Брусницын, СПбГУ (г. Санкт-Петербург, Россия), И.О. Галускина, Силезский университет (г. Катовице, Польша), Ю.Л. Войтеховский, Санкт-Петербургский горный университет (г. Санкт-Петербург, Россия), С.Л. Вотьяков, ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия), В.Г. Кривовичев, СПбГУ (г. Санкт-Петербург, Россия), Е.П. Макагонов, ИГЗ ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия), И.Ю. Мелекесцева, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия), В.В. Мурзин, ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия), П. Нимис, Университет г. Падуи (г. Падуа, Италия), Л.А. Паутов, Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН (г. Москва, Россия), И.В. Пеков, Московский государственный университет (г. Москва, Россия), В.И. Попова, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия), Э.В. Сокол, ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, Россия), С.Ю. Степанов, ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия), С.Г. Тесалина, Кертин Университет (г. Перт, Австралия), Р. Херрингтон, Музей естественной истории (г. Лондон, Великобритания), В.Н. Удачин, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия), М.А. Юдовская, ИГЕМ РАН (г. Москва, Россия), Университет Витватерсранда (г. Йоханнесбург, ЮАР).

*Адрес издателя и редакции:* Россия 456317, г. Миасс, Челябинская обл., тер. Ильменский заповедник, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН

Тел.: +7(3513)29-80-98

*E-mail:* journal-mineralogy@yandex.ru; *Сайт журнала:* www.journal.mineralogy.ru

© ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН

© Авторы статей

## **MINERALOGY 2023. VOL. 9. NO. 2**

**Scientific journal.** Issued 4 times per year. Founded in 2014

*Founder:* Federal State Budgetary Institution South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences

Journal MINERALOGY covers a wide spectrum of the mineralogical sciences including global and regional mineralogy and minera-geny, mineralogy of mineral deposits, technological mineralogy, ontogenesis of minerals and topomineralogy, eco- and biomineralogy, and archeological mineralogy. The main feature of the journal is the close relationship of the results of mineralogical studies with the priority area for the development of science in the Russian Federation: «Rational environmental management».

Journal «Mineralogy» inherits the traditions of the Ural Mineralogical Collection, published at the Institute of Mineralogy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

*Editor-in-Chief:*

Valery Maslennikov, Institute of Mineralogy SU FRC MiG UB RAS, Miass

*Editors:*

Elena Belogub, Institute of Mineralogy SU FRC MiG UB RAS, Miass; Vladimir Popov, Institute of Mineralogy SU FRC MiG UB RAS, Miass

*Editorial Board:*

Vsevolod Anfilogov (Institute of Mineralogy SU FRC MiG UB RAS, Miass, Russia), Askhab Askhabov (Institute of Geology KSC RAS, Syktyvkar, Russia), Aleksey Brusnitsyn (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia), Irina Galuskina (University of Silesia, Sosnowiec, Poland), Richard Herrington (Natural History Museum, London, United Kingdom), Vladimir Krivovichev (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia), Evgeny Makagonov (Ilmeny State Reserve SU FRC MiG UB RAS, Miass, Russia), Irina Melekstseva (Institute of Mineralogy SU FRC MiG UB RAS, Miass, Russia), Valery Murzin (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia), Paolo Nimis (University of Padova, Padova, Italy), Leonid Pautov (Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia), Igor Pekov (Moscow State University, Moscow, Russia), Valentina Popova (Institute of Mineralogy SU FRC MiG UB RAS, Miass, Russia), Ellina Sokol (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk), Sergey Stepanov (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia), Svetlana Tessalina (Curtin University, Perth, Australia), Valery Udachin (SU FRC MiG UB RAS, Miass, Russia), Yuri Voytekhevsky (St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia), Sergey Votyakov (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia), Marina Yudovskaya (IGEM RAS, Moscow, Russia; University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa).

*Contacts:* territory of the Ilmeny State Reserve, Miass, Chelyabinsk district, 456137 Russia, SU FRC MiG UB RAS

Тел.: +7(3513)29-80-98

*E-mail:* journal-mineralogy@yandex.ru; *Web-site:* www.journal.mineralogy.ru

---

## СОДЕРЖАНИЕ

9(2), 2023

### МИНЕРАЛЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

|   |    |
|---|----|
| МИНЕРАЛОГИЯ АПАТИТ-ЭГИРИН-МЕЗОПЕРТИТОВЫХ ПЕГМАТИТОВ<br>КОПИ 243 ИЛЬМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)<br><i>Е.П. Макагонов, С.А. Ретина, М.А. Рассомахин</i> .....    | 5  |
| ОКСАЛАТЫ Са В ЛИШАЙНИКЕ РОДА <i>CLADONIA</i> НА ОТВАЛАХ<br>СУГУРСКОГО МЕДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)<br><i>Е.Е. Артеменко, М.А. Рассомахин, П.В. Хворов, К.А. Филиппова</i> ..... | 20 |
| МИНЕРАЛОГИЯ МЕДНЫХ ШЛАКОВ<br>СЫСЕРТСКОГО ЖЕЛЕЗОДЕЛАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА<br><i>Ю.В. Ерохин, В.С. Пономарев, А.В. Захаров, Л.В. Леонова</i> .....  | 30 |

### РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

|  |    |
|--|----|
| МИНЕРАЛЬНЫЕ ФОРМЫ ВОЛЬФРАМА НА ПОРОХОВСКОМ<br>И ЮГО-КОНЕВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)<br><i>Д.А. Рогов, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов, М.А. Рассомахин, Р.Р. Ирмаков, А.Е. Чугаев</i> ..... | 41 |
|--|----|

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

|   |    |
|---|----|
| ПРОЯВЛЕНИЕ КРУПНОГО ГРАНАТА ПОЛЯКОВ ЛОГ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ<br><i>В.А. Попов, М.А. Рассомахин, С.В. Колисниченко</i> ..... | 60 |
|---|----|



## CONTENTS

9(2), 2023

### MINERALS AND MINERAL ASSEMBLAGES

|   |   |
|---|---|
| MINERALOGY OF APATITE-AEGIRINE-MESOPERTHITE<br>PEGMATITES OF MINE NO. 243 OF THE ILMENY STATE RESERVE (SOUTH URALS)<br><i>E.P. Makagonov, S.A. Repina, M.A. Rassomakhin</i> ..... | 5 |
|---|---|

|   |    |
|---|----|
| Ca OXALATES IN LICHEN GENUS CLADONIA ON DUMPS<br>OF THE SUGUR COPPER DEPOSIT (SOUTH URALS)<br><i>E.E. Artemenko, M.A. Rassomakhin, P.V. Khvorov, K.A. Filippova</i> ..... | 20 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| MINERALOGY OF COPPER SLAGS FROM<br>THE SYSERT IRON-WORKING PLANT, CENTRAL URALS<br><i>Yu.V. Erokhin, V.S. Ponomarev, A.V. Zakharov, L.V. Leonov</i> ..... | 30 |
|---|----|

### ORES OF MINERAL DEPOSITS

|   |    |
|---|----|
| MINERAL FORMS OF TUNGSTEN AT THE POROKHOVSKOE<br>AND YUGO-KONEVSKOE DEPOSITS (SOUTH URALS)<br><i>D.A. Rogov, E.V. Belogub, K.A. Novoselov, M.A. Rassomakhin, R.R. Irmakov, A.E. Chugaev</i> ..... | 41 |
|---|----|

### BRIEF REPORTS

|   |    |
|---|----|
| POLYAKOV LOG COARSE GARNET OCCURRENCE IN THE SOUTH URALS<br><i>V.A. Popov, M.A. Rassomakhin, S.V. Kolisnichenko</i> ..... | 60 |
|---|----|

УДК 549.642.3

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-1

**МИНЕРАЛОГИЯ АПАТИТ-ЭГИРИН-МЕЗОПЕРТИТОВЫХ  
ПЕГМАТИТОВ КОПИ № 243 ИЛЬМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА  
(ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

**Е.П. Макагонов<sup>1,2</sup>, С.А. Репина<sup>1</sup>, М.А. Рассомахин<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, ул. 8 Июля 10,  
г. Миасс, Челябинская обл., 456301 Россия

Статья поступила в редакцию 14.03.2023 г., принята к печати 17.05.2023 г.

**MINERALOGY OF APATITE-AEGIRINE-MESOPERTHITE PEGMATITES  
OF MINE NO. 243 OF THE ILMENY STATE RESERVE (SOUTH URALS)**

**E.P. Makagonov<sup>1,2</sup>, S.A. Repina<sup>1</sup>, M.A. Rassomakhin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> South-Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,  
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; [mak@mineralogy.ru](mailto:mak@mineralogy.ru)

<sup>2</sup> South Urals State University, Miass Branch, ul. 8 Iyulya 10, Miass,  
Chelyabinsk district, 456301 Russia

Received 14.03.2023, accepted 17.05.2023

**Аннотация.** В статье рассмотрена минералогия апатит-эгири-мезопертитовых пегматитов, которые находятся в фенитовом ореоле на юго-восточном контакте Селянкинского сиенитового массива на Южном Урале. Горными выработками вскрыты две пегматитовые жилы. Пегматиты отличаются от других известных жил Ильменского государственного заповедника высоким содержанием апатита и присутствием лучших коллекционных друз эгирина. В составе пегматитов установлены альбит, микроклин, эгирин, гидроксилapatит, фторапатит, кальцит, титанит, чевкинит-(Ce), магнетит, ильменит, гематит, рутил, гидроксиды Fe и Mn, монацит-(Ce), рабдофан-(Ce), рабдофан-(La), дальнегорскит.

**Ключевые слова:** эгирин, апатит, мезопертит, дальнегорскит, сиенит-пегматиты, фенит, Южный Урал.

**Abstract.** The paper describes mineralogy of apatite-aegirine-mesoperthite pegmatites, which are located in a fenite halo at the southeastern contact of the Selyankino syenite block (Ilmeny State Reserve, South Urals). Two pegmatite veins are exposed by mines. The pegmatites differ from the known veins of the Ilmeny State Reserve in a high amount of apatite and the presence of the best collection aegirine druses. The pegmatites contain albite, microcline, aegirine, hydroxyapatite, fluorapatite, calcite, titanite, chevkinite-(Ce), magnetite, ilmenite, hematite, rutile, Fe and Mn hydroxides, monazite-(Ce), rhabdophane-(Ce), rhabdophane-(La), and dalnegorskite.

**Keywords:** aegirine, apatite, mesoperthite, dalnegorskite, syenite pegmatites, phenite, South Urals.

---

**Для цитирования:** Макагонов Е.П., Репина С.А., Рассомахин М.А. Минералогия апатит-эгири-мезопертитовых пегматитов копи № 243 Ильменского государственного заповедника (Южный Урал). Минералогия, 9(2), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-1

**For citation:** Makagonov E.P., Repina S.A., Rassomakhin M.A. Mineralogy of apatite-aegirine-mesoperthite pegmatites of mine no. 243 of the Ilmeny State Reserve (South Urals). Mineralogy, 9(2), 5–19. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-1.

---

## Введение

В литературе практически нет данных о сиенит-пегматитах южной (Ильменской) части Центральной щелочной полосы, расположенной между Ильменскими и Вишневыми горами на Южном Урале. Исключение составляют жилы уникального Селянкинского месторождения ильменорутита. В 1980–1981 гг. на восточном берегу р. Селянка в верхней части крутого склона Е.П. Макагоновым была заложена копь № 243. Горными выработками вскрыты два пегматитовых тела сиенит-пегматитов. Пегматиты копи № 243 отличаются от известных жил Ильменского заповедника высоким содержанием апатита и наличием лучших коллекционных друз эгирина. Судя по количеству и распределению образцов и глыб в осыпи крутого склона на восточном борту р. Селянка, пегматиты являются представителями серии параллельных жил юго-восточного края Селянкинского сиенитового массива.

## Методы исследования

В процессе детальной геологической документации копи № 243 Е.П. Макагоновым производилась зарисовка жил по квадратам со сторонами 10 см и отбор образцов. Им же проведены измерения и составлены чертежи кристаллов. Собранный материал хранится в Естественно-научном музее Ильменского государственного заповедника. Фотографии образцов подготовлены С.А. Репиной. Исследованы образцы пород и минералов пегматитов, отобранных в друзовых полостях и в непосредственной близости от них. Кристаллы эгирина, полевых шпатов и апатита анализировались в продольных и поперечных сечениях. Ростовые взаимоотношения минералов изучены в агрегатах радиально-лучистого эгирина, образующих срастания с полевым шпатом и апатитом.

Электронно-микроскопические исследования проведены М.А. Рассомахиным с помощью СЭМ Tescan Vega 3 sbu с ЭДС приставкой Oxford Instruments X-act. Анализы выполнялись при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 15 нА и диаметре пучка электронов 1 мкм; время счета 120 с. Количественный анализ составов произведен с использованием эталонов сертифицированных стандартов № 1362 (Microanalysis Consultant Ltd), MINM25-53 (Astimes Scientific Limited, серийный номер 01-044) и НЭРМА. ГЕО1.25.10.7417. Расчет кристаллохимических формул выполнен Е.П. Макагоновым.

## Геологическая характеристика пегматитовых жил

Копь № 243 находится в фенитовом ореоле на юго-восточном контакте Селянкинского сиенитового массива (рис. 1). Поперечной канавой и продольными расчистками обнажены две жилы сиенит-пегматитов (рис. 2). Жилы залегают в высячем юго-восточном боку Селянкинского массива вблизи его контакта с вмещающими гнейсами и амфиболитами селянкинской толщи. Данный массив входит в зону Центральной щелочной полосы, он прослеживается от северного окончания Ильменогорского миаскитового массива на север на 15 км при ширине полосы до 1.2 км (Левин и др., 1974). Геологическое описание Селянкинского массива приведено в работе А.Г. Баженова и др. (1976).

Вмещающие породы пегматитов представлены амфиболовыми, пироксеновыми и биотитовыми фенитами. Текстура пород полосчатая, местами линзовидная и гнейсовидная с переменным количеством темноцветных минералов. Участки фенитов содержат включения существенно пироксеновых пород: от мелкозернистых до крупнозернистых. Породы содержат многочисленные пустоты с друзами мелких кристаллов пироксена, полевого шпата, апатита, кальцита. Толщу фенитов пересекают относительно ровные маломощные (2–10 см) пегматитовые прожилки полевошпат-пироксенового состава. С восточной стороны пегматитов приконтактовые фениты сменяются амфиболитами и биотитовыми гнейсами, состав которых близок к гранитному, содержащими шпинель и силлиманит.

Восточная пегматитовая жила прослеживается вдоль склона на 50 м, из них 7 м вскрыто канавой (рис. 2). В северной части выработки жила выклинивается, но через тонкую прослойку фенитов с севера кулисообразно соединяется с южным окончанием идентичного пегматитового тела. Восточный контакт пегматитовой жилы простирается на северо-восток с углом 10° и погружается на восток под углом 66°. Мощность восточной жилы пегматитов около 1 м. Контакты жилы с боковыми породами резкие неровные извилистые.

Северная часть и зальбанды жилы сложены крупнозернистым агрегатом полевого шпата друзово-блоковой текстуры с интерстициями, выполненными кристаллами эгирина и апатита. Центральная часть жилы пересекается полевошпат-эгириновым меланократовым агрегатом с апатитом и кальцитом.

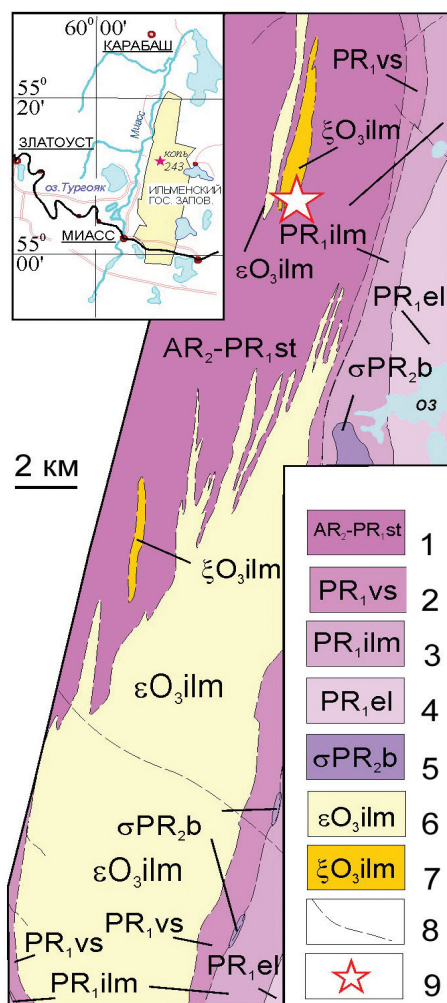


Рис. 1. Положение копи № 243 на геологической карте ильменогорского блока, по В.Ю. Юрецкому и др. с изменениями.

1–4 – метаморфические толщи: 1 – селяннинская (биотитовые и гранат-биотитовые гнейсы, пироксеновые и гранатовые амфиболиты; биотитовые и амфиболовые плагиомигматиты и фениты по ним); 2 – вишневогорская (биотитовые, гранат-биотитовые, гранат-биотит-силлиманитовые, силлиманитовые графитсодержащие гнейсы); 3 – ильменогорская (амфиболиты, диопсид-скаполит-плагиоклазовые породы, кварциты); 4 – еланчиковская (амфибол-биотитовые, биотитовые, двуслюдяные, гранат-биотитовые, мезо-меланократовые гнейсы); 5 – байкский комплекс (энстатит-оливиновые породы и хризотил-лизардитовые серпентиниты по ним); 6, 7 – ильменский комплекс: 6 – миаскиты, 7 – сиениты; 8 – разломы; 9 – копь № 243.

Fig. 1. Position of mine no. 243 on geological map of the Ilmenogorsky block, modified after V.Yu. Yuretsky et al..

1–4 – metamorphic sequences: 1 – Selyankino (biotite and garnet-biotite gneiss, pyroxene and garnet amphibolite, biotite and amphibole plagiomigmatite and phenite after them); 2 – Vishnevogorsk (biotite, garnet-biotite, garnet-biotite-sillimanite and sillimanite graphite-bearing gneiss); 3 – Ilmenogorsk (amphibolite, diopside-skapolite-plagioclase rocks, quartzite); 4 – Elanchik (amphibole-biotite, biotite, bicarbonate, garnet-biotite and meso-melanocrate gneiss); 5 – Baik complex (enstatite-olivine rocks and chrysotile-lysardite serpentinite after them); 6, 7 – Ilmeny complex: 6 – miaskite, 7 – syenite; 8 – faults; 9 – mine no. 243.

Жила рассекается системой трещин с азимутом простирания 350–340° и падением на северо-восток под углом 25–30°. Трещины выполнены кристаллами эгирина, полевого шпата, апатитом и кальцитом. Ширина полостей обычно 0.5–5.0 см, реже более. Первоначально друзовые полости были заполнены кальцитом, но в приповерхностных участках жилы кальцит большей частью выщелочен. Тонкие корки перекристаллизованного кальцита наблюдаются на обломках пород в рыхлых отложениях.

Более поздние наложенные пустоты и трещинки в полевошпатовом агрегате выполнены регенерированным полевым шпатом, мелкими кристаллами кварца, лимонитизированными минералами. В пустотах находятся мелкие кристаллы титанита, ильменита и рутила. Некоторые трещины выполнены кварцем или асбестовидным ферривинчином.

Западная пегматитовая жила вскрыта шурфом на глубине 1.5 м. Мощность жилы 50–70 см. Строение жилы блоковое: участки полевого шпата с индивидами до 25 см чередуются с участками,

сложенными блоками мономинерального желтовато-зеленого апатита и блоками эгириин-апатитового состава. В полевом шпате отмечаются ксеноморфные выделения ильменита длиной до 2–3 см. Количество апатита совместно с эгириин-апатитовыми агрегатами составляет до 30 % объема пегматитовой жилы.

### Породообразующие минералы сиенит-пегматитов

Породообразующие минералы сиенит-пегматитов представлены (в порядке убывания) полевыми шпатами (альбитом и микроклином), эгирином, гидроксипапатитом и фторапатитом, кальцитом, ферривинчином.

**Полевые шпаты.** В восточном жильном теле полевошпатовые участки пегматита сложены агрегатом блоково-друзовой текстуры. Отдельные плохо ограненные кристаллы срослись друг с другом, напоминая брекчию (рис. 3а). Размер отдельных ин-



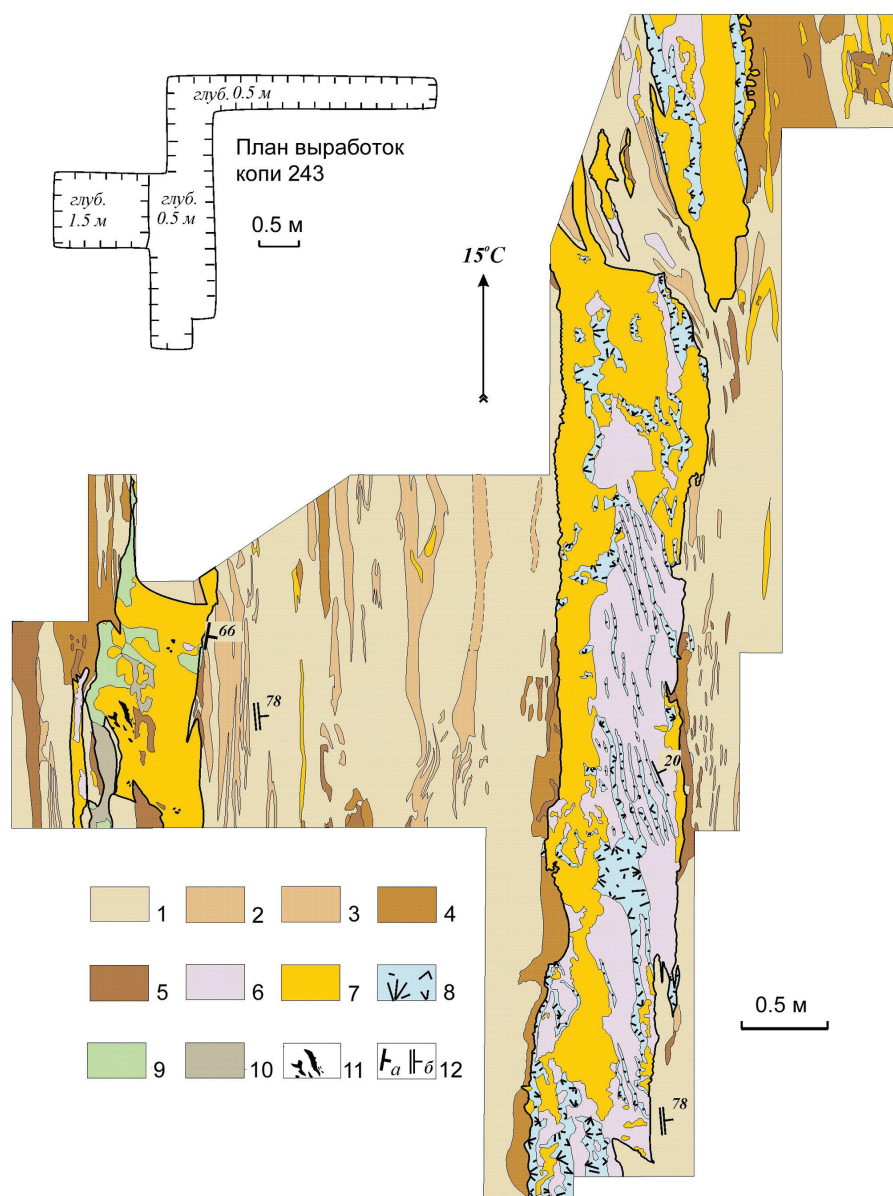


Рис. 2. Строение пегматитовых тел на геологическом плане копи № 243, составлено Е.П. Макагоновым.

1–3 – Фениты: 1 – лейкократовый; 2 – мезократовый; 3 – меланократовый; 4 – пироксеновая порода с полевым шпатом; 5 – мелко- до крупнозернистая мономинеральная пироксеновая порода; 6 – пироксеновый пегматоид; 7 – друзово-блоковый полевошпатовый пегматит; 8 – пироксеновые друзы с кальцитом; 9 – апатитовый агрегат; 10 – апатит-пироксеновый агрегат; 11 – ильменит; 12 – элементы залегания: а – минерализованных трещин, контактов; б – полосчатости.

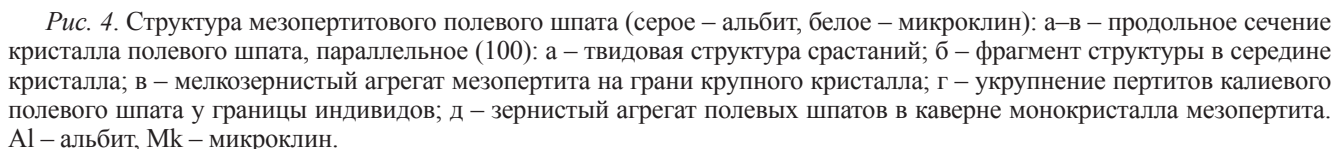
Fig. 2. Structure of pegmatite bodies on geological plan of mine no. 243, composed by E.P. Makagonov.

Phenite: 1 – leucocratic; 2 – mesocratic; 3 – melanocratic; 4 – pyroxene rock with feldspar; 5 – fine- to coarse-grained monomineral pyroxene rock; 6 – pyroxene pegmatite; 7 – druse-blocky feldspar pegmatite; 8 – pyroxene druses with calcite; 9 – apatite aggregate; 10 – apatite-pyroxene aggregate; 11 – ilmenite; 12 – bedding elements of mineralized fractures and contacts (a) and banding (b).

дивидов полевого шпата 1–5 см, реже более; окраска серовато-желтая однородная или неотчетливо пятнистая. В ограничении кристаллов участвуют грани форм {110}, {010}, {001}, {201}, {101}, {021}, {021}, реже {120}, {120} (рис. 36).

В западном жильном теле полевошпатовые обособления сложены крупными индивидами полевого шпата размером до 20 см. Местами у индивидов наблюдаются несовершенные грани форм {110}, {110}, {001}, {120}, {120}, {010}. Нередки





Здесь и на рис. 6, 7 и 10 – BSE фото.

Fig. 4. Structure of mesoperthite feldspar (gray – albite, white – microcline): a–b – longitudinal section of feldspar crystal parallel to (100): a – tweed structure of intergrowths; б – fragment of structure in the center of the crystal; в – fine-grained mesoperthite aggregate at the edge of a large crystal; г – enlarged K-feldspar perthite at the boundary of individuals; д – granular feldspar aggregate in the cavity of mesoperthite monocrystal. Al – albite, Mk – microcline.

Here and in Figs. 6, 7 and 10 – BSE image.

Структуры сростаний полевых шпатов хорошо проявляются на электронных изображениях (рис. 4). По соотношению между альбитовой и микроклиновой фазами, в основном близкому к паритетному, полевой шпат относится к мезоперти-ту. Участками альбитовая составляющая преобла-дает, поэтому такой полевой шпат можно отнести к антипертитам. В сечениях антипертиты имеют самую разнообразную форму: линзовидную, шну-ровидную, изометричную, пятнистую и сложную, обусловленную сочетанием этих форм. Индивиды калиевого полевого шпата в агрегатах имеют тон-кие альбитовые каемки.

Альбитовые фазы мезопертитов практиче-ски чистые, соответствуют кристаллохимической формуле. Примеси Ca, Fe, Mg составляют менее 0.1 к.а.ф. (табл. 1, ан. k–a). В химическом составе микроклина содержится до 14 % альбитового ми-нала. Среди примесей отмечаются следы Ba, Fe, Ti (табл. 1, ан. c–b’).

Детально изучено сечение кристалла мезо-пертита, параллельное (100). Длина кристалла около 2.5 см, он несколько вытянут относительно изображенного на рисунке 3б. На BSE-снимках представлено три изображения с разных участков кристалла: – присыпки микрозерен мезопертита на верхнем крае кристалла (рис. 4в); фрагменты из поперечного профиля кристалла, начиная от гра-ни {011}, слева (рис. 4г) и в центральной части (рис. 4д).

Основная матрица кристалла представле-на мезопертитом твидовой структуры (рис 4а). Кристалл трещиноват и содержит каверны. По кра-ям кристалла, трещинам и в кавернах индивиды микроклина увеличиваются в размерах и местами структура переходит в микрозернистую (рис. 4г, д). В каемках кристаллов и в центрах каверн находятся почти мономинеральные выделения альбита. При остановке кристаллизации микроклина альбит про-должал расти, постепенно перекрывая простран-ство над индивидами микроклина. После смыкания краев альбита над микроклином остались пустоты (рис. 4а). Местами эти пустоты заполнены апати-том.

Эгирин  $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$  – второй по распространен-ности минерал – образует радиально-лучистые и призматические кристаллы. Радиально-лучистый эгирин в основном находится в породе в тесном сростании с полевым шпатом (рис. 5). Промежутки между кристаллами пироксена выполняет мезопер-тит, иногда апатит. Призматические кристаллы эги-рина образуют друзовые агрегаты на стенках поло-стей, сложенных мезопертитовым полевым шпатом (рис. 5). На кристаллах пироксена отмечаются гра-ни форм {110}, {010}, {001}, {101}, {332} (рис. 5). Кристаллы эгирина обоих типов интенсивно тре-щиноваты. По трещинам в эгирине располагаются многочисленные включения гематита, магнетита, ильменита, альбита, апатита, сфена, рутила, мона-цита, ферривинчита (рис. 6).

Таблица 1

Table 1

Химический состав альбита (k–a) и микроклина (c–b’), мас. %

Chemical composition of albite (k–a) and microcline (c–b’), wt. %

| Точки анализа   | d     | b     | h     | a     | c     | f     | g     | b     | b’    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>  | 67.34 | 67.50 | 68.01 | 67.78 | 65.17 | 64.89 | 65.49 | 65.45 | 65.39 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 20.52 | 20.80 | 19.62 | 20.42 | 18.43 | 18.57 | 18.82 | 18.55 | 18.70 |
| CaO   | –     | 0.54  | 0.17  | 0.18  | –     | –     | –     | –     | –     |
| Na <sub>2</sub> O   | 11.05 | 10.73 | 11.79 | 11.46 | 1.68  | 1.15  | 1.54  | 1.24  | 1.35  |
| K <sub>2</sub> O  | 0.31  | 0.13  | –     | 0.13  | 14.05 | 14.47 | 13.96 | 14.55 | 13.97 |
| FeO   | 0.45  | –     | 0.25  | –     | –     | –     | –     | –     | 0.27  |
| Сумма   | 99.88 | 99.70 | 99.84 | 99.97 | 99.74 | 99.08 | 99.81 | 99.79 | 99.85 |
| Формулы рассчитаны на пять катионов   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| d – (Na <sub>0.94</sub> K <sub>0.02</sub> Mg <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>0.99</sub> (Si <sub>2.95</sub> Al <sub>1.06</sub> ) <sub>4.01</sub> O <sub>8</sub> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| b – (Na <sub>0.92</sub> K <sub>0.01</sub> Ca <sub>0.03</sub> ) <sub>0.95</sub> (Si <sub>2.97</sub> Al <sub>1.08</sub> ) <sub>4.05</sub> O <sub>8</sub>                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| h – (Na <sub>1.00</sub> Ca <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.01</sub> ) <sub>1.02</sub> (Si <sub>2.97</sub> Al <sub>1.01</sub> ) <sub>3.98</sub> O <sub>8</sub>                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| a – (Na <sub>0.97</sub> K <sub>0.01</sub> Ca <sub>0.01</sub> ) <sub>0.99</sub> (Si <sub>2.96</sub> Al <sub>1.05</sub> ) <sub>4.01</sub> O <sub>8</sub>                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| c – (K <sub>0.83</sub> Na <sub>0.15</sub> ) <sub>0.99</sub> (Si <sub>3.01</sub> Al <sub>1.00</sub> ) <sub>4.01</sub> O <sub>8</sub>                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| f – (K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.10</sub> ) <sub>0.96</sub> (Si <sub>3.02</sub> Al <sub>1.02</sub> ) <sub>4.04</sub> O <sub>8</sub>                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| g – (K <sub>0.82</sub> Na <sub>0.14</sub> ) <sub>0.96</sub> (Si <sub>3.02</sub> Al <sub>1.02</sub> ) <sub>4.04</sub> O <sub>8</sub>                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| b – (K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.11</sub> ) <sub>0.97</sub> (Si <sub>3.02</sub> Al <sub>1.01</sub> ) <sub>4.03</sub> O <sub>8</sub>                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| b’ – (K <sub>0.82</sub> Na <sub>0.12</sub> ) <sub>0.96</sub> (Si <sub>3.02</sub> Al <sub>1.02</sub> ) <sub>4.04</sub> O <sub>8</sub>                                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

Примечание. Анализы дополнительно содержат (мас. %): k – 0.21 MgO; c – 0.41 BaO; b’ – 0.17 TiO<sub>2</sub>. Положение точек анализов см. на рис. 4.

Note. The analyses also contain (wt. %): k – 0.21 MgO; c – 0.41 BaO; b’ – 0.17 TiO<sub>2</sub>. For the position of analytical points, see Fig. 4.



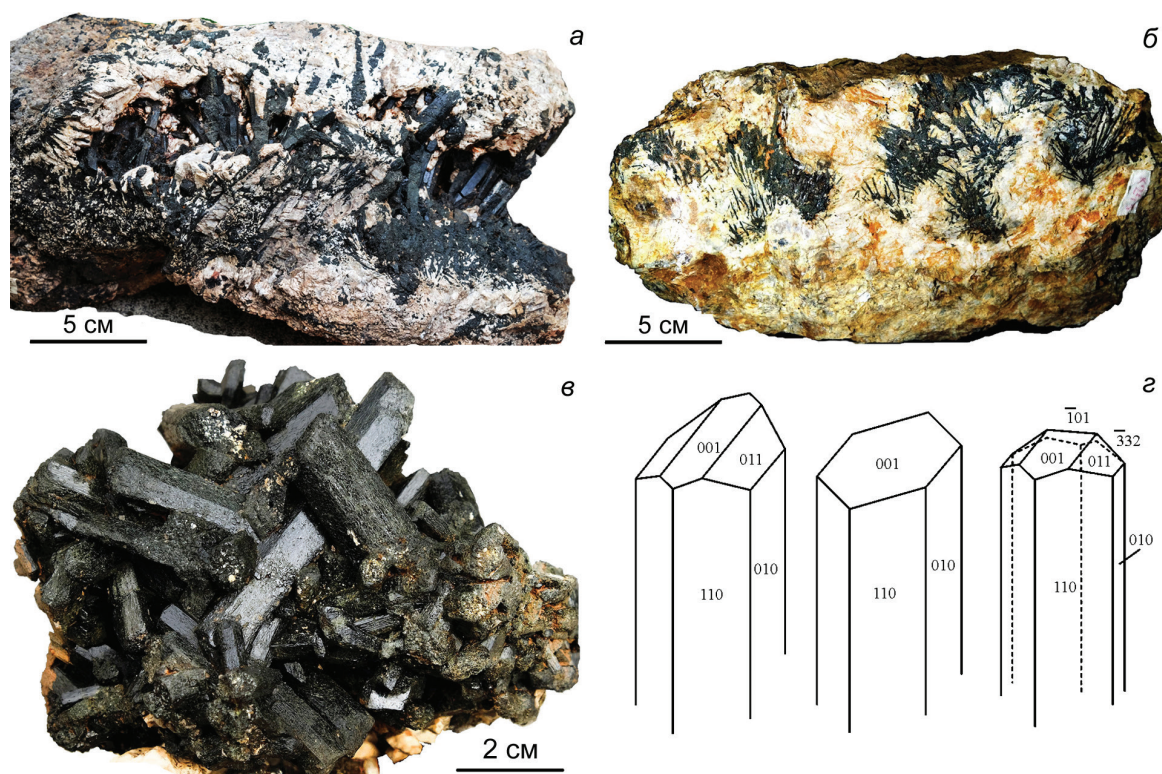


Рис. 5. Кристаллы эгирина в пегматитах копи № 243: а – кристаллы в друзовой щели; б – радиально-лучистые агрегаты в полеовом шпате; в – друза эгирина; г – формы кристаллов эгирина.

Fig. 5. Aegirine crystals in pegmatite of mine no. 243: а – crystals in a druse gap; б – radial aggregates in feldspar; в – aegirine druse; г – morphology of aegirine crystals.

Рис. 6. Типы кристаллов эгирина в продольном срезе: радиально-лучистый (слева) и призматический (справа) с многочисленными включениями альбита, апатита, гематита, ильменита, рутила, титанита, монацита, чевкинита и ферривинчита по трещинам.

Здесь и на рис. 7 и 10, белые точки – участки СЭМ-ЭДС анализов.

Fig. 6. Types of aegirine crystals in longitudinal section: radial (left) and prismatic (right) with numerous inclusions of albite, apatite, hematite, ilmenite, rutile, titanite, monazite, chevkinite, and ferrivinchite along fractures.

Here and in Fig. 7 and 10, the white points – areas of SEM-EDS analyses.



