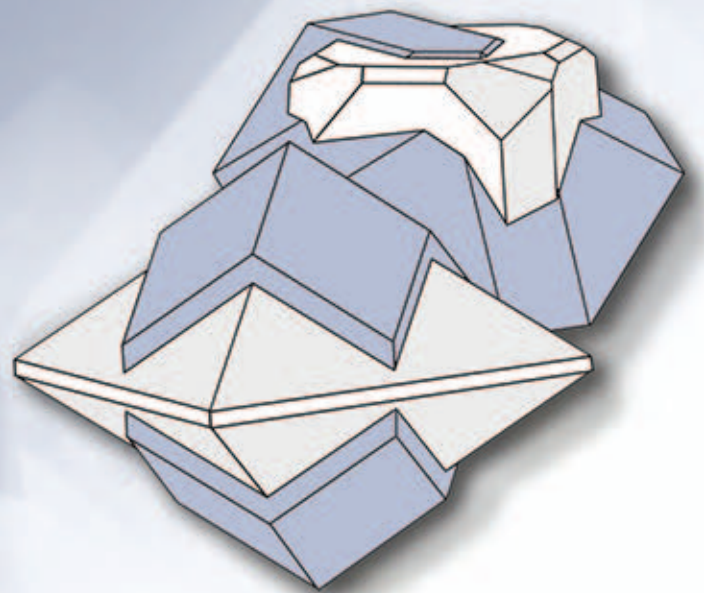


ISSN 2313-545X

МИНЕРАЛОГИЯ MINERALOGY

Том 6 № 1



2020

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

МИНЕРАЛОГИЯ

Том 6 № 1 2020 Март

Главный редактор: **В.В. Масленников**

Зам. главного редактора: **В.А. Попов, Е.В. Белогуб**

Состав редколлегии:

В.Н. Анфилогов, А.М. Асхабов, П.М. Вализер,
И.О. Галускина (Польша), Ю.Л. Войтеховский, С.Л. Вотяков,
В.А. Коротеев, В.Г. Кривовичев, Е.П. Макагонов, И.Ю. Мелекесцева,
В.В. Мурзин, П. Нимис (Италия), Л.А. Паутов, И.В. Пеков,
В.И. Попова, С.Г. Тесалина (Австралия),
Р. Херрингтон (Англия), В.Н. Удачин

Адрес редакции: 456317, г. Миасс Челябинской обл., терр. Ильменский заповедник

Тел.: (3513) 57-35-62

Факс: (3513) 57-02-86

E-mail: journal@mineralogy.ru

Сайт журнала: www.journal.mineralogy.ru

© ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН

© Авторы статей

СОДЕРЖАНИЕ

6(1), 2020

МИНЕРАЛЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

ЦЕОЛИТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ПЕГМАТИТАХ И ПОЗДНИХ ПРОЖИЛКАХ ВИШНЕВОГОРСКОГО ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ) <i>В.И. Попова, А.В. Касаткин, В.А. Попов, С.Н. Никандров, Е.П. Макагонов, А.М. Кузнецов, Р. Шкода</i>	3
УНИКАЛЬНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ПОЛЯКОВИТА-(СЕ) В ИЛЬМЕНСКИХ ГОРАХ, ЮЖНЫЙ УРАЛ – НОВЫЕ НАХОДКИ <i>В.А. Попов, М.А. Рассомахин, С.В. Колисниченко</i>	17
МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ЗЕРНАХ ПЛАТИНЫ ИЗ КАЗАНСКОЙ РОССЫПИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) <i>Е.В. Зайкова, И.А. Блинов, В.А. Котляров</i>	33
ТЕРРИУОЛЛАСЕИТ ИЗ КОЧКАРСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЮЖНЫЙ УРАЛ: ПЕРВАЯ НАХОДКА В РОССИИ <i>А.В. Касаткин, Р. Шкода</i>	47
МИНЕРАЛЫ МЕДИ ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ Cu(Mo)-ПОРФИРОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ САРЫШАГАН (ЗАПАДНОЕ ПРИБАЛХАШЬЕ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАЗАХСТАН) <i>С.В. Прибавкин, А.В. Коровко, Г.Ю. Шардакова, А.В. Антонишин</i>	58
ТУРМАЛИН ИЗ ПОЗДНИХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА МУРТЫКТЫ, ЮЖНЫЙ УРАЛ, БАШКОРТОСТАН <i>М.А. Рассомахин, Е.В. Белозуб, К.А. Новоселов, П.В. Хворов</i>	69

CONTENTS

6(1), 2020

MINERALS AND MINERAL ASSEMBLAGES

ZEOLITES IN PEGMATITES AND LATE VEINLETS OF THE VISHNEVOGORSKY ALKALINE-CARBONATITE COMPLEX (SOUTH URALS) <i>V.I. Popova, A.V. Kasatkin, V.A. Popov, S.N. Nikandrov, E.P. Makagonov, A.M. Kuznetsov, R. Šhkoda</i>	3
A UNIQUE ORE LOCALITY OF POLYAKOVITE-(CE) IN THE ILMENY MOUNTAINS, SOUTH URALS – NEW FINDS <i>V.A. Popov, M.A. Rassomakhin, S. V. Kolisnichenko</i>	17
MINERAL INCLUSIONS IN PLATINUM GRAINS FROM THE KAZAN PLACER (SOUTH URALS) <i>E.V. Zaykova, I.A. Blinov, V.A. Kotlyarov</i>	33
TERRYWALLACEITE FROM THE KOCHKAR AU DEPOSIT, SOUTH URALS: FIRST FIND IN RUSSIA <i>A.V. Kasatkin, R. Škoda</i>	47
COPPER MINERALS FROM THE OXIDATION ZONE OF THE SARYSHAGAN Cu(Mo)-PORPHYRY DEPOSIT (WESTERN BALKHASH REGION, CENTRAL KAZAKHSTAN) <i>S.V. Pribavkin, A.V. Korovko, G. Yu. Shardakova, A.V. Antonishin</i>	58
TOURMALIN FROM LATE QUARTZ VEINS OF THE MURTYKTY GOLD DEPOSIT, SOUTH URAL, BASHKORTOSTAN <i>M.A. Rassomakhin, E.V. Belogub, K.A. Novoselov, P.V. Khvorov</i>	69

ЦЕОЛИТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ПЕГМАТИТАХ И ПОЗДНИХ ПРОЖИЛКАХ ВИШНЕВОГОРСКОГО ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

**В.И. Попова¹, А.В. Касаткин², В.А. Попов¹, С.Н. Никандров¹,
Е.П. Макагонов¹, А.М. Кузнецов³, Р. Шкода⁴**

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru

² Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Ленинский пр. 18/2, г. Москва, 119071 Россия
³ ул. Октябрьская 5–337, г. Челябинск, 454071 Россия

⁴ Масариков университет, Котларшска 2, г. Брно, 61137 Чехия

ZEOLITES IN PEGMATITES AND LATE VEINLETS OF THE VISHNEVOGORSKY ALKALINE-CARBONATITE COMPLEX (SOUTH URALS)

V.I. Popova¹, A.V. Kasatkin², V.A. Popov¹, S.N. Nikandrov¹, E.P. Makagonov¹, A.M. Kuznetsov³, R. Škoda⁴

¹ South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru

² Fersman Mineralogical Museum of RAS, Leninsky pr. 18/2, Moscow, 119071 Russia
³ ul. Oktyabrskaya 5–337, Chelyabinsk, 454071 Russia

⁴ Masaryk University, Kotlárská 2, Brno, 61137 Czech Republic

В работе обобщены данные о минеральных парагенезисах, форме кристаллов и химическому составу цеолитов (анальцима, натролита, гоннардита, паранатролита, сколецита, мезолита, гарронита-Na, филлипсита-K, гармотома, шабазита-Ca, гейландита-Ca, гейландита-Sr, гейландита-K, стильбита-Ca, брюстерита-Sr и, предположительно, каулсита) из цеолитосодержащих пегматитов и секущих их поздних прожилков, локализованных преимущественно в миаскитах СЗ эндоконтакта Вишневогорского массива и Седловидной залежи, вмещающих жильные тела Вишневогорского месторождения ниобиевых руд на Южном Урале. Гарронит-Na впервые найден в России и второй раз – в мире. Ряд цеолитов (брюстерит-Sr, гейландит-K, гейландит-Sr, мезолит и филлипсит-K) выявлены впервые для территории Вишнёвых гор.

Илл. 21. Табл. 1. Библ. 14.

Ключевые слова: цеолиты, Вишнёвые горы, Южный Урал.

The paper summarizes the data on mineral assemblages, crystal morphology and chemical composition of zeolites (analcime, natrolite, gonnardite, paranatrolite, scolecite, mesolite, garronite-Na, phillipsite-K, harmotome, chabazite-Ca, heulandite-Ca, heulandite-Sr, heulandite-K, stilbite-Ca, brewsterite-Sr and, probably, cowlesite) from zeolite-bearing pegmatites and late veinlets, which are located in miaskites of the NW contact of the Vishnevogorsky block and Sedlovidnaya miaskite block, which host vein ore bodies of the Vishnevogorsky Nb deposit at the South Urals. Garronite-Na is found for the first time in Russia and this is the second finding in the world. Some zeolites (brewsterite-Sr, heulandite-K, heulandite-Sr, mesolite, and phillipsite-K) are identified for the first time in the Vishneve Mountains.

Figures 21. Tables 1. References 14.

Key words: zeolites, Vishneve Mountains, South Urals.

Введение

Цеолиты в Вишнёвых горах (Южный Урал) входят в состав поздней минерализации нефелин-канкринит-полевошпатовых пегматитов Курочкина Лога, жил пегматитов на восточном отроге г. Ерёмна, жилы № 5 на г. Каравай, жилы № 125 и рудной зоны 140 (Белянкин, 1933; Бонштедт-Куплетская, 1951; Чесноков, 1963). В результате исследований 1980–2019 гг. цеолиты встречены во многих других жилах щелочных пегматитов и поздних прожилках,

вскрытых выработками шахты Капитальная, карьером и штольной жилы № 35 в рудной зоне 147, полевошпатовым карьером Надежда на горах Долгой и Кобелихе и в жилах №№ 116, 137, 141, 144, 145 (Никандров, 1989; Макагонов, Никандров, 1990; Попов, Нишанбаев, 1993; Пеков и др., 2004; Нишанбаев и др., 2016). Цеолитсодержащие жилы проявлены, в основном, в миаскитах северо-западного эндоконтакта Вишневогорского массива и седловидной залежи, вмещающей рудные тела Вишневогорского месторождения ниобиевых руд (рис. 1).

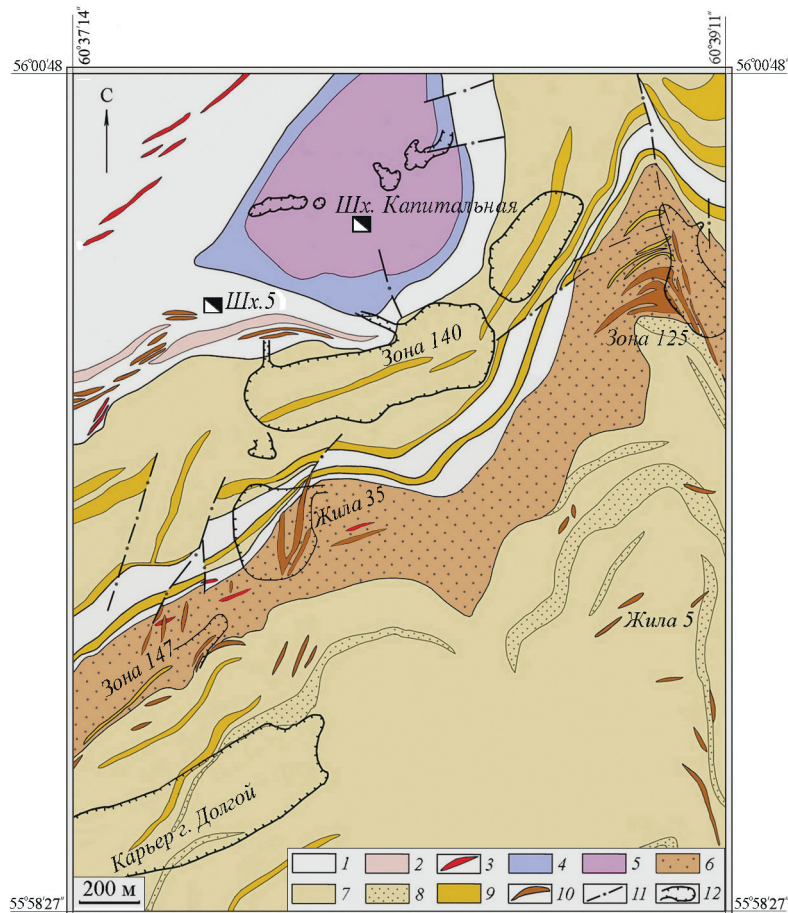


Рис. 1. Основные участки развития цеолитсодержащих пегматитов и поздних прожилков (схема по (Роненсон, 1966) с изменениями).

1 – гнейсы, амфиболиты и кристаллосланцы (PR_1); 2 – жильные граниты ($Pz_1?$); 3 – гранитные пегматиты ($Pz_{2-3}?$); 4, 5 – габброиды (4) и серпентиниты (5) Булдымского массива (PR_1); 6 – пироксеновые, амфибол-пироксеновые и биотит-пироксеновые фениты (Pz_1); 7–9 – биотитовые (7), мусковитизированные (8) и альбитизированные (9) миаскиты с зонами карбонатитов (Pz_{1-2}); 10 – миаскитовые и сиенитовые пегматиты (Pz_2); 11 – основные нарушения; 12 – контуры карьеров.

Fig. 1. Main areas of location of zeolite-bearing pegmatites and late veinlets, modified after (Ronenson, 1966).

1 – gneisses, amphibolites and crystal shists (PR_1); 2 – veined granites ($Pz_1?$); 3 – granitic pegmatites ($Pz_{2-3}?$); 4, 5 – gabbroids (4) and serpentinites (5) of the Buldym block (PR_1); 6 – pyroxene, amphibole-pyroxene and biotite-pyroxene fenites (Pz_1); 7–9 – biotite miaskites (7), muscovitized (8) and albitized (9) miaskites with carbonatite zones (Pz_{1-2}); 10 – miaskitic and syenitic pegmatites (Pz_2), 11 – main faults; 12 – contours of quarries.

В настоящей статье обобщены результаты ранее опубликованных и вновь полученных данных о локализации и строении цеолитсодержащих жил пегматитов и поздних прожилков Вишнёвых гор, минеральных парагенезисах, форме кристаллов и химическом составе цеолитов. Материалом послужили сборы авторов разных лет (в основном, 1982–2018 гг.). Часть образцов получена от С.Ю. Крюкова и А.В. Донскова. Гониометрические измерения кристаллов выполнены В.А. Поповым и Е.П. Макагоновым. Состав цеолитов определен при помощи СЭМ CamScan 4D с энергодисперсионным микроанализатором в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва (аналитик А.В. Касаткин) и на волновом микроанализаторе Cameca SX 100, Масариков университет, г. Брно, Чехия (аналитики Р. Шкода и А.В. Касаткин). Единичные анализы выполнены И.А. Блиновым (СЭМ Tescan Vega3) и В.А. Котляровым (РЭММА-202М) в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Структурные типы для ряда цеолитов определены по данным монокристалльной и порошковой рентгенографии (аналитики Ф. Нестола, г. Падуя, Италия, и А.В. Касаткин). Часть порошкограмм ранее снята В.Ф. Ждановым (Ильменский государственный заповедник, г. Миасс),

П.В. Хворовым (Институт минералогии, г. Миасс) и С.Г. Суставовым (Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург).

Парагенезисы цеолитов в пегматитах и поздних прожилках Вишнёвых гор

В миаскитовых пегматитах Курочкина Лога и жилы № 5 на г. Каравай отмечена частичная цеолитизация нефелина и канкринита по периферии зерен и вдоль секущих трещин с образованием микрозернистых или мелкошестоватых и тонковолокнистых агрегатов «шпреуштейна». Цеолитсодержащие жилы и прожилки наиболее проявлены в СЗ части Вишнёвых гор, где они приурочены к серии субмеридиональных трещин, крутопадающих на восток. Прожилки с цеолитами, секущие полосчатость миаскиотов, встречаются в эндоконтакте Центрального щелочного массива на его северном замыкании и в Седловидной залежи миаскиотов – в подземных горных выработках шахты Капитальная и в керне скважин на глубинах 20–580 м от поверхности. Протяженность прожилков по падению достигает 2 м и более, толщина – 1–2 см, иногда до 5 см и более (рис. 2).

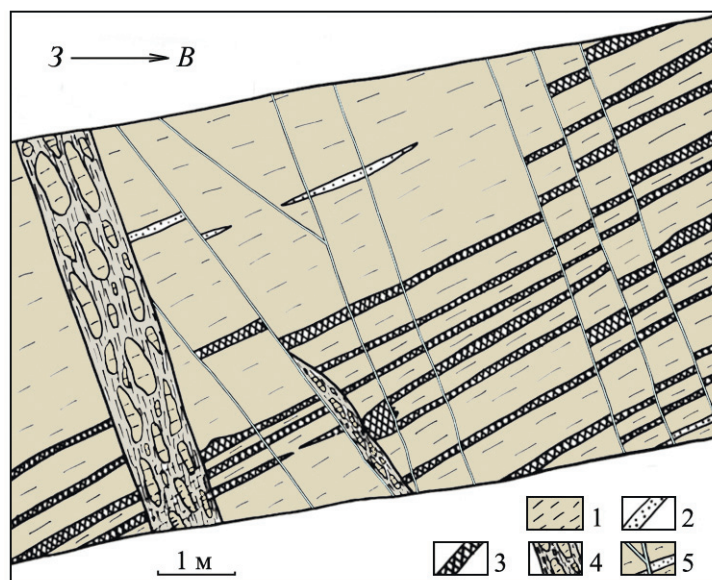


Рис. 2. Строение трещинной системы с натролит-анальцимовой минерализацией.

1 – миаскиты; 2 – микроклиновые прожилки с пирохлором; 3 – «рудные» пирохлорсодержащие аннит-кальцитовые прожилки; 4 – зоны дробления; 5 – натролит-анальцимовые прожилки.

Шахта Капитальная, уклон квершлага на глубине ~400 м (зарисовка С.Н. Никандрова, 1985 г.).

Fig. 2. Structure of a fracture system with natrolite-analcime mineralization.

1 – miaskites; 2 – microcline veinlets with pyrochlore; 3 – «ore» pyrochlore-bearing annite-calcite veinlets; 4 – fracturing zones; 5 – natrolite-analcime veinlets.

Mine Kapitalnaya, the slope of a crosscut at the depth of ~400 m (sketch of S.N. Nikandrov, 1985).

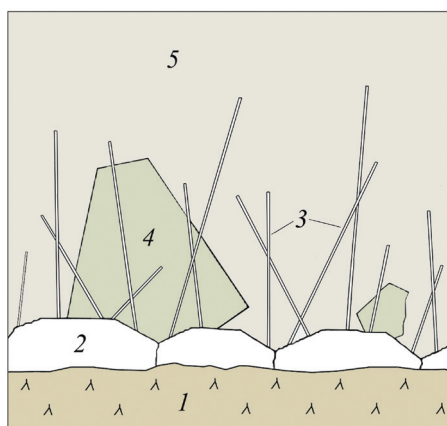


Рис. 3. Структура приконтактной зоны прожилка в миаските (Чесноков и др., 1984).

1 – миаскит; 2 – анальцим; 3 – натролит; 4 – шортит; 5 – мирабилит.

Ширина рисунка – 6 см.

Fig. 3. Structure of the contact zone of veinlet in miaskite (Chesnokov et al., 1984).

1 – miaskite; 2 – analcime; 3 – natrolite; 4 – shortite; 5 – mirabilite.

The width of the figure is 6 cm.



Рис. 4. Кристаллы анальцима с натролитом на агрегате полевых шпатов из жилы № 5.

Образец (7 см) и фото В. А. Попова.

Fig. 4. Analcime crystals with natrolite on feldspar aggregate from vein no 5.

Sample (7 cm) and photo of V. A. Popov.

В зальбандах прожилков нередко встречаются агрегаты минералов щелочных пегматитов (полевые шпаты, нефелин, канкринит, аннит, мусковит, кальцит), а центральные части и полости трещин выполнены анальцимом и натролитом (с геометрическим отбором от зальбандов к центру) с последующим отложением шортита и мирабилита (рис. 3). На кристаллах белого анальцима размером 1–5 мм и более встречаются мелкие сфероидные агрегаты темно-коричневого или зеленовато-черного шамозита с участками индукционных поверхностей

сокристаллизации и наростами кристаллов полупрозрачного натролита размером 0.2–2 см (рис. 4). В цеолитосодержащих прожилках также встречаются флюорит, рутил, кальцит или шортит. Их центральная часть чаще всего выполнена мирабилитом и снежно-белым порошковатым тенардитом.

К настоящему времени в Вишнёвых горах выявлены и в разной степени изучены 16 минеральных видов семейства цеолитов – анальцим, натролит, гоннардит, паранатролит, сколецит, мезолит, гарронит-Na, филлипсит-K, гармотом, шабазит-Ca, гейландит-Ca, гейландит-Sr, гейландит-K, стильбит-Ca, брюстерит-Sr и, предположительно, каулсит. Ниже приводится их краткая характеристика.

Морфология и состав кристаллов цеолитов и их агрегатов

Анальцим $\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$ в миаскитовых пегматитах Курочкина Лога впервые отмечен Д.С. Белянкиным (1933). Э.М. Бонштедт-Куплетская (1951) определила анальцим в пегматитах Курочкина Лога, Цирконового шурфа (№№ 3 и 4 на отроге г. Ерёмна) и № 5 на г. Каравай, в том числе мелкозернистые агрегаты желтоватого анальцима в сростании с альбитом, развивающиеся по нефелину. В результате наших исследований 1980–2018 гг. установлено широкое распространение анальцима в миаскитовых пегматитах и тонких прожилках среди миаскитов в полевошпатовом карьере Надежда на г. Долгая и в выработках шахты Капитальная. Белый или желтовато-розоватый крупнокристаллический (до 2–4 см) анальцим образует парагенезисы с крупным биотитом, магнетитом и кальцитом. Нередко анальцим частично замещен натролитом (рис. 5). Кристаллы анальцима из Вишнёвых гор по форме и внешней симметрии относятся к кубической сингонии и обычно встречаются в форме тетрагонтриоктаэдра $\{211\}$, иногда в комбинации с кубом $\{100\}$ (рис. 6).

Состав крупнокристаллического анальцима приведен в работе (Бонштедт-Куплетская, 1951) и показан в таблице (ан. 1). Эмпирическая формула минерала – $(\text{Na}_{0.91}\text{K}_{0.03}\text{Mg}_{0.02}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.00}[\text{Al}_{1.08}\text{Si}_{1.94}\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_6 и $1\text{H}_2\text{O}$).

Натролит $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ описан в виде столбчатых кристаллов, крупношестоватых веерообразных агрегатов и частичных псевдоморфоз (в ассоциации с бёмитом и диаспором) по нефелину и анальциму в пегматитах жилы Курочкина Лога и

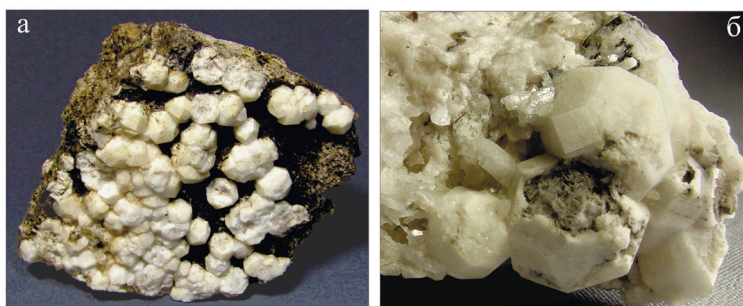


Рис. 5. Кристаллы анальцима (до 1 см) из жилы №№ 5 и 137. Образцы и фото С.Ю. Крюкова (а) и А.М. Кузнецова (б).
 Fig. 5. Analcime crystals (up to 1 cm) from vein no. 5, 137. Samples and photo of S.Y. Kryukov (a) and A.M. Kuznetsov (б).

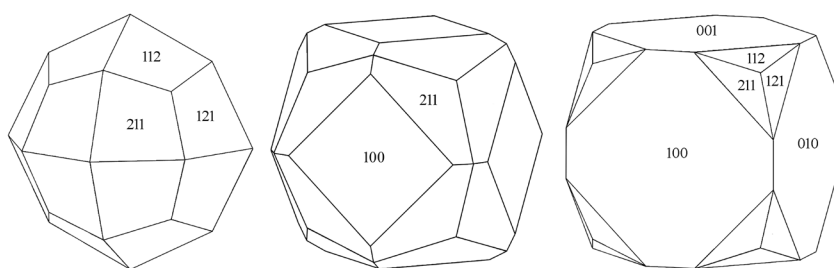


Рис. 6. Форма кристаллов анальцима из жил в миаскитах Вишнёвых гор. Чертежи В.А. Попова.
 Fig. 6. Morphology of analcime crystals from veins in miaskites of the Vishnevye Mountains. Drawing by V.A. Popov.