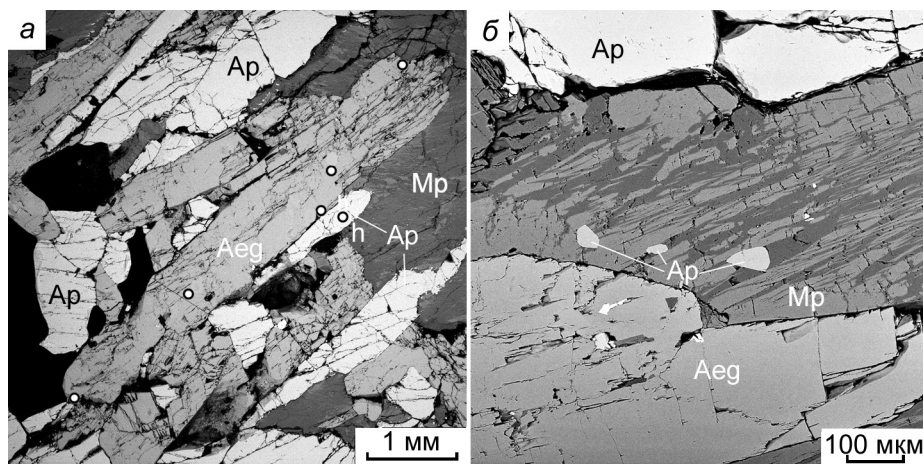


Рис. 7. Взаимоотношение породообразующих минералов в апатит-пироксен-полевошпатом агрегате: а – сростания апатита (Ap) и эгирина (Aeg); б – включения апатита в мезопертит (Mp).

Fig. 7. Relationship of rock-forming minerals in apatite-pyroxene-feldspar aggregate: а – intergrowths of apatite (Ap) and aegirine (Aeg); б – apatite inclusions in mesoperthite (Mp).

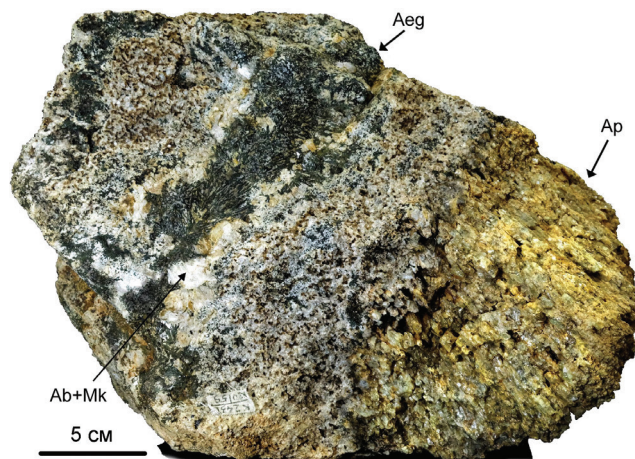


Рис. 8. Зональный пегматит из западного пегматитового тела копи № 243.

Ab + Mk – альбит с микроклином.

Fig. 8. Zoned pegmatite from a western pegmatite body of mine no. 243.

Ab + Mk – albite with microcline.

Несмотря на различную морфологию и разное время отложения, состав разных участков кристаллов пироксена практически идентичен. Средний химический состав из 15 анализов пироксена (мас. %, в скобках – стандартное отклонение):  $\text{SiO}_2$  52.91 (0.39),  $\text{TiO}_2$  0.72 (0.27),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2.52 (0.36),  $\text{FeO}$  17.46 (0.70),  $\text{MnO}$  0.56 (0.07),  $\text{MgO}$  6.21 (0.39),  $\text{CaO}$  12.52 (0.60),  $\text{Na}_2\text{O}$  6.84 (0.44), сумма 99.73 (0.19). При расчете на четыре катиона средняя кристаллохимическая формула пироксена имеет вид  $(\text{Na}_{0.49}\text{Ca}_{0.50}\text{Fe}^{2+}_{0.01})_{1.00}(\text{Fe}^{3+}_{0.50}\text{Mg}_{0.34}\text{Al}_{0.08}\text{Fe}^{2+}_{0.04}\text{Mn}_{0.02}\text{Ti}_{0.02})_{1.00}(\text{Si}_{1.97}\text{Al}_{0.03})_{2.00}\text{O}_6$ . Стандартное отклонение содержания отдельных химических элементов находится в пределах 0.00–0.02 к.а.ф. 98 % минерального состава распределяются по следующим видам (в формульных коэффициентах): эгирин 0.48 (0.51–0.45), ди-

опсид 0.34 (0.38–0.31), кушироит 0.07 (0.10–0.03), геденбергит 0.02 (0.07–0.00), гроссманит 0.02 (0.05–0.01), жадеит 0.01 (0.04–0.00), йохансенит и ферросилит по 0.02 (0.03–0.01).

**Ферривинчит**  $\text{CaNaMg}_4\text{FeSi}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$  отмечается по трещинам и в пустотках между индивидами основных породообразующих силикатов. Агрегаты игольчатые до асбестовидных. Цвет голубовато-серый. Химический состав ферривинчита (мас. %):  $\text{SiO}_2$  53.21,  $\text{TiO}_2$  0.41,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2.47,  $\text{FeO}$  17.91,  $\text{MnO}$  0.61,  $\text{MgO}$  12.73,  $\text{CaO}$  5.91,  $\text{Na}_2\text{O}$  4.74,  $\text{K}_2\text{O}$  0.24, сумма 98.23. Химический состав минерала соответствует кристаллохимической формуле  $(\text{Na}_{0.22}\text{K}_{0.04})_{0.26}(\text{Na}_{1.09}\text{Ca}_{0.91})_{2.00}(\text{Mg}_{2.00}\text{Fe}^{3+}_{1.11}\text{Fe}^{2+}_{1.04}\text{Mn}_{0.07}\text{Ti}_{0.04}\text{Al}_{0.03})_{5.00}(\text{Si}_{7.61}\text{Al}_{0.39})_{8.00}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ .



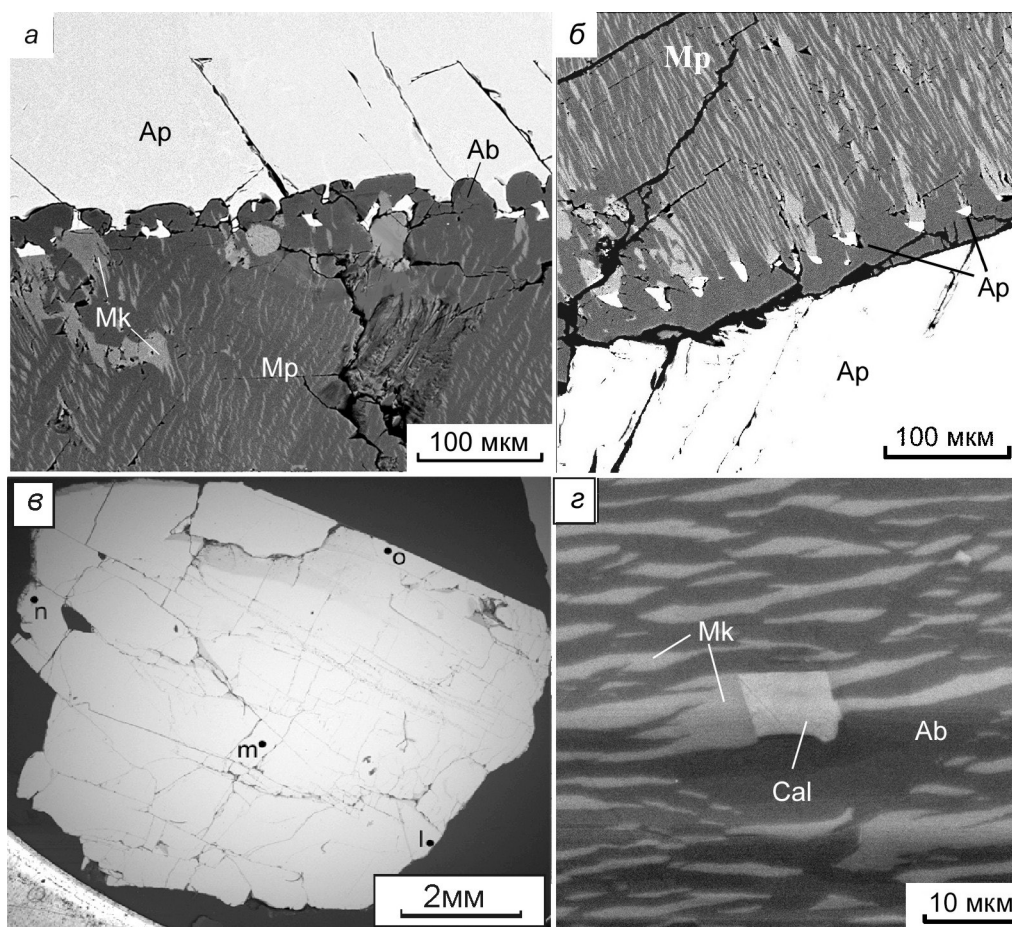


Рис. 9. Взаимоотношение апатита, мезопертита и кальцита в апатит-пироксен-полевошпатовом агрегате копи № 243: а – нарастание апатита на мезопертит (темно-серое – альбит, светло-серое – микроклин); б, в – апатит на индивидуальных микроклинах на границе альбита с мезопертитом; г – взаимоотношение зародыша кальцита (Cal) с мезопертитом.

Ab – альбит, Ap – апатит, Mk – микроклин, Mp – мезопертит.

Fig. 9. Relationship of apatite, mesoperthite and calcite in apatite-pyroxene-feldspar aggregate of mine no. 243: а – overgrowth of apatite on mesoperthite (dark gray – albite, light gray – microcline); б, в – apatite on microcline at the albite-mesoperthite boundary; г – relationship of calcite (Cal) with mesoperthite.

Ab – albite, Ap – apatite, Mk – microcline, Mp – mesoperthite.

Гидроксилапатит  $\text{CaPO}_4\text{OH}$  и фторапатит  $\text{CaPO}_4\text{F}$  отмечаются в восточном пегматитовом теле в виде включений в полевых шпатах и пироксене, а также в виде одиночных кристаллов в друзах совместно с силикатами (рис. 7). Кристаллы апатита длинно-призматические с гексагональной призмой и пирамидальной головкой с закругленными гранями. Содержание апатита в породах варьирует от 0.5 до 15.0 об. %. В западном пегматитовом теле апатит обособлен в блоках размером до 20 см. Апатит в блоках гранулирован, тем не менее, устанавливается первичная параллельно-шестоватая структура с индивидами размером 0.5–2.2 см в поперечнике (рис. 8). Помимо крупных обособлений апатит образует включения во внешних зонах индивидов полевого шпата (рис. 9а, б, в), заполняя остаточные

полости. Химический состав апатита соответствует границе минеральных видов гидроксилапатита и фторапатита (табл. 2). Зональность состава в продольном сечении кристалла апатита размером до 1.5 см по удлинению не обнаружена. Результаты пяти анализов близки, как в середине кристалла, так и по его краям (табл. 2). Для всех анализов характерна постоянная примесь Sr 0.06–0.07 к.а.ф. и незначительная примесь Na.

Кальцит  $\text{CaCO}_3$  образует крупнозернистые агрегаты, выполняющие центральные части друзовых полостей и остаточные пустоты. Изредка отмечаются индукционные поверхности с силикатами, особенно хорошо проявленные на гранях эгирина. Зародыши кальцита встречаются в мезопертитах, где они нарушают структуру микроклиновых

Таблица 2

## Химический состав гидроксилapatита (m, o) и фторапатита (l, n, h), мас. %

Table 2

## Chemical composition of hydroxylapatite (m, o) and fluorapatite (l, n, h), wt. %

| Точки анализа  | m      | o     | l     | n     | h     |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| CaO  | 54.97  | 53.51 | 52.27 | 54.02 | 52.59 |
| SrO  | 1.18   | 1.36  | 1.42  | 1.15  | 1.44  |
| Na <sub>2</sub> O  | 0.23   | 0.27  | 0.28  | 0.26  | —     |
| SiO <sub>2</sub>   | —      | 0.29  | 0.69  | —     | 0.49  |
| Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 0.28   | 0.19  | —     | 0.28  | 0.19  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 41.13  | 40.05 | 40.51 | 40.59 | 39.88 |
| F  | 1.79   | 1.77  | 2.46  | 1.85  | 2.13  |
| Cl   | —      | 0.05  | 0.04  | —     | —     |
| H <sub>2</sub> O   | 0.93   | 0.89  | 0.55  | 0.88  | 0.70  |
| Сумма  | 100.51 | 98.75 | 98.22 | 99.03 | 97.42 |
| Формулы рассчитаны на восемь катионов  |        |       |       |       |       |
| m – (Ca <sub>4.96</sub> Sr <sub>0.06</sub> Na <sub>0.04</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>5.07</sub> P <sub>2.93</sub> O <sub>12</sub> (OH) <sub>0.52</sub> F <sub>0.48</sub> ;  |        |       |       |       |       |
| o – (Ca <sub>4.92</sub> Sr <sub>0.07</sub> Na <sub>0.04</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>5.04</sub> (P <sub>2.91</sub> Si <sub>0.02</sub> S <sub>0.02</sub> ) <sub>2.96</sub> O <sub>12</sub> (OH) <sub>0.51</sub> F <sub>0.48</sub> Cl <sub>0.01</sub> ; |        |       |       |       |       |
| l – (Ca <sub>4.85</sub> Sr <sub>0.07</sub> Na <sub>0.05</sub> ) <sub>4.97</sub> (P <sub>2.97</sub> Si <sub>0.06</sub> ) <sub>3.03</sub> O <sub>12</sub> F <sub>0.67</sub> (OH) <sub>0.32</sub> Cl <sub>0.01</sub> ;                                      |        |       |       |       |       |
| n – (Ca <sub>4.95</sub> Sr <sub>0.06</sub> Na <sub>0.04</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>5.06</sub> P <sub>2.94</sub> O <sub>12</sub> F <sub>0.50</sub> (OH) <sub>0.50</sub> ;  |        |       |       |       |       |
| h – (Ca <sub>4.93</sub> Sr <sub>0.07</sub> Ce <sub>0.01</sub> ) <sub>5.01</sub> (P <sub>2.95</sub> Si <sub>0.04</sub> ) <sub>2.99</sub> O <sub>12</sub> F <sub>0.59</sub> (OH) <sub>0.41</sub> .   |        |       |       |       |       |

Примечание. Анализ m дополнительно содержит 0.37 мас. % SO<sub>3</sub>. Положение точек анализов см. на рис. 9в.

Note. Analysis m also contains 0.37 wt. % SO<sub>3</sub>. For the position of analytical points, see Fig. 9в.

востков (рис. 9г). В верхней части пегматитовых жил кальцит в основном выщелочен, но тонкие корки кальцита сохраняются на отдельных глыбах и стенках трещин в горных породах. Химический состав кальцита (мас. %): FeO 3.17, MnO 1.00, MgO 0.68, CaO 51.31, сумма 56.16. CO<sub>2</sub>, рассчитанное по стехиометрии – 43.57. Кристаллохимическая формула кальцита (Ca<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.05</sub>Mg<sub>0.02</sub>Mn<sub>0.01</sub>)<sub>1.00</sub>CO<sub>3</sub>.

## Акцессорные минералы сиенит-пегматитов

Акцессорные минералы сиенит-пегматитов представлены титанитом, чевкинитом-(Ce), магнетитом, ильменитом, гематитом, рутилом, гидроксидами Fe и Mn, монацитом-(Ce), рабдофаном-(Ce), рабдофан-(La) и дальнегорскитом.

**Титанит** CaTiSiO<sub>4</sub> образует мелкие включения в породообразующих силикатах: эгирине вместе с альбитом или мезопертитом (рис. 10а, б). Химический состав титанита из включений в разных минералах практически идентичен (мас. %): в эгирине – SiO<sub>2</sub> 31.27, TiO<sub>2</sub> 39.6, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.43, FeO 1.35, CaO 27.25, сумма 99.90, Ca<sub>0.95</sub>Ti<sub>0.97</sub>Al<sub>0.02</sub>Fe<sub>0.04</sub>Si<sub>1.02</sub>O<sub>4</sub> (расчет на три катиона), мезопертите – SiO<sub>2</sub> 30.84, TiO<sub>2</sub> 38.04, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.50, FeO 0.68, CaO 28.74, сумма 99.80, Ca<sub>1.00</sub>(Ti<sub>0.93</sub>Al<sub>0.06</sub>Fe<sub>0.02</sub>)<sub>1.01</sub>Si<sub>1.00</sub>O<sub>4</sub>.

**Чевкинит-(Ce)** (Ce,La)<sub>4</sub>(Fe,Ti)<sub>3</sub>(TiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> обнаружен в виде ксеноморфных включений размером 5–20 мкм в эгирине (рис. 10в, г). Химический состав неизмененного чевкинита характеризует точка анализа г на рисунке 10 и в таблице 3. Нередко чевкинит в различной степени изменен, что наблюдается в трещине этого же зерна (анализ s). Здесь чевкинит значительно гидратирован, что проявляется в увеличении содержания молекулярной воды до 0.75 ф.к. В слабо гидратированных зернах чевкинита (точка t) на долю молекулярной воды приходится 0.13 к.а.ф.

**Магнетит** FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> наблюдается в виде тонкой редкой вкрапленности во вмещающих породах и в минералах пегматитов, нередко в сростании магнетита с ильменитом (рис. 11а). Химический состав магнетита содержит примеси Cr, V (мас. %): FeO 92.05, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.30, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.38, TiO<sub>2</sub> 0.15, SiO<sub>2</sub> 0.32, сумма 93.20. Формула магнетита, рассчитанная на 3 катиона, имеет вид: Fe<sub>1.04</sub>(Fe<sub>1.93</sub>Cr<sub>0.01</sub>V<sub>0.01</sub>Si<sub>0.01</sub>)<sub>1.96</sub>O<sub>4.00</sub>.

**Ильменит** FeTiO<sub>3</sub> образует таблитчатые кристаллы размером до 150 мкм (рис. 11а, б). Химический состав двух зерен ильменита (мас. %): 1 – TiO<sub>2</sub> 48.75, FeO 47.19, MnO 3.62, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.29, сумма 99.85; 2 – TiO<sub>2</sub> 47.43, FeO 48.48, MnO 4.25, MgO 0.37, сумма 100.53. Кристаллохимические формулы, рассчитанные на два катиона: 1 –

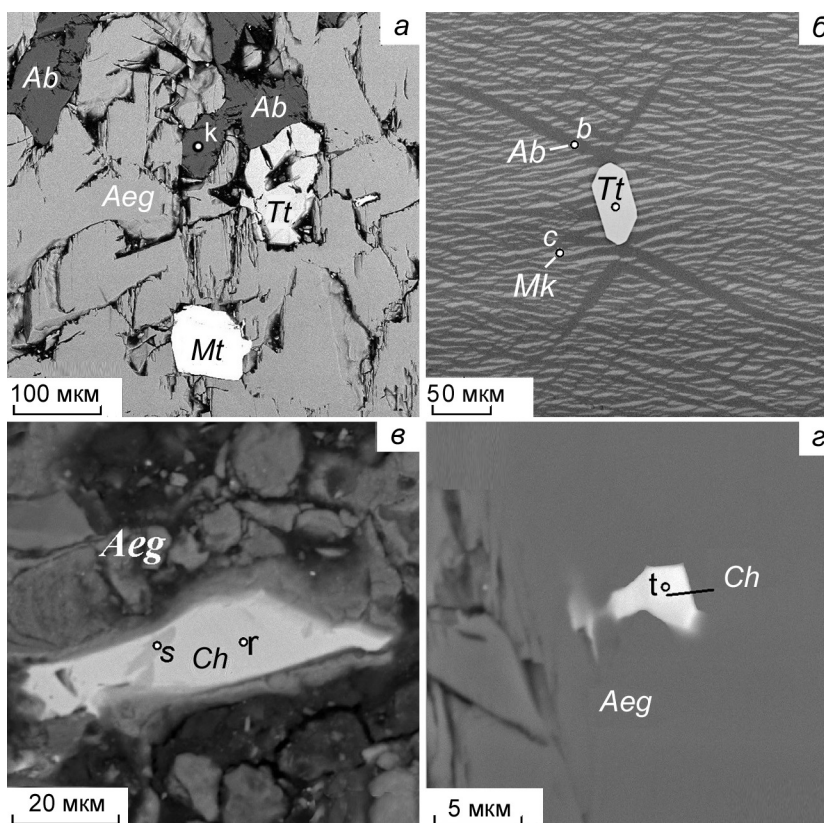


Рис. 10. Включения титанита и чевкинита в минералах пегматита копи № 243: а – титанит (Tt) и магнетит (Mt) в эгиристине и альбите; б – мезопертит с кристаллом титанита, у вершин которого наблюдаются трещины напряжения, залеченные альбитом; в, г – включения чевкинита (Ch) в эгиристине.

Fig. 10. Inclusions of titanite and chevkinite in pegmatite of mine no. 243: а – titanite (Tt) and magnetite (Mt) in aegirine and albite; б – mesoperthite with a titanite crystal exhibiting stress fractures healed by albite at the top; в, г – inclusions of chevkinite (Ch) in aegirine.

### Химический состав чевкинита-(Ce), мас. %

Таблица 3

### Chemical composition of chevkinite-(Ce), wt. %

Table 3

| Точки<br>анализов  | Компоненты |                                |                  |                               |      |                  |      |       |      |                  |                                |                                |                                |                                |                                |                  |       |
|--|------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------|------------------|------|-------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|
|  | MgO        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CaO  | TiO <sub>2</sub> | MnO  | FeO   | SrO  | ZrO <sub>2</sub> | Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ThO <sub>2</sub> | Сумма |
| r  | –          | 0.98                           | 20.79            | –                             | 3.88 | 18.61            | 0.57 | 10.66 | 1.17 | 1.17             | –                              | 18.63                          | 19.65                          | 0.56                           | 2.87                           | –                | 99.54 |
| s  | 0.35       | 1.79                           | 16.55            | 2.03                          | 2.75 | 19.29            | 0.24 | 11.10 | 0.93 | 0.89             | 0.41                           | 14.74                          | 17.20                          | –                              | –                              | 0.42             | 88.69 |
| t  | –          | 1.92                           | 21.27            | –                             | 4.33 | 17.60            | –    | 9.57  | –    | 3.18             | –                              | 13.48                          | 20.60                          | 1.65                           | 4.80                           | –                | 98.40 |
| Формулы рассчитаны на 13 катионов  |            |                                |                  |                               |      |                  |      |       |      |                  |                                |                                |                                |                                |                                |                  |       |
| r – (Ce <sub>1.42</sub> La <sub>1.35</sub> Ca <sub>0.82</sub> Nd <sub>0.20</sub> Pr <sub>0.04</sub> Sr <sub>0.13</sub> ) <sub>3.96</sub> (Fe <sup>2+</sup> <sub>1.75</sub> Zr <sub>0.11</sub> Mn <sub>0.10</sub> ) <sub>1.96</sub> Ti <sub>2.76</sub> Al <sub>0.23</sub> Si <sub>0.09</sub> ) <sub>3.07</sub> [Si <sub>2.00</sub> O <sub>7</sub> ] <sub>2.00</sub>                           |            |                                |                  |                               |      |                  |      |       |      |                  |                                |                                |                                |                                |                                |                  |       |
| s – (Ce <sub>1.39</sub> La <sub>1.20</sub> Ca <sub>0.65</sub> Sr <sub>0.12</sub> Mg <sub>0.11</sub> ) <sub>3.46</sub> (Fe <sup>2+</sup> <sub>2.04</sub> Zr <sub>0.10</sub> Mn <sub>0.04</sub> ) <sub>2.14</sub> (Ti <sub>3.19</sub> Al <sub>0.10</sub> Nb <sub>0.04</sub> ) <sub>3.26</sub> [Al <sub>0.18</sub> Si <sub>1.82</sub> O <sub>7</sub> ] <sub>2.00</sub> × 0.75(H <sub>2</sub> O) |            |                                |                  |                               |      |                  |      |       |      |                  |                                |                                |                                |                                |                                |                  |       |
| t – (Ce <sub>1.49</sub> La <sub>0.98</sub> Ca <sub>0.92</sub> Nd <sub>0.34</sub> Pr <sub>0.12</sub> ) <sub>3.86</sub> (Fe <sup>2+</sup> <sub>1.58</sub> Zr <sub>0.31</sub> ) <sub>1.89</sub> (Ti <sub>2.62</sub> Al <sub>0.45</sub> Si <sub>0.20</sub> ) <sub>3.26</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ] <sub>2.00</sub> × 0.13(H <sub>2</sub> O)  |            |                                |                  |                               |      |                  |      |       |      |                  |                                |                                |                                |                                |                                |                  |       |

Примечание. Положение точек анализов см. на рис. 10в, г. Содержание H<sub>2</sub>O рассчитано из суммы анализа примерно 100 %.

Note. For the position of analytical points, see Figs. 10в and 10г. The H<sub>2</sub>O content is calculated from the analytical total of ~100 %.

Fe<sub>1.00</sub>(Ti<sub>0.92</sub>Mn<sub>0.08</sub>)<sub>1.00</sub>O<sub>3</sub>; 2 – Fe<sub>1.01</sub>(Ti<sub>0.89</sub>Mn<sub>0.09</sub>Mg<sub>0.01</sub>)<sub>0.99</sub>O<sub>3</sub>.  
Некоторый избыток железа в последней формуле, вероятно, вызван тонкой структурой распада с образованием пластинок гематита в ильмените, едва различимых на рисунке 10б.

Гематит Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> образует скопления в кристаллах эгирина и полевого шпата, создавая эффект солнечного камня. Индивиды размером от долей миллиметра до 20 мкм (рис. 11в, г). Состав гематита практически соответствует стехиометрическому.



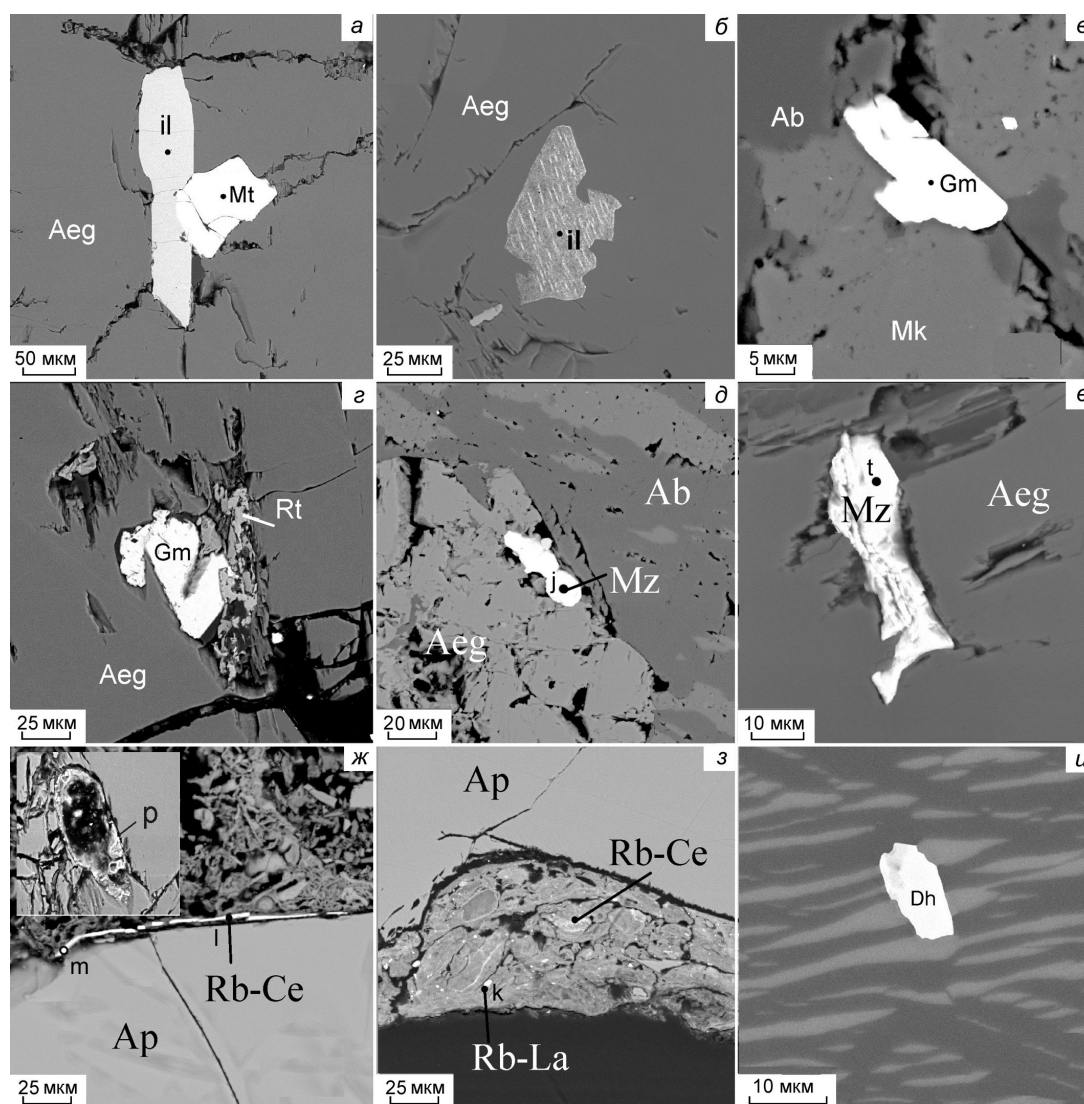


Рис. 11. Акцессорные минералы Fe, Ti, РЗЭ и дальнегорскит в пегматитах копи № 243: а – сросток ильменита (il) с магнетитом; б – структура распада в ильмените; в – пластинка гематита в мезопертите с микроклином и альбитом; г – рутил (Rt) и гематит в эгирине; д, е – зерна монацита (Mz) в эгирине и на контакте с мезопертитом; ж – корка рабдофана-(Ce) на апатите; з – рабдофан-(Ce) и рабдофан-(La) в оксидно-силикатных агрегатах на апатите; и – кристалл дальнегорскита (Dh) в мезопертите.

Fig. 11. Accessory Fe, Ti and REE minerals and dalnegorskite in pegmatites of mine no. 243: а – aggregate of ilmenite (il) and magnetite; б – exsolution structure in ilmenite; в – hematite plate in mesoperthite with microcline and albite; г – rutile (Rt) and hematite in aegirine; д, е – monazite grains (Mz) in aegirine and at the contact with mesoperthite; ж – rhabdophane-(Ce) crust on apatite; з – rhabdophane-(Ce) and rhabdophane-(La) in oxide-silicate aggregates on apatite; и – dalnegorskite crystal (Dh) in mesoperthite.

Рутил  $\text{TiO}_2$  встречается изредка, по-видимому, как продукт разложения ильменита (рис. 11г). Химический состав рутила (мас. %)  $\text{TiO}_2$  95.48, FeO 0.77, CaO 0.68,  $\text{ZrO}_2$  0.42,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  0.34,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  1.11,  $\text{WO}_3$  0.71, сумма 99.51. Эмпирическая формула имеет вид  $(\text{Ti}_{0.97}\text{Fe}_{0.01}\text{Ca}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$  (расчет на один катион).

Гидроксиды Fe и Mn в зоне выветривания жил образуют корки в трещинах пород.

Монацит-(Ce)  $\text{CePO}_4$  наблюдается в виде ксеноморфных выделений размером 25–50 мкм внутри кристаллов эгирина или на контактах пироксена с полевым шпатом (рис. 11д, е). В химическом составе монацита-(Ce) содержится значительное количество La: от 0.34 до 0.40 к.а.ф. (табл. 4, ан. т, j). Постоянными примесями являются Nd и Pr, кроме них отмечаются примеси Ca, Si, реже Fe и S.

Таблица 4

Химический состав монацита-(Ce) (t, j), рабдофана-(Ce) (m, l), рабдофана-La (k) и смеси рабдофана-La с оксидно-силикатным агрегатом (p), мас. %

Table 4

Chemical composition of monazite-(Ce) (t, j), rhabdophane-(Ce) (m, l), rhabdophane-La (k) and a mixture of rhabdophane-La with oxide-silicate aggregate (p), wt %

| Точки анализов                 | t     | j     | m      | l     | k     | p      |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 34.24 | 34.43 | 31.69  | 26.67 | 3.50  | 2.02   |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 27.32 | 23.25 | 23.23  | 19.10 | 20.52 | 14.18  |
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.61  | 6.84  | 6.22   | 5.89  | 13.74 | 9.60   |
| Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.38  | 2.66  | 2.75   | 1.60  | 3.76  | 2.48   |
| FeO                            | 0.44  | —     | 0.95   | 1.32  | 1.40  | 8.61   |
| MnO                            | —     | —     | —      | 0.92  | 2.21  | 1.08   |
| CaO                            | 0.28  | 0.26  | 0.37   | 1.41  | 3.64  | 3.73   |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.50  | 0.95  | 0.67   | 2.15  | 2.20  | 14.38  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | —     | —     | —      | 0.75  | 1.88  | 4.96   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 28.23 | 28.67 | 27.61  | 25.82 | 24.67 | 17.75  |
| SO <sub>3</sub>                | 0.24  | —     | —      | —     | 0.96  | 0.49   |
| H <sub>2</sub> O*              | —     | —     | 6.56   | 13.71 | 16.89 | 17.08  |
| Сумма                          | 99.24 | 99.29 | 100.05 | 99.99 | 99.80 | 100.05 |

Формулы рассчитаны на два катиона

t – (Ce<sub>0.49</sub>La<sub>0.40</sub>Nd<sub>0.08</sub>Pr<sub>0.03</sub>Ca<sub>0.01</sub>Fe<sub>0.01</sub>)<sub>1.03</sub>(P<sub>0.94</sub>Si<sub>0.02</sub>Sr<sub>0.01</sub>)<sub>0.97</sub>O<sub>4</sub>

j – (Ce<sub>0.50</sub>La<sub>0.34</sub>Nd<sub>0.10</sub>Pr<sub>0.04</sub>Th<sub>0.02</sub>Ca<sub>0.01</sub>)<sub>1.00</sub>(P<sub>0.96</sub>Si<sub>0.04</sub>)<sub>1.00</sub>O<sub>4</sub>

m – (Ce<sub>0.48</sub>La<sub>0.35</sub>Nd<sub>0.09</sub>Pr<sub>0.04</sub>Fe<sub>0.03</sub>Ca<sub>0.02</sub>)<sub>1.01</sub>(P<sub>0.96</sub>Si<sub>0.03</sub>)<sub>0.99</sub>O<sub>4</sub> × 0.9H<sub>2</sub>O

l – (Ce<sub>0.41</sub>La<sub>0.29</sub>Nd<sub>0.09</sub>Ca<sub>0.06</sub>Fe<sub>0.05</sub>Al<sub>0.04</sub>Mn<sub>0.03</sub>Pr<sub>0.02</sub>Sr<sub>0.02</sub>)<sub>1.01</sub>(P<sub>0.91</sub>Si<sub>0.09</sub>)<sub>0.99</sub>O<sub>4</sub> × 1.9H<sub>2</sub>O

k – (La<sub>0.30</sub>Ca<sub>0.16</sub>Nd<sub>0.20</sub>Mn<sub>0.07</sub>Y<sub>0.06</sub>Ce<sub>0.05</sub>Pr<sub>0.05</sub>Fe<sub>0.05</sub>Al<sub>0.04</sub>Sm<sub>0.02</sub>)<sub>0.96</sub>(P<sub>0.83</sub>Si<sub>0.09</sub>Sr<sub>0.03</sub>Al<sub>0.05</sub>)<sub>1.00</sub>O<sub>4</sub> × 2.25H<sub>2</sub>O

p\*\* – (La<sub>0.33</sub>Ca<sub>0.25</sub>Nd<sub>0.22</sub>Mn<sub>0.06</sub>Y<sub>0.06</sub>Ce<sub>0.05</sub>Pr<sub>0.06</sub>)<sub>1.03</sub>(P<sub>0.95</sub>Si<sub>0.02</sub>)<sub>0.97</sub>O<sub>4</sub> × 2.25H<sub>2</sub>O

Примечание. \* – Содержание H<sub>2</sub>O рассчитано из суммы анализа примерно 100 %; \*\* – рассчитано без Si, Al, Fe, Mg и K. Анализы дополнительно содержат (мас. %): j – 2.23 ThO<sub>2</sub>; l – 0.65 SrO; k – 2.70 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; k – 1.73 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; p – 1.43 MgO, 0.38 K<sub>2</sub>O и 1.88 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Положение точек анализов см. на рис. 11д–з.

Note. \* – The H<sub>2</sub>O content is calculated from the analytical total of ~100 %; \*\* – calculated without Si, Al, Fe, Mg and K. The analyses also contain (wt. %): j – 2.23 ThO<sub>2</sub>; l – 0.65 SrO; k – 2.70 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; k – 1.73 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; p – 1.43 MgO, 0.38 K<sub>2</sub>O and 1.88 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. For the position of analytical points, see Figs. 11d–z.

Рабдофан-(Ce) (Ce,La)PO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O наблюдается в виде тонких пленок толщиной до 2 мкм в пустотах на поверхности кристаллов апатита и зерен в оксидно-силикатных продуктах, выполняющих пустоты в зернах апатита (рис. 11ж, з). Как и в монаците-(Ce), рабдофан-(Ce) содержит значительное количество La (табл. 4, ан. m, l). Набор примесей также сходен с таковыми в монаците, но отмечается несколько больше примесей Fe и Si, Ca, а также появляются Mn и Al.

Рабдофан-(La) (La,Ce)PO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O является продуктом изменения рабдофана-(Ce) (рис. 11з). При гидротермальном преобразовании Ce выщелачивается из минерала и возрастает содержание примесей Fe, Si, Mn, Al и Ca (табл. 4, ан. k), присутствие которых связано с механическими примесями. При исключении петрогенных элементов, кристаллохимическая формула идентична рабдофану-(La) (анализы p и k, табл. 4).

Дальнегорскит Ca<sub>5</sub>Mn(Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>)<sub>2</sub> найден в кристалле мезопертита в виде слегка удлиненного зерна размером около 10 мкм (рис. 11и). Химический состав минерала (мас. %): SiO<sub>2</sub> 50.39, FeO 3.16, MnO 10.48, MgO 1.13, CaO 34.47, BaO 0.71, K<sub>2</sub>O 0.09, сумма 100.43. Кристаллохимическая формула (Ca<sub>4.39</sub>Fe<sub>0.31</sub>Mg<sub>0.20</sub>Ba<sub>0.03</sub>K<sub>0.01</sub>)<sub>5.94</sub>Mn<sub>1.06</sub>Si<sub>5.99</sub>O<sub>18</sub> (расчет на 12 катионов) отвечает открытому недавно минералу дальнегорскиту (Щипалкина и др., 2019).

## Обсуждение

В результате проведенных исследований установлена следующая смена минеральных ассоциаций. К наиболее раннему парагенезису относятся друзово-блоковые полевошпатовые агрегаты. В результате деформаций второго этапа в трещинах кристаллизовались агрегаты, состоящие преимущественно из эгирина с подчиненным количе-



ством полевого шпата. Наряду с новыми генерациями полевого шпата в агрегате регенерировались и дорастали ранее образовавшиеся индивиды. Кристаллизация минералов второго этапа сопровождалась образованием апатита. Ранние генерации апатита в виде включений располагались по зонам роста кристаллов полевого шпата. Основное количество апатита, образующего мономинеральные блоки в западном пегматитовом теле, отлагалось либо совместно с эгиринитом, либо до него. Здесь агрегаты апатита составляют не менее 30 % объема пегматитовой жилы. Параллельно-шестоватое строение второго типа апатитовых агрегатов указывает на медленное раскрытие вмещающей их полости при их кристаллизации.

В третий этап деформаций образовались новые пологие трещины, которые зарастали друзовыми агрегатами эгирина с полевым шпатом, апатитом и кальцитом. Кальцит заполнял остаточные полости, но в начале кристаллизации кальцит имел индукционные поверхности совместного роста с другими минералами. На стенки наиболее поздних секущих трещин и миароловых пустот нарастали кристаллы кварца и ферривинчита. За небольшим исключением, для всего периода формирования пегматитовых жил характерен постоянный состав кристаллизующихся минералов.

Пегматиты копи № 243 отличаются от известных жил сиенит-пегматита Ильменского государственного заповедника (например, копей №№ 15 и 158) лучшими коллекционными друзьями эгирина. Необычным в жилах оказалось высокое содержание апатита. Ранее в Ильменских горах наибольшие содержания апатита обнаруживались в миаскит-пегматитах, обычно в приконтактной зоне кальцитовых сердечников пегматитовых жил (коп № 6, жилы Савельева лога, гор Фирсовой и Лохматой). В сиенит-пегматитах апатит встречался практически во всех жилах, но в незначительных количествах (Попов, Попова, 2006). В копи № 243 мономинеральные апатитовые участки в западном пегматитовом теле достигают 50 см.

Дальнегорскит впервые определен для Урала. В бороносных известковых скарнах Дальнегорского месторождения (место первичной находки) этот минерал ранее принимался за волластонит. В 2018 г. были проведены углубленные исследования состава и структуры волластонита и он был отнесен к пироксеноидам со структурой бустамита (Щипалкина и др., 2019).

В описанных жилах пегматитов выделения ферривинчита незначительны. При дальнейшей расчистке копи по простиранию жил можно ожидать присутствие более существенных количеств Na-Ca-амфибол-асбеста. Так, в эгирин-полевошпатовой жиле, находящейся в 100 м восточнее от копи № 243, ранее были обнаружены крупные выделения ферривинчита в виде асбеста с длиной волокна до 20 см (Баженов, Макагонов, 2005).

## Выводы

Впервые рассмотрены жилы сиенит-пегматитов копи № 243 Ильменского государственного заповедника, находящиеся в фенитовом ореоле юго-восточного контакта Селянкинского сиенитового массива. По соотношению между альбитовой и микроклиновой фазами, полевым шпатом, слагающий жилы, относится к мезопертиту. Полости в пегматитах выполнены радиально-лучистыми и призматическими кристаллами эгирина. В составе пегматитов установлены альбит, микроклин, эгирин, гидроксилapatит, фторapatит, кальцит, титанит, чевкинит-(Ce), магнетит, ильменит, гематит, рутил, гидроксиды Fe и Mn, монацит-(Ce), рабдофан-(Ce), рабдофан-(La), дальнегорскит. Исходя из структурно-текстурных особенностей породообразующих минералов, жилы пегматитов являются синтектоническими, декомпрессионными, ранние минеральные ассоциации в них подвергались катаклазу и регенерации. Изучение минерального состава жил современными методами позволило выявить дальнегорскит – новый для Урала минерал. Минеральные ассоциации в дальнейшем позволят уточнить процессы формирования пегматитов и непосредственно Ильмено-Вишневогорского комплекса. В результате работы получены структурно-вещественные характеристики коллекционных друз эгирина, выставленные в демонстрационных залах музея Ильменского государственного заповедника и пополнен новыми данными паспорт копи № 243.

*Исследования проводились в рамках государственной темы «Структурно-вещественная эволюция полиметаморфических и магматических комплексов Южного Урала: петрология, геохимия, минералогия».*

## Литература

Баженов А.Г., Иванов Б.Н., Кутепова Л.А., Левин В.Я., Роненсон Б.М., Утенков В.А. (1976) О вещественном составе пироксен-полевошпатовых пород северной части ильменогорского комплекса. *Труды Ильменского государственного заповедника*, (15), 3–11.

Баженов А.Г., Макагонов Е.П. (2005) Na-Ca-амфибол-асбест в щелочном комплексе Ильменских гор. *Уральский минералогический сборник*, (15), 56–59.

Левин В.Я., Роненсон Б.М., Утенков В.А., Баженов А.Г., Левина А.А., Кутепова Л.А. (1974) Новые данные о геологическом строении северной части ильменогорского комплекса. *Ежегодник-1973. Труды ИГГ УрО АН СССР*. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 52–55.

Попов В.А., Попова В.И. (2006) Минералогия пегматитов Ильменских гор. *Минералогический альманах*, 9, 152.

Щипалкина Н.В., Пеков И.В., Ксенофонов Д.А., Чуканов Н.В., Белаковский Д.И., Кошлякова Н.Н. (2019) Дальнегорскит,  $\text{Ca}_5\text{Mn}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$ , новый пироксеноид структурного типа бустамита, породообразующий минерал известковых скарны Дальнегорского борного месторождения (Приморский край, Россия). *Записки РМО*, 148(2), 61–75.

## References

Bazhenov A.G., Ivanov B.N., Kuteпова L.A., Levin V.Y., Ronenson B.M., and Utenkov V.A. (1976) [Composition of pyroxene-feldspar rocks of the northern part of the Ilmenogorsky complex]. *Trudy Ilmenskogo gosudarstvennogo zapovednika [Proceedings of the Ilmeny State Reserve]*, (15), 3–11. (in Russian)

Bazhenov A.G., Makagonov E.P. (2005) [Na-Ca-amphibole-asbestos in an alkaline complex of the Ilmeny Mountains]. *Uralsky mineralogichesky sbornik [Urals Mineralogical Collection]*, (15), 56–59. (in Russian)

Levin V.Y., Ronenson B.M., Utenkov V.A., Bazhenov A.G., Levina A.A., Kuteпова L.A. (1974) [New data on geological structure of the northern part of the Ilmenogorsky complex]. *Ezhegodnik-1973. Trudy IGG UrO AN SSSR [Yearbook-1973. Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB AS SSSR]*. 52–55. (in Russian)

Popov V.A., Popova V.I. (2006) [Mineralogy of pegmatites of the Ilmeny Mountains]. *Mineralogicheskiy almanakh [Mineralogical Almanac]*, 9, 152. (in Russian)

Shchipalkina N.V., Pekov I.V., Ksenofontov D.A., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Koshlyakova N.N. (2019) Dalnegorskite,  $\text{Ca}_5\text{Mn}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$ , a new pyroxenoid of the bustamite structure, a rock-forming mineral of calcic skarns of the Dalnegorsk boron deposit (Primorsky krai, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 61, 756–766.

УДК 549.893.1, 582.29

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-2

**ОКСАЛАТЫ Ca В ЛИШАЙНИКЕ РОДА *CLADONIA* НА ОТВАЛАХ СУГУРСКОГО МЕДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)****Е.Е. Артеменко, М.А. Рассомахин, П.В. Хворов, К.А. Филиппова***Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,**г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; art\_k\_e@inbox.ru*

Статья поступила в редакцию 01.03.2023 г., принята к печати 09.06.2023 г.

**Ca OXALATES IN LICHEN GENUS *CLADONIA* ON DUMPS OF THE SUGUR COPPER DEPOSIT (SOUTH URALS)****E.E. Artemenko, M.A. Rassomakhin, P.V. Khvorov, K.A. Filippova***South-Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,**Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; art\_k\_e@inbox.ru*

Received 01.03.2023, accepted 09.06.2023

**Аннотация.** В чешуйчато-кустистом сцифоидном лишайнике *Cladonia chlorophaea* на отвалах Сугурского медного месторождения (Южный Урал), подвергавшихся воздействию аэрозольных выпадений Карабашского медеплавильного комбината (КМК), обнаружены кристаллы оксалатов Ca, преимущественно, уэдделлита ( $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot (2.5-x)\text{H}_2\text{O}$ ). Образцы лишайников и подстилающего субстрата изучены методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного микроанализа, рентгенофазового анализа и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. В подстилающем субстрате и талломах лишайников зафиксированы содержания токсичных элементов (Cu, Zn, Pb, Cd, Sn, Sb, Se, As, Te), превышающие их средние содержания в земной коре, при этом содержания в талломе ниже (за исключением Cd), чем в субстрате. Высокие содержания Pb обнаружены в местах скопления кристаллов оксалатов Ca. В талломе лишайника найдены также включения минералов, слагающих отвал, и сферические частицы, связанные с деятельностью КМК и содержащие существенные концентрации тяжелых металлов.

**Ключевые слова:** оксалаты кальция, уэдделлит, биоминерализация, *Cladonia*, Карабашский медеплавильный комбинат, Сугурское медное месторождение.

**Abstract.** Ca oxalate crystals (mainly, weddellite ( $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot (2.5-x)\text{H}_2\text{O}$ ) are found in the lichen *Cladonia chlorophaea* on dumps of the Sugur copper deposit underwent to aerosol emissions from the Karabash copper smelting (KCS), South Urals. The samples of lichens and substrate are studied by scanning electron microscopy, energy-dispersion microanalysis, X-ray phase analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry. The contents of toxic elements (Cu, Zn, Pb, Cd, Sn, Sb, Se, As, Te) of substrate and lichen thalli exceed their average contents in the Earth's crust, whereas their contents in thalli are lower than in substrate (except for Cd). The high Pb content is associated with Ca oxalate. The lichen thalli contains inclusions of minerals, which compose the dump, and spherical particles, which are associated with the activity of the KCS and which contain significant concentrations of heavy metals.

**Keywords:** calcium oxalates, weddellite, biomineralization, *Cladonia*, Karabash copper smelter, Sugur copper deposit,

**Для цитирования:** Артеменко Е.Е., Рассомахин М.А., Хворов П.В., Филиппова К.А. Оксалаты Ca в лишайнике рода *Cladonia* на отвалах Сугурского медного месторождения (Южный Урал). Минералогия, 9(2), 20–29. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-2

**For citation:** Artemenko E.E., Rassomakhin M.A., Khvorov P.V., Filippova K.A. Ca oxalates in lichen genus *Cladonia* on dumps of the Sugur copper deposit (South Urals). Mineralogy, 9(2), 20–29. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-2.

## Введение

Лишайники – симбиотические организмы, которые включают в себя гетеротрофный компонент, представляющий собой скопление гифов гриба – микобионт, и автотрофный компонент – водоросли или цианобактерии, который называют фотобионтом или фикобионтом (Purvis et al., 1992). Такой тип взаимодействия компонентов внутри организма способствует высокой адаптации к техногенным загрязнениям, в том числе, загрязнению тяжелыми металлами (Андреев и др., 2014), поэтому лишайники считаются «пионерами» в заселении новых территорий (Мучник и др., 2011). Лишайники сорбируют воду и растворенные в ней минеральные вещества всей поверхностью тела (таллома) и не имеют специализированных структур для регулировки водообмена (Рябкова, 1981). Источником минеральных веществ для лишайника является окружающая среда, в первую очередь субстрат, который заселяют лишайники, и частицы, захваченные из воздуха. Лишайники активно участвуют в биоминерализации, происходящей в результате взаимодействия продуктов их метаболизма (в первую очередь щавелевой кислоты) с подстилающим (обычно, каменным) субстратом (Андреев и др., 2014). Наиболее часто в талломах лишайников находят оксалаты металлов с общей формулой  $Me^{2+}(C_2O_4) \cdot nH_2O$  ( $Me^{2+} = Ca, Cu, Mg, Mn$ ) (Frank-Kamenetskaya et al., 2019, 2021; Wilson et al., 1980, 1981). Образование оксалатов тяжелых металлов активно используется в биотехнологиях по обезвреживанию токсичных металлов в различных средах за счет связывания их в стабильной, нерастворимой или слаборастворимой форме (Sartet et al., 1998). Оксалаты Са обнаружены в талломах лишайников, произрастающих на любых Са-содержащих каменных субстратах (карбонатных, силикатных, фосфатных и др.) (Frank-Kamenetskaya et al., 2019). Среди оксалатов, встречающихся в биопленках, наиболее распространены оксалаты Са (уэвеллит  $(Ca(C_2O_4) \cdot H_2O)$  и уэделлит  $(Ca(C_2O_4) \cdot (2.5-x)H_2O)$ ) (Frank-Kamenetskaya et al., 2019). Оксалаты обычно описываются в накипных и листоватых лишайниках и только одна находка известна в кустистых лишайниках (Rucova et al., 2022). Ниже описаны оксалаты Са, найденные в чешуйчато-кустистом лишайнике рода *Cladonia* на отвалах Сугурского медного месторождения на Южном Урале, подвергавшихся воздействию аэротехногенного загрязнения тяжелыми металлами, связанного с деятельностью Карабашского медеплавильного комбината (КМК) в Челябинской области (Williamson et al., 2004).

## Краткая характеристика экологической ситуации в районе исследования

Район исследования расположен в подзоне южно-таежных сосново-березовых лесов восточного макросклона Южного Урала. Экосистемы рядом с КМК антропогенно трансформированы в результате длительного воздействия промышленного загрязнения (рис. 1а). Основные выбросы предприятия – сернистые газы и пылевые частицы, содержащие токсичные металлы и полуметаллы (Cu, Pb, Zn, As) (Williamson et al., 2004.). Комбинат начал функционировать в 1910 г., а максимальное количество выбросов было достигнуто в 1960–1980 гг. (140–360 тыс. т в год). После модернизации производства в 1997–2005 гг., количество выбросов постепенно начало снижаться, и в конце 2000-х гг. оно составило около 10 тыс. т в год. (Комплексный..., 2009). Антропогенное загрязнение на территории вокруг КМК характеризуется накопительным эффектом, в результате чего экосистемы оказались полностью разрушенными: плодородные почвы уничтожены, почти полностью отсутствует растительность, территория представляет собой обширную техногенную пустошь (рис. 1а) (Безель, 2006).

Из-за того, что растения способны аккумулировать различные поллютанты, в зоне воздействия КМК их видовое разнообразие значительно снижено, а внешний вид изменен (Веселкин и др., 2017). Здесь произрастает редкостойный березово-сосновый мертвопокровный лес, живой напочвенный покров почти полностью отсутствует и представляет собой редко встречающиеся единичные экземпляры высшей растительности: *Calamagrostis arundinacea* (L.) и *Orthilia secunda* (L.) (вейник тростниковидный и ортилия однобокая, соответственно) (рис. 1б). Мхи практически отсутствуют, лишайниковый ярус обеднен (рис. 1б).

## Сугурское медное месторождение

Сугурское месторождение меди находится на южной окраине г. Карабаш в 3.6 км от КМК (источника выбросов), и в настоящий момент представляет собой несколько обвалившихся шахт и небольших отвалов руд и вскрышных пород (рис. 1в, г). Начало разработки месторождения датируется 1823 г. Отработка месторождения проходила в несколько этапов, шахта затапливалась и снова осушалась. Вначале добывались окисленные медные руды с малахитом, позднее – слабо окис-





Рис. 1. Фото места исследования: а – вид на Карабашский медеплавильный комбинат; б – лес вблизи остатков шахты и отвалов Сугурского месторождения; в – вход в заваленную шахту; г – отвалы; д – участки мохово-лишайникового яруса; е – фрагмент лишайника рода *Cladonia* на субстрате;

Fig. 1. Photos of the studied area: а – view to the Karabash copper smelter; б – forest around the relics of mine and dump of the Sugur deposit; в – entrance to a blocked mine; г – dumps; д – fragments of a moss-lichen layer; е – lichen of genus *Cladonia* on substrate.

ленные медные руды (Заварицкий, 1927). В 1941 г. шахта была окончательно закрыта ввиду нецелесообразности продолжения работ. Таким образом, возраст отвалов и промплощадки составляет ~80 лет. Одна из шахт в последние годы была обвалена.

Месторождение приурочено к контакту серпентинитов с известняками, в 70 м восточнее него отмечены тела диоритов. В отвалах отмечались скарны и тальк-карбонатные метасоматиты и описаны минералы группы серпентина, гранат (андрадит), эпидот, диопсид, кальцит, клинохлор, кварц, полевые шпаты, барит, кальцит, хромит, магнетит, пирит, халькопирит и другие, более редкие сульфиды (Попов и др., 2022). На обломках сульфидных руд и сульфидсодержащих метасоматитов в отвалах в сухую погоду образуются корки водорастворимых сульфатов Mg, Fe и Al. На старых отвалах месторождения почвы отсутствуют. Кустистые лишайники рода *Cladonia*, в которых обнаружены оксалаты Са, встречаются на отвалах и в непосредственной близости к ним, на субстратах, покрытых остатками прошлогодней палой листвы (рис. 1д, е).

### Материал и методы исследования

Образцы лишайников были отобраны с поверхностного слоя отвала Сугурского месторождения. Отбор проб субстрата, находящегося под лишайниками, проводили методом конверта с 2-х глубин: 1) 0–3 см; 2) 3–15 см.

Все аналитические работы проведены в ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН. Предварительное изучение лишайников и отбор проб для дальнейшего исследования проведены с помощью бинокулярного микроскопа ZEISS Stemi CZ. Срезы получены вручную при помощи тонкого лезвия. Диагностика лишайников проведена до вида по определителю лишайников Среднего Урала (Пауков, Трапезникова, 2005). Срезы лишайников были наклеены на токопроводящий скотч, напылены углеродом и изучены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega3 с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) для микроанализа Oxford Instrument X-act при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 0.5 нА.

Образцы лишайников с видимым на СЭМ большим количеством минеральной компоненты изучены методом рентгенофазового анализа на порошковом рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (Cu-анод, графитовый монохроматор). Измерения проводили с шагом 0.02° в диапазоне 2θ 4–70°. Использована подложка из бездифракционного кремния.

Для химического анализа пробы были истерты в порошок и подготовлены навески массой не менее 0.25 г. Содержание примесей в лишайниках и субстрате определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре Agilent 7700х с программным обеспечением MassHunter. Для метрологического контроля качества анализов использовали стандартные образцы SRM 1547 и SGD-2a.

## Результаты и их обсуждение

**Видовой состав лишайников.** Обычно на отвалах промышленных предприятий, содержащих токсичные элементы, лишайники угнетены и малочисленны. На исследуемой территории обнаружены несколько видов лишайников рода *Cladonia*: *Cladonia cariosa*, *C. chlorophaea*, *C. coniocraea*, *C. pyxidata*, *Cladonia sp.* и *Cladonia sp.* Лишайники представлены в основном угнетенными формами, имеют небольшие размеры, плодовые тела образуются редко.

**Элементный состав подстилающего субстрата и лишайника.** По данным СЭМ с ЭДС и рентгеновской дифрактометрии подстилающий субстрат содержит кальцит, гипс и ангидрит, которые могут быть источником Ca. Таллом лишайника, также как и подстилающий его субстрат, содержат значительное количество потенциально токсичных металлов (Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Sn, Ga, Sb, Mn) и полуметаллов (Se, As, Te), содержания которых существенно превышают средние содержания в земной коре (Скляр и др., 2001), за исключением Ga (рис. 2). Вертикальное распределение примесных

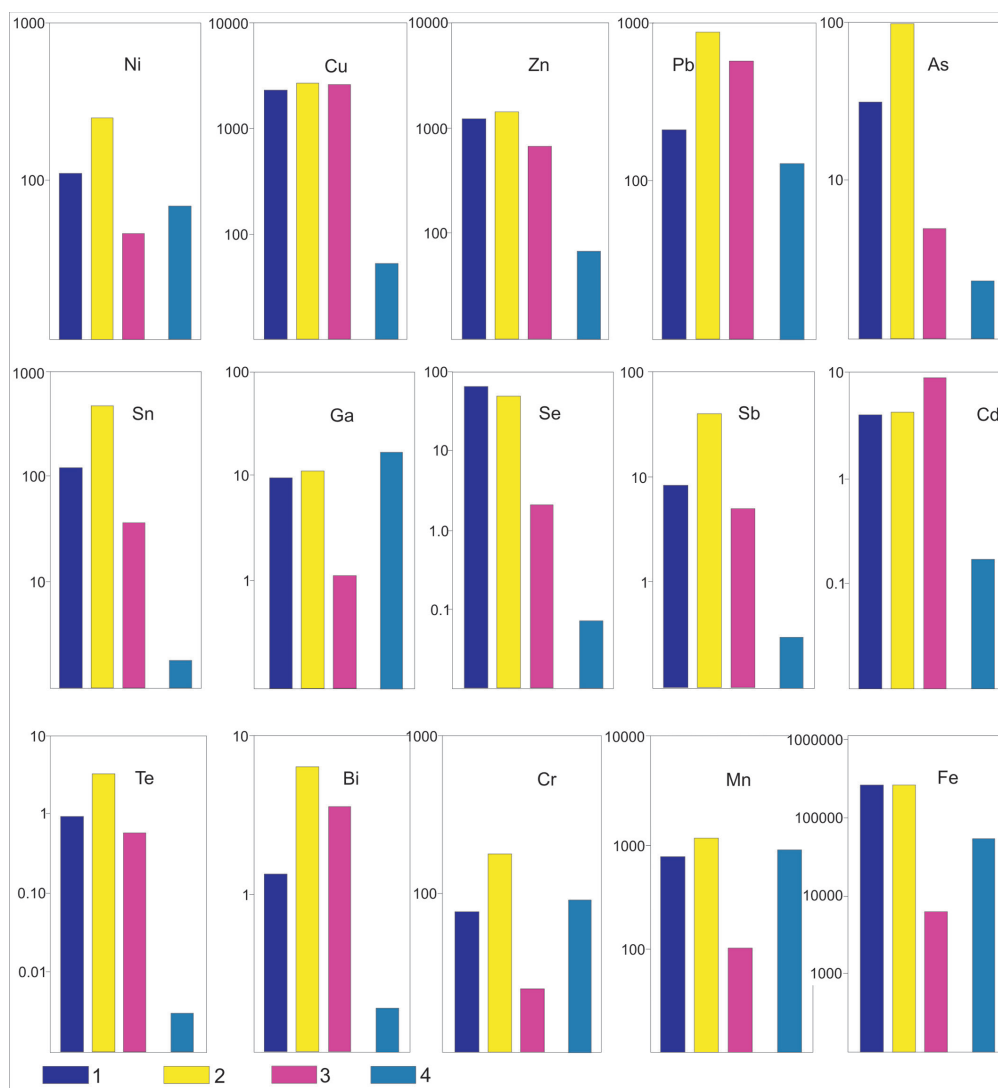


Рис. 2. Сравнение концентраций элементов в субстрате и талломе лишайника со средними содержаниями элементов в земной коре.

1 – нижняя часть субстрата, 2 – поверхностная часть субстрата, 3 – таллом лишайника *C. chlorophaea*, 4 – средние содержания элемента в земной коре (Скляр и др., 2001).

Fig. 2. Comparison of element contents of substrate and lichen thalli with average contents in the Earth's crust.

1 – the lower part of the substrate, 2 – the substrate surface, 3 – lichen thalli of the *C. chlorophaea*, 4 – average element content of the Earth's crust (Sklyarov et al., 2001).

элементов в субстрате и лишайнике отличается для разных элементов.

Содержания Cu, Zn, As, Sn, Sb, Te, Pb и Bi в нижней и приповерхностной части субстрата или близки, или повышаются у поверхности, при этом количество этих элементов в лишайнике может быть значительно ниже, чем в субстрате, но по-прежнему значительно выше средних содержаний в земной коре (Скляр и др., 2001). Вероятно, при длительном существовании отвальной массы происходит перенос вещества разлагающихся сульфидов по капиллярным сетям субстрата к поверхности, а также накопление на поверхности техногенных твердых аэрозольных частиц, но поглощение их лишайником незначительно.

Такие элементы как Fe, Cr, Mn и Ni имеют сходный тренд повышения содержаний от нижней части субстрата к верхней и значительное снижение в лишайнике. Однако их содержания в субстрате, в отличие от первой группы, близки к средним содержаниям в земной коре. Такой характер может объясняться накоплением минералов-концентратов этих элементов (оксигидрооксидов Fe и Mn и хромита) в приповерхностном слое субстрата в результате его промывания дождевыми водами.

Кадмий накапливается в самом лишайнике относительно субстрата и значительно (на два порядка) его содержания превышают средние содержания в земной коре. Несмотря на то, что Cd-содержащие частицы обнаружены не были, он входит в состав выбросов КМК (Williamson et al., 2004).

Таким образом, несмотря на значительное превышение содержаний Cu, Zn, As, Sn, Sb, Te и Bi над средними содержаниями в земной коре, концентрации этих элементов в водных растворах были недостаточными для того, чтобы кристаллизовались оксалаты иных элементов, кроме Ca. Наиболее вероятная форма нахождения этих элементов в лишайниках – захваченные минеральные частицы природного происхождения из отвалов и частицы сложного состава аэрального переноса с КМК, содержащие в себе высокие концентрации Pb, Cu, Sb, As, Cd и др.

*Минералы в лишайнике.* На порошковой рентгенограмме таллома лишайника, содержащего большое количество минеральной компоненты (по визуальной оценке на СЭМ), на фоне интенсивного гало, вызванного преобладанием рентгеноаморфного органического вещества, наблюдаются интенсивные характеристические отражения уз-

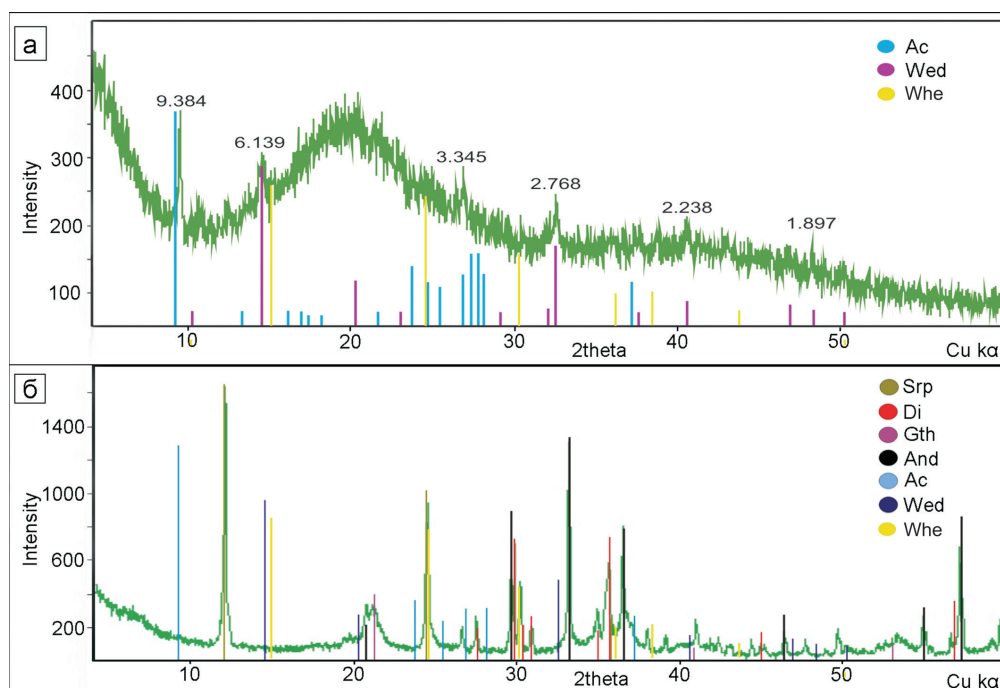


Рис. 3. Дифрактограмма таллома лишайника *C. chlorophaea* (а) и субстрата (б).

Цифрами над пиками обозначены соответствующие межплоскостные расстояния, Å. Ac – водный ацетат Ca (19–200), Wed – уэдделлит (87–655), Whe – уэвеллит, Srp – минералы группы серпентина, Di – диопсид, Gth – гётит, And – андрадит.

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of *C. chlorophaea* lichen thalli (a) and substrate (b).

The numbers above the peaks indicate the corresponding interplane distances, Å. Ac – Ca monohydrate acetate (19–200), Wed – weddellite (87–655), Whe – whewellite, Srp – serpentine group minerals, Di – diopside, Gth – goethite, And – andradite.



деллита и, предположительно, водного ацетата Ca –  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (рис. 3а). Присутствующее на рентгенограмме отражение  $\sim 9.4 \text{ \AA}$ , можно было бы отнести к тальку, однако отсутствие интенсивного отражения талька  $3.13 \text{ \AA}$  дает основания предположить, что это отражение соответствует наиболее интенсивному отражению ацетата Ca. Ацетат Ca отсутствует в списке минеральных видов международной минералогической ассоциации (ММА) и его количество слишком мало для уверенной диагностики по рентгенограмме. Кроме того, ацетат Ca является водорстворимым соединением. Обычно в работах, посвященных биоминерализации в лишайниках, описывается уэдделлит совместно с одноводным оксалатом Ca уэвеллитом (Vereshchagin et al., 2023; Frank-Kamenetskaya et al., 2019), но качество

рентгенограммы (интенсивные колебания фона) не позволяет однозначно ответить на вопрос о присутствии в исследуемых лишайниках уэвеллита.

На рентгенограмме подстилающего субстрата присутствуют отражения, характерные для гётита, серпентина, диопсида и андрадита (рис. 3б), а отражения, соответствующие минералам, обнаруженным в талломах лишайника *C. chlorophaea* (уэдделлиту и водному ацетату Ca), отсутствуют. Таким образом, можно заключить, что найденные в талломе лишайника оксалаты Ca являются биоминералами, а их образование связано с взаимодействием продуктов метаболизма лишайника и подстилающим минеральным субстратом. Присутствие водорстворимого ацетата Ca, возможно, связано с обезвоживанием таллома при хранении и пробоподготовке.

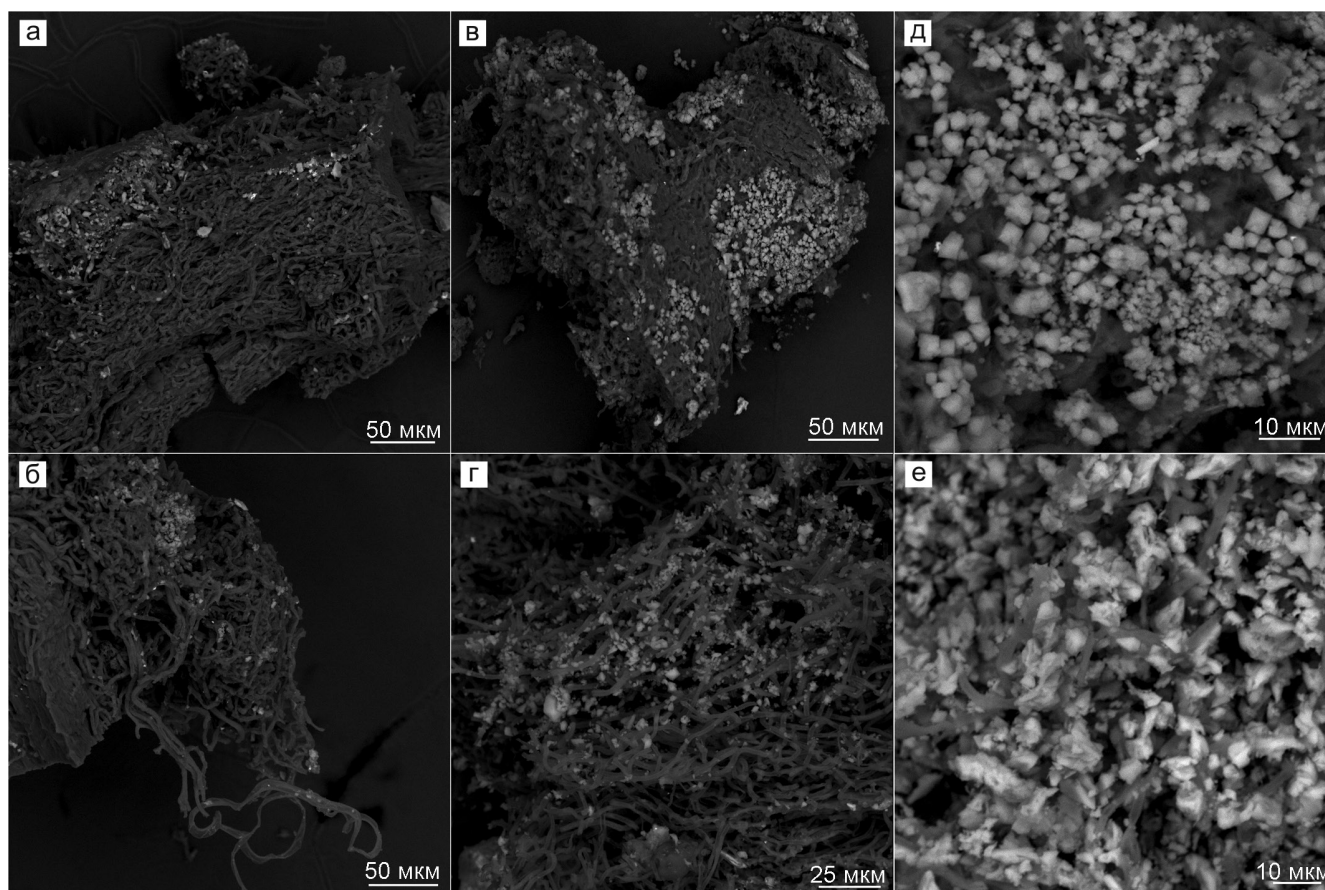


Рис. 4. Срезы лишайника рода *Cladonia*: а, б – срез наружной части таллома; в – верхушечная часть лишайника; г – срез внутренней части; д, е – морфология биоминералов: д – субизометричные дипирамидальные кристаллы оксалата Ca (уэдделлита), е – пластинчатые кристаллы предположительно оксалата Ca уэвеллита и/или ацетата Ca.

Здесь и на рис. 5 и 6, BSE фото.

Fig. 4. Sections of lichen of the genus *Cladonia*: а, б – section of the outer part of the thallus; в – the apical part of the lichen; г – section of the inner part; д, е – morphology of biominerals: д – subisometric dipyramidal crystals of Ca oxalate (weddelite); е – platy crystals of probable Ca oxalate (whewellite) and/or Ca acetate.

Here and in Figs. 5 and 6, BSE images.