на горах Курочкина и Каравай (Бонштедт-Куплетская, 1951). Позднее отмечался во многих жилах щелочных пегматитов. Размер кристаллов и сферолитовых агрегатов составляет 2.5–3.0 см (рис. 7) и реже достигает 4–5 см. Встречаются «саблевидные» сростки с двойниковой осью [001] (Макагонов, Никандров, 1990). В пустотах полиминеральных мелко- и микрокристаллических агрегатов (в шпреуштейне) отмечены мельчайшие игольчатые кристаллы более позднего натролита с выросшими на них кристаллами бёмита и гиббсита («гидраргиллита») и последующим отложением галлуазита (Бонштедт-Куплетская, 1951). В поздних цеолит-содержащих прожилках, рассекающих миаскиты, миаскитовые пегматиты и биотит-кальцитовые жилы в карьере на г. Долгой на сферолитах игольчатого натролита отмечались наросты белого микрозернистого паранатролита, а также частичные и полные псевдоморфозы натролита и паранатролита по кристаллам анальцима и канкринита (Пеков и др., 2004). Сферолитовые агрегаты натролита нередко нарастали на анальцим (рис. 7г, д), а позднее частично замещались микрозернистыми белыми агрегатами паранатролита (рис. 7б–г).

Состав относительно крупных кристаллов натролита приведен в работе (Бонштедт-Куплетская, 1951) и показан в таблице (ан. 2). Рассчитанная нами формула (на O_{10}) имеет вид $(Na_{1.63}Ca_{0.02}Fe_{0.02}Mg_{0.01}K_{0.01})_{\Sigma 1.69}[Al_{2.16}Si_{2.93}S_{0.01}O_{10}] \cdot 1.98H_2O$ с дефицитом в позиции А и повышенным количеством Al в позиции В. Возможно, материал пробы включал небольшую примесь других минералов. По нашим данным (табл., ан. 3), эмпирическая формула натролита – $(Na_{1.80}Ca_{0.06}Fe_{0.02})_{\Sigma 1.88}[Al_{2.00}Si_{3.01}O_{10}] \cdot 2H_2O$ (расчет на O_{10} и $2H_2O$). В «саблевидных» двойниках натролита (рис. 7ж) состав разных индивидов одинаков (табл., ан. 4) и отвечает эмпирической формуле $Na_{1.98}[Al_{2.00}Si_{3.01}O_{10}] \cdot 2H_2O$. От внутренних участков исследованных кристаллов к периферии в ряде анализов немного возрастает содержание Na (Макагонов, Никандров, 1990).

Гоннардит $Na_2Ca[(Al_4Si_6)O_{20}] \cdot 7H_2O$ («тетранатролит») установлен С.Г. Сустановым (устное сообщение) в 1998 г. по рентгенограмме минерала в корках изменения нефелина из щелочных пегматитов Свистунова лога (Кобяшев, Никандров, 2007). В образце, найденном в 2008 г. А.М. Кузнецовым в Полевошпатовом карьере г. Долгой (рис. 8), мине-

Таблица

Химический состав (мас. %) цеолитов из Вишнёвых гор

Table

Chemical composition (wt. %) of zeolites from the Vishnevye Mountains

№ ан.	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	SrO	BaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O	Сумма
Анальцит											
1 ¹	12.75	0.63	0.10	0.30	–	–	0.16	25.01	52.98	8.31	100.24
Натролит											
2 ¹	13.45	0.11	0.32	0.10	–	–	0.47	29.37	46.88	9.72	100.54
3	14.43	–	0.88	–	–	–	0.29 ²	26.40	46.68	9.35 ³	98.03
4	16.20	–	–	–	–	–	–	26.80	47.62	9.50 ³	100.12
Паранатролит											
5 ⁴	9.70	–	4.93	–	1.19	0.20	–	28.32	42.60	13.57 ³	100.47
Мезолит											
6	5.33	–	9.23	–	–	–	–	26.37	47.05	12.48 ³	100.46
Гарронит											
7	14.07	0.56	0.28	–	–	–	–	26.03	47.85	11.72 ³	100.51
Филлипсит-К											
8	1.81	5.34	4.12	–	–	–	–	18.66	53.36	16.79 ³	100.08
Гармотом											
9	0.94	0.85	4.14	–	–	13.68	–	17.88	46.54	15.32 ³	99.35
Шабазит-Са											
10	0.15	2.47	7.22	–	0.69	0.35	0.28	16.32	50.00	20.92 ³	98.40
11	0.11	0.95	6.83	–	0.14	4.92	–	18.38	46.56	20.39 ³	98.28
Гейландит-Са											
12	0.12	2.76	4.75	–	6.44	0.31	–	15.80	54.93	14.89 ³	100.00
Гейландит-Sr											
13	0.69	1.65	3.01	–	7.98	0.20	–	15.52	55.48	14.83 ³	99.36
Гейландит-К											
14	1.57	2.95	1.91	–	3.67	3.83	–	15.11	55.34	14.64 ³	99.02
Стильбит-Са											
15 ⁴	0.84	–	7.87	–	–	–	–	14.34	58.56	17.74 ³	99.35
Брюстерит-Sr											
16	0.29	0.26	0.35	–	13.51	3.53	–	15.33	54.40	13.71 ³	101.38
Каулсит (?)											
17	0.17	1.27	7.12	–	7.55	0.32	0.79	20.32	34.31	21.39 ³	93.24

Примечание. ¹ – (Бонштедт-Куплетская, 1951); ² – железо определено как FeO; ³ – H₂O рассчитано по стехиометрии; ⁴ – (Пеков и др., 2004); прочерк – не определено. Анализ 2 содержит 0.12 мас. % SO₃. Анализы получены на приборах СЭМ Tescan Vega3 (3, 17), РЭММА-202М (4, 10, 11) и Cameca SX 100 (6–9, 12–14, 16). Расчетные формулы см. текст.

Note. ¹ – (Bonstedt-Kupletskaya, 1951); ² – iron is determined as FeO; ³ – H₂O is recalculated from stoichiometry; ⁴ – (Pekov et al., 2004); dash – not determined. Analysis 2 contains 0.12 wt % SO₃. The chemical composition is analyzed on SEMs Tescan Vega3 (3, 17), REMMA-202M (4, 10, 11) and Cameca SX 100 (6–9, 12–14, 16). For calculation of formulas, see text.

рал определен П.В. Хворовым также по рентгенограмме.

Паранатролит Na₂[Al₂Si₃O₁₀] · 3H₂O установлен в крупных скоплениях в виде снежно-белых толстых корок (до 2–3 см) на натролите, кальците и анальците, а также в частичных псевдоморфозах по канкриниту в пегматитовых жилах, секущих мискисты на г. Долгой (Пеков и др., 2004). Химический состав паранатролита (табл., ан. 5) отвечает эмпирической формуле (Na_{1.25}Ca_{0.35}Sr_{0.05}Ba_{0.01})_{Σ1.66}[Al_{2.21}Si_{2.83}O₁₀]·3H₂O (расчет на O₁₀ и 3H₂O). При гидротермальных и/или гипергенных изменениях

паранатролит частично замещается гоннардитом. В наших образцах также отмечались мучнисто-белые агрегаты паранатролита на друзовидных сферолитах натролита (рис. 9).

Сколецит Ca[Al₂Si₃O₁₀] · 3H₂O оптически определен в шлифах в зернах с низким двупреломлением среди вишневиты из пегматитов Курочкина Лога (Белянкин, 1933). Там же он предположительно отмечен в виде игольчатых кристаллов с отрицательным удлинением без изучения состава (Бонштедт-Куплетская, 1951). Без описания минерал приведен в списке минералов Вишнёвых гор (Еськова и др.,

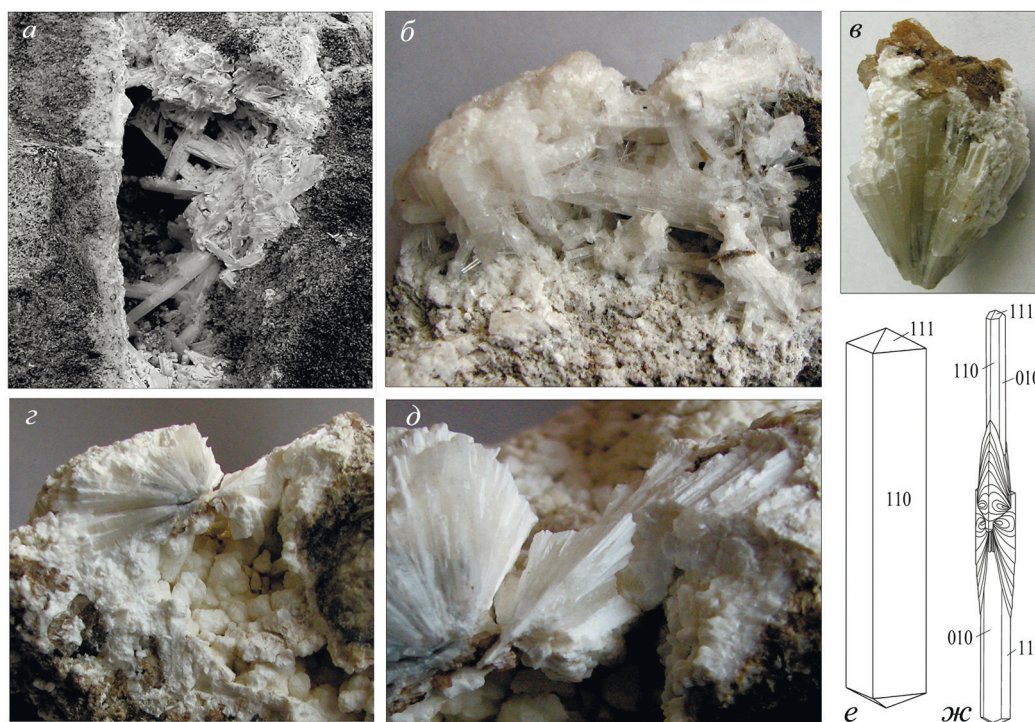


Рис. 7. Кристаллы (а, б, е), двойник (ж) и сферолитовые агрегаты (в–д) натролита размером 2–3 см из полостей в жилах щелочных пегматитов на г. Каравай и Долгой.

Образцы и фото (а–е) В.А. Попова; чертеж двойника (ж) Е.П. Макагонова и С.Н. Никандрова.

Fig. 7. Crystals (a, б, e), twin (ж) and spherulitic aggregates (в–д) of natrolite 2–3 cm in size from cavities in alkali pegmatite veins from quarry at Mts. Karavay and Dolgaya.

Samples and photos (a–e) of V.A. Popov; drawing of the twin (ж) by E.P. Makagonov and S.N. Nikandrov.

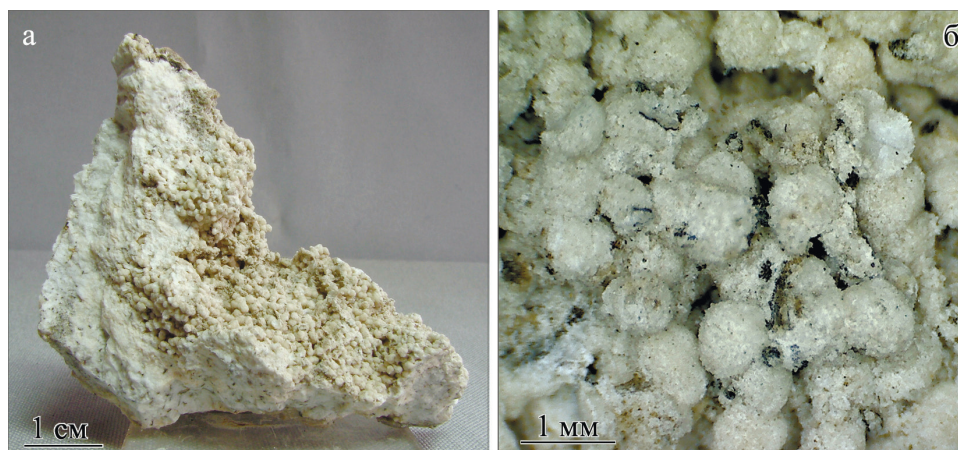


Рис. 8. Агрегат гоннардита из карьера на г. Долгой.

Образец и фото А.М. Кузнецова.

Fig. 8. Gonnardite aggregate from quarry at Mt. Dolgaya.

Sample and photo of A.M. Kuznetsov.

1964). В образцах с цеолитами из жилы № 129 в штольне № 7 (сборы Г.Е. Антонова, 1993 г.) игольчатые кристаллы кальциевого цеолита в ассоциации с кальцитом, алланитом-(Се) и калиевым полевым шпатом по соотношению катионов близки сколециту (предварительные данные А.В. Касаткина).

Мезоцит $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{Al}_6\text{Si}_9\text{O}_{30}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ в виде бесцветных удлиненно-пластинчатых кристаллов до 1–2 мм (рис. 10) в ассоциации с цирконом, аннитом и другими минералами установлен в образце, отобранном А.М. Кузнецовым в 2014 г. из полости в нефелин-полевошпатовом пегматите на г. Кобеле-



Рис. 9. Белый порошковатый паранатролит на сферолитовом натролите из прожилка с пиритом.