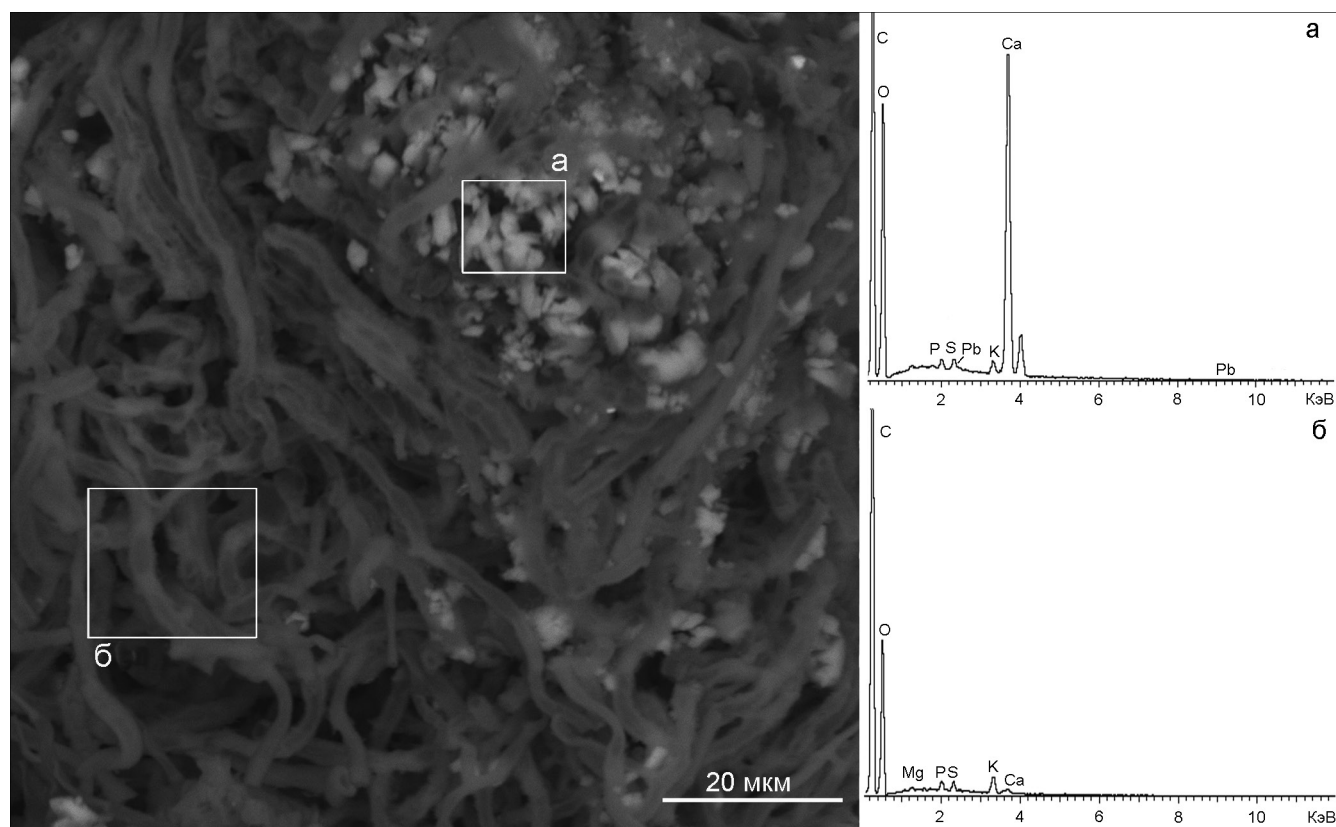


Рис. 5. Таллом *C. chlorophaea* со скоплением минерального вещества (а) и гифы без кристаллов (б) и их ЭД спектры.  
 Fig. 5. Thalli of the lichens *C. chlorophaea* with minerals (a) and mineral-free hypha (b) and ED spectrum.

По данным СЭМ в лишайнике *C. chlorophaea* присутствуют скопления кристаллов двух типов: изометричных дипирамидальных размером 0.5–8.0 мкм (рис. 4д) и пластинчатых размером менее 1 мкм до 4 мкм (рис. 4е). Морфология кристаллов первого типа соответствует узеллиту (Vereshchagin et al., 2023), а среди пластинчатых кристаллов предполагается присутствие как уэвеллита, морфологически сходного с описанным в статье (Vereshchagin et al., 2023), так и ацетата, предположительно выявленного по рентгенограмме. Кристаллы локализованы как внутри таллома лишайника (рис. 4б, г), так и на его поверхности (рис. 4в) и в некоторых случаях расщеплены. На BSE фото хорошо видно, что они ассоциированы с микобионтом лишайника: нарастают на гифы, повторяя их форму (рис. 4б) или свободно располагаются в переплетениях гифов (рис. 4г).

Наибольшее количество кристаллов локализовано в верхней части таллома (рис. 4в), а также в поверхностных слоях (рис. 4а). Вероятнее всего, это связано с тем, что верхушечные части более молодые, в этом направлении осуществляется рост

лишайника, и биохимические процессы в них протекают интенсивнее, а оксалаты, образовавшиеся ранее в глубинных слоях талломов лишайников, частично растворены под действием агрессивных продуктов метаболизма и окружающей среды.

На ЭД спектрах кристаллов оксалатов Ca фиксируются слабые пики Pb (рис. 5а), при этом на спектрах частей таллома лишайника *C. chlorophaea* без видимых включений минеральных частиц Pb отсутствует (рис. 5б). Обогащение оксалатов Ca свинцом описано в статье (Vereshchagin et al., 2023), однако механизм этого обогащения (изоморфный или адсорбционный) пока не ясен и требует дальнейшего изучения.

Помимо кристаллических фаз, образовавшихся в результате жизнедеятельности лишайника (оксалатов и ацетата(?)) в теле лишайников обнаружены минеральные частицы размером 1–50 мкм. По составу, оцененному по ЭД спектрам, и морфологии частицы можно разделить на 1) угловатые обломки пород и руд, захваченные растущим лишайником из субстрата (рис. 6д–ж), и 2) сфероидальные техногенные Cu- и Fe-содержащие оксидные, сили-



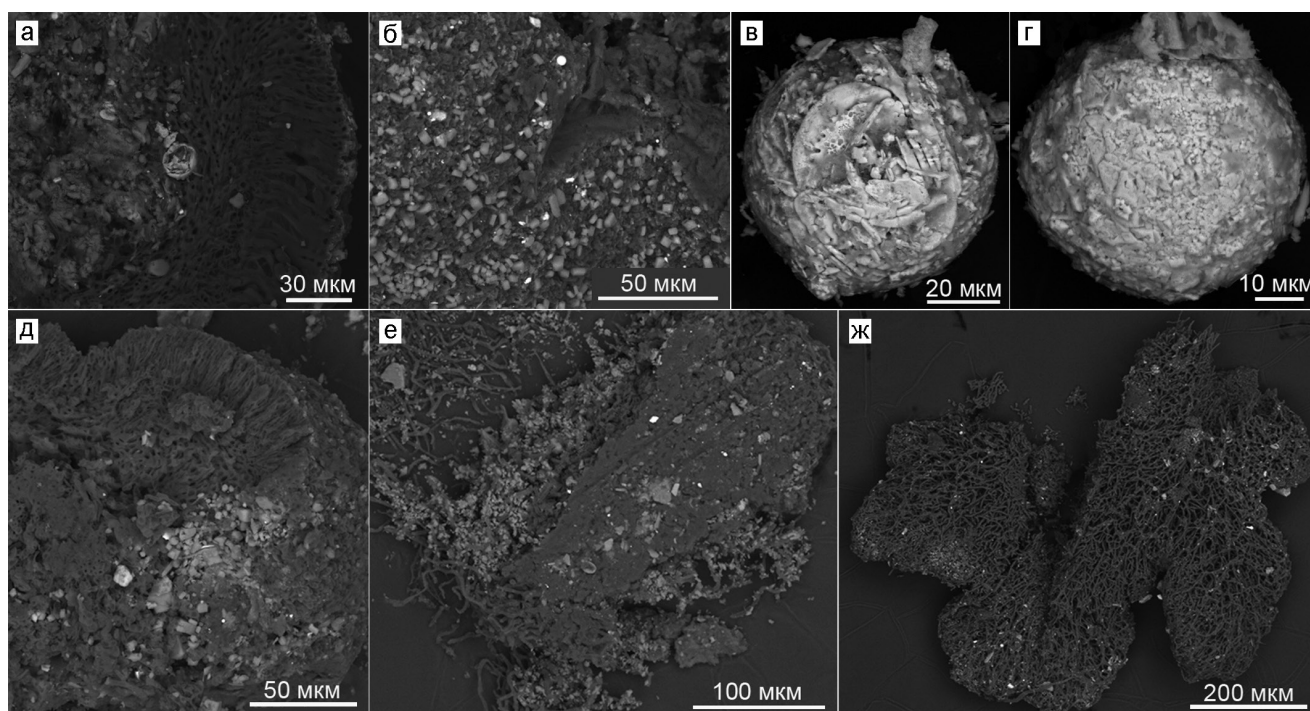


Рис. 6. Минеральные частицы различного состава, обнаруженные в лишайниках: а–г – сфероидальные зерна внутри тела (а) и на поверхности (б) лишайника; в, г – отдельные сферические частицы; д–ж – угловатые минеральные обломки внутри тела (д, е) и на поверхности (ж) лишайника.

Fig. 6. Mineral particles of various compositions found in lichens: а–г – spherical mineral grains inside the lichen thalli (а) and on its surface (б); в, г – individual spherical particles; д–ж – angular mineral fragments inside the lichen thalli (д, е) and on its surface (ж).

катные и сульфидные, связанные с деятельностью КМК и привнесенные ветром или поверхностными водотоками (рис. 6а–г) (Williamson et al., 2004).

Среди обломков природных минералов по ЭД спектрам определены минералы группы серпентина, оксиды и гидрооксиды Fe (предположительно, гётит, гематит, магнетит), гипс, пирит, эпидот, кварц, плагиоклаз (альбит и промежуточные члены ряда альбит–анортит), андрадит, халькопирит, диопсид, хромит, альбит, хлорит, слюды (биотит и мусковит), титанит, сфалерит, барит, борнит (?), галенит, бромаргирит (?), шпинель, ильменит. Техногенные сферические частицы условно можно разделить на два типа: силикаты Fe, и Cu с примесью Mg и Al, Ba и Zn и сульфиды Cu, Zn и Sb с примесями As и Pb.

### Закключение

В талломе чешуйчато-кустистого лишайника *Cladonia chlorophaea*, отобранного на отвалах Сугурского медного месторождения на Южном Урале, подвергавшихся воздействию аэрозольных выпадений Карабашского медеплавильного ком-

бината, впервые обнаружены кристаллы оксалатов Ca – преимущественно узелелита. Потенциально токсичные металлы и полуметаллы (Ni, Cu, Zn, Cr, Sn, Sb, Mn, Se, As) в лишайниках концентрируются в виде угловатых зерен природных минералов, входивших в состав пород и руд месторождения, а также в сферических техногенных минеральных частицах, связанных с деятельностью комбината. Свинец локализован на поверхности кристаллов оксалатов Ca, что говорит об их интенсивном взаимодействии (изоморфном или адсорбционном). Частицы, содержащие Cd, не обнаружены.

Авторы выражают благодарность рецензентам О.С. Верецагину и О.В. Франк-Каменецкой, а также Е.В. Белозуб за ценные замечания, которые позволили улучшить текст рукописи, и А.Г. Паукову за советы и помощь в определении лишайников. Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01324-23-00.

## Литература

Андреев М.П., Ахти Т., Войцехович А.А., Гагарина Л.В., Гимельбрант Д.Е., Давыдов Е.А., Конорева Л.А., Кузнецова Е.С., Макрый Т.В., Надина О.В., Рандлане Т., Сааг А., Степанчикова И.С., Урбанавичюс Г.П. (2014) Флора лишайников России. Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников. Москва, Санкт-Петербург, Товарищество научных изданий КМК, 392 с.

Безель В.С. (2006) Экологическая токсикология: популяционный и биоценотический аспекты. Екатеринбург, Гошицкий, 280 с.

Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Чашина О.Е., Коротева Е.В. (2017) Мониторинг загрязнения древесных растений тяжелыми металлами возле Карабашского медеплавильного комбината. *Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития»*. Москва, ИГКЭ Росгидромета и РАН, с. 245–247.

Заварицкий А.Н. (1927) Геологический очерк месторождений медных руд на Урале. Часть 1. Колчеданные месторождения на Урале. Л., Издание геологического комитета, 151 с.

Комплексный доклад «О состоянии окружающей среды Челябинской области в 2008 году» (2009) Министерство по радиационной и экологической безопасности Челябинской области, Челябинская область.

Мучник Е.Э., Инсарова И.Д., Казакова М.В. (2011) Учебный определитель лишайников Средней России: учебно-методическое пособие. Рязань, Рязанский государственный университет, 359 с.

Пауков А.Г., Трапезникова С.Н. (2005) Определитель лишайников Среднего Урала. Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 207 с.

Попов В.А., Рассомахин М.А., Попова В.И. (2022) Новые данные о минералогии Сугурского медного месторождения на Южном Урале. *Минералогия*, 8(2), 23–36.

Рябкова К.А. (1981) Лишайники Урала (учебное пособие). Свердловск, 52 с.

Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Летникова Е.Ф., Миронов А.Т., Бараш И.Г., Буланов В.А., Сизых А.И. (2001) Интерпретация геохимических данных. М., Интернет Инжиниринг, 288 с.

Frank-Kamenetskaya O.V., Ivanyuk G.Yu., Zelenskaya M.S., Izatulina A.R., Kalashnikov A.O., Vlasov D.Yu., Polyanskaya E.I. (2019) Calcium oxalates in lichens on surface of apatite-nepheline ore (Kola Peninsula, Russia). *Minerals*, 9(11), 656.

Frank-Kamenetskaya O.V., Zelenskaya M.S., Izatulina A.R., Vereshchagin O.S., Vlasov D.Yu., Himelbrant D.E., Pankin D.V. (2021) Copper oxalate formation by lichens and fungi. *Scientific Reports*, 11, 24239.

Purvis O.W., Coppins B.J., Hawksworth D.L., James P.W., Moore D.M. (1992) The lichen flora of Great Britain and Ireland. London, Natural History Museum Publications in association with the British Lichen Society. 710 p.

Rucova D., Dordevic T., Balaz M., Weidinger M., Lang I., Gajdos A., Goga M. (2022) Investigation of calcium forms in lichens from travertine sites. *Plants*, 11(5), 620.

Sarret G., Manceau A., Cuny D., Haluwyn C.V., Déruelle S., Hazemann J.-L., Soldo Y., Eybert-Bérard L., Menthonnex J.-J. (1998) Mechanisms of lichen resistance to metallic pollution. *Environmental Science Technology*, 32(21), 3325–3330.

Vereshchagin O.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu., Zelenskaya M.S., Rodina O.A., Chernyshova I.A., Himelbrant D.E., Stepanchikova I.S., Britvin S.N. (2023) Microbial biomineralization under extreme conditions: case study of basaltic rocks, Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia. *Catena*, 226, 107048.

Williamson B.J., Udachin V., Purvis O.W., Spiro B., Cressey G., Jones G.C. (2004) Characterisation of airborne particulate pollution in the Cu smelter and former mining town of Karabash, South Ural mountains of Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 98, 235–259.

Wilson M. J., Jones D., Mchardy W.J. (1981) The weathering of serpentinite by lecanora atra. *Lichenologist*, 13(2), 167–176.

Wilson M. J., Jones D., Russell J. D. (1980) Glushinskite, a naturally occurring magnesium oxalate. *Mineralogical Magazine*, 43(331), 837–840.

## References

Andreev M.P., Akhti T., Voytsekhovich A.A., Gagarina L.V., Gimel'brant D.E., Davydov E.A., Konoreva L.A., Kuznetsova E.S., Makriy T.V., Nadina O.V., Randlane T., Saag A., Stepanchikova I.S., Urbanavichyus G.P. (2014) [Flora of lichens of Russia. Biology, ecology, diversity, distribution and methods of study of lichens]. Moscow, St. Petersburg, Товарищество научных изданий КМК, 392 p. (in Russian)

Bezel V.S. (2006) [Ecological toxicology: population and biocenotic aspects]. Yekaterinburg, Goshitsky, 280 p. (in Russian)

[Comprehensive Report «On the state of environment of Chelyabinsk region in 2008»]. (2009) Chelyabinsk, Ministry of Radiation and Environmental Safety of Chelyabinsk region. (in Russian)

Frank-Kamenetskaya O.V., Ivanyuk G.Yu., Zelenskaya M.S., Izatulina A.R., Kalashnikov A.O., Vlasov D.Yu., Polyanskaya E.I. (2019) Calcium oxalates in lichens on surface of apatite-nepheline ore (Kola Peninsula, Russia). *Minerals*, 9(11), 656

- Frank-Kamenetskaya O.V., Zelenskaya M.S., Izatulina A.R., Vereshchagin O.S., Vlasov D.Yu., Himelbrant D.E., Pankin D.V. (2021) Copper oxalate formation by lichens and fungi. *Scientific Reports*, **11**, 24239
- Muchnik E.E., Insarova I.D., Kazakova M.V. (2011) [Educational guide for lichens of Central Russia]. Ryazan, Ryazanski gosudarstvennyy universitet, 359 p. (in Russian)
- Paukov A.G., Trapeznikova S.N. (2005) [Guide for lichens of the Central Urals]. Yekaterinburg, Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 207 p. (in Russian)
- Popov V.A., Rassomakhin M.A., Popova V.I. (2022) [New data on mineralogy of the Sugur copper deposit, South Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **8**(2), 23–36. (in Russian)
- Purvis O.W., Coppins B.J., Hawksworth D.L., James P.W., Moore D.M. (1992) The lichen flora of Great Britain and Ireland. London, Natural History Museum Publications in association with the British Lichen Society. 710 p.
- Rucova D., Dordevic T., Balaz M., Weidinger M., Lang I., Gajdos A., Goga M. (2022) Investigation of calcium forms in lichens from travertine sites. *Plants*, **11**(5), 620.
- Ryabkova K.A. (1981) [Lichens of the Urals (a tutorial)]. Sverdlovsk, 52 p. (in Russian)
- Sarret G., Manceau A., Cuny D., Haluwyn C.V., Déruelle S., Hazemann J.-L., Soldo Y., Eybert-Bérard L., Menthonnex J.-J. (1998) Mechanisms of lichen resistance to metallic pollution. *Environmental Science Technology*, **32**(21), 3325–3330
- Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Don-skaya T.V., Ivanov A.V., Letnikova E.F., Mironov A.T., Barash I.G., Bulanov V.A., Sizykh A.I. (2001) [Interpretation of geochemical data]. Moscow, Internet Engineering, 288 p. (in Russian)
- Vereshchagin O.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu., Zelenskaya M.S., Rodina O.A., Chernyshova I.A., Himelbrant D.E., Stepanchikova I.S., Britvin S.N. (2023) Microbial biomineralization under extreme conditions: Case study of basaltic rocks, Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia. *Catena*, **226**, 107048
- Veselkin D.V., Kuyantseva N.B., Chashchina O.E., Koroteeva E.V. (2017) [Monitoring of contamination of woody plants with heavy metals near the Karabash copper smelter]. *Tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy. Osnovnye rezul'taty i puti razvitiya» [Abstracts of the All-Russian Scientific Conference «Monitoring of the State and Pollution of Environment. Main Results and Ways of Development»]*. Moscow, IGKE Rosgidrometa i RAN, p. 245–247. (in Russian)
- Williamson B.J., Udachin V., Purvis O.W., Spiro B., Cressey G., Jones G.C. (2004) Characterisation of airborne particulate pollution in the cu smelter and former mining town of Karabash, South Ural mountains of Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, **98**, 235–259
- Wilson M. J., Jones D., Mchardy W.J. (1981) The weathering of serpentinite by lecanora atra. *Lichenologist*, **13**(2), 167–176
- Wilson M.J., Jones D., Russell J.D. (1980) Glushinskite, a naturally occurring magnesium oxalate. *Mineralogical Magazine*, **43**(331), 837–840
- Zavaritsky A.N. (1927) [Geological sketch of copper deposits in the Urals. Part 1. Massive sulfide deposits of the Urals]. Leningrad, Izdanie geologicheskogo komiteta, 151 p. (in Russian).



УДК 549.0+669.181.28(470.5)

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-3

**МИНЕРАЛОГИЯ МЕДНЫХ ШЛАКОВ  
СЫСЕРТСКОГО ЖЕЛЕЗОДЕЛАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА, СРЕДНИЙ УРАЛ****Ю.В. Ерохин, В.С. Пономарев, А.В. Захаров, Л.В. Леонова***Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского 15,**г. Екатеринбург, 620110 Россия; erokhin-yu@yandex.ru**Статья поступила в редакцию 18.04.2023 г., принята к печати 19.05.2023 г.***MINERALOGY OF COPPER SLAGS FROM  
THE SYSERT IRON-WORKING PLANT, CENTRAL URALS****Yu.V. Erokhin, V.S. Ponomarev, A.V. Zakharov, L.V. Leonova***Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15,**Yekaterinburg, 620110 Russia; erokhin-yu@yandex.ru**Received 18.04.2023, accepted 19.05.2023*

**Аннотация.** Изучена минералогия медных шлаков Сысертского железодобывающего завода, действовавшего с 1733 по 1930 гг., который послужил основой зарождения современного города Сысерть в Свердловской области. Установлено, что шлаки сложены фаялит-геденбергитовым агрегатом со значительным содержанием сульфидов (троилита, халькопирита, халькозина и неизвестных Cu-Fe фаз), а также магнетита, стекла и самородной меди. Изученные шлаки образовались в результате медного доменного производства, а в качестве сырья использовались окисленные железные руды с высоким содержанием Cu, которые добывались на Гумешевском руднике вблизи г. Полевского. По экспериментальным данным плавления троилита температура образования шлаков оценивается около 1200 °C.

**Ключевые слова:** Средний Урал, Сысертский завод, шлаки, минералогия, медь, геденбергит, фаялит.

**Abstract.** The paper presents the results of study of mineralogy of copper slags from the Sysert iron-working plant, which has been operated from 1733 to 1930 and became the basis for the origination of modern town of Sysert in Sverdlovsk district. The slags are composed of a fayalite-hedenbergite aggregate with a significant amount of sulfides (troilite, chalcopyrite, chalcocite and unknown Cu-Fe phases), as well as magnetite, glass and native copper. The slags formed as a result of blast-furnace copper production of oxidized iron ores with a high Cu content, which were extracted at the Gumesheka mine near the town of Polevskoy. According to experimental data on melting of troilite, the formation temperature of slags is estimated at ~1200 °C.

**Keywords:** Central Urals, Sysert plant, slags, mineralogy, copper, hedenbergite, fayalite.

**Для цитирования:** Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В. Минералогия медных шлаков Сысертского железодобывающего завода. Минералогия, 9(2), 30–40. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-3

**For citation:** Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V. Mineralogy of copper slags from the Sysert iron-working plant, Central Urals. Mineralogy, 9(2), 30–40. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-3.

## Введение

Средний Урал уже несколько веков является одним из главных металлургических центров России, и за столь продолжительное время здесь накопилось большое количество отвалов шлаков. Их изучение является актуальной задачей как с точки зрения экологии, так и для промышленного использования, т. к. многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать.

Шлаки старинных металлургических заводов являются наиболее интересным объектом. Некоторые из этих предприятий имеют длительную историю развития, охватывая огромный пласт времени, и напрямую связаны с историческими фигурами первой величины. В настоящей работе мы приводим результаты изучения минералогии медных шлаков Сысертского железоделательного завода, который долгие годы был семейным предприятием дворянского рода Турчаниновых-Соломирских – известных горнозаводчиков Российской империи.

## Краткая история Сысертского завода

Берега р. Сысерти (в те времена река называлась Сысерь) начали осваиваться еще в 1662 г., когда местные жители здесь вели бобровый промысел. В 1731 г. начальник уральских заводов Георг Вильгельм де Генин осмотрел окрестности и установил, что это место вполне пригодное для основания предприятия, т. к. здесь много леса, воды,

богатые железные руды и имеется известняк для флюса. При этом он упоминает, что местные жители уже лет десять плавилы железо небольшими ручными доменками. Весной 1732 г. на р. Сысерть основали рабочий поселок, стали ставить плотину и строить казенный железоделательный завод (рис. 1), который заработал через год, когда была построена первая домна. 28 июля (8 августа) 1733 г. в присутствии горного начальства заводчане провели первую плавку железа (Савичев, 2018).

К 1749 г. на предприятии функционировали одна домна и три молотовые фабрики. В 1757 г. завод приобретает известный солепромышленник и заводчик Александр Федорович Турчанинов (1704–1787 гг.). Во владении А.Ф. Турчанинова также оказались Полевской и Северский заводы, а также богатый Гумешевский медный рудник. Это дало новый импульс в развитии Сысертского завода, на котором сразу была построена медная фабрика. К 1771 г. на Сысертском заводе уже было две домны, медеплавильная фабрика с двумя печами, цех для литья чугунной посуды и четыре молотовые фабрики (Алексеев, 2001; Пирогова и др., 2008).

Во время Пугачевского восстания (1773–1775 гг.) А.Ф. Турчанинов организовал успешную оборону Сысерти, за что получил в 1783 г. от Екатерины II дворянский титул. К титулу полагался герб, на котором красовалась серебряная цапля. Со временем эта цапля стала ставиться в виде клейма на всех турчаниновских изделиях как знак высокого качества. В 1787 г. А.Ф. Турчанинов умер, и все богатое наследство (только деньгами около 2 млн

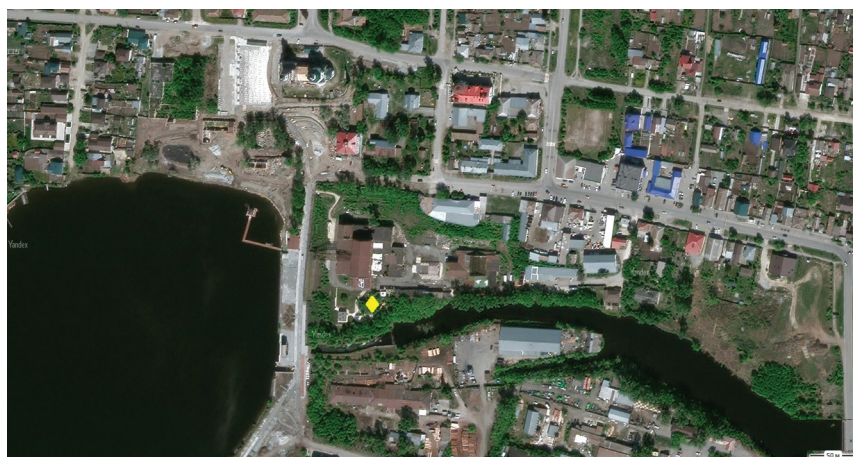


Рис. 1. Расположение железоделательного завода в центре г. Сысерть. Место отбора шлака указано ромбом (дано с использованием Яндекс.Карты).

Fig. 1. Location of the ironwork plant in the center of Sysert. The place of slag sampling is indicated by a rhomb (based on Yandex.Maps).



руб.) было разделено между вдовой, тремя сыновьями и пятью дочерьми. Для управления заводами было создано семейно-паевое товарищество, но среди родственников быстро возникли разногласия, которые длились десятилетиями, что дестабилизировало обстановку на всех турчаниновских предприятиях. В это время Сысертский завод работал, но объем производства чугуна и железа понемногу снижался (Алексеев, 2001; Пирогова и др., 2008).

В 1832 г. в число заводоладельцев вошел внук А.Ф. Турчанинова – Павел Дмитриевич Соломирский (1798–1870 гг.). Он фактически и стал главным хозяином Сысертского завода, когда в 1841 г. переехал с семьей на Урал. При нем была проведена капитальная реконструкция предприятия: построены пудлинговые и прокатные цеха, а также возведен доменный цех (1847 г.) на две домны. Производительность чугуна и железа резко возросла с 158 (в 1841 г.) до 1040 (в 1859 г.) тыс. пудов. Для переработки такого количества железа пришлось возводить поблизости два новых передельных завода – Верхне-Сысертский (1849 г.) и Ильинский (1854 г.). При этом в 1850 г. выплавка меди на Сысертском заводе была прекращена (Алексеев, 2001).

В 1861 г. после отмены крепостного права и перехода к вольнонаемному труду у завода возникли трудности. Усилились разногласия совладельцев и резко накопились долги к казне. Это привело к тому, что в 1861 г. Сысертский завод (вместе с другими предприятиями Сысертского горного округа) был взят в казну, однако государственное управление не привело к значительным положительным результатам. В 1864 г. заводы вернули наследникам Турчанинова и деятельность предприятий постепенно восстановилась.

В 1870 г. П.Д. Соломирский умер и только в 1879 г. на Сысертский завод приехал его старший сын Дмитрий Павлович (1838–1923 гг.), который уволился с государственной службы. В 1883–1884 гг. из-за засухи и маловодья временно было остановлено изготовление железа, производилась только плавка чугуна. В это же время возникла проблема с топливными ресурсами, т. к. в округе вырубили почти весь лес. Удивительно, но Сысертский завод до конца XIX в. продолжал работать на древесном угле, хотя с середины века почти все уральские заводы перешли на плавку с каменным углем. В результате на заводе стали ставить экспериментальные работы с использованием торфа, газа и даже сосновой хвои. Причем плавка с торфом была признана успешной и его стали использовать на

пудлинговом производстве. Все эти проблемы возникли из-за того, что Д.П. Соломирский, в отличие от своего отца, мало погружался в заботы семейного предприятия, а посвятил себя общественно-научным занятиям, хотя при нем и был построен мартеновский цех (1894 г.) (Алексеев, 2001).

В начале XX в. случился экономический кризис, который затронул и Сысертский завод, в связи с чем реализация продукции резко снизилась. Революция 1905 г. привела к массовым выступлениям рабочих 1905–1907 гг., но постепенно работа предприятия нормализовалась. В 1912 г. 74-летний Д.П. Соломирский, не имея наследников, продал все заводы Сысертского горного округа иностранным предпринимателям. В итоге заводами стала управлять английское акционерное общество «Сысертская компания». После Октябрьской революции в 1917 г. все заводы Сысертского горного округа были национализированы. Во время Гражданской войны Сысертский завод практически не работал, и только в начале 1921 г. началась выплавка металла. В ноябре 1925 г. завод был передан в концессию английской компании «Лена Голдфилдс лимитед». Практически сразу англичане стали вывозить наиболее передовое оборудование, что привело к конфликту рабочих с администрацией и упадку предприятия. В 1930 г. концессию расторгли, но Сысертский завод уже не смог заниматься выплавкой металла (Алексеев, 2001). С 1931 г. предприятие поменяло свой профиль на машиностроение и стало ориентироваться на потребности народного хозяйства. В 1942 г. завод переориентировали на изготовление гидротурбин и насосов. На данный момент предприятие успешно работает под названием «Уралгидромаш», а от старого Сысертского завода сохранилось два здания – доменный и мартеновский цеха. Местная городская администрация использует их в качестве музейных объектов.

### Материал и методы исследования

Шлаки отобраны авторами в июле 2019 г. рядом с главным (доменным) зданием Сысертского железоделательного завода (рис. 2), который расположен в историческом центре одноименного города. Шлаки обнаружены с южной стороны завода (56°49'36.6" с.ш., 60°81'04.6" в.д.) на заросшей площадке, которая далее ограничивается рекой. Площадка, по всей видимости, ранее предназначалась для временного складирования шлакоотвала. Шлаки здесь встречаются везде, необходимо только



Рис. 2. Главное здание (доменный цех) Сысертского завода. Фото Ю.В. Ерохина, 2019 г.

Fig. 2. The main building (blast furnace shop) of the Sysert plant. Photo by Yu. V. Erokhin, 2019.

снять дерн, но в основном от железодельного производства. Медные шлаки встречаются крайне редко, поскольку производство меди было прекращено в 1850 г. Нами обнаружено только два образца медных шлаков размером до 10 см. Они хорошо отличаются буровато-красной поверхностью с зеленоватыми налетами вторичных минералов. На сколе они имеют пористую структуру и темно-серую окраску с вкраплениями сульфидов. Эти шлаки были изучены на предмет минерального состава.

Все аналитические исследования были выполнены в Институте геологии и геохимии УрО РАН в лаборатории физико-химических методов исследования (г. Екатеринбург). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из образцов.

Содержания петрогенных компонентов определены на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu, который оснащен мощной (4 кВт) рентгеновской трубкой (Rh-анод), кристаллами-анализаторами TAP, PET, Ge, LiF (200), а также стабилизатором вакуума, проточно-пропорциональным и сцинтилляционным счетчиками (аналитик Н.П. Горбунова). Потери при прокаливании установлены методом мокрой химии (аналитик Г.С. Неупокоева). К сожалению, из-за высокого содержания Fe в пробе, определение отношения окисной и закисной формы железа аналитиками не проводилось.

Химический анализ минералов из медного шлака Сысертского завода выполнялся на элек-

тронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (аналитик В.А. Булатов). Для калибровки анализов использовались сертифицированные стандарты эталонных минералов.

Фотографии минералов в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments и программным обеспечением AZtecOne с ускоряющим напряжением 20 кВ (аналитик Л.В. Леонова).

### Результаты исследований и обсуждение

Отобранные шлаки сложены геденбергит-фаялитовым агрегатом с постоянным присутствием самородной меди, магнетита и различных сульфидов меди (рис. 3). Химический состав шлака (мас. %):  $\text{SiO}_2$  35.74;  $\text{TiO}_2$  0.09;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2.15;  $\text{FeO}_{\text{общ}}$  48.93;  $\text{MgO}$  1.03;  $\text{MnO}$  0.06;  $\text{CaO}$  9.87;  $\text{K}_2\text{O}$  0.03;  $\text{Na}_2\text{O}$  0.04; S 0.49; Cu 0.78; Zn 0.09; п.п.п. 1.12; сумма 100.42. Присутствие потерь при прокаливании указывает на небольшие вторичные изменения породы.

*Фаялит* – один из главных минералов в шлаке, он слагает две генерации: крупные кристаллы (рис. 3–8) и скопления мелких зерен в интерстициях породообразующих минералов. Первая генерация резко преобладает количественно и сложена гипидиоморфными короткопризматическими индивидами длиной до 0.3 мм. Местами они образуют скелетные кристаллы длиной до 1–2 см. Вторая генерация в основном представлена скелетными кристаллами размером до 30 мкм. Минерал содержит включения геденбергита, стекла и сульфидов. Кристаллы первой генерации характеризуются зональным составом (табл. 1, ан. 1, 2). В центральной части индивидов оливин представлен феррогортонолитом, т. к. содержит миналы фаялита (75.0–77.5 %), форстерита (19.5–22.0 %) и кальциооливина (3 %). Минерал также содержит до 0.1 мас. %  $\text{MnO}$ . В краевой части индивидов оливин более железистый и попадает на границу феррогортонолита и фаялита, т. к. содержит миналы фаялита (89.0–91.5 %), форстерита (3.5–8.0 %), кальциооливина (3.5–4.5 %) и тефроита (до 0.5 %). В этом оливине также зафиксированы  $\text{ZnO}$  (до 0.1 мас. %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 0.1 мас. %).

Индивиды второй генерации отличаются устойчивым составом (табл. 1, ан. 3–5). По данным пересчета все анализы попадают в поле фаялита,



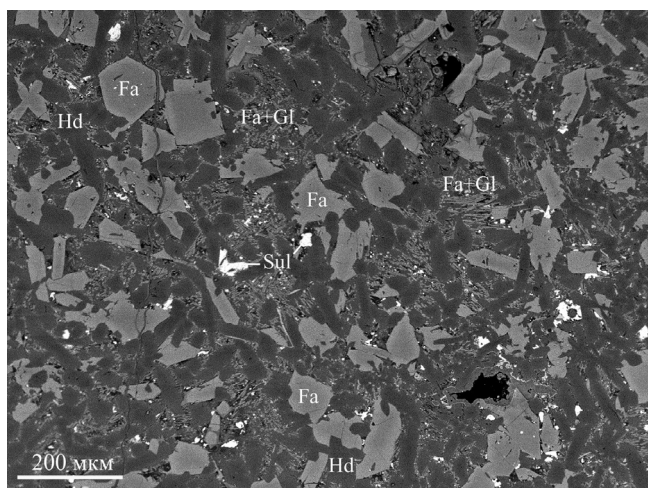


Рис. 3. Внешний вид медного шлака из Сысертского завода, сложенный агрегатом фаялита и геденбергита с вкраплениями сульфидов.

Fa – фаялит, Hd – геденбергит, Sul – сульфиды, Gl – стекло. Здесь и на рис. 4–8, BSE-фото.

Fig. 3. Copper slag from the Sysert plant composed of the fayalite-hedenbergite aggregate with sulfide inclusions.

Fa – fayalite, Hd – hedenbergite, Sul – sulfides, Gl – glass. Here and in Figs. 4–8, BSE-images.

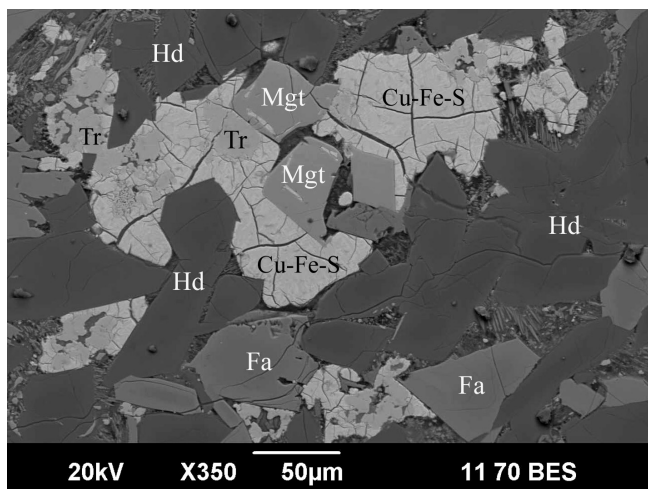


Рис. 5. Магнетит (Mgt) в скоплениях троилита с сульфидами Cu и Fe среди агрегата фаялита и геденбергита в медном шлаке.

Fig. 5. Magnetite (Mgt) in troilite with Cu and Fe sulfides among fayalite and hedenbergite aggregates in copper slag.

т. к. имеют желези́стость от 91.5 до 92.5 %. Интересной особенностью данного оливина является практически полное отсутствие магния, лишь в некоторых анализах диагностируется MgO до 0.6 мас. %. Из других примесей отмечаются CaO (до 4.2 мас. %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 0.9 мас. %), MnO (до 0.2 мас. %) и ZnO (до 0.2 мас. %).

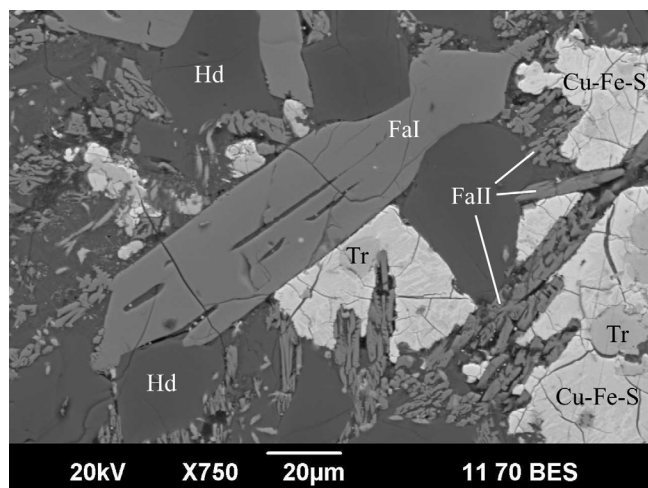


Рис. 4. Индивиды фаялита генерации I (FaI) и II (FaII) с геденбергитом (Hd), троилитом (Tr) и сульфидами Cu и Fe (Cu-Fe-S) в медном шлаке.

Fig. 4. Fayalite grains of generations I (FaI) and II (FaII) with hedenbergite (Hd), troilite (Tr) and Cu and Fe sulfides (Cu-Fe-S) in copper slag.

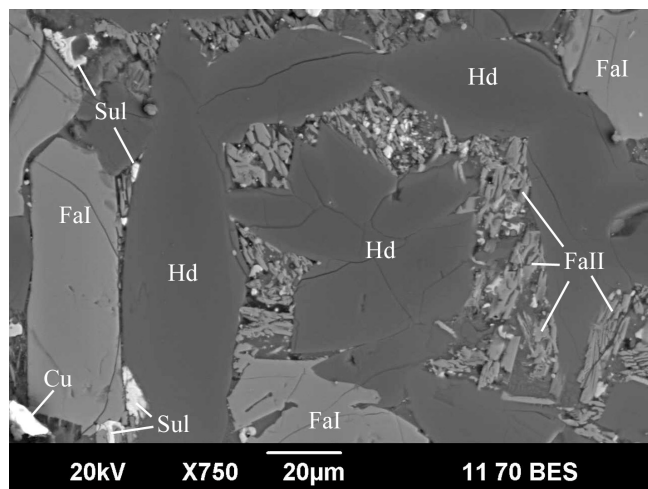


Рис. 6. Самородная медь (Cu) и сульфиды (Sul) в агрегате фаялита I, фаялита II и геденбергита в медном шлаке.

Fig. 6. Native copper (Cu) and sulfides (Sul) in aggregate of fayalite I, fayalite II, and hedenbergite in copper slag.

В целом, несмотря на некоторые отличия составов двух генераций оливина, они имеют общие черты химизма и сильно напоминают фаялит из шлаков Режевского никелевого завода (Ерохин, 2012). Интересно, что данный оливин по химическому составу отличается от своих аналогов из медных шлаков Среднеуральского (Ерохин, Козлов,



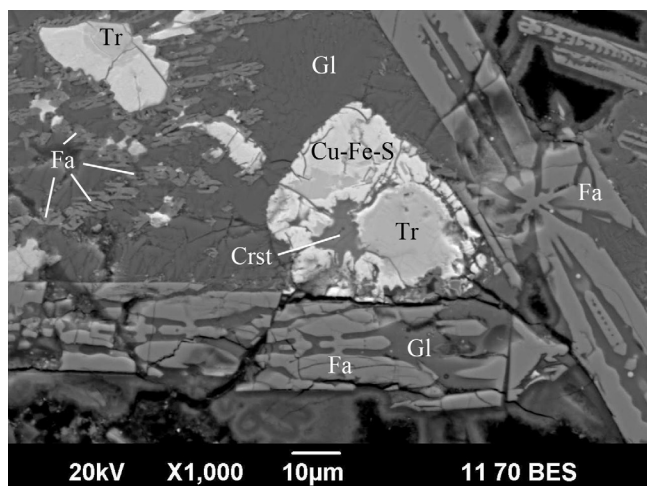


Рис. 7. Стекло (Gl) со скоплениями троилита, кронстедтита (Crst), сульфидами Cu и Fe в интерстициях кристаллов фаялита в медном шлаке.

Fig. 7. Glass (Gl) with interstitial troilite, cronstedtite (Crst), Cu and Fe sulfides in fayalite crystals of copper slag.

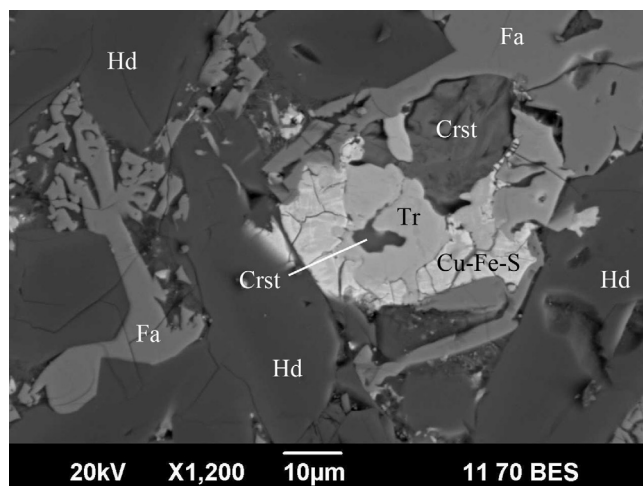


Рис. 8. Кронстедтит, замещающий троилит с сульфидами Cu и Fe в кристаллах фаялита и геденбергита в медном шлаке.

Fig. 8. Cronstedtite replacing troilite with Cu and Fe sulfides in fayalite and hedenbergite crystals in copper slag.

Таблица 1

Химический состав фаялита в шлаках Сысертского завода (мас. %)

Table 1

Chemical composition of fayalite from slags of the Sysert plant (wt. %)

| №   | SiO <sub>2</sub>  | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MnO  | ZnO  | MgO  | CaO  | Сумма  |
|---|---|------------------|--------------------------------|-------|------|------|------|------|--------|
| 1ц  | 31.60   | 0.01             | 0.04                           | 57.20 | 0.08 | 0.01 | 9.43 | 1.86 | 100.23 |
| 1кр   | 29.85   | 0.04             | 0.07                           | 64.91 | 0.09 | 0.11 | 3.19 | 2.09 | 100.35 |
| 2ц  | 31.36   | 0.01             | 0.03                           | 58.70 | 0.08 | 0.03 | 8.36 | 1.89 | 100.46 |
| 2кр   | 29.85   | —                | 0.08                           | 65.92 | 0.16 | 0.09 | 1.44 | 2.57 | 100.11 |
| 3   | 29.34   | —                | 0.57                           | 66.19 | 0.19 | 0.14 | —    | 3.80 | 100.23 |
| 4   | 29.02   | 0.02             | 0.63                           | 65.64 | 0.21 | 0.12 | —    | 4.21 | 99.85  |
| 5   | 28.98   | —                | 0.88                           | 65.74 | 0.22 | 0.15 | 0.64 | 3.53 | 100.13 |
| Кристаллохимические формулы (расчет на три катиона) |   |                  |                                |       |      |      |      |      |        |
| 1ц  | (Fe <sub>1.50</sub> Mg <sub>0.44</sub> Ca <sub>0.06</sub> ) <sub>2.00</sub> [Si <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> ]  |                  |                                |       |      |      |      |      |        |
| 1кр   | (Fe <sub>1.78</sub> Mg <sub>0.16</sub> Ca <sub>0.07</sub> ) <sub>2.01</sub> [Si <sub>0.99</sub> O <sub>4</sub> ]  |                  |                                |       |      |      |      |      |        |
| 2ц  | (Fe <sub>1.55</sub> Mg <sub>0.39</sub> Ca <sub>0.06</sub> ) <sub>2.00</sub> [Si <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> ]  |                  |                                |       |      |      |      |      |        |
| 2кр   | (Fe <sub>1.83</sub> Ca <sub>0.09</sub> Mg <sub>0.07</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>2.00</sub> [Si <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> ]                                       |                  |                                |       |      |      |      |      |        |
| 3   | (Fe <sub>1.85</sub> Ca <sub>0.14</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>2.00</sub> [(Si <sub>0.98</sub> Al <sub>0.02</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> ]                    |                  |                                |       |      |      |      |      |        |
| 4   | (Fe <sub>1.84</sub> Ca <sub>0.15</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>2.00</sub> [(Si <sub>0.97</sub> Al <sub>0.03</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> ]                    |                  |                                |       |      |      |      |      |        |
| 5   | (Fe <sub>1.83</sub> Ca <sub>0.13</sub> Mg <sub>0.03</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>2.00</sub> [(Si <sub>0.96</sub> Al <sub>0.04</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> ] |                  |                                |       |      |      |      |      |        |

Примечание. Ан. 1, 2 – фаялит генерации I, ан. 3–5 – фаялит генерации II; здесь и далее: ц – центр зерна, кр – краевая часть.

Note. An. 1, 2 – fayalite of generation I, an. 3–5 – fayalite of generation II; hereinafter: ц – center of the grain, кр – marginal part.

2010), Карабашского (Ерохин и др., 2019) и Благодатного (Ерохин и др., 2021) заводов. При этом изученный фаялит отличается и от оливина из шлаков сыродутного железодельного производства (Portillo-Blanco et al., 2020).

Геденбергит также является главным минералом, он образует короткопризматические, гипидиоморфные и хорошо образованные кристаллы длиной до 200 мкм (рис. 3–6, 8). Они заметно отличаются в BSE-режиме от более светлого фаялита.

Таблица 2

## Химический состав геденбергита в шлаках Сысертского завода (мас. %)

Table 2

## Chemical composition of hedenbergite from slags of the Sysert plant (wt. %)

| №  | SiO <sub>2</sub>  | TiO <sub>2</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MnO  | MgO  | CaO   | Na <sub>2</sub> O | Сумма  |
|--|---|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------|-------------------|--------|
| 1ц   | 46.12   | 0.06             | 0.12                           | 3.88                           | 22.36 | 0.05 | 4.39 | 23.25 | 0.02              | 100.25 |
| 1кр  | 40.54   | 0.33             | 0.06                           | 7.06                           | 28.38 | 0.02 | 0.65 | 23.06 | 0.10              | 100.20 |
| 2ц   | 47.33   | 0.10             | 0.14                           | 2.78                           | 20.46 | 0.03 | 6.01 | 23.73 | 0.01              | 99.59  |
| 2кр  | 41.57   | 0.29             | 0.08                           | 6.75                           | 27.51 | 0.03 | 0.82 | 22.82 | 0.10              | 99.97  |
| 3ц   | 47.61   | 0.06             | 0.17                           | 2.81                           | 20.41 | —    | 5.69 | 23.02 | 0.08              | 99.85  |
| 3кр  | 39.94   | 0.42             | 0.05                           | 7.61                           | 28.94 | 0.03 | 0.47 | 22.20 | 0.14              | 99.80  |
| Кристаллохимические формулы (расчет на четыре катиона) |   |                  |                                |                                |       |      |      |       |                   |        |
| 1ц   | Ca <sub>0.99</sub> (Fe <sub>0.74</sub> Mg <sub>0.26</sub> ) <sub>1.00</sub> [(Si <sub>1.83</sub> Al <sub>0.18</sub> ) <sub>2.01</sub> O <sub>6</sub> ]  |                  |                                |                                |       |      |      |       |                   |        |
| 1кр  | (Ca <sub>1.00</sub> Na <sub>0.01</sub> ) <sub>1.01</sub> (Fe <sub>0.96</sub> Mg <sub>0.04</sub> ) <sub>1.00</sub> [(Si <sub>1.64</sub> Al <sub>0.34</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>1.99</sub> O <sub>6</sub> ] |                  |                                |                                |       |      |      |       |                   |        |
| 2ц   | Ca <sub>1.00</sub> (Fe <sub>0.68</sub> Mg <sub>0.35</sub> ) <sub>1.02</sub> [(Si <sub>1.85</sub> Al <sub>0.13</sub> ) <sub>1.98</sub> O <sub>6</sub> ]  |                  |                                |                                |       |      |      |       |                   |        |
| 2кр  | (Ca <sub>0.99</sub> Na <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> (Fe <sub>0.93</sub> Mg <sub>0.05</sub> ) <sub>0.98</sub> [(Si <sub>1.69</sub> Al <sub>0.32</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>2.02</sub> O <sub>6</sub> ] |                  |                                |                                |       |      |      |       |                   |        |
| 3ц   | (Ca <sub>0.97</sub> Na <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (Fe <sub>0.67</sub> Mg <sub>0.33</sub> ) <sub>1.00</sub> [(Si <sub>1.88</sub> Al <sub>0.13</sub> Cr <sub>0.01</sub> ) <sub>2.02</sub> O <sub>6</sub> ] |                  |                                |                                |       |      |      |       |                   |        |
| 3кр  | (Ca <sub>0.97</sub> Na <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (Fe <sub>0.99</sub> Mg <sub>0.03</sub> ) <sub>1.02</sub> [(Si <sub>1.63</sub> Al <sub>0.36</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>2.00</sub> O <sub>6</sub> ] |                  |                                |                                |       |      |      |       |                   |        |

Включений обычно не содержит, за исключением мелких зерен фаялита II генерации. По своему составу минерал определяется как магнезиально-глиноземистый геденбергит. В кристаллах отчетливо проявляется химическая зональность (табл. 2). От центра к краю в индивидах нарастает содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 2.8 до 7.6 мас. %), FeO (от 20.4 до 28.9 мас. %), TiO<sub>2</sub> (от 0.06 до 0.4 мас. %) и падает – MgO (от 6.0 до 0.5 мас. %), SiO<sub>2</sub> (от 47.6 до 39.9 мас. %), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 0.2 до 0.05 мас. %). По результатам пересчета содержание минерала диопсида в центре кристаллов составляет 26–35 %, а в краевой части – 3–5 %. В целом геденбергит является редким минералом для металлургических шлаков и на среднеуральских заводах он был установлен только в шлаках Благодатного медеплавильного завода (Ерохин и др., 2021).

Магнетит является редким минералом изученного шлака и обычно встречается в ассоциации с сульфидами (рис. 5). Он образует изометричные, местами идиоморфные зерна размером 50–100 мкм, часто с включениями сульфидов. Химический состав (мас. %): Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 66.47, FeO 31.46, TiO<sub>2</sub> 0.62, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.53, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.43, SiO<sub>2</sub> 0.33, CuO 0.52, сумма 100.36 (среднее из трех анализов), т. е. количество примесей не превышает 3 %. Образование магнетита при медно-металлургическом производстве – обычное явление (Береговский, Кистяковский, 1971). Нами магнетит описан в фаялитовых шлаках Среднеуральского завода (Ерохин, Козлов,

2010) и геденбергитовых шлаках Благодатного медеплавильного завода (Ерохин и др., 2021).

Троилит является одним из главных сульфидных минералов в шлаке (рис. 4, 5, 7, 8). Он образует в породе округлые выделения размером до 200 мкм в интерстициях между кристаллами геденбергита и фаялита. Часто обрамляется скоплениями медно-железистых сульфидов, иногда ассоциирует с магнетитом. Практически постоянно в троилите отмечается развитие вторичного железистого серпентина – кронстедтита. По химическому составу сульфид неоднородный (табл. 3, ан. 1–4). В центральных частях он близок к теоретическому составу троилита и содержит небольшую примесь меди (до 1.1 мас. %). В краевых зонах на контакте с медно-железистыми сульфидами в троилите резко нарастает количество меди (до 6.3 мас. %).

Троилит является обычным сульфидным минералом медных шлаков (Ерохин и др., 2021; Mohamadi et al., 2022). При этом он отмечается в отходах других производств, например, Режевского никелевого завода (Ерохин, 2012). Сульфид часто встречается в древних металлургических шлаках железного века (Tumiati et al., 2005; Artemyev et al., 2018). Температура плавления троилита экспериментально оценивается в узких пределах 1186–1193 °C (Самсонов, Дроздова, 1972; Ефимов и др., 1983), что позволяет предполагать кристаллизацию шлака при температуре около 1200 °C.

Таблица 3

Химический состав сульфидов в шлаках Сысертского завода (мас. %)

Table 3

Chemical composition of sulfides from slags of the Sysert plant (wt. %)

| №                         | Fe    | S     | Ag   | Pb   | Co   | Cu    | Hg   | Сумма  |
|---------------------------|-------|-------|------|------|------|-------|------|--------|
| Троилит                   |       |       |      |      |      |       |      |        |
| 1                         | 63.40 | 36.57 | 0.05 | 0.13 | 0.06 | 0.68  | 0.14 | 101.03 |
| 2                         | 62.98 | 36.98 | 0.03 | 0.08 | 0.06 | 0.67  | 0.06 | 100.86 |
| 3                         | 61.76 | 36.48 | –    | 0.15 | –    | 1.12  | 0.11 | 99.62  |
| 4                         | 57.11 | 35.63 | –    | 0.24 | 0.04 | 6.33  | –    | 99.35  |
| Халькопирит               |       |       |      |      |      |       |      |        |
| 5                         | 30.81 | 34.34 | –    | 0.17 | 0.06 | 33.67 | –    | 99.05  |
| 6                         | 30.03 | 34.33 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 34.64 | –    | 99.24  |
| Медно-железистые сульфиды |       |       |      |      |      |       |      |        |
| 7                         | 21.89 | 32.44 | 0.03 | 0.16 | –    | 45.90 | 0.12 | 100.54 |
| 8                         | 19.26 | 31.64 | 0.09 | –    | –    | 48.77 | 0.12 | 99.88  |
| 9                         | 15.34 | 30.38 | 0.08 | –    | –    | 55.20 | –    | 101.00 |
| 10                        | 9.97  | 25.77 | –    | 0.11 | 0.05 | 63.26 | –    | 99.16  |
| Халькозин                 |       |       |      |      |      |       |      |        |
| 11                        | 3.68  | 19.86 | 0.05 | 0.09 | 0.04 | 75.47 | 0.06 | 99.25  |
| 12                        | 2.81  | 20.68 | 0.04 | –    | –    | 76.12 | 0.08 | 99.73  |

Халькопирит встречается на границе троилита с медно-железистыми сульфидами. Он слагает небольшие скопления до 10–15 мкм. Химический состав (табл. 3, ан. 5, 6) близок к теоретическому. В минерале отмечаются небольшие примеси Pb, Ag и Co. Халькопирит часто встречается в медных шлаках (Mohamadi et al., 2022 и др.), а также установлен в медно-кобальтовых шлаках (Vitková et al., 2010).

Сульфиды Cu-Fe-S также встречаются в интерстициях между кристаллами геденбергита и фаялита, где ассоциируют с троилитом, халькопиритом, реже с магнетитом. Они являются более поздними по сравнению с троилитом и халькопиритом, т. к. их обрамляют. По химическому составу сульфиды неоднородные и сильно варьируют по содержанию Cu и Fe (табл. 3, ан. 7–10). Наиболее железистые разности тяготеют к скоплениям троилита и халькопирита. Природные соединения с такими составами пока не обнаружены, хотя наиболее медистые разности приближаются к теоретическому составу борнита (табл. 3, ан. 10). Известны так называемые «расплавные твердые растворы»  $Cu_{1-x}Fe_{2+y}S_{2-z}$ , которые хорошо изучены экспериментально (Kosyakov, Sinyakova, 2014 и др.) и кристаллизуются в широком диапазоне температур от 1012 до 325 °С.

Халькозин встречается в виде отдельных мелких ксеноморфных зерен размером до 30 мкм. Приурочен к скоплениям самородной меди и, по всей видимости, замещает ее. Химический состав (табл. 3, ан. 11, 12) близок к теоретическому и содержит примесь Fe до 3.7 мас. %. Халькозин часто отмечается в медных шлаках как вторичный сульфид, замещающий самородную медь (Mohamadi et al., 2022). Он также встречался в медно-кобальтовых шлаках (Vitková et al., 2010).

Самородная медь в шлаке образует мелкие ксеноморфные выделения размером до 20–25 мкм в интерстициях между кристаллами геденбергита и фаялита. В BSE-режиме (рис. 6) минерал выглядит самым ярким на фоне остальных минералов. В химическом составе отмечается только примесь Fe (до 3.9 мас. %) и Si (до 0.8 мас. %). В отдельных случаях примеси не установлены. Местами, по всей видимости, замещается халькозином.

Стекло встречается по всей матрице шлака в интерстициях крупных индивидов фаялита и геденбергита. Оно находится в парагенезисе с фаялитом II генерации в резко подчиненном количестве. Содержание стекла в шлаке не превышает 2–3 об. %. В BSE-режиме (рис. 7) оно выглядит однородным и имеет следующий химический состав (мас. %):  $SO_3$



1.57, SiO<sub>2</sub> 42.14, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10.86, FeO 27.42, CuO 2.18, CaO 11.67, K<sub>2</sub>O 2.17, сумма 99.01. По соотношению кремнезема и щелочей, стекло на диаграмме TAS для вулканитов относится к ряду ультраосновных пород, попадая в область умеренно-щелочных пикробазальтов. Примесь S и Cu, по всей видимости, связана с присутствием в стекле тонкодисперсных сульфидов.

*Кронстедтит* является вторичным серпентиновым минералом, который замещает матрицу троилита в виде прожилковатых и округлых выделений размером до 30 мкм. Они хорошо выделяются в BSE-изображении темно-серой окраской на фоне более светлого сульфида (рис. 7, 8). Минерал определен по химическому составу (мас. %): SiO<sub>2</sub> 11.61, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 41.12 (по стехиометрии), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.09, FeO 32.16, CuO 3.34, ZnO 0.15, MgO 0.06, CaO 0.20, сумма 90.73. Рассчетная кристаллохимическая формула кронстедтита –  $(\text{Fe}^{2+}_{1.80}\text{Cu}_{0.17}\text{Mg}_{0.01}\text{Ca}_{0.01}\text{Zn}_{0.01})_{2.00}\text{Fe}^{3+}_{1.00}[(\text{Si}_{0.77}\text{Fe}^{3+}_{1.07}\text{Al}_{0.16})_{2.00}\text{O}_5](\text{OH})_{4.13}$ .

В природе подобный кронстедтит с повышенным содержанием Cu встречается в метабазитах, где замещает медно-железистые сульфиды (Лобова, Берзин, 2011). Кронстедтит, обогащенный Ni, характерен для углистых хондритов (Zolensky et al., 2014). Классический кронстедтит отмечался в зонах дробления пирит-пирротитовых руд Узельгинского медноколчеданного месторождения на Южном Урале (Белогуб, Овчарова, 2003).

В целом, химический и минеральный составы шлаков позволяют относить их к доменному медному производству, который осуществлялся на Сысертском железоделательном заводе вплоть до 1850 г.. В качестве медной руды использовались окисленные железистые массы (лимонит, гётит и др.) с высоким содержанием Cu, которые добывались на Гумешевском руднике (Иванов, 1941; Вертушков, 1975). В качестве флюса, по всей видимости, использовался известняк, каменоломни которого до сих пор существуют в окрестностях г. Сысерть.

### Выводы

Таким образом, впервые изучена минералогия медных шлаков Сысертского железоделательного завода, действовавшего в период с 1733 по 1930 гг. Установлено, что медные шлаки сложены фаялит-геденбергитовым агрегатом со значительным содержанием различных сульфидов (троилита, халькопирита, халькозина и неизвестных Cu-Fe-фаз), а также магнетита, стекла и меди. Шлаки образова-

лись в результате доменного медного производства, в качестве сырья использовались окисленные железные руды с высоким содержанием Cu, которые добывались на Гумешевском руднике близ г. Полевской. Температура образования данных шлаков, судя по экспериментальным данным плавления троилита, оценивается в пределах 1200 °С.

*Авторы благодарны депутату Думы Сысертского городского округа VI созыва А.А. Савичеву за возможность посетить и отобрать пробы на территории бывшего Сысертского завода.*

### Литература

- Алексеев В.В.** (гл. ред.) (2001) Металлургические заводы Урала XVII-XX вв. Энциклопедия. Екатеринбург, Изд-во «Академкнига», 536 с.
- Белогуб Е.В., Овчарова Е.С.** (2003) Кронстедтит из Узельгинского медноколчеданного месторождения (Южный Урал). *Минералогия Урала – 2003. Материалы IV Всероссийского совещания*. Миасс: ИМин УрО РАН, 2, 130–137.
- Береговский В.И., Кистяковский Б.Б.** (1971) Металлургия меди и никеля. М., Изд-во «Металлургия», 456 с.
- Вертушков Г.Н.** (1975) Гумешевское месторождение малахита на Урале. *Труды Свердловского горного института*, (106), 3–26.
- Ерохин Ю.В.** (2012) Минералогия шлаков Режевского никелевого завода. *Минералогия техногенеза*, (13), 50–64.
- Ерохин Ю.В., Козлов П.С.** (2010) Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда). *Минералогия техногенеза*, (11), 32–40.
- Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В.** (2019) Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета*, 17(3), 12–18.
- Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В.** (2021) Шлаки Благодатного медеплавильного завода (состав и геоэкология). *Известия вузов. Горный журнал*, (5), 75–86.
- Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П.** (1983) Свойства неорганических соединений. Л., Изд-во «Химия», 389 с.
- Иванов С.Н.** (1941) Гумешевское медное месторождение на Урале. *Советская геология*, (2), 82–96.
- Лобова Е.В., Берзин С.В.** (2011) Медьсодержащий кронстедтит из параллельных долеритовых даек Среднего Урала. *Вестник Уральского отделения РМО*. (8), 68–71.
- Пирогова Е.П., Неклюдов Е.Г., Ларионова М.Б.** (2008) Род Турчаниновых. Екатеринбург, ИД «Сократ», 352 с.

**Савичев А.А.** (2018) Архитектурное достояние Сысерти. Часть 1. Исторический центр. Екатеринбург, Изд-во «Уральский рабочий», 200 с.

**Самсонов Г.В., Дроздова С.В.** (1972) Сульфиды. М., Металлургия, 304 с.

**Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Lukpanova Ya.A.** (2018) Mineralogy and origin of slags from the 6<sup>th</sup> kurgan of the Taksay 1 burial complex, Western Kazakhstan. *Canadian Mineralogist*, **56**, 883–904.

**Kosyakov V.I., Sinyakova E.F.** (2014) Melt crystallization of  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$  in the Cu-Fe-S system. *Journal Thermal Analysis Calorimetry*, **115**, 511–516.

**Mohamadi N.S., Shafiei B.B., Yarahmadi M.R., Mahmoudi M.M., Kamalabadi K.J.** (2022) Mineralogical properties of the cooper slags from the SarCheshmeh Smelter Plant, Iran, in view of value recovery. *Minerals*, **12**, 1153.

**Portillo-Blanco H., Zuluaga M.C., Ortega L.A., Alonso-Olazabal A., Cepeda-Ocampo J.J., Salcedo A.M.** (2020) Mineralogical characterization of slags from the Oiola Site (Biscay, Spain) to assess the development in bloomery iron smelting technology from the Roman Period to the Middle Ages. *Minerals*, **10**, 321.

**Tumiati S., Casartelli P., Mambretti A., Martin S., Frizzo P., Rottoli M.** (2005) The ancient mine of Servette (Saint-Marcel, Val d'Aosta, western Italian Alps): A mineralogical, metallurgical and charcoal analysis of furnace slags. *Archaeometry*, **47**, 317–340.

**Vitková M., Ettler V., Johan Z., Křibek B., Šebek O., Mihaljevič M.** (2010) Primary and secondary phases in copper-cobalt smelting slags from the Copperbelt Province, Zambia. *Mineralogical Magazine*, **74**(4), 581–600.

**Zolensky M., Mikouchi T., Fries M., Bodnar R., Jenniskens P., Yin Q., Hagiya K., Ohsumi K., Komatsu M., Colbert M., Hanna R., Maisano J., Ketcham R., Kebukawa Y., Makamura T., Matsuoka M., Sasaki S., Tsuchiyama A., Gounelle M., Le L., Martinez J., Ross K., Rahman Z.** (2014) Mineralogy and petrography of C asteroid regolith: The Sutter's Mill CM meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*. **49**(11), 1997–2016.

## References

**Alekseev V.V.** (chief editor) (2001) [Metallurgical factories of the Urals. XVII-XX centuries. Encyclopedia]. Yekaterinburg, Izdatelstvo «Academkniga», 536 p. (in Russian)

**Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Lukpanova Ya.A.** (2018) Mineralogy and origin of slags from the 6<sup>th</sup> kurgan of the Taksay 1 burial complex, Western Kazakhstan. *Canadian Mineralogist*, **56**, 883–904.

**Belogub E.V., Ovcharova E.S.** (2003) [Kronstedtite from the Uzelga copper pyrite deposit (Southern Urals)]. *Mineralogiya Urala – 2003. Materialy IV Vserossiyskogo*

*soveshchaniya. [Mineralogy of the Urals - 2003. Materials of the IV All-Russian Conference]*. **2**, 130–137. (in Russian)

**Beregovsky V.I., Kistiyakovsky B.B.** (1971) [Metallurgy of copper and nickel]. Moscow, Izdatelstvo «Metallurgiya», 456 p. (in Russian)

**Efimov A.I., Belorukova L.P., Vasilkova I.V., Chechev V.P.** (1983) [Properties of inorganic compounds]. L., Izdatelstvo «Khimiya», 389 p. (in Russian)

**Erokhin Yu.V.** (2012) [Mineralogy of slags of the Rezh nickel plant]. *Mineralogiya tekhnogeneza [Mineralogy of technogenesis]*, (13). Miass, 50–64. (in Russian)

**Erokhin Yu.V., Kozlov P.S.** (2010) [Fayalite from slags of the Central Urals copper melting plant (Revda)]. *Mineralogiya tekhnogeneza [Mineralogy of technogenesis]*, (11). Miass, IMin UrBr RAS, 32–40. (in Russian)

**Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V.** (2019) [Material composition of slags of the Karabash copper smelter]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University]*, **17**(3), 12–18. (in Russian)

**Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V.** (2021) [Slags of the Blagodatny copper smelter (composition and geoecology)]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal [Izvestiya vuzov. Mining magazine]*, (5), 75–86. (in Russian)

**Ivanov S.N.** (1941) [Gumeshevskoe copper deposit in the Urals]. *Sovetskaya geologiya [Soviet Geology]*, (2), 82–96. (in Russian)

**Kosyakov V.I., Sinyakova E.F.** (2014) Melt crystallization of  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$  in the Cu-Fe-S system. *Journal Thermal Analysis Calorimetry*, **115**, 511–516.

**Lobova E.V., Berzin S.V.** (2011) [Copper-bearing cronstedtite from parallel dolerite dikes of the Middle Urals]. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya RMO [Bulletin of the Ural branch of the RMS]*, (8), 68–71. (in Russian)

**Mohamadi N.S., Shafiei B.B., Yarahmadi M.R., Mahmoudi M.M., Kamalabadi K.J.** (2022) Mineralogical properties of the cooper slags from the SarCheshmeh Smelter Plant, Iran, in view of value recovery. *Minerals*, **12**, 1153.

**Pirogova E.P., Neklyudov E.G., Larionova M.B.** (2008) [The Turchaninov family]. Yekaterinburg, Izdatelskiy dom «Sokvat» 352 p. (in Russian)

**Portillo-Blanco H., Zuluaga M.C., Ortega L.A., Alonso-Olazabal A., Cepeda-Ocampo J.J., Salcedo A.M.** (2020) Mineralogical characterization of slags from the Oiola Site (Biscay, Spain) to assess the development in bloomery iron smelting technology from the Roman Period to the Middle Ages. *Minerals*, **10**, 321.

**Samsonov G.V., Drozdova S.V.** (1972) [Sulfides]. Moscow, Metallurgiya, 304 p. (in Russian)

**Savichev A.A.** (2018) [Architectural heritage of Sysert. Part 1. Historical center]. Yekaterinburg, Izdatelstvo «Uralskiy rabochiy», 200 p. (in Russian)

**Tumiati S., Casartelli P., Mambretti A., Martin S., Frizzo P., Rottoli M.** (2005) The ancient mine of Servette

(Saint-Marcel, Val d'Aosta, western Italian Alps): A mineralogical, metallurgical and charcoal analysis of furnace slags. *Archaeometry*, **47**, 317–340.

**Vertushkov G.N.** (1975) [Gumeshevskoe malachite deposit in the Urals]. *Trudy Sverdlovskogo gornogo instituta [Proceedings of the Sverdlovsk Mining Institute]*, (106), 3–26.

**Vitková M., Ettler V., Johan Z., Křibek B., Šebek O., Mihaljevič M.** (2010) Primary and secondary phases in copper-cobalt smelting slags from the Copperbelt Province, Zambia. *Mineralogical Magazine*, **74**(4), 581–600.

**Zolensky M., Mikouchi T., Fries M., Bodnar R., Jenniskens P., Yin Q., Hagiya K., Ohsumi K., Komatsu M., Colbert M., Hanna R., Maisano J., Ketcham R., Kebukawa Y., Makamura T., Matsuoka M., Sasaki S., Tsuchiyama A., Gounelle M., Le L., Martinez J., Ross K., Rahman Z.** (2014) Mineralogy and petrography of C asteroid regolith: The Sutter's Mill CM meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*. **49**(11), 1997–2016.



УДК 549.761.6(470.5)

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-4

**МИНЕРАЛЬНЫЕ ФОРМЫ ВОЛЬФРАМА НА ПОРОХОВСКОМ И ЮГО-КОНЕВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)****Д.А. Рогов<sup>1</sup>, Е.В. Белогуб<sup>1</sup>, К.А. Новоселов<sup>1</sup>, М.А. Рассомахин<sup>1</sup>,  
Р.Р. Ирмаков<sup>2</sup>, А.Е. Чугаев<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; danil.rogov99@mail.ru<sup>2</sup>ООО «Уральская Геологоразведочная Экспедиция», ул. Вайнера стр. 55а,  
г. Екатеринбург, 620014 Россия

Статья поступила в редакцию 22.03.2023 г., принята к печати 18.05.2023 г.

**MINERAL FORMS OF TUNGSTEN AT THE POROKHOVSKOE AND YUGO-KONEVSKOE DEPOSITS (SOUTH URALS)****D.A. Rogov<sup>1</sup>, E.V. Belogub<sup>1</sup>, K.A. Novoselov<sup>1</sup>, M.A. Rassomakhin<sup>1</sup>,  
R.R. Irmakov<sup>2</sup>, A.E. Chugaev<sup>2</sup>**<sup>1</sup>South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district,  
456317 Russia; danil.rogov99@mail.ru<sup>2</sup>Urals Geological Exploration Expedition LLC, ul. Vaynera 55a, Yekaterinburg, 620014 Russia

Received 22.03.2023, accepted 18.05.2023

**Аннотация.** Изучены штуфные образцы и групповые пробы руд Пороховского и Юго-Коневского месторождений вольфрама грейзеновой формации на Южном Урале. Установлено, что основными минеральными формами вольфрама первичных руд на обоих месторождениях являются гюбнерит и шеелит. Второстепенные и акцессорные минералы – пирит, халькопирит, молибденит, редко – сфалерит, галенит, висмутин, айкинит, не диагностированные точно халькогениды и сульфосоли Вi, а также магнетит, рутил, ильменит, титанит, колумбит. Жилы представлены, преимущественно, кварцем и мусковитом, второстепенными кальцитом, доломитом, флюоритом, редкими хлоритом и амфиболом и акцессорными цирконом, апатитом и уранинитом. Отчетливая зональность в распределении вольфрамитов с разным содержанием Fe относительно Юго-Коневского массива гранитов не выявлена, но вольфрамиты Северного участка Пороховского месторождения обогащены железом по сравнению с таковыми Центрального участка и Юго-Коневского месторождения. В окисленных рудах, помимо сквозных жильных вольфрамитов и шеелита, присутствуют оксигидроксиды Fe и Mn, малахит, пироморфит, бромаргирит. Вольфрам входит в состав оксигидроксидов Mn и Fe, замещающих вольфрамит и реже – сульфиды. Содержание WO<sub>3</sub> в псевдоморфных оксигидроксидах Mn и Fe по гюбнериту достигает 18 мас. %. Установлены единичные выделения штольцита и русселита. По результатам фазового химического анализа групповых проб количество тунгстита в рудах, определенных визуально как окисленные, незначительно. Это позволяет все руды обоих месторождения отнести к первичному промышленно-технологическому типу.

**Ключевые слова:** Южный Урал, Пороховское месторождение, Юго-Коневское месторождение, вольфрам, гюбнерит, шеелит, штольцит, примеси.

**Abstract.** The ore hand specimens and technological ore samples from the Porokhovskoe and Yugo-Konevskoe W greisen deposits in the South Urals are studied. The major W minerals of primary ores at both deposits include hübnerite and scheelite. The secondary and accessory minerals are pyrite, chalcopyrite and molybdenite, rare minerals include sphalerite, galena, bismuthinite, aikinite, unidentified chalcogenides and sulfosalts, magnetite, rutile, ilmenite, titanite and columbite. The veins are mainly composed of quartz and muscovite with subordinate calcite, dolomite and fluorite, rare chlorite and amphibole and accessory zircon, apatite and uraninite. No zonation in the distribution of wolframite with various Fe content is identified relative to the Yugo-Konevsky granite pluton, however, wolframite of the Northern area of the Porokhovskoe deposit is enriched in Fe compared to that of the Central area and Yugo-Konevskoe deposit. In addition to veined wolframite and scheelite, the oxidized ores also contain Fe and Mn oxyhydroxides, malachite, pyromorphite and bromargyrite. Tungsten is part of Mn and Fe oxyhydroxides, which replace wolframite and less often sulfides. The  $WO_3$  content of pseudomorphic Mn and Fe oxyhydroxides after hübnerite reaches 18 wt. %. Single grains of stolzite and russellite are found. According to the results of phase chemical analysis of technological samples, the amount of tungstite in oxidized ores is minor, therefore all ores of both deposits were ascribed to primary type.