Размер образца – 6 см, карьер на г. Долгой. Фото А.М. Кузнецова.

Fig. 9. White powdery parnatrolite on natrolite from veinlets with pyrite.

Sample is 6 cm in size, quarry at Mt. Dolgaya. Photo of A.M. Kuznetsov.

ва. Его химический состав (табл., ан. 6) отвечает формуле $\text{Na}_{2.00}\text{Ca}_{1.90}(\text{Al}_{5.99}\text{Si}_{9.06}\text{O}_{30}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_{30} и $8\text{H}_2\text{O}$). Параметры ромбической элементарной ячейки, рассчитанные по порошковой рентгенограмме, отвечают мезолиту (Å): $a = 18.333(4)$, $b = 56.414(7)$, $c = 6.554(1)$, $V = 6779(2) \text{ \AA}^3$.

Гарронит-Na $\text{Na}_6(\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ установлен в образце, отобранном А.М. Кузнецовым в 2019 г. на горизонте 336 м нефелин-полевошпатового карьера г. Долгой. Этот чрезвычайно редкий цеолит образует мозаичные агрегаты белых полупрозрачных, со стекляннным блеском, субизометричных дипирамидальных кристаллов размером до 0.2–0.5 мм в полости растворения натролита (рис. 11). Химический состав (табл., ан. 7) отвечает эмпирической формуле $(\text{Na}_{5.60}\text{K}_{0.15}\text{Ca}_{0.06})_{\Sigma 5.81}[\text{Al}_{6.29}\text{Si}_{9.81}\text{O}_{32}] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_{32} и $8\text{H}_2\text{O}$). Рассчитанные по порошковой рентгенограмме параметры моноклинной элементарной ячейки: $a = 9.964(1) \text{ \AA}$, $b = 10.098(1) \text{ \AA}$, $c = 10.098(2) \text{ \AA}$, $\beta = 90.46(2)^\circ$, $V = 1016.1(2) \text{ \AA}^3$. Гарронит-Na описан в щелочном массиве Сент-Илер в провинции Квебек в Канаде и считался эндемиком для этого объекта (Grise et al., 2016). Наша находка является первой в России и второй – в мире.

Филлипсит-К $(\text{K}, \text{Ca}, \text{Na})_{4-x}[\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ обнаружен в кавернах цеолитового прожилка в образце содалита, отобранного А.М. Кузнецовым в 1996 г. из Полевошпатового карьера на г. Долгой. В жильном агрегате преобладают натролит и

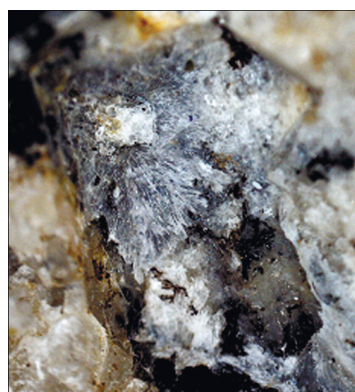


Рис. 10. Бесцветные кристаллы мезолита в полости нефелин-полевошпатового пегматита на г. Кобелева.

Размер фото – 36 × 39 мм. Образец А.В. Касаткина, фото А.М. Кузнецова.

Fig. 10. Colorless mesolite crystals in cavity of nepheline-feldspar pegmatite at Mt. Kobeleva.

Image size is 36 × 39 mm. Sample of A.V. Kasatkin, photo of A.M. Kuznetsov.

анальцит, в меньших количествах встречаются гоннардит и кальцит. Многочисленные полости инкрустированы мелкими водяно-прозрачными блочными кристаллами филлипсита-К размером до 0.5 мм (рис. 12). Химический состав минерала (табл., ан. 8) отвечает эмпирической формуле $(\text{K}_{1.46}\text{Ca}_{0.95}\text{Na}_{0.75})_{\Sigma 3.16}[\text{Al}_{4.71}\text{Si}_{11.44}\text{O}_{32}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_{32} и $12\text{H}_2\text{O}$). Параметры моноклинной элементарной



Рис. 11. Сrostок белых кристаллов (0.2–0.3 мм) гарронита-Na из карьера на г. Долгой.

Размер фото – 3.3 × 3.2 мм. Образец и фото А.М. Кузнецова.

Fig. 11. Intergrowth of white crystals (0.2–0.3 mm) of garronite-Na from quarry at Mt. Dolgaya.

Image size is 3.3 × 3.2 mm. Sample and photo of A.M. Kuznetsov.

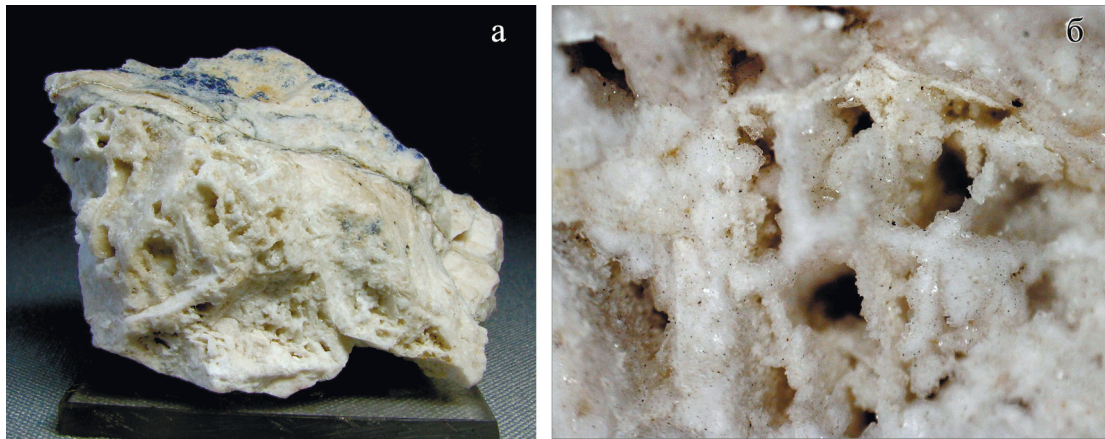


Рис. 12. Мелкие бесцветные кристаллы филлипсита-К на стенках каверн в натролите с анальцимом и содалитом. а – общий вид образца, $4 \times 3.5 \times 2$ см; б – фрагмент, 0.5×0.5 см. Карьер на г. Долгой. Образец и фото А.М. Кузнецова.

Fig. 12. Small colorless phillipsite-K crystals on walls of cavities in natrolite with analcime and sodalite.

a – general view of the sample, $4 \times 3.5 \times 2$ cm; б – detail of photo a, 0.5×0.5 cm. Quarry at Mt. Dolgaya. Sample and photo of A.M. Kuznetsov.

ячейки, рассчитанные по порошковой рентгенограмме, соответствуют структурному типу филлипсита (Å): $a = 9.879(2)$, $b = 14.261(3)$, $c = 8.653(1)$, $\beta = 124.34(1)^\circ$, $V = 1006.6(2) \text{ \AA}^3$.

Гармотом $(\text{BaCa})_2[\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ упоминался в ассоциации со стильбитом и стронцианитом в цеолитсодержащих пегматитах жил №№ 35, 124–136 и 145 среди пироксеновых фенитов (Еськова и др., 1964). Кальцийсодержащий гармотом обнаружен в 2006 г. А.М. Кузнецовым в полости мелкокристаллического агрегата алланита-(Ce)-ферриалланита-(Ce) в образце из отвала жилы № 35. Гармотом образует сростки до 1.5 мм досковидных кристаллов белого и желтоватого цвета со стекляннным блеском (рис. 13) в ассоциации с альбитом, бастнезитом-(Ce), пиритом и титанитом. В другом образце, найденном там же в 2018 г., гармотом образует нитевидные прожилки толщиной не более 10 мкм и длиной до 4 мм, секущие альбит и калиевый полевой шпат и местами замещенные пиритом (рис. 14а), а также таблитчатые кристаллы до 100 мкм в альбите со Sr-содержащим баритом (рис. 14б). В этой же ассоциации находятся алланит-(Ce), анкилит-(Ce), бастнезит-(Ce), колумбит-(Mn), колумбит-(Fe), ниобозинит-(Y), фторапатит, циркон и шеелит. Химический состав гармотома (табл., ан. 9) отвечает формуле $(\text{Ba}_{1.26}\text{Ca}_{1.04}\text{Na}_{0.43}\text{K}_{0.26})_{\Sigma 2.99}[\text{Al}_{4.96}\text{Si}_{10.95}\text{O}_{32}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_{32} и $12\text{H}_2\text{O}$).

Шабазит-Са $\text{Ca}_2[\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ («шабазит») выявлен Э.М. Бонштедт-Куплетской (1951) в виде одиночных желтых полупрозрачных кубо-

видных ромбоэдров и двойников прорастания до 1–2 мм в пустоте среди агрегата натролита и нефелина в образце из отвалов жилы № 5 на г. Каравай. Плотность шабазита 2.11 г/см^3 , показатели преломления $n_g 1.493$ и $n_p 1.490$ (Бонштедт-Куплетская, 1951). Нами в 1983–1984 гг. в отвалах

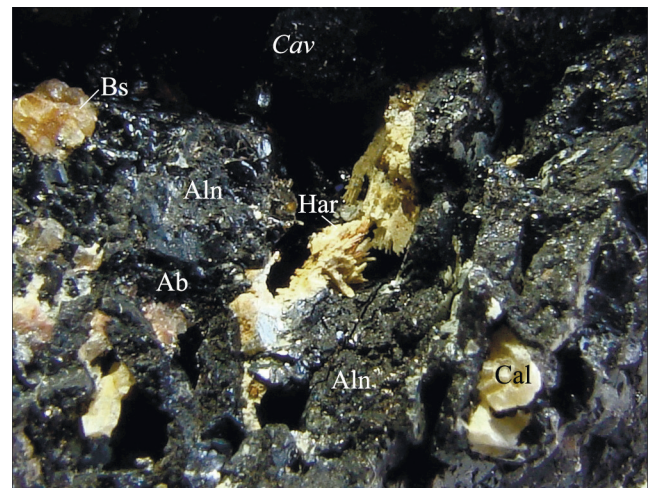


Рис. 13. Агрегат желтоватых кристаллов гармотома (Har) в полости черного алланита-(Ce)-ферриалланита-(Ce) (Aln).

Bs – бастнезит-(Ce), Cal – кальцит (подтравлен), Ab – альбит, Cav – полость. Размер фото – 8×6 мм. Жила № 35, образец и фото А.М. Кузнецова.

Fig. 13. Yellowish harmotome crystals (Har) in cavity of black allanite-(Ce)-ferriallanite-(Ce) (Aln).

Bs – bastnäsite-(Ce), Cal – calcite (etched), Ab – albite, Cav – cavity. Image size is 8×6 mm. Vein no 35, specimen and photo of A.M. Kuznetsov.

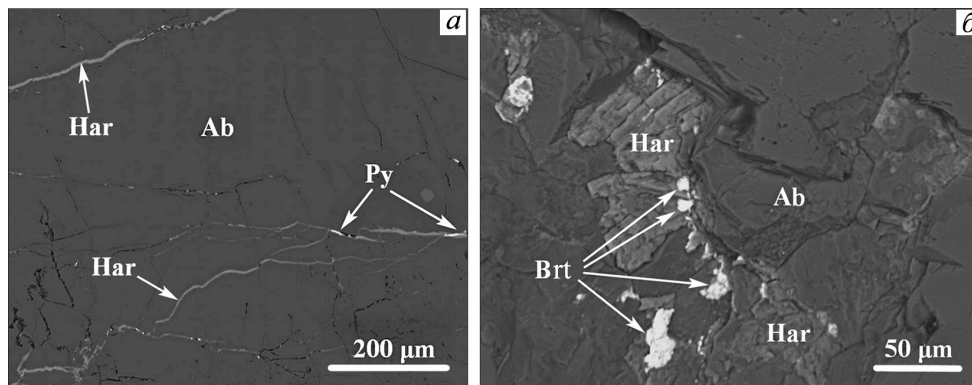


Рис. 14. Нитевидные жилки гармотома (Har) с пиритом (Py) в альбите (Ab) (а) и таблитчатые кристаллы гармотома с баритом (Brt) в альбите (б).

BSE фото А.В. Касаткина.

Fig. 14. Fine harmotome (Har) veinlets with pyrite (Py) (a) and tabular harmotome crystals with barite (Brt) in albite (Ab) (б).

BSE photo of A.V. Kasatkin.

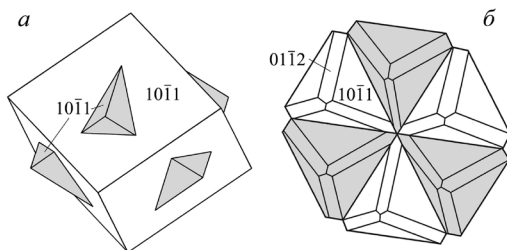


Рис. 15. Двойники прорастания шабазита-Са. а – по В.А. Попову, б – по Е.П. Макагонову.