**Keywords:** South Urals, Porokhovskoe deposit, Yugo-Konevskoe deposit, tungsten, hübnerite, scheelite, stolzite, trace elements.

## Введение

Коренные проявления вольфрама известны на Урале с конца XVIII в., однако систематическая разведка и эксплуатация данных объектов не проводилась. Только в 1915 г. после оценочных работ было введено в эксплуатацию Боевское месторождение, к тому времени уже пострадавшее от хищнической добычи. На 20-е и 30-е годы прошлого века пришелся пик геологоразведочных экспедиций, по результатам которых было открыто более 60 месторождений и проявлений вольфрама (Филатов, 2005). Тем не менее, отработка этих месторождений не стала систематической и сопровождалась их периодической консервацией, техногенными авариями, повторной разведкой и восстановлением рудников. Большинство месторождений Южного Урала, обладая сравнительно небольшими запасами и сложной конфигурацией рудных тел, находились на грани рентабельности, из-за чего работы на них носили эпизодический характер (Покровский, 1950; Рунквист и др., 1964; Левин и др., 1993ф). В последнее десятилетие, ввиду истощения известных вольфрамовых объектов и необходимости воспроизводства минерально-сырьевой базы вольфрама в РФ, интерес к мелким месторождениям вырос. Актуальность изучения таких объектов на Урале подтверждается появлением ряда публикаций (Золоев и др., 2004;

Морозова, 2006; Елохин, 2009; Касаткин и др., 2022; Новоселов и др., 2022), а также возобновлением геологоразведочных работ с начала 2000-х гг.

Целью данной работы является характеристика минеральных форм вольфрама на Пороховском и Юго-Коневском месторождениях на Южном Урале, выполненная в рамках геологоразведочных работ, проведенных здесь в 2021–2022 гг. ООО «УГЭ», инициатором которых является Кировоградский завод твердых сплавов.

## Геологическое строение района

Пороховское и Южно-Коневское месторождения располагаются в Челябинской области и локализируются в пределах Коневско-Карасьевского рудного узла, который является частью Боевско-Биктимировской редкометалльной зоны и вмещает несколько месторождений и проявлений вольфрама. Рудный узел протяженностью около 40 км имеет субмеридиональное простирание (рис. 1) и локализован в Тагило-Магнитогорской мегазоне (Puchkov, 2017).

Стратифицированные образования в районе представлены межевской ( $S_1m$ ), колютинской ( $S_{1k}$ ), карбонатной ( $D_{1c}$ ), базальт-дацитовый толщами ( $D_{2bd}$ ), белекнищевской ( $C_{1bk}$ ) и исетской ( $C_{1is}$ ) свитами (Коровко и др., 2015).

---

**Для цитирования:** Рогов Д.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Рассомахин М.А., Ирмаков Р.Р., Чугаев А.Е. Минеральные формы вольфрама на Пороховском и Юго-Коневском месторождениях (Южный Урал). Минералогия, 9(2), 41–59. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-4

**For citation:** Rogov D.A., Belogub E.V., Novoselov K.A., Rassomakhin M.A., Irmakov R.R., Chugaev A.E. Mineral forms of tungsten at the Porokhovskoe and Yugo-Konevskoe deposits (South Urals). Mineralogy, 9(2), 41–59. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-4.

---

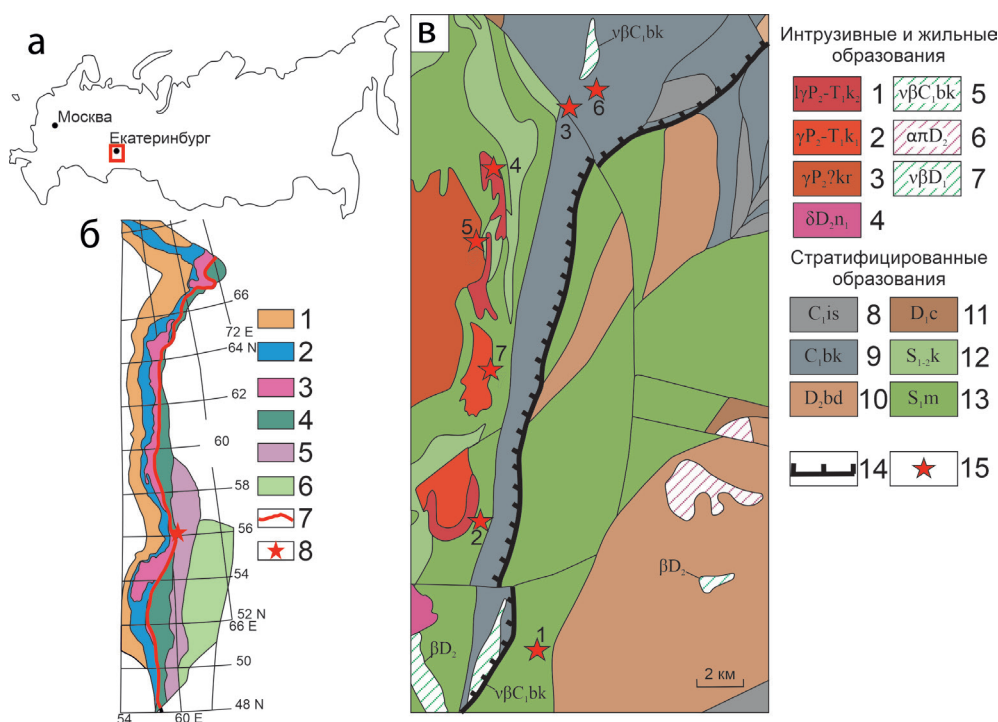


Рис. 1. Положение месторождений Коневско-Карасьевского рудного узла на географической схеме (а), схеме тектоно-магматического районирования Урала (Puchkov, 2017) (б) и схеме рудного узла (Коровко и др., 2015) (в).

Рис. 1б: 1 – Предуральский краевой прогиб; 2 – Западно-Уральская зона; 3 – Центрально-Уральская зона; 4 – Тагил-Магнитогорская зона; 5 – Восточно-Уральская зона; 6 – Зауральская зона; 7 – Главный уральский разлом; 8 – Коневско-Карасьевский рудный узел.

Рис. 1в: 1, 2 – Юго-Коневской гранит-лейкогранитовый комплекс: 1 – лейкограниты второй фазы; 2 – граниты и гранодиориты первой фазы; 3 – граниты карасьевского комплекса; 4 – известняки исетской свиты; 5, 6 – белекнищевская свита: 5 – вулканогенно-осадочные породы, 6 – дайки габбро-долеритов; 7 – габбро, диориты и кварцевые диориты некрасовского комплекса; 8 – базальт-дацитовая толща; 9 – дайки диоритовых порфиритов; 10 – дайки долеритов; 11 – известняки и мраморы карбонатной толщи; 12 – слюдяно-кварцевые сланцы колюткинской толщи; 13 – вулканогенно-осадочные породы межевской толщи; 14 – Кодинский надвиг; 15 – Mo-W-Be месторождения: 1 – Пороховское, 2 – Юго-Коневское, 3 – Ново-Боевское, 4 – Пьянковское, 5 – Карасьевское, 6 – Боевское, 7 – Игишское.

Fig. 1. Position of deposits of the Konevsko-Karas'evsky ore cluster on geographical map (a), scheme of tectonic-magmatic zoning (Puchkov, 2017) (b) and scheme of the ore cluster (Korovko et al., 2015) (v).

Fig. 1b: 1 – Preuralian Foredeep; 2 – West Uralian Zone; 3 – Central Uralian Zone; 4 – Tagil-Magnitogorsk Zone; 5 – East Uralian Zone; 6 – Transuralian Zone; 7 – Main Uralian Fault; 8 – Konevsko-Karas'evsky ore cluster.

Рис. 1в: 1, 2 – Юго-Коневской гранит-лейкогранитовый комплекс: 1 – лейкограниты второй фазы; 2 – граниты и гранодиориты первой фазы; 3 – граниты карасьевского комплекса; 4 – известняки исетской свиты; 5, 6 – Белекнищевская свита: 5 – вулканогенно-осадочные породы; 6 – дайки габбро-долеритов; 7 – габбро, диориты и кварцевые диориты некрасовского комплекса; 8 – базальт-дацитовая толща; 9 – дайки диоритовых порфиритов; 10 – дайки долеритов; 11 – известняки и мраморы карбонатной толщи; 12 – слюдяно-кварцевые сланцы колюткинской толщи; 13 – вулканогенно-осадочные породы межевской толщи; 14 – Кодинский надвиг; 15 – Mo-W-Be месторождения: 1 – Пороховское, 2 – Юго-Коневское, 3 – Ново-Боевское, 4 – Пьянковское, 5 – Карасьевское, 6 – Боевское, 7 – Игишское.

Разрез межевской толщи представлен вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами от основного до кислого составов с горизонтами алевролитов, пелитов, известняков. Нижняя часть разреза сложена ритмично-слоистыми туфами, переходящими в верхах ритмов в туффиты, алевропелиты и глинисто-кремнистые породы. Породы со-

держат примесь карбонатного материала вплоть до образования известняков, переслаивающихся с вулканогенно-осадочными породами. Породы толщи метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации. В обрамлении Юго-Коневского массива породы межевской толщи ороговикованы.



Породы колюткинской толщи согласно залегают на вулканитах межевской толщи и представлены кварцитами и слюдисто-кварцевыми сланцами, мраморами. Породы толщи повсеместно дислоцированы.

Карбонатная толща почти целиком сложена мраморизованными известняками и мраморами. В ее основании залегают углеродисто-карбонатно-глинистые породы с граптолитами.

Вулканогенно-осадочная толща представлена эффузивными, пирокластическими, осадочно-пирокластическими образованиями непрерывной базальт-андезит-дацитово-гранитной формации и осадочными породами. Толща прорвана силлами и штоками комагматических долеритов и диоритовых порфиритов.

Бекленищевская свита характеризуется резкой фациальной изменчивостью и интенсивно тектонически нарушена. Толща представляет собой переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов с вулканитами и туфами от базальтового до риодацитового состава. Встречаются отдельные прослои туфитов и известняков. Вулканогенные породы свиты и комагматичный им бекленищевский габбро-долерит-риолитовый субвулканический комплекс образуют одноименную вулканическую ассоциацию. Породы метаморфизованы в условиях фации зеленых сланцев.

Исетская свита с размывом залегает на ниже лежащих породах и сложена известняками.

Все породы стратифицированной толщи прорваны гранитами карасьевского и юго-коневского комплексов, условно отнесенных к нижнетриасовому возрасту (Коровко и др., 2015). Карасьевский комплекс формирует одноименный массив мелко- и среднезернистых биотитовых и мусковит-биотитовых гранитов. В пределах массива встречены жилы кварц-полевошпатовых пегматитов с небольшим количеством биотита, мусковита и единичными зернами граната. Юго-Коневский гранит-лейкогранитовый комплекс включает в себя три небольших гранитных массива: Пьянковский, Игишанский и Юго-Коневский, а также два «слепых» тела, расположенных на небольшом удалении к северу от Пьянковского массива: Мыльниковское и Боевское. Комплекс представлен двумя фазами внедрения. Первая фаза представлена порфировидными гранитами, ко второй относятся лейкократовые и аляскитовые граниты, образующие многочисленные жилы и апофизы. Контакты между породами разных фаз сопровождаются метасоматическими изменениями, затушевывающими границы между петрографическими разновидностями.

Тектоническая структура района определяется субширотным Кодиным надвигом и локальными тектоническими нарушениями сбросо-сдвигового характера ССЗ и ССВ простираний, связанными с внедрением интрузий юго-коневского комплекса.

Вольфрамовое оруденение Коневско-Карасьевского рудного узла локализовано в зоне развития малых интрузий и даек гранитоидов юго-коневского комплекса в породах межевской и бекленищевской свит, и в прорывающих их интрузиях гранитоидов юго-коневского комплекса ( $P_2-T_{1jk}$ ). Рудные тела контролируются системами разрывных нарушений Кодиного разлома.

По литературным данным и авторским полевым наблюдениям Пороховское месторождение представляет собой серию жил северо-западного простирания. Вмещающими породами являются метаморфически измененные плагиоклазовые и пироксен-плагиоклазовые андезитовые порфириды и их туфы межевской толщи (рис. 2). Ориентировка жильных тел дискордантна Кодиному надвигу. Вмещающие андезиты преобразованы в мелкозернистый серицит-актинолит-эпидот-хлоритовый агрегат с сохранением первичных порфировых структур. В северной части месторождения скважинами вскрыты мелкозернистые мрамора, на контакте с которыми развиваются скарноиды, представленные эпидот-пироксеновыми и эпидот-хлоритовыми скарнами и эпидозитами. Глинистая кора выветривания развивается на глубину 2–4 м, иногда до 10 м. На месторождении выделяется два генетических типа вольфрамовых руд: грейзеновый кварцево-жильный в метавулканитах и скарновый.

Кварцевые жилы субвертикальные, по направлению простирания их можно разделить на 2 системы:  $240-260^\circ$  и  $225-240^\circ$ . Протяженность жил первой системы достигает 1.5 км, вторая представляет собой скопление жил длиной не более 200 м. Мощность всех жил колеблется от первых сантиметров до 0.5 м. На глубину жилы прослеживаются на несколько сотен метров без существенных изменений в характере минерализации (Покровский, 1950). Жилы имеют кварц-мусковитовый состав с второстепенными карбонатами, флюоритом, реже – альбитом. Рудная минерализация представлена вольфрамитом, шеелитом, пиритом, халькопиритом и более редкими молибденитом и халькогенидами  $Bi$ . Жилы иногда окружены каймами осветления и серицитизации. Скарновые руды развиты локально в связи с мраморами. Рудная минерализация представлена, преимущественно, пиритом, шеелитом, молибденитом.

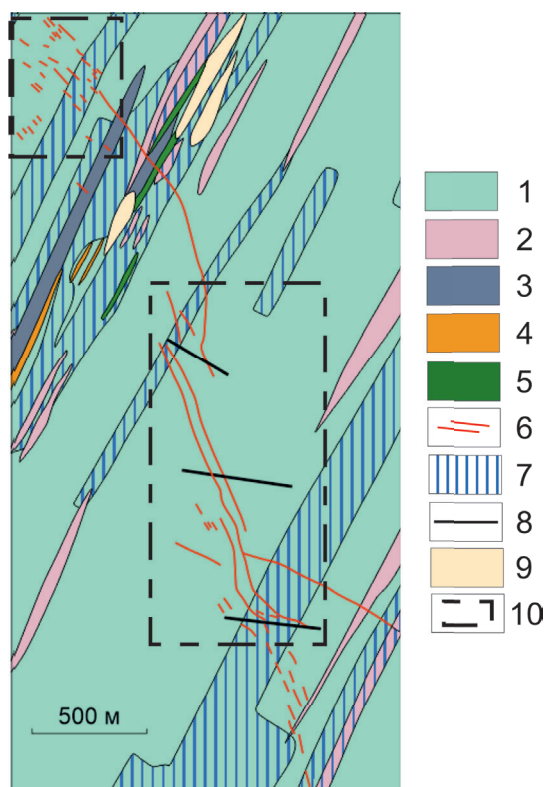


Рис. 2. План Пороховского месторождения по материалам Пороховской партии УГСЭ (Золоев и др., 2004).

1 – туфы порфириров; 2 – пироксен-плагиоклазовые порфириды; 3 – мраморы; 4 – эпидозиты, эпидот-хлоритовые и эпидот-актинолитовые породы; 5 – скарны; 6 – вольфрамоносные кварцевые и кварц-мусковитовые жилы; 7 – зоны эпидотизации и актинолитизации; 8 – тектонические нарушения; 9 – карстовые полости; 10 – границы участков.

Fig. 2. Plan of the Porokhovskoe deposit after materials of the Porokhovskaya Party of UGSE (Zoloev et al., 2004).

1 – porphyrite tuff; 2 – pyroxene-plagioclase porphyrite; 3 – marble; 4 – epidosite, epidote-chlorite and epidote-actinolite rocks; 5 – skarn; 6 – W-bearing quartz and quartz-muscovite veins; 7 – zones of epidotization and actinolitization; 8 – faults; 9 – karst cavities; 10 – boundaries of areas.

Юго-Коневское месторождение приурочено к восточной периферии одноименного массива гранитов (Золоев и др., 2004). В отличие от Пороховского месторождения, оно целиком находится в пределах рудогенерирующей интрузии (рис. 3). Рудные жилы имеют аз. пр. 300–310°, ССВ падение под углами 65–80°. Мощность жил достигает 1.5 м, средняя мощность – 15–20 см. На глубину жилы прослеживаются до 200 м, по простиранию – до 400 м. Около рудных жил обычно развиты каймы метасоматически измененных пород мощностью от 5 до 60 см.



Рис. 3. Схема геологического строения Юго-Коневского месторождения (Золоев и др., 2004).

1 – амфиболовые сланцы; 2 – биотитовые граниты; 3 – лейкократовые граниты; 4 – кварцевые рудные жилы; 5 – элементы залегания

Fig. 3. Schematic geological structure of the Yugo-Konevskoe deposit (Zoloev et al., 2004).

1 – amphibole schist; 2 – biotite granite; 3 – leucocrate granite; 4 – quartz ore veins; 5 – bedding elements.

В рудах и метасоматически измененных гранитах наблюдаются молибденит, шеелит, вольфрамит, берилл.

### Методы исследования

Материалом для исследования послужили штучные и групповые пробы кернового и бороздового опробования, предоставленные специалистами ООО «УГЭ» и отобранные авторами. Работы включали макроскопическое описание, оптические

скую микроскопию в проходящем (37 шлифов) и отраженном (30 аншлифов) свете и электронную микроскопию. Для диагностики шеелита использована ультрафиолетовая лампа SpectroLine. Все лабораторные исследования были проведены в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (Миасс).

Групповые пробы (10 шт.) отобраны на различных участках месторождений и подразделены по степени окисления визуально. Их валовый состав анализировался рентгеноструктурным методом (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000, CuK- $\alpha$  излучение с монохроматором), количественные соотношения рассчитаны методом Ритвельда (программный пакет Siroquant V.4, аналитик П.В. Хворов).

Химический фазовый анализ групповых проб осуществлялся по стандартной методике (Солнцев, Леонтьева, 1958; Филиппова, 1975). Содержание  $WO_3$ , связанное с тунгститом, определялось из отдельной навески массой 5 г. Содержание  $WO_3$ , связанное с шеелитом, определялось из последовательной экстракции щавелевой кислотой, процедура повторена дважды для достижения полного извлечения шеелита. Содержание  $WO_3$ , связанное с вольфрамитом, определялось последовательной экстракцией при кипячении HCl 2.4 н. Процедура повторялась дважды для достижения полного перевода вольфрамита в раствор. Полноту экстракции определяли при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA3 TESCAN с энергодисперсионным анализатором (ЭДА). Ввиду обнаружения зерен неразложенного стехиометрически чистого гюбнерита в остатке после двукратной экстракции, остаток после экстракций озоляли и сплавляли с NaOH. Полученное количество W относили на счет гюбнерита. Содержания W в растворе определены фотометрическим методом в виде роданидного комплекса (Фотометрическое..., 1968) (аналитики Г.Ф. Лонцакова, П.А. Карионова).

Известно, что фазовый анализ вольфрамовых руд сталкивается с трудностями, связанными с нахождением вольфрама в т. н. «упорной» форме, устойчивой к кислотному разложению (Солнцева, Леонтьев, 1958). Разложение нерастворимого остатка после кислотного разложения путем спекания со щелочью привело к полному разложению осадка, однако при переводе в азотнокислый раствор для непосредственных измерений в нескольких пробах выпал ярко-желтый осадок вольфрамовой кислоты, состав которого был подтвержден на СЭМ. Таким

образом, классические методы проведения химического фазового анализа не дают полной информации о минеральных формах W и нуждаются в уточнении прямыми минералогическими методами.

Для мультиэлементного ИСП-МС анализа использовался масс-спектрометр Agilent 7700x (аналитик К.А. Филиппова).

Из групповых проб был получен тяжелый концентрат путем отмывки в лотке с последующей доводкой в бромформе ( $\rho = 2.9 \text{ г/см}^3$ ). Минеральный состав концентратов различных классов крупности (+1.00, -1.00 +0.50, -0.50 +0.25, -0.25 мм) был изучен под бинокулярным микроскопом (Stemi 2000-C, Цейс) и в полированных препаратах.

Оптико-микроскопическое изучение выполнено с помощью поляризационного микроскопа Axioscope A1 CZ. Состав минералов определен на СЭМ VEGA3 TESCAN SBU с ЭДА 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), аналитик М.А. Рассомахин).

Микропримеси в вольфрамите изучены в монофракциях. Монофракции вольфрамита отобраны из тяжелых концентратов групповых проб под стереомикроскопом и истерты в агатовой ступке. Чистота монофракций проверялась рентгенофазовым методом. Ввиду наличия минеральных включений и визуально неразличимых сростков вольфрамита с другими минералами, отобрать чистую монофракцию не удалось. При расшифровке рентгенограмм монофракций в пробах повсеместно наблюдалась примесь шеелита, в некоторых пробах – мусковита и пирита.

## Результаты исследования

*Минеральные формы вольфрама в первичных рудах.* По результатам фазового химического анализа представительных групповых проб на обоих участках Пороховского месторождения преобладает шеелит, на Юго-Коневском месторождении вольфрамит и шеелит находятся в примерно равных соотношениях (рис. 4). Содержание W в окисленной форме ничтожно мало. В окисленных рудах, по сравнению с первичными, относительное количество вольфрамита увеличивается на Юго-Коневском месторождении и Центральном участке Пороховского месторождения. Для Северного участка Пороховского месторождения эта тенденция не характерна.





Рис. 4. Соотношение основных форм W по результатам фазового химического анализа.

Fig. 4. Amount of W minerals according to the results of phase chemical analysis.

Первичные руды на обоих месторождениях имеют сходный минеральный состав. Отличия наблюдаются только в количестве и соотношении второстепенных минералов в тяжелых концентратах (табл. 1). В визуально окисленных рудах отмечается увеличение доли вольфрамита в тяжелом концентрате за счет уменьшения количества сульфидов. В окисленных и полуокисленных рудах вольфрамит и шеелит хорошо сохраняются. Также в окисленных рудах значительную роль играют оксигидроксиды Fe и Mn. Главными экономическими минералами на обоих месторождениях являются вольфрамит и шеелит. Также W может входить в состав гипергенных минералов (штольцит, русселлит, примесь в оксигидроксидах Mn и Fe).

Вольфрамит образует удлиненно-уплощенные кристаллы размером до первых сантиметров и их скопления, развитые как в призальбандовой, так и в центральной частях жил (рис. 5а). Вольфрамит часто замещается шеелитом (рис. 5б) (в окисленных рудах – оксигидроксидами Fe и Mn) и может содержать тонкие включения пирита (рис. 5в) и флюорита.

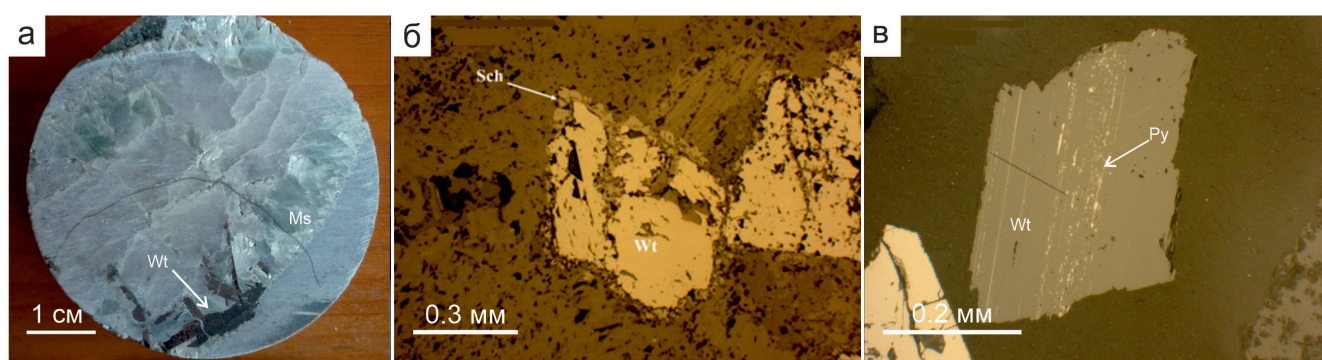


Рис. 5. Формы выделений вольфрамита: а – сросток вольфрамита (Wt) в зальбанде кварцевой жилы с мусковитом (Ms); б – кристаллы вольфрамита с каймами шеелита (Sch); в – включения пирита (Py) в вольфрамите.

Рис. а – фото образца; б – аншлиф, отраженный свет; в – полированный брикет тяжелого концентрата, отраженный свет.

Fig. 5. Morphology of wolframite aggregates: а – aggregate of wolframite (Wt) and muscovite (Ms) in selvage of quartz vein; б – wolframite crystals with scheelite (Sch) rims; в – pyrite (Py) inclusions in wolframite.

Fig. а – macrophoto of the sample; б – polished section, reflected light; в – polished briquette of heavy concentrate, reflected light.

Таблица 1

## Минеральный состав руд Пороховского и Юго-Коневского месторождения

Table 1

## Mineral composition of ores of the Porokhovskoe and Yugo-Konevskoe deposits

| Участок/тип руды*            | Жильные (по данным КРФА групповых проб, мас. %) |  | Рудные (по данным изучения концентратов в оптическом и электронном микроскопе, об. % в концентрате) |                                 |  |
|------------------------------|---|--|---|---------------------------------|--|
|                              | Главные   | Второстепенные                                       | Главные   | Второстепенные                  | Редкие   |
| Центральный/первичные        | кварц 46, мусковит 41                           | хлорит 5, пирит 4, флюорит 3, карбонат 3             | пирит 35, вольфрамит 31, шеелит 9   | сфалерит 4, циркон 3, флюорит 1 | молибденит, сфалерит, халькопирит, ильменит, рутил, пирротин, айкинит, халькозин |
| Центральный / полуокисленные | мусковит 56, кварц 24                           | хлорит 6, флюорит 5, амфибол 4, пирит 3, карбонат 2  | пирит 34, вольфрамит 33, шеелит 11  | флюорит 3, циркон 1             | сфалерит, халькопирит, пирротин, рутил, колумбит                                 |
| Центральный / окисленные     | кварц 85, мусковит 15                           | —  | вольфрамит 64, шеелит 10, пирит 2   | циркон 10, гетит 10             | халькопирит, оксиды Mn   |
| Северный/первичные           | мусковит 61, кварц 28                           | флюорит 5, пирит 2, амфибол 2, хлорит 1, карбонат 1, | пирит 43, вольфрамит 20, шеелит 12  | циркон 3, сфалерит 1, флюорит 1 | уранинит, титанит, молибденит, сульфиды Bi, галенит, гетит                       |
| Северный / полуокисленные    | мусковит 47, кварц 38                           | амфибол 5, флюорит 4, хлорит 4, пирит 3, карбонат 1  | пирит 27, вольфрамит 12, шеелит 5   | сфалерит 3, циркон 1, апатит 1  | висмутин, гетит  |
| Северный / окисленные        | кварц 77, мусковит 18                           | хлорит 2, пирит 1                                    | вольфрамит 63, шеелит 19, пирит 3   | циркон 4, апатит 1              | висмутин, бромаргитит, пироморфит, галенит, оксиды Bi                            |
| Юго-Коневское/первичные      | нет данных                                      | нет данных   | пирит 35, вольфрамит 9, шеелит 8  | флюорит 2, циркон 1             | гетит, гидроксиды Mn, магнетит, малахит  |
| Юго-Коневское/окисленные     | кварц 98  | мусковит 1, кальцит 1                                | вольфрамит 34, шеелит 12, пирит 2   | гетит 5, флюорит 1, циркон 1    | гидроксиды Mn, оксиды Bi, русселит, бурсаит, штольцит                            |

Примечание. \* – тип руды согласно визуальной оценке.

Note. \* – ore type according to visual estimation.

Химический состав практически всех изученных неизмененных вольфрамитов как Пороховского, так и Юго-Коневского месторождений соответствует гюбнериту с содержаниями FeO от 0.57 до 11.61 мас. % до (табл. 2). Для Северного участка характерны более железистые разновидности с большим диапазоном колебаний состава (рис. 6), а в трех анализах соотношение гюбнерита к фербериту близко к 1:1 (обр. 2021/152.5 м, ан. 20–22 в табл. 2). Намечается тенденция увеличения железистости вольфрамитов с увеличением глубины от-

бора образцов на Северном участке (табл. 2). Точки состава вольфрамитов Центрального участка, независимо от степени окисления руд, образуют узкое поле, в которое попадают и вольфрамиты из окисленных и часть анализов из первичных руд Северного участка, а также вольфрамит Юго-Коневского месторождения.

Содержания примесей в вольфрамите, определенные в монофракциях, значительно варьируют (рис. 7, электронное приложение 1). Форма графитов концентраций в вольфрамите из первичных

Таблица 2

Химический состав вольфрамита Пороховского и Юго-Коневского месторождений (мас. %)

Table 2

Chemical composition of wolframite of the Porokhovskoe and Yugo-Konevskoe deposits (wt. %)

| № обр.                                | MnO   | FeO   | WO <sub>3</sub> | Сумма  | Формула   |
|---------------------------------------|-------|-------|-----------------|--------|---|
| Северный участок, первичные руды      |       |       |                 |        |   |
| 2041a/93                              | 22.07 | 0.89  | 77.04           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 21.92 | 0.92  | 77.16           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 21.73 | 1.04  | 77.12           | 99.89  | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 21.94 | 0.70  | 77.36           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 21.96 | 1.09  | 76.95           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.05</sub> ) <sub>0.99</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 2041a/126.5                           | 21.87 | 1.06  | 77.08           | 100.01 | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 22.14 | 0.94  | 76.92           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|                                       | 21.43 | 1.64  | 76.93           | 100.00 | (Mn <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.07</sub> ) <sub>0.99</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 21.83 | 1.08  | 77.09           | 100.00 | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.05</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 21.65 | 1.57  | 76.78           | 100.00 | (Mn <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.07</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|                                       | 22.14 | 0.89  | 76.97           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.99</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 2022/135.6                            | 16.08 | 6.62  | 77.30           | 100.00 | (Mn <sub>0.69</sub> Fe <sub>0.28</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 2022/139.6                            | 20.48 | 2.38  | 77.86           | 100.72 | (Mn <sub>0.87</sub> Fe <sub>0.1</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub>  |
| 2021/145.9                            | 21.74 | 1.43  | 76.83           | 100.00 | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.06</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|                                       | 19.99 | 2.69  | 77.32           | 100.00 | (Mn <sub>0.85</sub> Fe <sub>0.11</sub> ) <sub>0.96</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 16.16 | 6.72  | 77.13           | 100.01 | (Mn <sub>0.69</sub> Fe <sub>0.28</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 18.55 | 3.95  | 77.51           | 100.01 | (Mn <sub>0.79</sub> Fe <sub>0.17</sub> ) <sub>0.96</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 18.09 | 4.90  | 77.01           | 100.00 | (Mn <sub>0.77</sub> Fe <sub>0.21</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 2021/152.5                            | 17.12 | 5.94  | 76.94           | 100.00 | (Mn <sub>0.73</sub> Fe <sub>0.25</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 10.68 | 12.10 | 77.21           | 99.99  | (Mn <sub>0.51</sub> Fe <sub>0.46</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 11.97 | 11.11 | 76.93           | 100.01 | (Mn <sub>0.51</sub> Fe <sub>0.47</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 11.54 | 11.61 | 76.85           | 100.00 | (Mn <sub>0.49</sub> Fe <sub>0.49</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 12.79 | 10.29 | 76.92           | 100.00 | (Mn <sub>0.55</sub> Fe <sub>0.43</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 15.00 | 8.19  | 76.81           | 100.00 | (Mn <sub>0.64</sub> Fe <sub>0.35</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
| 2021/156.8                            | 21.66 | 1.72  | 77.32           | 100.70 | (Mn <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.07</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|                                       | 14.43 | 8.79  | 77.49           | 100.71 | (Mn <sub>0.61</sub> Fe <sub>0.37</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 20.91 | 1.89  | 77.42           | 100.22 | (Mn <sub>0.89</sub> Fe <sub>0.08</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 17.13 | 5.79  | 77.20           | 100.12 | (Mn <sub>0.73</sub> Fe <sub>0.24</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 2021/160.6                            | 15.58 | 7.45  | 76.97           | 100.00 | (Mn <sub>0.67</sub> Fe <sub>0.31</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Проба 8                               | 17.68 | 5.32  | 77.00           | 100.00 | (Mn <sub>0.77</sub> Fe <sub>0.23</sub> ) <sub>1</sub> WO <sub>4</sub>                     |
|                                       | 21.35 | 0.86  | 77.11           | 99.32  | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Проба 10                              | 21.42 | 0.80  | 77.67           | 99.89  | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.96</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Проба 13                              | 21.71 | 0.80  | 77.49           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Северный участок, полуокисленные руды |       |       |                 |        |   |
| Проба 7                               | 21.52 | 0.89  | 77.59           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|                                       | 21.15 | 1.35  | 77.50           | 100.00 | (Mn <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.06</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |



Окончание таблицы 2

| № обр.                                       | MnO   | FeO  | WO <sub>3</sub> | Сумма  | Формула   |
|--|-------|------|-----------------|--------|---|
| Северный участок, окисленные руды            |       |      |                 |        |   |
| Проба 6                                      | 21.35 | 0.70 | 77.95           | 100.00 | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.96</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 21.53 | 0.95 | 77.52           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 21.83 | 0.65 | 77.52           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 21.37 | 1.09 | 77.55           | 100.01 | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.05</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Центральный участок, первичные руды          |       |      |                 |        |   |
| 1023/124                                     | 22.28 | 0.43 | 77.29           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.35 | 0.90 | 76.75           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|  | 22.27 | 0.71 | 77.03           | 100.01 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.28 | 0.69 | 77.03           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 21.83 | 1.14 | 77.04           | 100.01 | (Mn <sub>0.93</sub> Fe <sub>0.05</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.11 | 1.01 | 76.88           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> WO <sub>4</sub>                  |
| 1002/84                                      | 22.03 | 0.87 | 77.10           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.22 | 0.83 | 76.95           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.09 | 0.81 | 77.11           | 100.01 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.44 | 0.81 | 76.75           | 100.00 | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|  | 22.15 | 0.67 | 77.18           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Проба 2                                      | 22.83 | 1.04 | 76.14           | 100.00 | (Mn <sub>0.99</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>1.03</sub> W <sub>0.99</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.56 | 1.08 | 76.36           | 99.65  | (Mn <sub>0.98</sub> Fe <sub>0.05</sub> ) <sub>1.03</sub> W <sub>0.99</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.26 | 0.82 | 76.91           | 100.00 | (Mn <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>1.1</sub> WO <sub>4</sub>                   |
| Центральный участок, полуокисленные руды     |       |      |                 |        |   |
| Проба 3                                      | 21.98 | 0.90 | 77.12           | 100.00 | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>1</sub> WO <sub>4</sub>                     |
|  | 22.24 | 0.85 | 76.91           | 100.01 | (Mn <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>1.01</sub> WO <sub>4</sub>                  |
| Центральный участок, окисленные руды         |       |      |                 |        |   |
| ТР1  | 22.40 | 0.81 | 76.79           | 100.00 | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|  | 22.67 | 0.74 | 76.60           | 100.01 | (Mn <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>1</sub> WO <sub>4</sub>                     |
|  | 22.46 | 0.76 | 76.78           | 100.00 | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|  | 22.54 | 0.84 | 76.62           | 100.00 | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>1</sub> WO <sub>4</sub>                     |
|  | 22.51 | 0.78 | 76.70           | 99.99  | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|  | 22.31 | 0.76 | 76.92           | 99.99  | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.38 | 0.69 | 76.93           | 100.00 | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 22.62 | 0.72 | 76.66           | 100.00 | (Mn <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>1</sub> WO <sub>4</sub>                     |
|  | 22.63 | 0.57 | 76.80           | 100.00 | (Mn <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
|  | 22.50 | 0.82 | 76.68           | 100.00 | (Mn <sub>0.96</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
| Проба 1                                      | 21.71 | 0.70 | 77.59           | 99.99  | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 21.88 | 0.64 | 77.48           | 100.00 | (Mn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Юго-Коневское месторождение, первичные руды  |       |      |                 |        |   |
| Проба 4                                      | 22.00 | 1.05 | 76.94           | 100.00 | (Mn <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| Юго-Коневское месторождение, окисленные руды |       |      |                 |        |   |
| Проба 5                                      | 20.50 | 1.83 | 77.67           | 99.99  | (Mn <sub>0.88</sub> Fe <sub>0.08</sub> ) <sub>0.96</sub> W <sub>1.02</sub> O <sub>4</sub> |
|  | 20.98 | 0.96 | 78.06           | 100.00 | (Mn <sub>0.9</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>0.94</sub> W <sub>1.02</sub> O <sub>4</sub>  |
|  | 20.40 | 1.39 | 77.86           | 100.00 | (Mn <sub>0.88</sub> Fe <sub>0.06</sub> ) <sub>0.94</sub> W <sub>1.02</sub> O <sub>4</sub> |

Примечание. Здесь и в табл. 3, формулы рассчитывались на четыре атома О.

Note. Here and in Table 3, the formulas were recalculated to four O atoms.

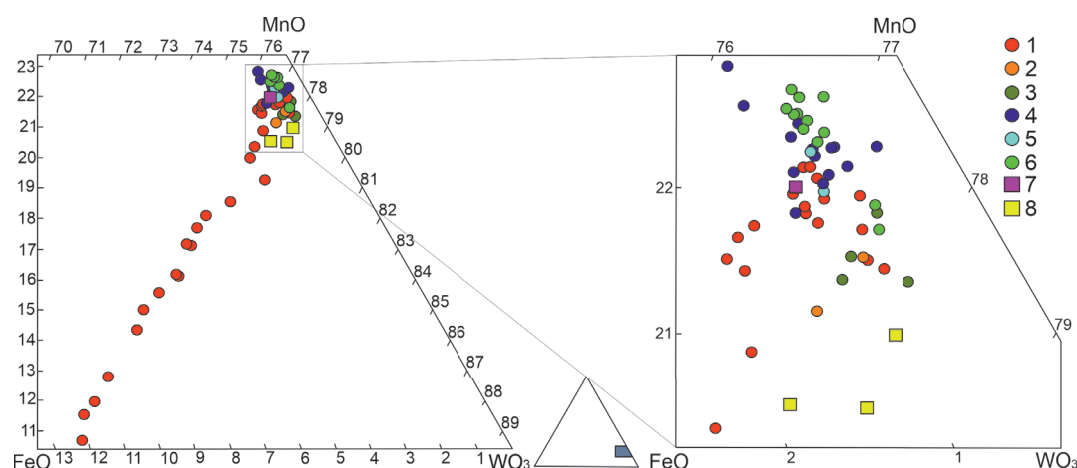


Рис. 6. Фрагмент треугольной диаграммы составов вольфрамита, мас. %.

1–3 – Северный участок Пороховского месторождения: 1 – первичные руды, 2 – полуокисленные руды, 3 – окисленные руды; 4–6 – Центральный участок Пороховского месторождения: 4 – первичные руды, 5 – полуокисленные руды, 6 – окисленные руды; 7, 8 – Юго-Коневское месторождение: 7 – первичные руды, 8 – окисленные руды.

Fig. 6. Fragment of a triangular diagram of wolframite composition, wt. %.

1–3 – Northern area of the Porokhovskoe deposit: 1 – primary ores, 2 – semioxidized ores, 3 – oxidized ores; 4–6 – Central area of the Porokhovskoe deposit: 4 – primary ores, 5 – semioxidized ores, 6 – oxidized ores; 7, 8 – Yugo-Konevskoe deposit: 7 – primary ores, 8 – oxidized ores.

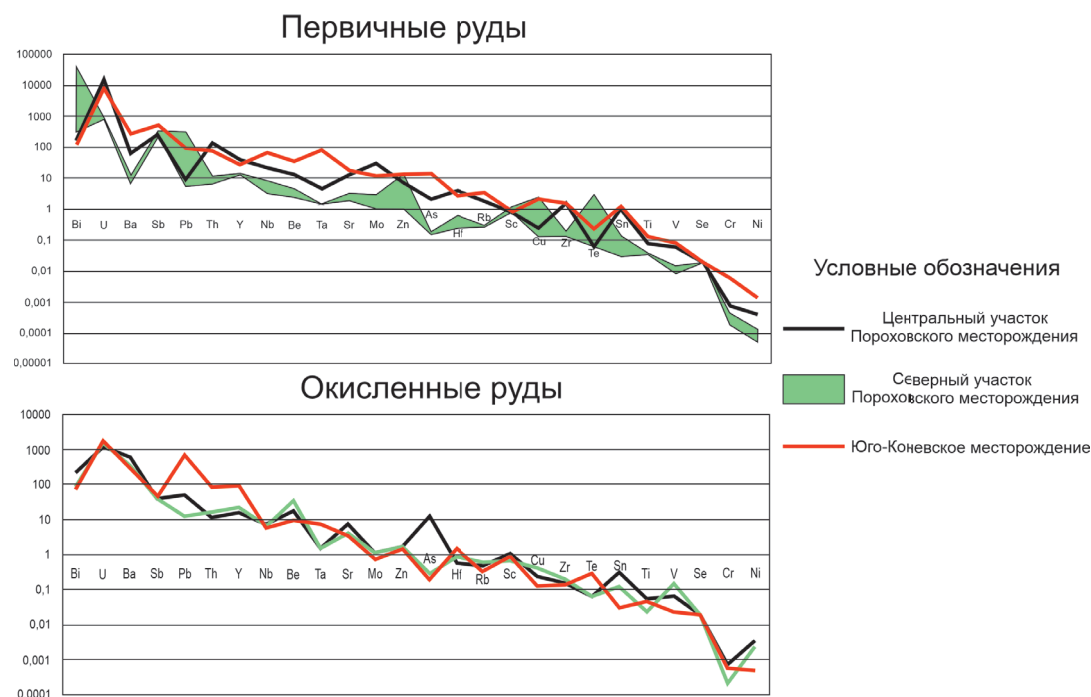


Рис. 7. Спайдер-диаграммы для вольфрамита с различных участков исследованных месторождений.

Здесь и на рис. 8, содержания элементов нормированы на хондрит по (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 7. Spider diagrams for wolframite from various areas of the studied deposits.

Here and in Fig. 8, the contents of elements are normalized to chondrite after (McDonough, Sun, 1995).

и окисленных руд, в целом, сходна. Для всех проанализированных проб вольфрамита, отобранных как из первичных, так и из визуально окисленных руд, характерны повышенные концентрации халькофильных элементов (Zn, Pb, Cu, Bi, Sb), при этом содержания Ni, As, Se невелики, так же, как и со-

держания Ta, Nb, Sn, Be, характерных для месторождений грейзеновой формации. Поскольку монофракции были загрязнены включениями и тонкими сростками с другими минералами, повышенные концентрации халькофилов, вероятно, связаны с механическими примесями.

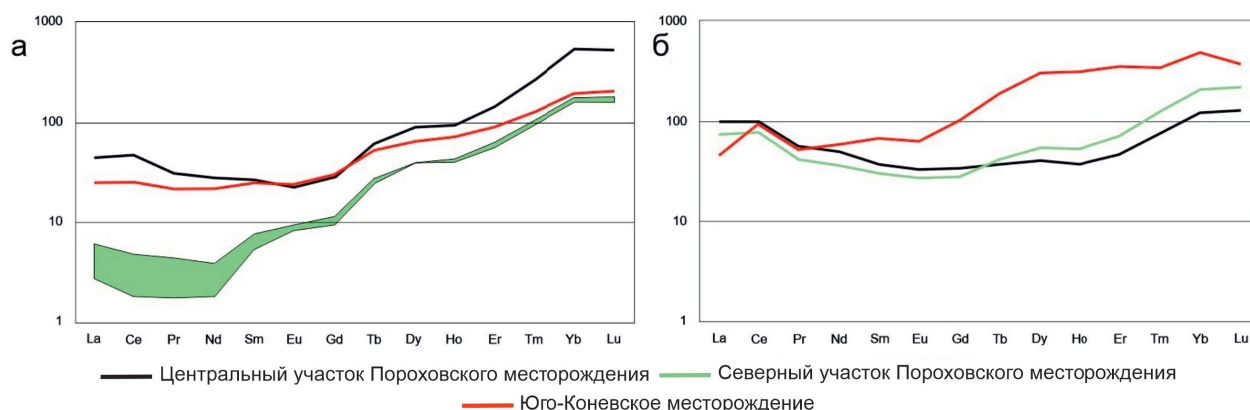


Рис. 8. Распределение РЗЭ в вольфрамите первичных (а) и окисленных (б) руд.

Fig. 8. REE pattern of wolframite from primary (a) and oxidized (b) ores.

Вольфрамит из первичных руд Северного участка содержит меньше примесей, за исключением Bi, Cu, Pb и Te, чем вольфрамит Центрального участка и Юго-Коневского месторождения (рис. 7). Концентрации примесей в вольфрамите окисленных руд разных участков близки.

Спектры РЗЭ в вольфрамитах первичных руд всех изученных участков характеризуются значительным накоплением тяжелых РЗЭ, по сравнению с легкими (рис. 8а). Европиевая и цериевая аномалии не проявлены. Вольфрамиты из окисленных руд обогащены РЗЭ, в особенности легкими, по сравнению с неизмененными (рис. 8б). Обогащение тяжелыми РЗЭ проявлено на Юго-Коневском месторождении, в то время как на Пороховском эта тенденция заметно слабее.

Шеелит на Пороховском месторождении встречается в виде октаэдрических кристаллов размером до 1 см (рис. 9а), но чаще всего – в виде гипидиоморфных зерен, обрастающих кристаллы вольфрамита (рис. 9б), тонкозернистых агрегатов ксеноморфных зерен, замещающих вольфрамит (рис. 9в), и тонких просечек в жилах, иногда – в ассоциации с пиритом (рис. 9г). Шеелит встречается как в кварцевых, карбонат-кварцевых жилах с мусковитом и флюоритом, так и в скарноидах, где он может ассоциировать с хлоритом, эпидотом, флюоритом, молибденитом. В шеелите Пороховского месторождения встречены включения флюорита, кальцита, колумбита. Химический состав шеелита соответствует стехиометрической формуле. Примеси, содержание которых выше предела обнаружения СЭМ с ЭДА, не выявлены (табл. 3).

*Минеральные формы вольфрама в окисленных рудах.* Вторичные вольфрамосодержащие минералы в окисленных и полуокисленных рудах представлены, преимущественно оксигидроксидами Mn и Fe, как правило, замещающими вольфрамит и, реже, сульфиды, а также образующими свободные зерна в тяжелом концентрате.

Оксигидроксиды Mn и Fe развиваются по периферии и трещинам спайности кристаллов вольфрамита (рис. 10). По составу вторичные минералы подразделяются на оксигидроксиды Mn (рис. 10а–в), Fe и Mn (рис. 10г). Содержание  $WO_3$  в них варьирует от 0.60 до 18.75 мас. % (табл. 4), достигая 43.68 мас. % в Fe-W оксигидроксидах (табл. 4, ан. 16).

В тяжелом концентрате часто присутствуют колломорфные агрегаты (рис. 11а), частичные и полные псевдоморфозы оксигидроксидами по сульфидам (рис. 11б) и гюбнериту (рис. 11в). Для псевдоморфоз по сульфидам характерен железистый («лимонитовый») состав, по гюбнериту – марганцовистый («вад»). Содержания вольфрама в колломорфных агрегатах лимонита достигают 0.94 мас. %  $WO_3$ , в псевдоморфозах лимонита по сульфидам максимальное измеренное содержание  $WO_3$  составило 3.11 мас. % (табл. 4).

Помимо основных элементов в составе оксигидроксидами всегда наблюдается примесь Са. Для агрегатов, обогащенных железом, характерной примесью являются Al, Si, P. Повышенные содержания Ba характерны для агрегатов с преобладанием Mn (табл. 4). Оксигидроксиды Юго-Коневского месторождения отличаются высокими содержаниями  $PbO$ , достигающими 22.09 мас. %. Все полученные анализы характеризуются дефицитной сум-



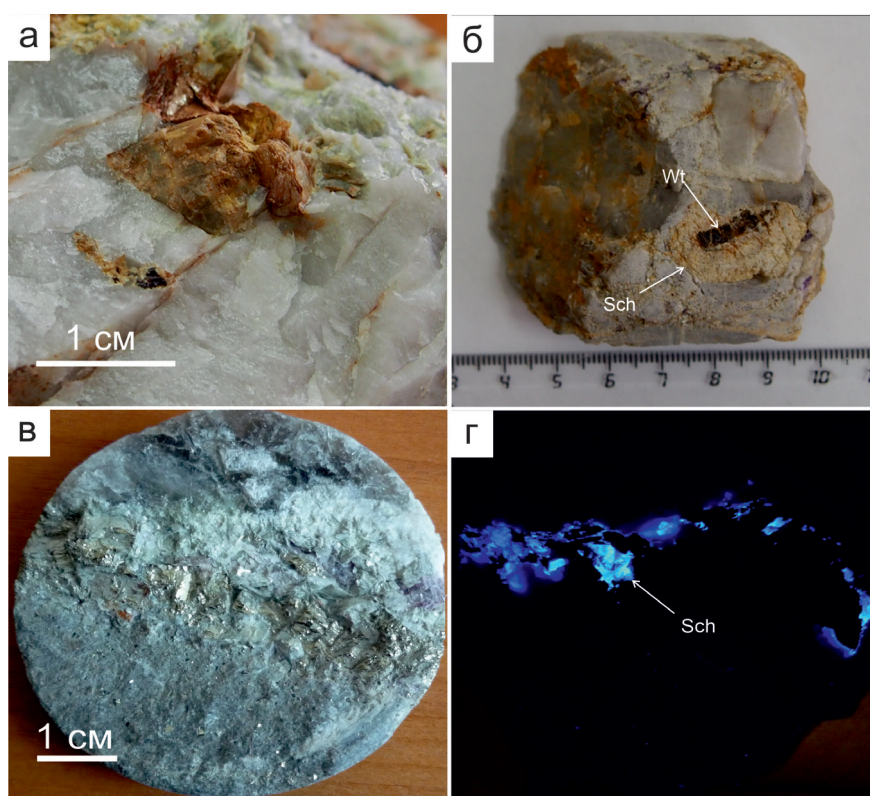


Рис. 9. Формы выделений шеелита Пороховского месторождения: а – дипирамидальный кристалл шеелита в кварце; б – обрастание вольфрамитом шеелитом; в, г – прожилковые выделения шеелита в агрегате пирита из кварцевой жилы.

Рис. а–г – фото образцов; г – фото в ультрафиолетовом свете.

Fig. 9. Morphology of scheelite aggregates of the Porokhovskoe deposit: а – dipyramidal scheelite crystal in quartz; б – wolframite with a scheelite rim; в, г – veined scheelite in pyrite aggregate of quartz vein.

Figs. а–г – macrophotos of samples, г – photos in ultraviolet light.

Таблица 3

**Химический состав шеелита Пороховского месторождения (мас. %)**

Table 3

**Chemical composition of scheelite of the Porokhovskoy deposit (wt. %)**

| № п/п | № обр.     | № лаб. | CaO   | WO <sub>3</sub> | Сумма  | Формула   |
|-------|------------|--------|-------|-----------------|--------|---|
| 1     | 2021/156.8 | 21325b | 18.72 | 81.60           | 100.32 | Ca <sub>0.96</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 2     | 2022/139.6 | 22766a | 18.64 | 81.36           | 100.00 | Ca <sub>0.96</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 3     | 2022/135.6 | 22764j | 19.02 | 80.98           | 100.00 | Ca <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 4     | 2021/160.6 | 22763b | 18.86 | 81.14           | 100.00 | Ca <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 5     | 2021/149.6 | 22767a | 19.22 | 80.78           | 100.00 | Ca <sub>0.99</sub> WO <sub>4</sub>                  |
| 6     | 2021/141.3 | 22765e | 18.82 | 81.18           | 100.00 | Ca <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 7     | проба 1    | 22804g | 19.21 | 81.35           | 100.56 | Ca <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 8     | проба 2    | 22816h | 19.01 | 80.99           | 100.00 | Ca <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 9     | проба 3    | 22815a | 19.45 | 80.55           | 100.00 | Ca <sub>1.00</sub> W <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> |
| 10    | проба 5    | 22815b | 18.72 | 80.95           | 99.67  | Ca <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 11    | проба 7    | 22817b | 19.13 | 80.87           | 100.00 | Ca <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 12    | проба 9    | 22841a | 19.28 | 81.52           | 100.80 | Ca <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |
| 13    | проба 10   | 22844f | 19.09 | 81.12           | 100.21 | Ca <sub>0.98</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> |

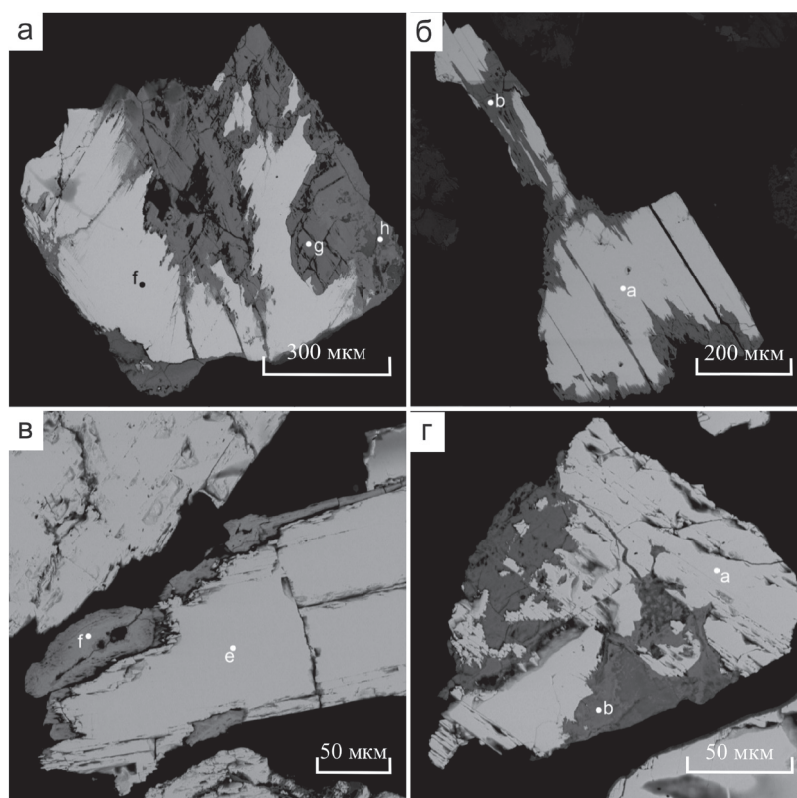


Рис. 10. Замещение гюбнерита (светлое) вторичными оксигидроксидами Mn (а-в) и Fe-Mn (г).

Химический состав оксигидроксидов приведен в табл. 4, точка (№ ан.): а – г (10), h (11), б – б (12), в – f (13), г – b (5). Здесь и на рис. 11 и 12 – BSE фото.

Fig. 10. Replacement of hübnerite (light) by secondary oxyhydroxides Mn (a–b) and Fe-Mn (g).

Chemical composition oxyhydroxides is given in Table 4, point (no. an.): a – g (10), h (11), б – b (12), в – f (13), г – b (5). Here and in Figs. 11 and 12 – BSE image.

мой, свидетельствующей о присутствии в агрегатах молекулярной и/или гидроксильной воды. Анализы не рассчитываются на стехиометрические формулы известных минералов и, по всей видимости, отражают минеральные смеси.

Таким образом, максимальные количества W концентрируют оксигидроксиды, непосредственно замещающие вольфрамит.

В окисленных рудах также установлены штольцит  $\text{PbWO}_4$  и единичные выделения вольфрамата Bi (русселита?). Штольцит наблюдается в тяжелых концентратах руд Юго-Коневского месторождения, где образует сростки ксеноморфных зерен со сложными извилистыми границами с шеелитом и окисленным гюбнеритом (рис. 12, табл. 5). В этих сростках также присутствуют единичные зерна уран- и свинецсодержащих минералов W (рис. 12б). Единичное ксеноморфное зерно русселита (?) обнаружено в оксигидроксидах Fe, замещающих точно не определенный халькогенид Bi.

## Обсуждение результатов

Согласно литературным данным (Золоев и др., 1995; 2004) формирование всех месторождений Коневско-Карасьевского рудного узла связано со становлением гранитных массивов юго-коневского комплекса, в частности, с постмагматическими гидротермальными процессами. Предполагается, что минералогические особенности месторождений обусловлены различной удаленностью от материнского массива, а также локальными структурными условиями и вмещающими породами. Нашими исследованиями установлено, что отличия в минеральном составе жильных руд Пороховского и Юго-Коневского месторождения незначительны и проявлены, преимущественно, в вариациях количественных соотношений между минералами.

Вольфрамит образует идиоморфные удлиненно-уплощенные кристаллы размером до первых сантиметров. Кристаллы в центральных частях жил располагаются обособленно, в призальбандо-

Таблица 4

Химический состав оксигидроксидов Fe и Mn  
Пороховского (1–12) и Юго-Коневского (13–16) месторождений

Table 4

Chemical composition of Fe and Mn oxyhydroxides of the  
Porokhovskoe (1–12) and Yugo-Konevskoe (13–16) deposits

| № п/п | № рис/ точки | FeO   | MnO   | WO <sub>3</sub> | CaO  | BaO  | MgO  | PbO   | K <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Сумма |
|-------|--------------|-------|-------|-----------------|------|------|------|-------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|
| 1     | 11б/ф        | 63.03 | –     | 3.11            | 0.20 | –    | –    | –     | –                | 5.31                           | 2.01             | 0.82                          | 74.48 |
| 2     | б/р          | 58.36 | –     | 0.71            | 0.66 | –    | –    | –     | –                | 4.20                           | 2.88             | 4.08                          | 70.89 |
| 3     | 11а/а        | 44.39 | –     | 0.94            | 0.73 | –    | –    | –     | –                | 3.60                           | 2.26             | 3.01                          | 55.29 |
| 4     | 11а/б        | 52.53 | –     | 1.03            | 0.77 | –    | 0.37 | –     | –                | 5.04                           | 4.92             | 3.93                          | 68.94 |
| 5     | 10г/б        | 47.73 | 5.20  | 19.50           | 1.31 | 0.54 | –    | –     | –                | 1.10                           | 3.00             | –                             | 78.38 |
| 6     | б/р          | 36.24 | 15.32 | 18.75           | 1.83 | 1.57 | –    | –     | –                | 1.21                           | –                | –                             | 74.74 |
| 7     | б/р          | 34.54 | 17.17 | 15.68           | 2.56 | 1.68 | –    | –     | –                | 0.85                           | 1.31             | 0.70                          | 74.49 |
| 8     | 11в/д        | –     | 51.07 | 2.72            | 2.33 | 4.38 | –    | 3.07  | 0.25             | 3.50                           | –                | –                             | 68.02 |
| 9     | 11в/е        | 5.12  | 39.91 | 15.18           | 3.56 | 3.82 | 0.28 | 1.34  | 0.21             | 1.57                           | 0.30             | –                             | 71.29 |
| 10    | 10а/г        | 1.85  | 42.46 | 12.97           | 2.73 | 7.29 | –    | –     | 0.21             | 3.77                           | 2.67             | –                             | 73.95 |
| 11    | 10а/х        | 1.73  | 46.41 | 12.36           | 4.39 | 4.42 | –    | –     | –                | –                              | –                | –                             | 69.31 |
| 12    | 10б/б        | 5.59  | 41.96 | 13.02           | 4.71 | 3.34 | 1.10 | 0.34  | 0.43             | –                              | –                | –                             | 70.50 |
| 13    | 10в/ф        | 1.02  | 40.08 | 11.17           | 1.23 | 1.72 | –    | 19.89 | –                | –                              | –                | –                             | 75.11 |
| 14    | 12а/д        | 6.13  | 29.18 | 18.21           | 1.53 | 1.42 | –    | 16.61 | –                | –                              | –                | –                             | 73.08 |
| 15    | б/р          | 1.47  | 38.88 | 9.35            | 0.39 | 1.09 | –    | 22.09 | –                | –                              | –                | –                             | 73.27 |
| 16    | б/р          | 37.47 | –     | 43.68           | 0.41 | –    | –    | 0.70  | –                | –                              | –                | 1.41                          | 83.67 |

Примечание. Оксигидроксиды Fe (1–5), Fe и Mn (6, 7), Mn (8–15) и Fe и W (16); б/р – без рисунка. Здесь и в табл. 5, прочерк – ниже предела обнаружения, дополнительно анализы содержат (мас. %): ан. 3 и 4 – 0.36 и 0.35 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, соответственно; ан. 8 – 0.70 NiO и 0.64 Cu<sub>2</sub>O; ан. 10 – 0.32 SO<sub>2</sub> и 0.66 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; ан. 14 – 0.80 Cu<sub>2</sub>O.

Note. Oxyhydroxides of Fe (1–5), Fe and Mn (6, 7), Mn (8–15) and Fe and W (16); б/р – without figure. Here and in Table 5, dash – below detection limit, the analyses also contain (wt. %): an. 3 and 4 – 0.36 and 0.35 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectively; an. 8 – 0.70 NiO and 0.64 Cu<sub>2</sub>O; an. 10 – 0.32 SO<sub>2</sub> and 0.66 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; an. 14 – 0.8 Cu<sub>2</sub>O.

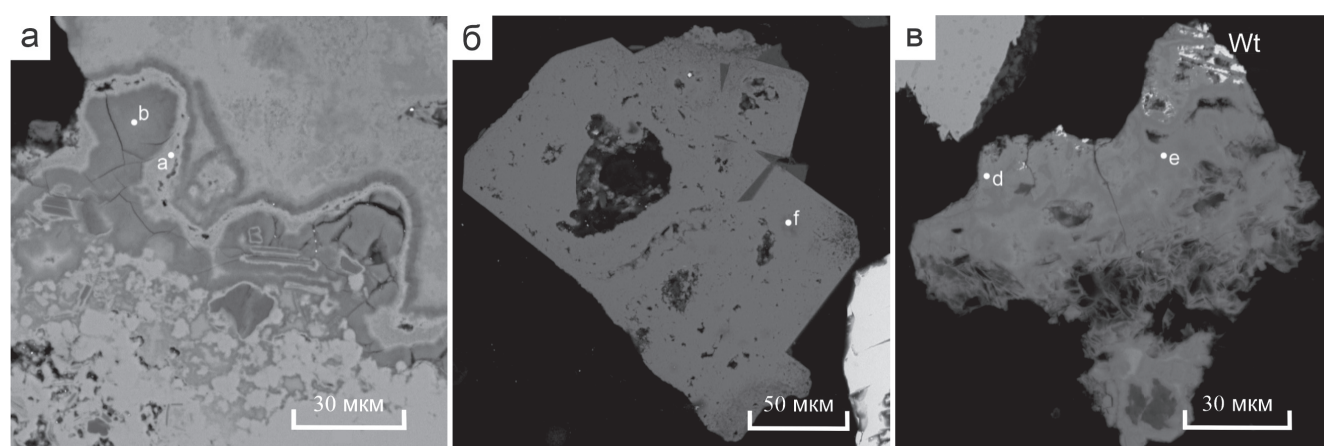


Рис. 11. Свободные частицы оксигидроксидов в тяжелом концентрате: а – коломорфные агрегаты оксигидроксидов Fe (табл. 4, ан. 3 – а, ан. 4 – б); б – полная псевдоморфоза лимонита (табл. 4, ан. 1 – ф) по пириту; в – «вад» (табл. 4, ан. 8 – д, ан. 9 – е) с реликтами гюбнерита.

Fig. 11. Free particles of oxyhydroxides in heavy concentrate: а – colloform aggregates of Fe oxyhydroxides (Table 4, an. 3 – а, an. 4 – б); б – complete pseudomorphosis of «limonite» (Table 4, an. 1 – f) by pyrite; в – «vad» (Table 4, an. 8 – d, an. 9 – e) with relics of hübnerite.



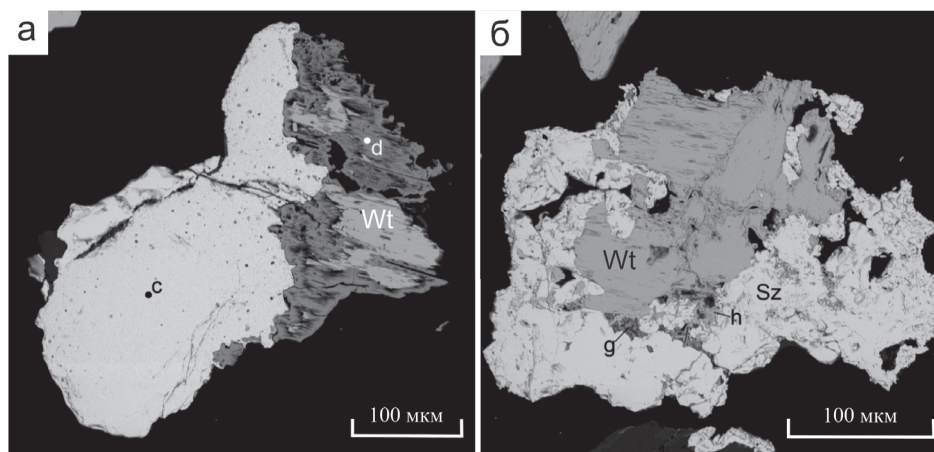


Рис. 12. Вторичные минералы вольфрама: а – сросток штольцита (точка с, ан. 2 в табл. 5) и оксигидроксидов Mn (d), замещающих гюбнерит (Wt); б – сросток урансодержащих фаз (точка g, ан. 4, точка h, ан. 5 в табл. 5) с гюбнеритом (Wt) и штольцитом (Sz).

Fig. 12. Secondary W minerals: a – intergrowth of stolzite (Sz) (Table 5, an. 2 – c) and Mn oxyhydroxides (d) after hübnerite; б – aggregate of U-bearing phases (Tables 5, an. 4 – g, an. 5 – h) with hübnerite and stolzite.

Таблица 5

Химический состав штольцита (1, 2), русселлита (3) и U-Pb содержащих вольфраматов (4, 5)

Table 5

Chemical composition of stolzite (1, 2), russellite (3) and U-Pb-bearing tungstates (4, 5)

| № ан. | WO <sub>3</sub> | PbO   | CaO  | FeO  | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | UO <sub>2</sub> | Формула   |
|-------|-----------------|-------|------|------|--------------------------------|-----------------|---|
| 1     | 52.52           | 47.48 | –    | –    | –                              | –               | Pb <sub>0.95</sub> W <sub>1.02</sub> O <sub>4</sub>                                       |
| 2     | 52.09           | 47.91 | –    | –    | –                              | –               | Pb <sub>0.97</sub> W <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub>                                       |
| 3     | 35.45           | –     | –    | 1.63 | 62.92                          | –               | (Bi <sub>0.91</sub> Fe <sub>0.15</sub> ) <sub>1.06</sub> W <sub>1.03</sub> O <sub>6</sub> |
| 4     | 47.20           | 23.30 | 0.49 | 6.89 | –                              | 3.54            | смесь минералов   |
| 5     | 38.68           | 17.39 | 0.61 | 7.21 | –                              | 5.07            |   |

Примечание. Формулы 1 и 2 рассчитывались на четыре атома О. Формула 3 рассчитывалась на шесть атомов О.  
Note. Formulas 1 and 2 were calculated to four O atoms. Formula 3 was calculated to six O atoms.

вой части нередко срастаясь между собой и с мусковитом. По периферии и по трещинам нередко происходит замещение вольфрамита шеелитом, а в окисленных рудах – оксигидроксидами Fe и Mn. В качестве включений присутствуют включения сульфидов (чаще всего пирита) и флюорита. Наличие включений отражается в химическом составе монофракций вольфрамита. Отсюда можно сделать вывод, что крупные кристаллы вольфрамита будут хорошо обогащаться гравиметрическими методами. Только в окисленных рудах будут наблюдаться потери вольфрамита из-за пленок вторичных минералов и склонности зерен к переизмельчению.

Ранее для месторождений Коневско-Карасевского рудного узла, было показано увеличение железистости вольфрамита по направлению с юга на север (Покровский, 1950). По нашим дан-

ным вольфрамит наиболее северного Юго-Коневского месторождения, практически не содержит Fe. Железистость вольфрамит Северного участка увеличивается с глубиной, однако, количество проанализированных зерен для разных участков недостаточно для того, чтобы делать выводы, и вопрос о зональности состава вольфрамита требует дальнейшего изучения.

Содержание элементов-примесей в вольфрамите как из первичных, так и из окисленных руд Центрального и Северного участков Пороховского и Юго-Коневского месторождений сходно. Поскольку были проанализированы монофракции, загрязненные включениями и вростками других минералов, состав микропримесей в какой-то мере отражает присутствие этих минералов. Сходство набора и содержаний элементов-примесей в воль-

фрамите разных участков и месторождений может служить подтверждением единства условий рудотложения.

Форма спайдер-диаграмм, характеризующих состав элементов-примесей вольфрамитов из окисленных руд, в целом, сходна с таковой для первичных руд, за исключением поведения РЗЭ. В вольфрамитовых из окисленных руд спектр выполаживается, при этом содержание легких РЗЭ значительно повышается. Особенно ярко эта тенденция проявлена для Северного участка Пороховского месторождения. Вероятно, эти особенности можно объяснить более высокой подвижностью легких РЗЭ в гипергенезе (Berger et al., 2014) и их сорбцией из гипергенных растворов оксигидроксидами  $Fe^{3+}$  (Ling, Liu, 2002), развивающимися по вольфрамитовому. Появление цериевого максимума на спектрах вольфрамитовых окисленных руд подтверждает участие окислительных гипергенных вод в процессах их преобразования.

Несмотря на то, что результаты фазового химического анализа показывают незначительное содержание W в окисленной («тунгститовой») форме, при планировании эксплуатации необходимо учитывать присутствие обогащенных W оксигидроксидами Fe и Mn. Их количество в верхней окисленной части месторождения может достигать 20 %. Наряду с реликтами первичных минералов, они могут содержать W. Развитие этих минералов по трещинам спайности вольфрамитов приводит к уменьшению механической прочности вольфрамитов при дроблении, кроме того, вторичные минералы образуют тонкие агрегаты, также имеющие склонность к переизмельчению. Эти минералогические особенности являются ключевыми для последующей разработки месторождения, так как потребуют различной системы пробоподготовки и обогащения (Петров, 1998).

### Заключение

Изучены штучные образцы и групповые пробы руд Пороховского и Юго-Коневского месторождений W грейзеновой формации на Южном Урале. На обоих месторождениях руды представлены в основном кварцевыми жилами с карбонатами и мусковитом. На Пороховском месторождении выделяется также не имеющий широкого распространения скарновый тип. Основными минеральными формами W первичных руд на обоих месторождениях яв-

ляются гюбнерит и шеелит. Второстепенные и акцессорные рудные минералы – пирит, халькопирит, молибденит, редкие – сфалерит, галенит, висмутин, айкинит, магнетит, рутил, ильменит, титанит, колумбит точно не диагностированные халькогениды и сульфосоли Bi. Жильная масса представлена, преимущественно, кварцем и мусковитом со второстепенными кальцитом, доломитом и флюоритом, редкими – хлоритом, амфиболом, эпидотом и акцессорными – цирконом, апатитом и уранинитом. Зональность в содержании ферберитового минерала в вольфрамитовых относительно Юго-Коневского массива гранитов не выявлена. Вольфрамит из Юго-Коневского месторождения, так же как и вольфрамит Центрального участка Пороховского месторождения, содержит незначительное количество Fe и близок к чистому гюбнериту. В рудах Северного участка Пороховского месторождения отмечена тенденция увеличения содержания Fe с глубиной.

В окисленных рудах, помимо сквозных жильных минералов, присутствуют оксигидроксиды Fe и Mn, малахит, пироморфит, бромаргирит. Вольфрам входит в состав оксигидроксидами Mn и Fe, замещающих вольфрамит, и в меньшей степени – в псевдоморфозы лимонита по сульфидам и самостоятельные агрегаты оксигидроксидами Fe и Mn. Установлены единичные выделения штольцита и русселлита (?). По результатам фазового химического анализа групповых проб установлено, что количество W в форме тунгстита в рудах, определенных визуально как окисленные, не превышает 0.5 %, что позволяет отнести все руды месторождения к первичному технологическому типу. Развитие вторичных минералов по трещинам спайности вольфрамитов приводит к уменьшению его прочности при дроблении. В связи с этим рудоподготовку окисленных и полукисленных руд, выделенных по данным визуальной оценки, следует проводить в разных режимах.

*Авторы благодарны ООО «Инфо Маркет Ресурс» за предоставленные материалы. Часть аналитических работ и обобщение результатов выполнено в рамках государственного задания ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, тема № 22031600292-6.*

### Литература

- Елохин В.А. (2009) Эндогенные молибденосодержащие редкометалльные формации Урала. *Литосфера*, (3), 47–63.
- Золотов К.К., Левин В.Я., Мормиль С.И., Шардакова Г.Ю. (2004) Минерогения и месторождения редких

металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург, Министерство природных ресурсов РФ, ГУПР по Свердловской области, Институт геологии и геохимии РАН, ОАО УГСЭ, 336 с.

**Золоев К.К., Левин В.Я., Рапопорт М.С.** (1995) Геолого-промышленные типы редкометальных месторождений Урала. *Известия ВУЗов. Горный журнал*, (10–12), 50–57.

**Касаткин А.В., Кузнецов А.М., Арзамасцев Н.А.** (2022) Рудные минералы Бурановского вольфрамового месторождения (Южный Урал). *Минералогия*, **8**(3), 23–46.

**Коровко А.В., Двоеглазов Д.А., Кузовков Г.Н. и др.** (2015) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXXII. Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 274 с.

**Левин В.Я., Савельева К.П., Баранцев В.В. и др.** (1993ф) Отчет по теме «Оценка и геолого-экономический анализ прогнозных ресурсов категорий Р3, Р2, Р1 основных твердых полезных ископаемых по состоянию на 1.01.1993 г. по территории деятельности Уралгеолкома», кн. 7 (тантал, редкие земли, вольфрам, молибден). Екатеринбург, 104 с.

**Морозова А.В.** (2006) Геохимия гранитов Среднего и Южного Урала, продуктивных на W-Mo и Be-W-Mo оруденение. *Литосфера*, (3), 171–177.

**Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Паленова Е.Е., Заботина М.В., Котляров В.А.** (2022) Коклановское W-Mo месторождение (Зауралье): минералого-геохимическая зональность. *Геология рудных месторождений*, **63**(3), 1–24.