Fig. 15. Interpenetration twins of chabazite-Ca. а – after V.A. Popov, б – after E.P. Makagonov.

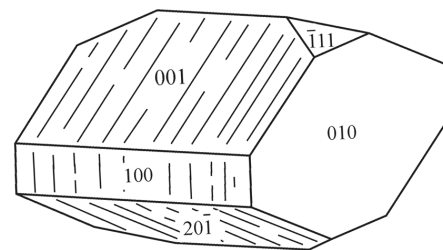


Рис. 16. Кристалл гейландита-(Са).

Чертеж Е.П. Макагонова.

Fig. 16. Heulandite-(Ca) crystal.

Drawing by E.P. Makagonov.

жил № 32 и № 35 встречены подобные двойники прорастания бесцветного шабазита как с гранями одного ромбоэдра $\{10\bar{1}1\}$, так и двух ромбоэдров (рис. 15). Состав шабазита-(Са) изучен для двойника, сходного с изображенным на рисунке 15б двойником из сиенит-пегматита № 32. Состав его разных участков (возможно, пирамид нарастания разных ромбоэдров) отличается содержаниями оксидов К и Ва (табл., ан. 10 и 11). Эмпирические формулы минерала (расчет на O_{24} и $12H_2O$) – $(Ca_{1.33}K_{0.54}Sr_{0.07}Na_{0.05}Ba_{0.02})_{\Sigma 2.01}(Al_{3.32}Si_{8.62}Fe^{3+}_{0.04})_{\Sigma 11.98}O_{24} \cdot 12H_2O$ и $(Ca_{1.26}Ba_{0.33}K_{0.21}Na_{0.04}Sr_{0.01})_{\Sigma 1.84}Al_{3.83}Si_{8.24})_{\Sigma 12.07}O_{24} \cdot 12H_2O$, соответственно.

Гейландит-Са $(Ca,Na)_5(Al_9Si_{27}O_{72}) \cdot 24H_2O$ как «гейландит» впервые указан без описания в поздних цеолитовых прожилках со стильбитом («десмином») и шабазитом, секущих брекчированные карбонатиты в зоне западного контакта миаскитового массива (Еськова и др., 1964). Позднее он был найден в образцах жил с поздней минерализацией в шахте Капитальная геологами Н.М. Некрасо-

вой и О.Б. Устиновым (Попов, Нишанбаев, 1993), а А.М. Кузнецовым – в отвалах жилы № 35. Кристаллы гейландита-Са размером до первых миллиметров обычно удлинены по оси $[010]$ со спайностью по пинакоиду $\{010\}$ (рис. 16) и образуют друзовидные агрегаты с кальцитом, шабазитом-Са и пиритом. ИК спектр и оптические константы гейландита-Са близки справочным данным. В сечении $\Pi(010)$ слабо проявлена оптическая зональность с постепенным снижением преломления к периферии кристалла. Гейландит-Са отмечен в полевошпатовых жилах с эгирином и щелочными амфиболами среди фенитов западного экзоконтакта миаскитового массива (Пеков и др., 2004). В жиле № 129 (г. Долгая) гейландит-Са образует сростки бледно-коричневых прозрачных со стекляннным блеском толстотаблитчатых кристаллов до 1 см.

Химический состав гейландита-Са (табл., ан. 12) при расчете на O_{72} и $24H_2O$ соответствует формуле $(Ca_{2.47}Sr_{1.81}K_{1.71}Na_{0.11}Ba_{0.06})_{\Sigma 6.16}[Al_{9.02}Si_{26.61}O_{72}] \cdot 24H_2O$. Параметры моноклинной элементарной ячей-



Рис. 17. Друза бесцветных таблитчатых кристаллов гейландита-Sr с розоватым альбитом и темно-зеленым диопсидом из жилы № 35.

Размер фото – 2 × 1.6 см. Образец и фото А.М. Кузнецова.

Fig. 17. Druse of tabular colorless heulandite-Sr crystals with pinkish albite and dark green diopside from vein no. 35.

Image size is 2 × 1.6 cm. Sample and photo of А.М. Kuznetsov.

ки гейландита-Ca (Å): $a = 7.4298(12)$, $b = 17.720(3)$, $c = 17.900(4)$, $\beta = 116.49(2)^\circ$, $V = 2109.3(7) \text{ \AA}^3$ (данные монокристалльной рентгеновской дифрактометрии).

Гейландит-Sr (Sr,Ca,KNa) $_5[\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ найден А.М. Кузнецовым в отвалах жилы № 35 в 2003 г. в небольшой полости среди агрегата розоватого альбита, темно-зеленого диопсида, черного алланита-(Ce) и белого волокнистого мейонита. Кристаллы минерала размером до 0.5–2 мм брусковидные до таблитчатых (рис. 17), бесцветные

и прозрачные со стекляннным блеском, по форме подобны кристаллам гейландита-(Ca), но нередко более удлиненные по оси [010]. Химический состав отвечает формуле ($\text{Sr}_{2.25}\text{Ca}_{1.57}\text{K}_{1.02}\text{Na}_{0.65}\text{Ba}_{0.04}$) $_{\Sigma 5.53}[\text{Al}_{8.90}\text{Si}_{26.98}\text{O}_{72}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_{72} и $24\text{H}_2\text{O}$) (табл., ан. 13). Параметры моноклинной элементарной ячейки (Å): $a = 17.769(6)$, $b = 17.870(2)$, $c = 7.450(2)$; $\beta = 116.49(4)^\circ$, $V = 2117(1) \text{ \AA}^3$ (данные монокристалльной рентгеновской дифрактометрии).

Гейландит-K (K,Ca,Na,Ba) $_5(\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ установлен А.В. Касаткиным в образцах из жилы № 129 в штольне № 7, отобранных А.М. Кузнецовым в 1993 г. Гейландит-K образует мелкие друзы кристаллов до 2–5 мм от таблитчатого до толстотаблитчатого облика с преобладанием граней пинакоидов {010}, {20 $\bar{1}$ } и {100} (рис. 18). Ранее присутствие гейландита-K предполагалось В.А. Поповым по форме уплощенных по оси [010] таблитчатых кристаллов размером 0.05–0.3 мм с соотношением содержания К/Са ~1.3 и небольшой примесью Na и Ba (по ЭД спектру) в образце, отобранном С.Ю. Крюковым из цеолитсодержащей жилы нефелин-полевошпатового пегматита в карьере г. Долгой. Химический состав гейландита-K соответствует формуле ($\text{K}_{1.85}\text{Na}_{1.50}\text{Sr}_{1.05}\text{Ca}_{1.01}\text{Ba}_{0.74}$) $_{\Sigma 5.53}[\text{Al}_{8.75}\text{Si}_{27.20}\text{O}_{72}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_{72} и $24\text{H}_2\text{O}$) (табл., ан. 14). Параметры моноклинной элементарной ячейки гейландита-K (Å): $a = 7.4370(12)$, $b = 17.902(3)$, $c = 17.762(3)$, $\beta = 116.614(18)^\circ$, $V = 2114.2(6) \text{ \AA}^3$ (данные монокристалльной рентгеновской дифрактометрии).

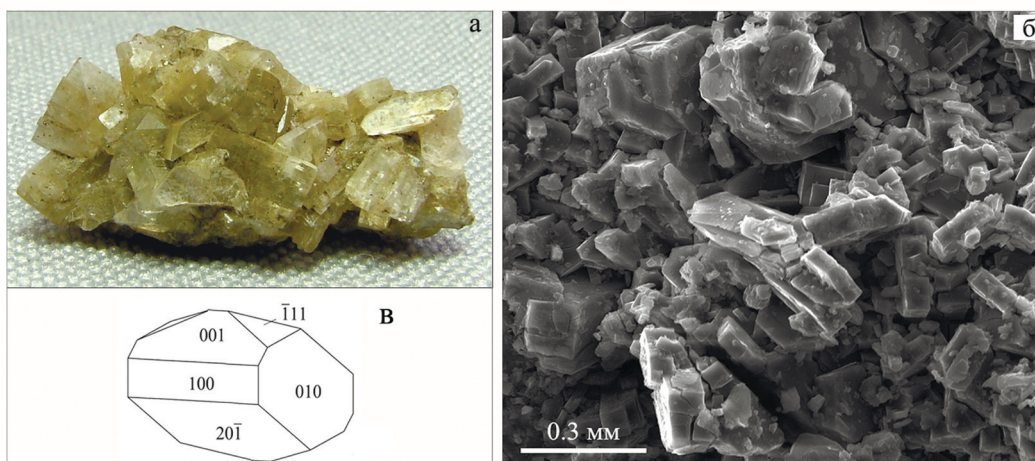


Рис. 18. Агрегаты кристаллов гейландита-K (а, б) и идеализированная форма кристалла (в). Образец 2 см (а), жила № 129. Фото А.М. Кузнецова (а) и И.А. Блинова (б); чертёж В.А. Попова.

Fig. 18. Aggregates of heulandite-K crystals (a, б) and its idealized form (в).

Sample is 2 cm (а), vein no. 129. Photo of А.М. Kuznetsov (а) and I.А. Blinov (б); drawing by V.А. Popov.

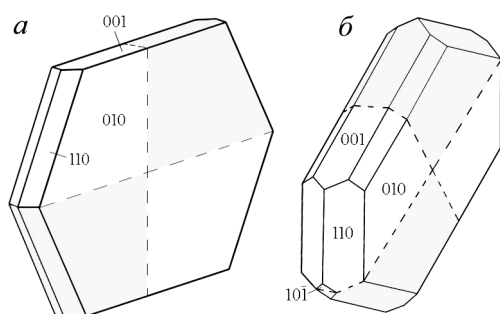


Рис. 19. Двойники прорастания стильбита-Са.

а – по И.В. Пекову (в нестандартной установке), б – по Е.П. Макагонову.

Fig. 19. Interpenetration twins of stilbite-Ca.

а – after I.V. Pekov (in non-standard setting), б – after E.P. Makagonov.

Стильбит-Са (NaCa_4)[$\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}$] · 28 H_2O как «десмин» впервые указан без описания в поздних цеолитсодержащих жилах (Чесноков, 1963; Еськова и др., 1964). Позднее он был найден в виде тонкотаблитчатых, уплощенных по оси [010] сдвойникованных кристаллов размером до 2 мм (рис. 19а), нарощих на стенки полостей трещин среди фенитов в жиле № 125 (Пеков и др., 2004). Удлиненно-таблитчатые двойники прорастания стильбита-Са с более богатым ограничением встречены в образцах из района жилы № 137 (рис. 19б). Химический состав стильбита-Са из жилы № 125 (табл., ан. 15) соответствует эмпирической формуле ($\text{Ca}_{4.0}\text{Na}_{0.77}$) $_{\Sigma 4.77}$ [$\text{Al}_{8.02}\text{Si}_{27.79}\text{O}_{72}$]·28 H_2O (Пеков и др., 2004).

Брюстерит-Sr $\text{Sr}_2(\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32})\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – редкий цеолит – диагностирован А.В. Касаткиным в образцах А.М. Кузнецова, отобранных в 1993 г. на г. Долгой из разведочной штольни № 7 (горизонт +230 м) по жиле № 129 (~ в 700 м ЮЮВ ствола шах-



Рис. 20. Таблитчатые кристаллы коричневатого брьюстерита-Sr до 5 мм на кальците с черным алланитом-(Ce) из жилы № 129 на г. Долгой.

Образец (2×1×1 см) и фото А.Д. Касаткиной.

Fig. 20. Tabular brownish brewsterite-Sr crystals up to 5 mm on calcite with black allanite-(Ce) from vein no. 129 at Mt. Dolgaya.

Sample (2×1×1 cm) and photo of A.D. Kasatkina.

ты Капитальная). Минерал образует коричневатые просвечивающие таблитчатые кристаллы размером до 3–5 мм со стеклянным блеском и агрегаты кристаллов в ассоциации с алланитом-(Ce), кальцитом и калиевым полевым шпатом (рис. 20). По сравнению с подобным по форме гейландитом-К, кристаллы брьюстерита-Sr удлинены по оси [010] и отличаются слабым развитием граней пинакоида {100} (рис. 21). Химический состав брьюстерита-Sr (табл., ан. 16) соответствует эмпирической формуле ($\text{Sr}_{1.72}\text{Ba}_{0.30}\text{Na}_{0.12}\text{K}_{0.07}\text{Ca}_{0.08}$) $_{\Sigma 2.29}$ [$\text{Al}_{3.96}\text{Si}_{11.93}\text{O}_{32}$]·10 H_2O (расчет на O_{32} и 10 H_2O). Параметры моноклинной элементарной ячейки отвечают брьюстериту: $a =$

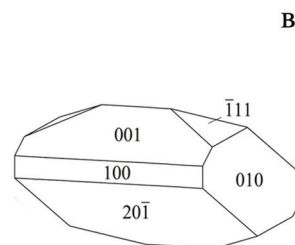


Рис. 21. Фрагменты друз брьюстерита-Sr (а, б) из жилы № 129 на г. Долгой и форма его кристалла (в).