**Петров С.В.** (1998) Типоморфные и технологические свойства вольфрамита. Автореферат дис. на соиск. степ. канд. геол.-минерал. наук. Санкт-Петербург, СПбГУ, 16 с.

**Покровский П.В.** (1950) Минеральный состав, структурные особенности и условия локализации Карасьевского, Пороховского, Пьянковского вольфрамовых месторождений Боевского-Юго-Коневской группы. *Труды Уральского ФАН СССР*, 15–24.

**Рундквист Д.В.** (1964) О структурах и закономерностях размещения кварц-редкометальных жильных месторождений Восточного склона Урала. *Геология рудных месторождений*, (2), 21–37.

**Солнцев Н.И., Леонтьева К.Д.** (1958) Фазовый анализ вольфрамовых руд и концентратов. *Сборник научных трудов ГИНЦВЕТМЕТА*, (14), 155–168.

**Филатов В.В.** (2005) Уральский вольфрам: история открытия. *Уральский геологический журнал*, (2), 139–154.

**Филиппова Н.А.** (1975) Фазовый анализ руд и продуктов их переработки. М., Химия, 280 с.

Фотометрическое определение вольфрама в горных породах в виде роданидного комплекса. Москва, ВИМС, 1968. 15 с.

**Berger A., Janots E., Gnos E., Frei R., Bernier F.** (2014) Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar. *Applied Geochemistry*, **41**, 218–228.

**Ling Q., Liu C.** (2002) Review of rare earths and fluid-rock interaction. *Rare Earths*, **20**, 570–578.

**McDonough W.F., Sun S.-S.** (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**(3–4), 223–253.

**Puchkov V.N.** (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: what, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, **85**, 4–29.

## References

**Berger A., Janots E., Gnos E., Frei R., Bernier F.** (2014) Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar. *Applied Geochemistry*, **41**, 218–228.

**Elokhin V.A.** (2009) [Endogenic Mo-bearing rare metal complexes of the Urals]. *Litosfera [Lithosphere]*, (3), 47–63. (in Russian)

**Filatov V.V.** (2005) [Uralian tungsten: the history of discovery]. *Uralsky geologicheskyy zhurnal [Urals Geological Journal]*, (2), 139–154. (in Russian)

**Filippova N.A.** (1975) [Phase analysis of ores and products of their processing]. Moscow, Khimiya, 280 p. (in Russian)

**Kasatkin A.V., Kuznetsov A.M., Arzamashev N.A.** (2022) [Ore minerals of the Buranovskoe tungsten deposit (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **8**(3), 23–46. (in Russian)

**Korovko A.V., Dvoeglazov D.A., Kuzovkov G.N. et al.** (2015) [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Second edition. Central Urals Series. Sheet O-41-XXXII. Explanatory note]. Moscow, VSEGEI, 274 p. (in Russian)

**Levin V.Ya., Savelyeva K.P., Barantsev V.V. et al.** (1993) [Unpublished report «Assessment and geological and economic analysis of forecast resources of categories Р3, Р2, Р1 of the main solid minerals as of 1.01.1993 on the territory of the activity of Uralgeolcom». Book 7 (tantalum, rare earths, tungsten, molybdenum)]. Yekaterinburg, 104 p. (in Russian)

**Ling Q., Liu C.** (2002) Review of rare earths and fluid-rock interaction. *Rare Earths*, **20**, 570–578.

**McDonough W.F., Sun S.-S.** (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**(3–4), 223–253.

**Morozova A.V.** (2006) [Geochemistry of granites of the Central and South Urals productive for W-Mo and Be-W-Mo mineralization]. *Litosfera [Lithosphere]*, (3), 171–177. (in Russian)

**Novoselov K.A., Belogub E.V., Polenova E.E., Zabotina M.V., Kotlyarov V.A.** (2022) The Koklan W-Mo deposit, Transuralia: mineralogical-geochemical zoning. *Geology of Ore Deposits*, **64**, 221–242.



**Petrov S.V.** (1998) [Typomorphic and technological properties of wolframite]. *Avtoreferat dissertatsii na soiskanie stepeny kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. [Abstract of Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences]*. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 16 p. (in Russian)

[Photometric analysis of W in rocks in form of a rhodanide complex]. Moscow, VIMS, 1968. 15 p. (in Russian)

**Pokrovsky P.V.** (1950) [Mineral composition, structural features and localization conditions of the Karas'evskoe, Porokhovskoe and P'yankovskoe W deposits of the Boevsky-Yugo-Konevskaya group]. *Trudy Ural'skogo FAN SSSR [Proceedings of the Urals Branch of the Academy of Sciences of the USSR]*, 15–24. (in Russian)

**Puchkov V.N.** (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: what, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, **85**, 4–29.

**Rundquist D.V.** (1964) [Structures and principle of occurrence of quartz-rare metal vein deposits in the eastern slope of the Urals]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (2), 21–37. (in Russian)

**Solntsev N.I., Leontieva K.D.** (1958) [Phase analysis of W ores and concentrates]. *Sbornik nauchnykh trudov GINTsVETMETa [Collection of Scientific Works of GINTsVETMET]*, **14**, 155–168. (in Russian)

**Zoloev K.K., Levin V.Ya., Mormil S.I., Shardakova G.Yu.** (2004) [Minerageny and deposits of rare metals, molybdenum, tungsten of the Urals]. Yekaterinburg, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, GUPR for the Sverdlovsk Region, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, UGSE, 336 p. (in Russian)

**Zoloev K.K., Levin V.Ya., Rapoport M.S.** (1995) [Geological and economic types of rare metal deposits of the Urals]. *Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal [News of Universities. Mining Journal]*, (10–12), 50–57. (in Russian)

УДК 549.0(470.5)

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-5

## ПРОЯВЛЕНИЕ КРУПНОГО ГРАНАТА ПОЛЯКОВ ЛОГ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

В.А. Попов<sup>1</sup>, М.А. Рассомахин<sup>1</sup>, С.В. Колисниченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru<sup>2</sup>Верхняя Санарка, Челябинская обл., Россия

Статья поступила в редакцию 14.04.2023 г., принята к печати 30.05.2023 г.

## POLYAKOV LOG COARSE GARNET OCCURRENCE IN THE SOUTH URALS

V.A. Popov<sup>1</sup>, M.A. Rassomakhin<sup>1</sup>, S.V. Kolisnichenko<sup>2</sup><sup>1</sup> South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,  
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru<sup>2</sup>Verkhnyaya Sanarka, Chelyabinsk district, Russia

Received 14.04.2023, accepted 30.05.2023

**Аннотация.** Онтогеническое моделирование происхождения крупного граната проявления Поляков лог на Южном Урале в мелкозернистой сланцевой толще привело авторов к представлению о его метасоматическом росте с замещением хлоритового агрегата. Мусковит, ильменит, эпидот, кварц и апатит остались незамещенными в исходной сланцевой ориентировке индивидов. Совместно с гранатом кристаллизовались акцессорные андезин, кобальтин, пентландит, пирротин и циркон. Возникновение крупных кристаллов граната предположительно связывается с флуктуациями пересыщения относительно граната в участках с обильным хлоритом в сланцах. Это позволяет ожидать наличие проявлений с крупным гранатом в других соседних участках сланцевой толщи.

**Ключевые слова:** Южный Урал, гранат, онтогенез.

**Abstract.** Ontogenic modeling of the origin of coarse garnet of the Polyakov log occurrence (South Urals) in a fine-grained schist sequence allowed the authors to conclude on its metasomatic growth with the replacement of chlorite aggregates. Muscovite, ilmenite, epidote, quartz and apatite remain preserved in the primary schist orientation of individuals. Accessory andesine, cobaltite, pentlandite, pyrrhotite and zircon crystallized together with garnet. The formation of coarse garnet crystals is probably related to fluctuations of supersaturation relative to garnet in areas of schists with abundant chlorite. This allows us to expect the presence of coarse garnet areas in adjacent parts of the schist sequence.

**Keywords:** South Urals, garnet, ontogeny.

**Для цитирования:** Попов В.А., Рассомахин М.А., Колисниченко С.В. Проявление крупного граната Поляков лог на Южном Урале. Минералогия, 9(2), 60–66. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-5

**For citation:** Popov V.A., Rassomakhin M.A., Kolisnichenko S.V. Polyakov log coarse garnet occurrence in the South Urals. Mineralogy, 9(2), 60–66. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-5.

## Введение

Поляков лог находится к востоку от Миасского пруда в полутора километрах к югу от старой части г. Миасса (рис. 1). Название дано по фамилии Полякова – бывшего владельца угодий в этом районе. Гранатовая копь (рис. 2) расположена примерно в 1 км на восток от берега пруда.

Первое упоминание о гранате в Поляковом логу приводится И.Н. Менге (1827), с. 45: «На берегах Миасского пруда, к западу от гнейсовых Ильменских гор, поразило внимание мое необыкновенно увеличенное сослоение пород, выходящих тонкими пластами на поверхность земли. На пространстве полверсты нашел я известковый камень, тальковый сланец с горьким шпатом, кварц, глинистый сланец, роговообманковый сланец, слюдяной сланец, как с большим количеством черной венисы, так и без оной, и все сии породы тянутся в виде пластов, имеющих то же вертикальное падение. Кристаллы венисы, в тех местах, где содержащий их слюдяной сланец разрушился, лежат в песке в великом множестве, представляя часто странные изменения своего первообразного вида. Сии додекаэдры встречаются здесь удлинненными, то по оси октаэдра, то ромбоэдра, переходя в первом случае в четырехсторонние, а во втором шестисторонние призмы; либо некоторые плоскости их бывают уничтожены через необыкновенное увеличивание других, так что происходят пирамидальные, ромбоэдрические и даже кубические виды».

В 1928 г. на Среднем и Южном Урале Институт прикладной минералогии и металлургии цветных металлов предпринял обследование гранатовых месторождений для выяснения возможности использования граната для нужд внутреннего рынка и экспорта (Мамуровский и др., 1929). Среди 33 объектов в кадастре оказался и Поляков лог, поскольку среди разных гранатов лучшими были альмандины, дающие высокоабразивные порошки. Однако специальные исследования объекта не проводились. Отмечено только, что кристаллы альмандина крупные и вмещающими породами являются хлоритовые сланцы.

В книге «Геологический разрез Урала...» (Коптев-Дворников и др., 1940) Г.А. Мирлин привел общее петрографическое описание палеозойской черносланцевой толщи, где упоминаются глинистые и филлитовые прослойки, представленные буроватыми и светло-коричневыми тонко-листоватыми породами. По плоскостям сланцеватости в них развит серицит. Филлиты представлены тонко-рассланцованными породами, часто сплошными, от серебристо-серой до зелено-черной окраски, обусловленной развитием серицита и хлорита. Филлиты состоят из кварца, серицита, биотита и хлорита. По-видимому, из этих сланцев добывали плитки для грифельных досок. Данные о сланцах собственно Полякова лога с гранатовым проявлением отсутствуют.

В настоящее время гранатовая копь Полякова лога периодически посещается минералогами-

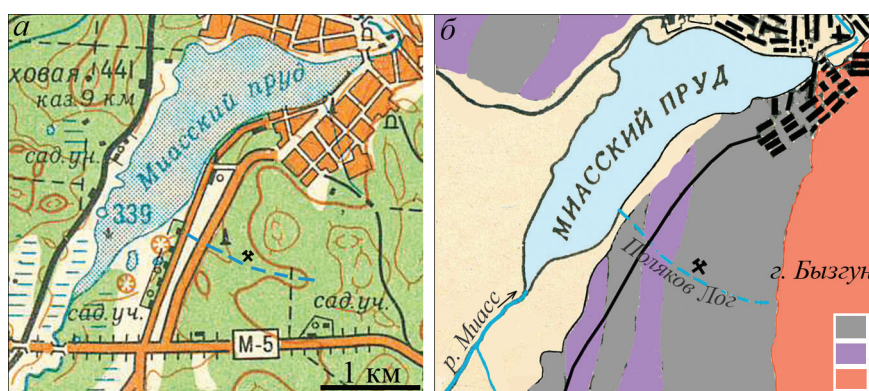


Рис. 1. Положение проявления граната Поляков Лог на географической (а) и схематической геологической карте (Коптев-Дворников и др., 1940) (б) в районе города Миасса.

1 – палеозойские черные сланцы; 2 – тела ультрамафитов; 3 – граниты и гранитогнейсы Чашковского массива.

Fig. 1. Position of the Polyakov log garnet occurrence on geographical (a) and schematic geological map (Koptev-Dvornikov et al., 1940) (b) in the area of Miass.

1 – Paleozoic black shale; 2 – ultramafic bodies; 3 – granite and granite gneiss of the Chashkovsky pluton.





Рис. 2. Вид копи в 2009 г. (слева) и строение слоистой сланцевой толщи (справа).  
Фото В.А. Попова.

Fig. 2. View of a mine in 2009 (left) and structure of the layered schist sequence (right).  
Photo by V.A. Popov.

любителями. Обращается внимание на крупность кристаллов граната среди мелкозернистых сланцев и асимметрию ромбододекаэдрических кристаллов. Иногда во влажных темных кристаллах граната угадывается внутреннее сияние при поворотах на солнце. Все это побудило нас к более детальному изучению этого объекта. Исследования включали оптические наблюдения и анализ минералов на сканирующем электронном микроскопе Vega-3 Tescan с ЭДС (аналитик М.А. Рассомахин). Состав минералов приведен в виде расчетных кристаллохимических формул, исходные анализы – в электронном приложении. Из трех десятков образцов сланцев с гранатом под биноклем отобрано пять наиболее информативных и из них приготовлены аншлифы для исследований.

### Петрография сланцев, вмещающих гранаты

Судя по данным И.Н. Менге и Г.А. Мирлина, «черные сланцы» района минералогически и структурно разнообразны и неоднородны. Нами изучены только те из них, которые непосредственно включают крупные кристаллы граната (рис. 3), с целью выяснить локальный онтогенез минерального агрегата.

В поперечном разрезе в сланце видны тонкозернистые слои коричневого цвета (с преобладанием хлорита), светло-серые слои (с преобладанием мусковита) и линзы с преобладанием кварца. В одном хлоритовом слое видны вкрапления черного биотита величиной 1–4 мм (рис. 3а). Грани кристаллов граната «рассекают» сложный пльчатый рисунок вмещающего сланца, но и сами несут сле-

ды позднего сдавливания, иногда с образованием небольших «отрывов» с кварцевым заполнением. По-видимому, при деформациях происходило вращение индивидов граната, но в нашей небольшой коллекции отсутствуют «рубашки» около кристаллов с параллельно-шестоватыми агрегатами второго рода, которые образуются при медленном толчковом раскрытии трещин в процессе пластической деформации минерального агрегата.

Начиная с И.Н. Менге, многие специалисты обращают внимание на асимметрию ромбододекаэдров граната Полякова лога (рис. 4). Ее обычно связывают с симметрией «питания» кристаллов во время роста. Если предположить, что гранат рос метасоматически в рассланцованной породе, то его «питание», поступающее вдоль трещин основного кливажа, действительно является более интенсивным, чем в поперечном направлении. Это могло определить соответствующую асимметрию кристаллов в зависимости от ориентировки кристаллографических осей относительно трещин кливажа. Следовательно, нашей задачей является найти признаки метасоматического роста граната в уже рассланцованной породе.

### Минералы сланцев Полякова лога

Распределение минералов в сланцевой толще полосчатое и неоднородное. К породообразующим минералам относятся хлорит, мусковит, кварц и гранат в местах скопления. Широкое распространение мельчайших ориентированных кристаллов ильменита позволяет использовать этот акцессорный



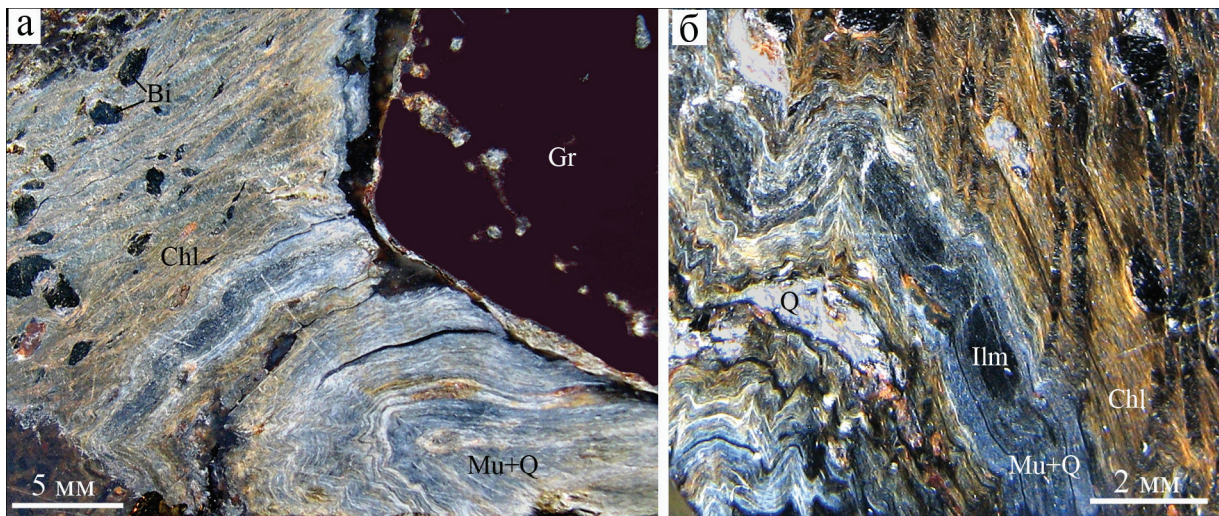


Рис. 3. Состав и плейчатая текстура сланцев: а – кристалл граната (Gr) на контакте со слоями разного состава и текстуры; б – деталь плейчатой текстуры с фрагментами будинажа ильменит-мусковит-кварцевого слойка (по центру).

Chl – хлорит, Bi – биотит, Mu – мусковит, Q – кварц, Ilm – ильменит. Косое освещение.

Fig. 3. Structure and plicative texture of schist: а – garnet crystal (Gr) at the contact with layers of different composition and texture; б – detail of plicative texture with fragments of boudinage of the ilmenite-muscovite-quartz layer (in the center).

Chl – chlorite, Bi – biotite, Mu – muscovite, Q – quartz, Ilm – ilmenite. Oblique light.

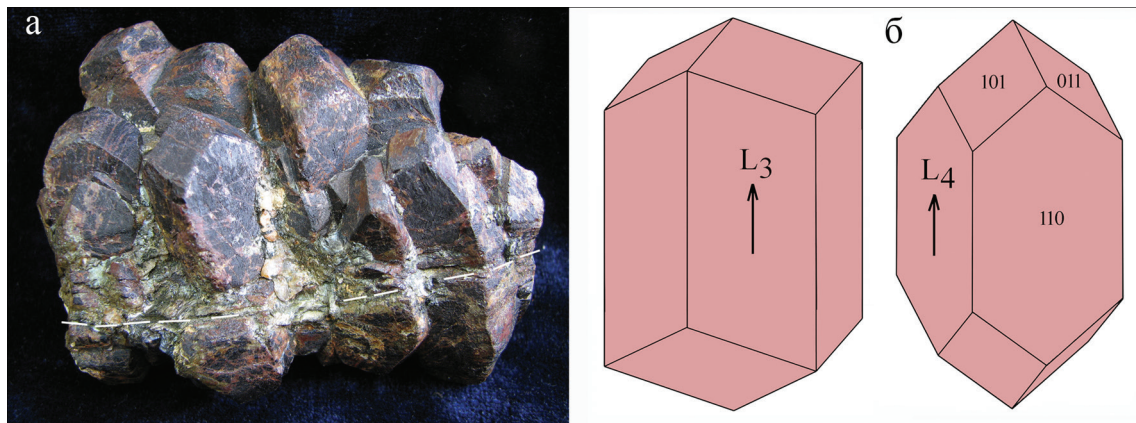


Рис. 4. Асимметрия ромбододекаэдров метакристаллов альмандина: а – друза кристаллов, выросших от трещины во вмещающие хлоритовые сланцы; б – модели ромбододекаэдров, удлинённых вдоль тройной ( $L_3$ ) и четверной ( $L_4$ ) осей. Размер образца 4 см.

Друза найдена Ю. Вилячкиным.

Fig. 4. Asymmetrical rhombododecahedrons of almandine metacrystals: а – crystal druse grown from fracture toward the host chlorite schist; б – models of rhombododecahedrons along the triple ( $L_3$ ) and quad ( $L_4$ ) axes.

Druze was found by Yu. Vilyachkin.

минерал для рассмотрения относительного возраста некоторых минералов. Какие-либо признаки исходных пород не найдены.

**Альмандин**  $(\text{Fe}_{2.11}\text{Ca}_{0.54}\text{Mn}_{0.29}\text{Mg}_{0.06})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ <sup>1</sup> отнесен к поздним минералам, поскольку его кристаллы находятся в секущем положении к полосча-

<sup>1</sup> Примечание редакции. Здесь и далее: формулы даны в авторской редакции.

тому сланцевому агрегату и не имеют индукционных поверхностей ни с хлоритом, ни с мусковитом (рис. 3а, 5). В альмандине присутствуют включения трех видов: одни – синхронные с ним и имеют индукционные границы (андезин, кобальтин, пирротин, пентландит – рис. 6); другие (ранние) – остаточные при замещении сланцев гранатом, ориентированные вдоль сланцеватости (линзы мусковита





Рис. 5. Линзы незамещенного мусковита в метакристаллах альмандина.

Косое освещение.

Fig. 5. Lenses of primary muscovite in almandine metacrystals.

Oblique light.

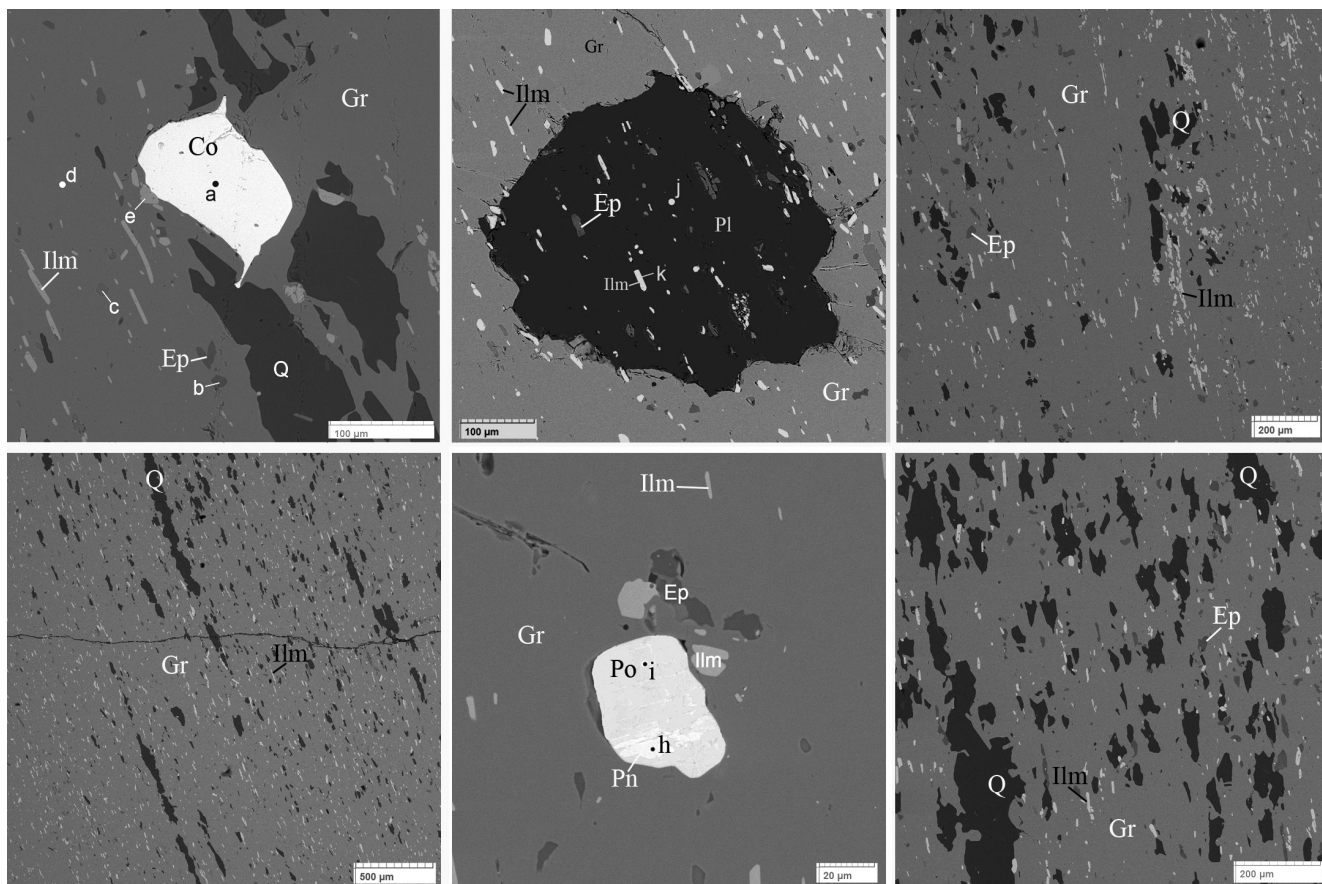


Рис. 6. Разновозрастные включения минералов в метакристаллах альмандина (Gr): ранние – ильменит (Ilm), эпидот (Ep) и частично кварц (Q); синхронные с гранатом – кобальтин (Co), пирротин (Po), пентландит (Pn), плагиоклаз (Pl) и регенерационный кварц. Буквами обозначены точки анализов.

Здесь и на рис. 7, BSE-фото.

Fig. 6. Mineral inclusions of various ages in almandine metacrystals (Gr): early – ilmenite (Ilm), epidote (Ep) and locally quartz (Q); synchronous with garnet – cobaltite (Co), pyrrhotite (Po), pentlandite (Pn), plagioclase (Pl) and regenerated quartz.

Here and in Fig. 7, BSE-photo.



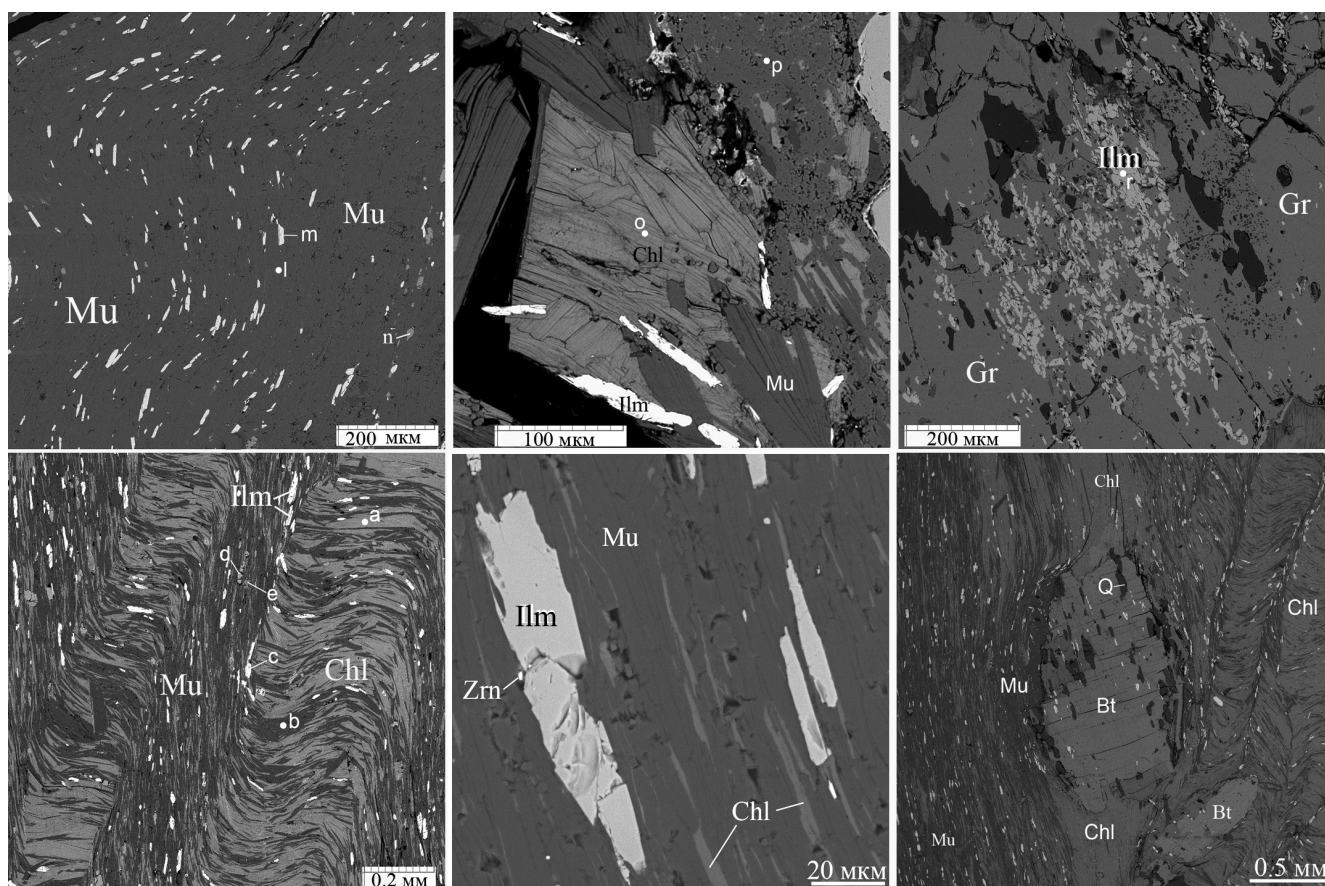


Рис. 7. Взаимоотношения мусковита, ильменита, хлорита, биотита и граната в черных сланцах рядом с гранатовой полосой. Буквами обозначены точки анализов.

Fig. 7. Relationship of muscovite, ilmenite, chlorite, biotite and garnet in black shale close to a garnet band.

– рис. 5, пластинки ильменита, столбики апатита и эпидота); третьи – остаточные, но регенерированные во время роста альмандина (кварц – рис. 6). В друзовом агрегате граната наблюдался один прозрачный кристалл циркона размером 1 мм, покрытый индукционной поверхностью.

**Андезин**  $(\text{Na}_{0.72}\text{Ca}_{0.27}\text{K}_{0.01})(\text{Al}_{1.32}\text{Si}_{2.68})\text{O}_8$  (плагноклаз № 27) наблюдался только как включение в гранате, имеющее с ним индукционные поверхности одновременного роста. Более мелкие включения ильменита и эпидота в плагноклазе имеют ту же ориентировку, что и в гранате, т. е. наследуют ориентировку предшествующего хлоритового сланца (рис. 6).

**Биотит**  $\text{K}_{0.83}\text{Mg}_{0.60}\text{Ti}_{0.09}\text{Fe}_{1.69}\text{Al}_{0.79}(\text{Si}_{2.89}\text{Al}_{1.11})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  кристаллизовался, по-видимому, одновременно с гранатом, но образует отдельные скопления (рис. 3а) и лишь в одном месте наблюдались их срастания.

**Кобальтин**  $(\text{Co}_{0.65}\text{Ni}_{0.19}\text{Fe}_{0.16})\text{AsS}$ , **пирротин**  $\text{Fe}_{8.8}\text{S}_9$  и **пентландит**  $(\text{Fe}_{4.39}\text{Ni}_{4.13}\text{Co}_{0.82})\text{S}_8$  диагностированы только в гранате как синхронные с ним минералы (рис. 6). Пирротин и пентландит образо-

вали синтаксические срастания.

Включения зерен **кварца**  $\text{SiO}_2$  в гранате также наследуют свое расположение в сланце (рис. 6), но они, судя по рисунку границ, несколько дорастали (регенерировали) во время роста метасоматического граната.

Ранними (догранатовыми) минералами в сланцах были породообразующие хлорит, мусковит и кварц, второстепенные ильменит, эпидот, апатит, рутил.

**Хлорит** (шамозит)  $(\text{Fe}_{3.35}\text{Mg}_{1.25}\text{Al}_{0.40})\text{Al}(\text{Si}_{2.49}\text{Al}_{1.51})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  и **мусковит**  $\text{K}_{0.77}\text{Na}_{0.14}\text{Mg}_{0.02}\text{Fe}_{0.12}\text{Al}_{1.94}(\text{Si}_{3.10}\text{Al}_{0.90})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  образуют отдельные или совместные прослоив в толще сланцев (рис. 7). Вместе с ними образовались второстепенные **ильменит**  $\text{Fe}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{Ta}_{0.003}\text{TiO}_3$ , **эпидот**  $\text{Ca}_{1.97}\text{Mn}_{0.02}\text{Ti}_{0.01}(\text{Al}_{2.30}\text{Fe}_{0.7})(\text{Si}_3\text{O}_{12})(\text{OH})$  и акцессорный **фторапатит**  $\text{Ca}_{4.96}\text{Fe}_{0.04}(\text{PO}_4)_3(\text{F}_{0.64}\text{OH}_{0.36})$  (рис. 6, 7).

**Глинистый минерал (монтмориллонит?)**  $\text{Na}_{0.28}\text{K}_{0.02}\text{Fe}_{0.83}\text{Mg}_{0.39}\text{Ca}_{0.04}\text{Ti}_{0.05}\text{Al}_{1.43}(\text{Si}_{2.55}\text{Al}_{1.45})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  широко распространен в коре выветривания сланцевой толщи.

## Заключение

В изученных образцах не обнаружены какие-либо признаки исходных (досланцевых) пород. Вероятно, породы были неоднородны, поэтому при метасоматозе отдельные слои характеризуются преобладанием либо хлорита, либо мусковита (с сопровождающими ильменитом, эпидотом и кварцем). Местами порода приобрела плейчатое сложение. Гранатовая (и биотитовая) минерализация с сопутствующими минералами (плагиоклазом, кварцем, сульфидами, цирконом) является также метасоматической и более поздней (наложенной). При этом пластические деформации толщи продолжались, приводя к сдавливанию индивидов граната и биотита. Гранат и биотит замещали преимущественно хлорит (шамозит), остальные минералы сохранились в виде индифферентных включений, подчеркивая плейчатую раннюю текстуру породы. Причина возникновения крупных метакристаллов граната не выявлена, но можно предположить возможные флуктуации пересыщения относительно граната в сланцевой толще. Отсюда следует, что в пределах сланцевой толщи можно ожидать других проявлений крупного граната.

## Литература

**Коптев-Дворников В.С., Доброхотова Е.С., Рожков Е.С., Мирлин Г.А. (1940)** Геологический разрез Урала от Златоуста до Челябинска. М.-Л., АН СССР, 328 с.

**Мамуровский А.А., Коптев-Дворников В.С., Пылаев Б.Ф. (1929)** Опыт промышленной оценки уральских месторождений граната. Минеральное сырье и цветные металлы, (5–6), 666–687.

**Менге И.Н. (1827)** Геогностические наблюдения в окрестностях Миасского завода. Горный журнал, 4(2), 42–48.

## References

**Koptev-Dvornikov V.S., Dobrokhotova E.S., Rozhkov E.S., Mirlin G.A. (1940)** [Geological section of the Urals from Zlatoust to Chelyabinsk]. Moscow–Leningrad, AN SSSR, 328 p. (in Russian)

**Mamurovsky A.A., Koptev-Dvornikov V.S., Pylaev B.F. (1929)** [Experience of economic evaluation of the Urals garnet deposits]. *Mineral'noe syr'e i tsvetnye metally* [Mineral Raw Materials and Nonferrous Metals], (5–6), 666–687. (in Russian)

**Menge I.N. (1827)** [Geognostic observations in the vicinity of the Miass plant]. *Gorny zhurnal* [Mining Magazine], 4(2), 42–48. (in Russian)

# МИНЕРАЛОГИЯ

## Том 9 № 2 2023

ISSN 2313-545X (print)

ISSN 2782-2044 (online)

ISSN 2313-545X



### Свидетельство

о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-78696 от 30 июля 2020 г.  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи информационных  
технологий и массовых коммуникаций

Технический редактор:

*И.Ю. Мелекесцева*

Оригинал-макет:

*О.Л. Бусловская*

Корректор:

*И.А. Спирина*

---

Подписано в печать 27.06.2023. Дата выхода в свет: 29.06.2023

Формат 60 × 80%. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4.7. Уч.-изд. л. 4.5. Тираж 200 экз. Заказ №  
ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН: 456317, г. Миасс Челябинской обл., Ильменский заповедник

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ООО «ПРИНТ»

620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Розы Люксембург, 52А, офис 3.

Возрастное ограничение 16+. Распространяется бесплатно.

---



# MINERALOGY

## 2023. Vol. 9. No. 2

ISSN 2313-545X (print)

ISSN 2782-2044 (online)



*Founder:* Federal State Budgetary Institution South Urals Federal Research Center  
of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences

Registration certificate PI no. FS77-78696 from July 30, 2020  
Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation

*Technical editor:*  
Irina Melekestseva

*Layout:*  
Olga Buslovskaya

*Corrector:*  
Irina Spirina

---

Signed in print 29.06.2023.

Format 60 × 80 $\frac{1}{8}$ . Offset printing. Printed sheets 4.7. Circulation of 200. Order no.  
SU FRC MiG UB RAS: territory of the Ilmeny State Reserve, Miass, Chelyabinsk district, 456137 Russia

Printed from a layout in Printing House Tipografiya dlya vas  
ul. Rozy Lyuksemburg 52A/3, Yekaterinburg, Sverdlovsk district, 620026 Russia  
Free of charge

---