Образцы (до 3 мм) и фото А.М. Кузнецова; чертеж В.А. Попова.

Fig. 21. Fragments of druses of brewsterite-Sr crystals from vein no. 129 (а, б) at Mt. Dolgaya and its morphology (в). Samples (up to 3 mm) and photos of A.M. Kuznetsov; drawing by V.A. Popov.

6.7848(11) Å, $b = 17.517(2)$ Å, $c = 7.750(4)$ Å, $\beta = 94.34(2)^\circ$, $V = 918.5(5)$ Å³ (данные монокристалльной рентгеновской дифрактометрии).

Каулсит $\text{Ca}[(\text{Al}_2\text{Si}_3)\text{O}_{10}] \cdot 5-6\text{H}_2\text{O}$ (?) был предположен в 2014 г. М.А. Рассомахиным по составу и КР спектру в сростке пластинчатых кристаллов цеолита в ассоциации с кальцитом, стронцианитом, натролитом, анальцимом, давсонитом, шамозитом и другими минералами из содалит-канкринитового пегматита горизонта 480 м карьера на СЗ склоне г. Кобелихи, но по расчету отнесен к шабазиту-Са (Нишанбаев и др., 2016). Нами минерал по составу (табл., ан. 17) отнесен к Sr-содержащему каулситу с эмпирической формулой $(\text{Ca}_{0.64}\text{Sr}_{0.37}\text{K}_{0.14}\text{Na}_{0.03}\text{Ba}_{0.01})_{\Sigma 1.19}[\text{Al}_{2.02}\text{Si}_{2.89}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{10}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (расчет на O_{10} и $6\text{H}_2\text{O}$). Избыток катионов в позиции А и дефицит суммы анализа, возможно, обусловлены захватом стронцианита при анализе. Близкий по составу цеолит встречен в 2001 г. В.А. Поповым в поздних прожилках, секущих канкринит в миаскитовом пегматите Северного карьера на г. Долгой (в настоящее время это единый полевошпатовый карьер Надежда). Поскольку рентгенографическое исследование вишневогорского каулсита не проведено, его диагностику нельзя считать окончательной. В России Sr-содержащий каулсит ранее отмечался в Ловозерском массиве (Пеков, 2001).

Заключение

Цеолитовая минерализация в Вишнёвых горах широко проявлена в северо-западном эндоконтакте Центрального миаскитового массива и Седловидной залежи миаскитов, вмещающей рудные тела Вишневогорского месторождения ниобиевых руд. В крупных жилах нефелин-полевошпатовых пегматитов в остаточных друзовых полостях на нефелине, канкрините и полевых шпатах кристаллизовались анальцим, натролит и, частично, поздние цеолиты (паранатролит и другие). Поздние цеолит-содержащие прожилки, секущие щелочные пегматиты и жильные карбонатиты, выполняют полости субмеридиональных трещин, вскрытых выработками шахты Капитальная, карьером и штольней по жиле № 35 в рудной зоне 147, карьерами на горах Долгой и Кобелихе и на жилах №№ 116, 137, 141, 144, 145.

К настоящему времени в жилах и прожилках Вишнёвых гор выявлены и в разной степени изучены 16 цеолитов – анальцим, натролит,

гоннардит, паранатролит, сколецит, мезолит, гарронит, филлиписит-К, гармотом, шабазит-Са, гейландит-Са, гейландит-Sr, гейландит-К, стильбит-Са, брүстерит-Sr и, предположительно, каулсит. Гарронит-На является первой находкой в России и второй – в мире. Ряд цеолитов (брүстерит-Sr, гейландит-К, гейландит-Sr, мезолит и филлиписит-К) выявлены впервые для территории Вишнёвых гор.

Авторы признательны руководству и геологам Вишневогорского рудоуправления и ОАО «Вишневогорский ГОК», в разные годы способствовавших проведению исследований минералогии Вишнёвых гор, Ф. Нестола (Университет г. Падуа, Италия) – за монокристалльную съёмку ряда образцов, И.А. Блинову и В.А. Котлярову – за анализы цеолитов, С.С. Суставову и П.В. Хворову – за рентгеноструктурные анализы, А.В. Донскову (г. Миасс) и С.Ю. Крюкову (г. Снежинск) за образцы для исследования, Е.В. Белогуб – за замечания.

Литература

- Белянкин Д.С.** (1933) О воде в некоторых минералах. *Труды Петрографического института АН СССР*, 4, 65–71.
- Бонштедт-Куплетская Э.М.** (1951) Минералогия щелочных пегматитов Вишнёвых гор. М., АН СССР, 176 с.
- Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н.** (1964) Минералогия и геохимия редких элементов Вишнёвых гор. М., Наука, 319 с.
- Кобяшев Ю.С., Никандров С.Н.** (2007) Минералы Урала (минеральные виды и разновидности). Екатеринбург, Квадрат, 312 с.
- Макагонов Е.П., Никандров С.Н.** (1990) Двойники натролита симметрии $\bar{4}m2'$ из Вишнёвых гор. *Региональная минералогия Урала: тез. докл. II регион. совещ. «Минералогия Урала»*, 1, 62–63.
- Никандров С.Н.** (1989) Поздняя минерализация Вишневогорского месторождения ниобия: *Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук*. Миасс, Ильменский государственный заповедник, 18 с.
- Нишанбаев Т.П., Рассомахин М.А., Блинов И.А., Попова В.И.** (2016) Минералы содалит-канкринитового пегматита в Вишневогорском миаскитовом массиве (Южный Урал). *Минералогия*, 2(3), 40–52.
- Пеков И.В.** (2001) Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М., Ассоциация «Экоств», 432 с.
- Пеков И.В., Турчкова А.Г., Ловская Е.В., Чуканов Н.В.** (2004) Цеолиты щелочных массивов. М., Ассоциация «Экоств», 168 с.

Попов В.А., Нишанбаев Т.П. (1993) Целестин, апофиллит, гейландит и гизингерит из Вишнёвых гор. *Уральский минералогический сборник № 1*, 56–59.

Роненсон Б.М. (1966) Происхождение миаскитов и связь с ними редкометалльного оруденения. М., Недра, вып. **28**, 173 с.

Чесноков Б.В. (1963) Жилы альпийского типа в щелочных породах Вишнёвых гор. *Геология и полезные ископаемые Урала. Тр. Свердловск. горн. ин-та*, **42**, 143–151.

Чесноков Б.В., Попов В.А., Никандров С.Н., Баженова Л.Ф., Корнилов Ю.Б., Жданов В.Ф. (1984) Тенардит-мирабилитовая минерализация в миаскитах Вишневых гор на Урале. Материалы по минералогии месторождений Урала. Свердловск, УИЦ АН СССР, 24–33.

Grice, J.D., Rowe, R., and Poirier, G. (2016). Garronite-Na, a new zeolite species from Mont Saint-Hilaire, Québec. *Canadian Mineralogist*, **54**, 1549–1562.

References

Belyankin D.S. (1933) [About water in some minerals]. *Trudy Petrograficheskogo instituta AN SSSR [Proceedings of Petrographic Institute of Academy of Sciences of USSR]*, **4**, 65–71. (in Russian)

Bonstedt-Kupletskaya E.M. (1951) [Mineralogy of alkali pegmatites of the Vishnevy Mountains]. Moscow, AN SSSR, 176 p. (in Russian)

Chesnokov B.V. (1963) [Alpine-type veins in alkaline rocks of the Vishnevy Mountains]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Urala. Trudy Sverdlovskogo gornogo instituta [Geology and Mineral Resources. Proceedings of Sverdlovsk Mining Institute]*, **42**, 143–151. (in Russian)

Chesnokov B.V., Popov V.A., Nikandrov S.N., Bazhenova L.F., Kornilov Yu.B., Zhdanov V.F. (1984) [Tenardite-mirabilite mineralization in miaskites from Vishnevy Mountains in the Urals]. *Materialy po mineralogii mestorozhdeniy Urala [Materials on mineralogy deposits of the Urals]*. Sverdlovsk, UNTS AN SSSR, 24–33. (in Russian)

Es'kova E.M., Zhabin A.G., Muchitdinov G.N. (1964) [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevy Mountains]. Moscow, Nauka, 319 p. (in Russian)

Grice J.D., Rowe R., Poirier G. (2016) Garronite-Na, a new zeolite species from Mont Saint-Hilaire, Québec. *Canadian Mineralogist*, **54**, 1549–1562.

Kobyashev Yu.S., Nikandrov S.N. (2007) [Minerals of the Urals: mineral species and varieties]. Yekaterinburg, Kvadrat, 312 p. (in Russian)

Makagonov E.P., Nikandrov S.N. (1990) [Natro-lite twins of symmetry 4'm2' from Vishnevy Mountains]. *Regionalnaya mineralogiya Urala: tez. dokl. II region. soveshan. «Mineralogiya Urala» [Regional mineralogy of Urals. Tesis of reports II regional. conf. «Mineralogy of Urals»]*, **1**, 62–63. (in Russian)

Nikandrov S.N. (1989) [Late mineralization of the Vishnevogorsky Nb deposit]. *Abstract of Dissertation of Candidate of Geol.-Mineral. Sciences*. Miass, Ilmeny State Reserve, 18 p. (in Russian)

Nishanbaev T.P., Rassomakhin M.A., Blinov I.A., Popova V.I. (2016) [Minerals of sodalite–can-crinite pegmatites from the Vishnevogorsky miaskite massif (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **2**(3), 40–52. (in Russian)

Pekov I.V. (2001) [Lovozero massif: history of study, pegmatites, and minerals]. Moscow, Assotsiatsiya «Ekost», 432 p. (in Russian)

Pekov I.V., Turchkova A.G., Lovskaya E.V., Chukanov N.V. (2004) [Zeolites of alkaline complexes]. Moscow, Assotsiatsiya «Ekost», 168 p. (in Russian)

Popov V.A., Nishanbaev T.P. (1993) [Celestine, apophyllite, heulandite, and hisingerite from Vishnevy Mountains]. *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik [Urals Mineralogical Collection]*, (1), 56–59. (in Russian)

Ronenson B.M. (1966) [Origin of miaskites and related rare metal mineralization]. Moscow, Nedra, **28**, 174 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 4 марта 2020 г.

УНИКАЛЬНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ПОЛЯКОВИТА-(СЕ) В ИЛЬМЕНСКИХ ГОРАХ, ЮЖНЫЙ УРАЛ – НОВЫЕ НАХОДКИ

В.А. Попов¹, М.А. Рассомахин¹, С.В. Колисниченко

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru

A UNIQUE ORE LOCALITY OF POLYAKOVITE-(CE) IN THE ILMENY MOUNTAINS, SOUTH URALS – NEW FINDS

V.A. Popov¹, M.A. Rassomakhin¹, S.V. Kolisnichenko

¹ South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru

Крупный кристалл редчайшего минерала поляковита-(Ce) обнаружен в 2019 г. в карбонатит-пегматитах копи № 97 Ильменских гор на Южном Урале. Тела карбонатитов, слюдитов, слюдит-пегматитов и карбонатит-пегматитов находятся в пределах небольшого сложного тела щелочных ультрамафитов и содержат широкий уникальный спектр минеральных парагенезисов (горных пород), а также редкометалльных и редкоземельных минералов.

Илл. 18. Табл. 2. Библ. 12.

Ключевые слова: поляковит-(Ce), редкометалльные и редкоземельные минералы, щелочные ультрамафиты, карбонатиты, слюдиты, карбонатит-пегматиты, Южный Урал, Ильменские горы.

A large crystal of the rarest mineral polyakovite was discovered in 2019 in the carbonatites-pegmatites of pit № 97 of the Ilmeny Mountains. Bodies of carbonatites, glimmerites, glimmerites-pegmatites and carbonatite-pegmatites are located within a small complex body of alkaline ultramafites and carry a unique range of mineral assemblages (rocks), as well as rare-metal and REE minerals, which is unique for this famous mineral province.

Figures 18. Tables 2. References 12.

Key words: polyakovite-(Ce), rare-metal and REE minerals, alkaline ultramafites, carbonatites, glimmerite, carbonatite-pegmatites, South Urals, Ilmen Mountains.

Введение

Ильменские горы на Южном Урале и их отроги сложены Ильменогорским миаскитовым массивом, телами сиенитов, гранитов, ультрамафитов, карбонатитов и вмещающими их метаморфическими породами – гранитогнейсами, амфиболитами, кристаллическими сланцами и кварцитами. Здесь открыты такие минералы как ильменит, канкринит, монацит, самарскит, эшинит, фергусонит, чевкинит, хиолит, ушковит, макарочкинит, поляковит, ферривинчит и фторрихтерит (Попов, Попова, 2006; и мн. др.), а также горные породы – миаскиты («ильменские граниты»), фирситы и «зерни-

стые известняки», которые позднее на норвежских объектах были названы карбонатитами (Brögger, 1921). Именно в «зернистых известняках» (карбонатитах и карбонатит-пегматитах) Ильменских гор найдены кристаллы ильменита, циркона, пироклора, молибденита, чевкинита, алланита со сложной комбинацией простых форм.

Копь на «бурый сфен» вблизи Ильменского озера была заложена в 1836 г. горным инженером И.И. Редикорцевым на восточной окраине Северо-Ильменского торфяного болота; позднее ей присвоен № 97 (Мельников, 1882). «Бурый сфен» никого не заинтересовал, и копь надолго была забыта. Ее современные координаты – 55° 01' с.ш. и

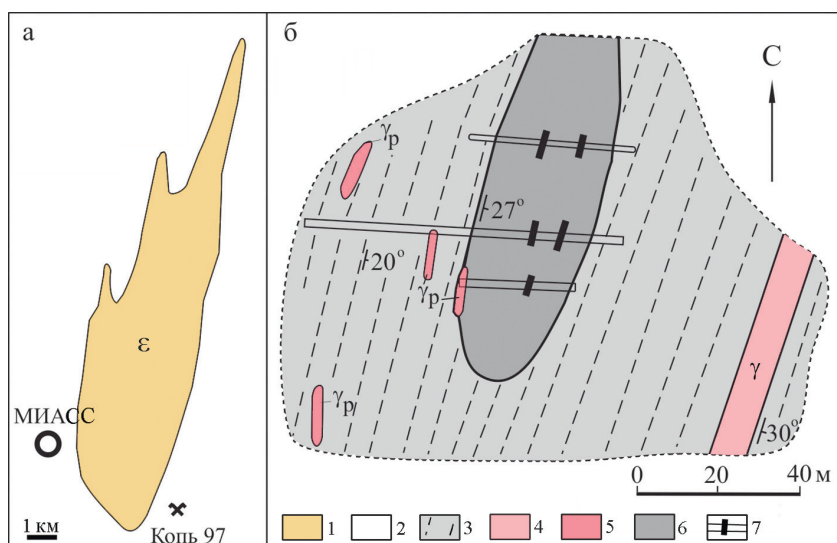


Рис. 1. Местоположение копи № 97 относительно Ильменогорского миаскитового массива (а) и геологическая схема района копи (б).

1 – миаскиты; 2 – вмещающие метаморфические породы; 3 – пироксеновые фениты; 4 – граниты; 5 – гранитные пегматиты; 6 – ультрамафиты; 7 – канавы с выходами жил слюдит-пегматитов и карбонатит-пегматитов.

Fig. 1. Position of pit no. 97 relative to Ilmenogorsky miaskite complex (a) and geological scheme of the pit area (b).

1 – miaskites; 2 – host rocks; 3 – pyroxene fenites; 4 – granites; 5 – granitic pegmatites; 6 – ultramafic rocks; 7 – trenches with veins of glimmerite-pegmatites and carbonatite-pegmatites.



Рис. 2. Выветрелые карбонатиты (голубовато-серые), рихтерит-флогопит-оливиновые породы (коричневатые) и биотитовые слюдиты (серые) в западном шурфе копи № 97. Фото: С.В. Колисниченко, июль 2019 г.

Fig. 2. Weathered carbonatites (bluish gray), richterite-phlogopite-olivine rocks (brownish) and biotite glimmerites (gray) in the western trench of pit no. 97.

Photo of S.V. Kolisnichenko, July 2019.

60° 11' в.д. В 1984 г. В.О. Поляковым тело ультрамафитов было вскрыто шурфом и составлена геологическая схема. Позже дано первичное описание минералов (Поляков, Недосекова, 1990). В 2000 г. в районе «сфеновой» копи № 97 в жилах карбонатит-пегматитов и слюдит-пегматитов обнаружены крупные кристаллы монацита, фергусонита, фторрихтерита, форстерита, корунда, хромита и нового минерала из группы чевкинита – поляковита-(Ce) (Попов и др., 2000). В 2001 г. в процессе геологической практики студентов геологического факультета ЮУрГУ под руководством В.А. Попова уточнена геологическая карта района копи № 97 (рис. 1). Новая расчистка горных выработок копи № 97 (рис. 2) проведена в 2019 г. С.В. Колисниченко с группой юных геологов, в результате которой получены новые данные о строении пегматитовых тел с находками поляковита-(Ce), в том числе его кристалла размером 16 см (Колисниченко, Попов, 2019). В настоящее время это единственное проявление самых крупных индивидов редчайшего в мире минерала поляковита-(Ce). При изучении новых образцов нами выявлено более 60-ти минералов, из них около половины ранее здесь не отмечались. Ниже приводятся некоторые результаты исследований, полученных за последние 20 лет по основным минералам. Акцессорные минералы заслуживают отдельной публикации.

Изучение горных пород и минералов под микроскопом, фотографии образцов и гониометрические измерения кристаллов выполнены В.А. Поповым. Химический состав минералов определен М.А. Рассомахиным на СЭМ Tescan Vega 3 с ЭД спектрометром при ускоряющем напряжении 20 кВ с использованием эталонов MAC (Micro-analysis consultants LTD, рег. № 1362) и MINM 25-53 (Astimex Scientific Limited, серийный номер 01-044).

Краткая характеристика горных пород и жильных тел в районе копи № 97

На исследованной площади в сложном теле щелочных ультрамафитов установлены флогопит-форстеритовые, флогопитовые и рихтеритовые породы и карбонатиты (рис. 3), местами претерпевшие неоднократную хрупко-пластическую деформацию с образованием реологитов (бластомилонитов) и брекчиевидных текстур, а также реликтовых менее деформированных участков. В мелкозернистых пироксеновых фенитах гнейсовидность слабо заметна, а в амфиболовых и биотитовых фенитах четко проявлена субмеридиональная полосчатость и гнейсовидность. В связи с деформациями относительный возраст разных породных тел проблематичен: контакты сорваны и сдвинуты, проявлено одновременное брекчирование. Небольшое сложное тело щелочных ультрамафитов нанесено на геологическую схему в косесекущем положении по отношению к вмещающим гнейсовидным пироксеновым сиенитам (рис. 1). На некоторых участках контакты пород нарушены, а породы выветрены. Фенитизация в ультрамафитах (Поляков, Недосекова, 1990) нами не наблюдалась, и не установлены секущие миаскитовые и сиенитовые тела. Тело ультрамафитов разбито разноориентированными трещинами, в которых наблюдаются жилы карбонатитов, слюдитов, карбонатит-пегматитов, слюдит-пегматитов, флогопит-фторрихтеритовых пегматитов, частично смещенных по склону в коре выветривания.

Состав и строение жильных тел сильно варьируют по количественным соотношениям как породообразующих минералов (доломита, кальцита, флогопита, фторрихтерита, клиногумита, форстерита, хлорита, корунда), так и второстепенных минералов (монацита-(Ce), поляковита-(Ce), эшинита-(Ce), фергусонита-(Ce), хромита, шпинели, циркона и других минералов). В некоторых слу-

чаях встречались аномальные скопления нескольких минералов. Характерной чертой щелочного ультрамафитового тела является сходство минералогии горных пород и их пегматитовых аналогов.

Минеральный состав щелочных ультрамафитов и карбонатитов копи № 97

Флогопит-форстеритовая порода мелко- и среднезернистая (рис. 3а) содержит 93–95 об. % форстерита и 2–5 об. % флогопита, а также пирит, пирротин, пентландит, халькопирит, молибденит, хромит, монацит-(Ce), апатит, барит, единичные зерна фторрихтерита и талька, а в редких тонких трещинках – серпентин. Встречена и неравнозернистая (порфиroidная) флогопит-форстеритовая порода, где отдельные изометричные индивиды форстерита достигают размера 5–10 см, а вкрапленность флогопита и редкие призмы зеленого фторрихтерита – 1 см.

Флогопит-рихтеритовая порода (рис. 3б) содержит 70–90 об. % рихтерита, 10–30 об. % флогопита и аксессуарные хромит, монацит-(Ce) и циркон. Состав минералов относительно однороден.

Слюдиты – жилообразные маломощные карбонатно-слюдистые тела, сложенные светло-коричневым или коричнево-черным флогопитом (рис. 3в–д) и карбонатами (кальцитом и доломитом), алланитом-(Ce), шпинелью, скаполитом, пирротин, магнетитом и другими аксессуарными минералами.

Среди этих пород присутствуют слюдиты необычного апатит-скаполит-алланит-флогопитового состава. В их небольшом теле мощностью 20 см проявлена дифференциация минералов по плотности (рис. 3д). Порода среднезернистая с количественными соотношениями флогопит/алланит/скаполит = 3 : 1 : 1, апатит составляет ~3 об. %. Флогопит таблитчатый, коричневатый с зеленоватыми пятнами. Его состав характеризуется формулой $K_{0.95}Na_{0.09}Mg_{1.78}Fe_{0.83}Mn_{0.03}Ti_{0.12}Al_{0.20}(Si_{2.79}Al_{1.21})O_{10}(OH)_{1.75}F_{0.25}$. Алланит-(Ce) представлен изометричными зернами серого цвета, нерадиоактивный, его формула – $Ca_{1.15}Ce_{0.44}La_{0.33}Nd_{0.06}Pr_{0.04}Fe_{0.74}Al_{1.94}(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$. Зерна скаполита субизометричны, белого цвета, имеют состав, промежуточный между мейонитом и мариалитом – $Na_{2.42}Ca_{1.49}Fe_{0.02}(Al_{4.01}Si_{7.94}O_{24})Cl_{0.58}(CO_3)_{3.042}$. Sr-содержащий фторапатит образует мелкие бесцветные субизометричные зерна состава $Ca_{4.8}Sr_{0.1}Na_{0.07}Mg_{0.01}Ce_{0.01}U_{0.01}(P_{2.93}Si_{0.06}S_{0.01})O_{12}(F_{0.95}OH_{0.05})$.

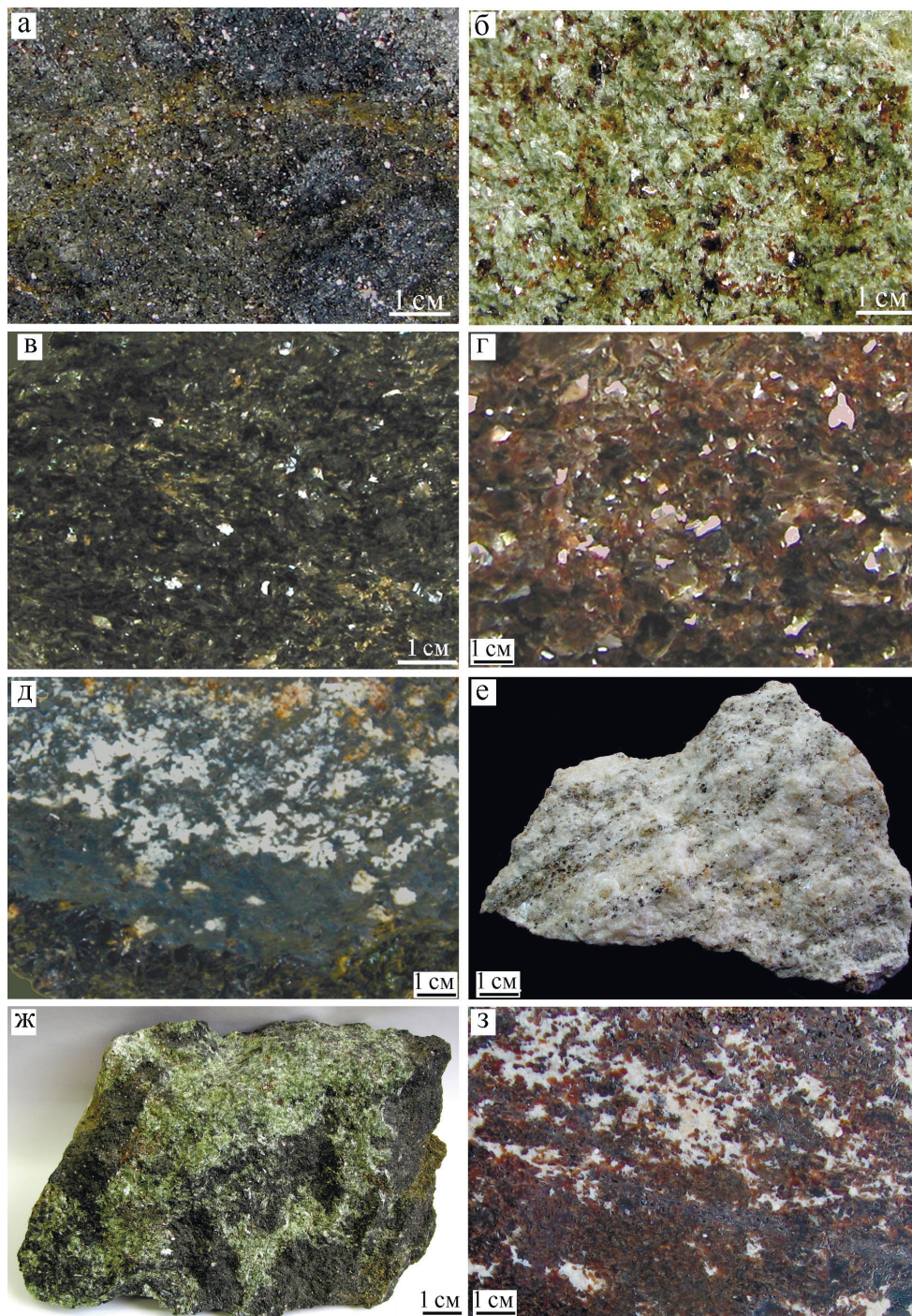


Рис. 3. Породы района копи № 97.

а – хромит-флогопит-форстеритовая; б – флогопит-фторрихтеритовая (с хромитом); в – аннитовый слюдит; г – флогопитовый слюдит; д – контакт шпинель-биотитовой породы с алланит-доломит-скаполитовой породой; е – полосчатый флогопит-кальцит-доломитовый карбонатит; ж – магматическая брекчия флогопит-форстеритовой породы (серая) в флогопит-фторрихтеритовой (зеленая); з – магматическая брекчия флогопитового слюдита в карбонатите.

Fig. 3. Rocks of the area of pit no. 97.

а – chromite-phlogopite-forsterite; б – phlogopite-fluorrichterite (with chromite); в – annite glimmerite; г – phlogopite glimmerite; д – contact of spinel-biotite rock with allanite-dolomite-scapolite rock; е – banded phlogopite-calcite-dolomite carbonatite; ж – magmatic breccia of phlogopite-forsterite rock (gray) in phlogopite-fluorrichterite rock (green); з – magmatic breccia of phlogopite mica rock in carbonatite.

Вместе с алланит-флогопитовой породой в отвале найдены обломки темной шпинель-флогопитовой породы, содержащей доломит, клинохлор, апатит, ильменит и акцессорные бадделеит, циркон, монацит-(Се), рабдофан, барит и рутил. Присутствуют дендриты меди в лимонитовой псевдоморфозе по железистому доломиту. В небольшой полости от растворенного зерна доломита наблюдались мелкие тройники клинохлора. В зерне неоднородного алланита-(Се) встречено включение калиевого полевого шпата, зонального по содержанию Ва (гиалофан).

Некоторые слюдиты с преобладанием флогопита и небольшой примесью доломита имеют светло-коричневый цвет и среднезернистую структуру. Под микроскопом в некоторых зернах флогопита видны синтаксические вроски зеленого клинохлора. Вследствие тонких срастаний флогопита и клинохлора получить чистый анализ клинохлора не удалось. Эмпирическая формула флогопита $K_{0.91}Na_{0.03}Ba_{0.01}Mg_{2.89}Fe_{0.24}(Al_{0.85}Si_{3.07})O_{10}(OH_{1.63}F_{0.37})$.

В тонкой смеси хлорита с флогопитом определены (мас. %) FeO (6.95), NiO (0.22) и CaO (0.33). Хлорит подтвержден рентгенограммой. Доломит по составу отвечает формуле $Ca_{1.01}Mg_{0.91}Fe_{0.05}Mn_{0.02}Sr_{0.01}(CO_3)_2$.

Корунд-флогопитовые пегматиты встречаются только в рыхлом отвале северной канавы копи № 97. Индивиды корунда достигают 4 см. Флогопит толстотаблитчатый, зеленоватый. Корунд изометричный, розоватый. Совместно с корундом кристаллизовались диаспор, шпинель, прайсверкит, циркон, фергусонит-(Се), кальцит, пирротин, уранинит, торинит, кальцит.

Флогопит-клиногумитовая порода встречается в отвалах юго-восточной части ультрамафитового тела. Это светло-коричневая неравнозернистая порода содержит мелкие зерна хромита и монацита-(Се).

Флогопит-доломит-кальцитовые карбонаты. Долгое время в коре выветривания сложного ультрамафитового тела в канавах встречались лишь фрагменты карбонатит-пегматитовых тел. В 2012 г. в восточной части центральной канавы на контакте крупной жилы доломитового карбонатит-пегматита с обильным монацитом-(Се) обнаружены среднезернистые слабо полосчатые флогопит-доломит-кальцитовые карбонатиты (рис. 3е) с монацитом-(Се), хромитом и другими акцессорными минералами.

Встречаются и своеобразные магматические брекчии, где обломки флогопит-форстеритовой породы сцементированы флогопит-рихтеритовой породой (рис. 3ж), а также брекчия флогопитового слюдита с карбонатитовым «цементом» (рис. 3з).

Район копи № 97 Ильменских гор уникален по набору тел магматических фаз карбонатит-щелочно-ультрамафитовой формации, а также и по минеральному составу этих тел. Карбонатиты необычны – они обогащены одновременно РЗЭ, Cr, Ni, Ba, Sr. В слюдитах и карбонатитах встречается хлорит (предположительно, магматический), местами образующий небольшие собственные тела хлоритов.

Минеральный состав пегматитов копи № 97

Среди жильных тел пегматитов, вскрытых горными выработками копи, в щелочных ультрамафитах к настоящему времени выявлены доломитовые и кальцит-доломитовые карбонатит-пегматиты, слюдит-пегматиты и флогопит-фторрихтеритовые пегматиты (рис. 4), а во вмещающих породах (фенитах) – жилы гранитного пегматита (рис. 1).

Ранее установленный список минералов (Поляков, Недосекова, 1990; Баженов и др., 1993; Попов и др., 2000) дополнен нашими новыми находками кристаллов разной величины и формы (рис. 5) в разных ассоциациях и срастаниях. Два минерала – поляковит-(Се) и фторрихтерит – дополнили список минералов мира. На данный момент щелочные ультрамафиты копи № 97 включают 62 минерала, краткая характеристика которых приведена ниже.

Форстерит $Mg_2(SiO_4)$ является порообразующим минералом мелко-среднезернистой серой флогопит-оливиновой породы и некоторых доломитовых карбонатит-пегматитов и крупнозернистых рихтеритовых пегматитовых жил. В рихтеритовых пегматитах форстерит встречается в виде ограненных кристаллов в миароловых полостях (рис. 5, ба). Во всех парагенезисах форстерит частично имеет индукционные поверхности с соприкасающимися минералами. Форстерит содержит (мас. % по двум анализам): SiO_2 40.93 и 40.62, Al_2O_3 0.34 и 0.88, Fe_2O_3 1.44 и 1.63, FeO 7.83 и 8.08, MnO 0.62 и 0.64, F 0.2 и 0.32 (Поляков, Недосекова, 1990). По данным СЭМ анализа Al_2O_3 и F в форстерите не выявлены, но установлена примесь NiO 0.12 мас. % (Попов, 2007).

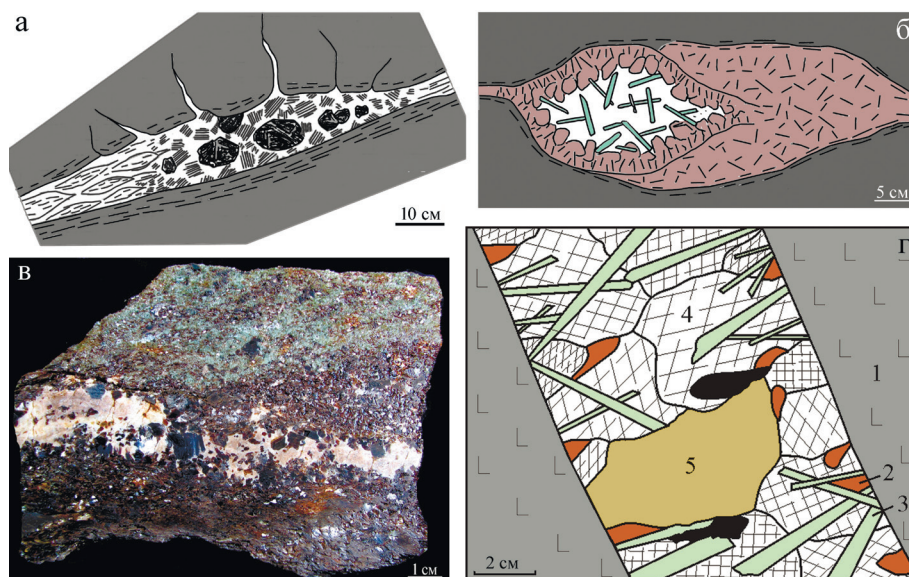


Рис. 4. Строение некоторых жильных тел в ультрамафитах копи № 97.

а – поляковит-(Ce) (черные кристаллы) в жиле флогопит-доломитового карбонатита среди флогопитового слюдита; б – фторрихтерит-доломит-флогопитовая миарола в контакте с флогопитовым слюдитом среди флогопит-фторрихтеритовой породы; в – жила флогопит-доломитового пегматита, секущая контакт флогопитового слюдита с флогопит-рихтеритовой породой; г – форстеритовая порода (1), рассеченная карбонатит-пегматитовой жилкой с монацитом-(Ce) (2), фторрихтеритом (3), кальцитом (4), клиногумитом (5) и поляковитом-(Ce) (черное).

Fig. 4. Structure of some vein bodies in ultramafic rocks of pit no. 97.

а – polyakovite-(Ce) (black crystals) in phlogopite-dolomite carbonatite among phlogopite glimmerite; б – fluorrichterite-dolomite-phlogopite miarola at the contact with phlogopite glimmerite among phlogopite-fluorrichterite rock; в – vein of phlogopite-dolomite pegmatite, cutting the contact of phlogopite glimmerite with phlogopite-richterite rock; г – forsterite rock (1) cut by carbonatite-pegmatite vein with monazite-(Ce) (2), fluorrichterite (3), calcite (4), clinohumite (5) and polyakovite-(Ce) (black).

В рыхлой отвальной массе иногда встречались крупные псевдоморфозы антигорита (бастита) по энстатиту (рис. 6б).

Амезит $Mg_2Al(AlSiO_5)(OH)_4$ из шпинель-флогопитовой породы характеризуется формулой $Mg_{1.85}Fe^{2+}_{0.22}Al_{0.93}(Al_{0.93}Si_{1.07}O_5)(OH)_4$.

Тальк $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ встречен в виде редких таблитчатых включений в форстерите рихтерит-флогопит-форстеритовых пород.

Клиногумит $Mg_9(SiO_4)_4F_2$ был установлен В.О. Поляковым в карбонатит-пегматитах в виде крупных индивидов красновато-коричневого цвета (рис. 4г); его рентгенограмма близка эталонной (Поляков, Недосекова, 1990). Позднее обнаружены среднезернистые породы хромит-флогопит-клиногумитового состава. Формула клиногумита $Mg_{8.34}Fe_{0.61}Mn_{0.06}Ti_{0.03}(Si_{3.96}O_{16})(F_{1.19}OH_{0.81})$ (микронд, расчет на 13 катионов).

Хондродит $Mg_5(SiO_4)_2F_2$ в виде крупных индивидов (до 4 см) коричнево-красного цвета встречен в небольшой линзе крупнозернистого зеленого клинохлора среди выветрелого светло-коричне-

вого слюдита. Состав хондродита (мас. %): SiO_2 34.27; MgO 51.74; FeO 6.78; TiO_2 1.35; MnO 0.77; F 5.28; сумма 100.19; формула $(Mg_{4.55}Fe_{0.33}Ti_{0.06}Mn_{0.04})(Si_{2.02}O_8)(F_{1.02}OH_{0.98})$. При исследовании встречены зерна **гидроксилхондродита** с существенно меньшим количеством F.

Флогопит $KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$ установлен почти во всех парагенезисах исследованного тела ультрамафитов. В мелко- и среднезернистых агрегатах флогопит образует прозрачные светло-коричневые индивиды от толстотаблитчатых до столбчатых форм. Кристаллы внешне и под микроскопом однородны, имеют индукционные поверхности одновременного роста с форстеритом, фторрихтеритом, кальцитом, доломитом, поляковитом-(Ce), фергусонитом-(Ce), монацитом-(Ce) и другими минералами. Состав флогопита из разных участков и жильных тел практически не отличаются. Один из анализов рассчитывается на формулу $(K_{0.9}Na_{0.07}Ba_{0.005})(Mg_{2.9}Fe_{0.17}Cr_{0.01})(Si_{3.08}Al_{0.87})(OH_{1.74}F_{0.26})$. В одной из жил встречены крупные индивиды флогопита, в центральной части кото-

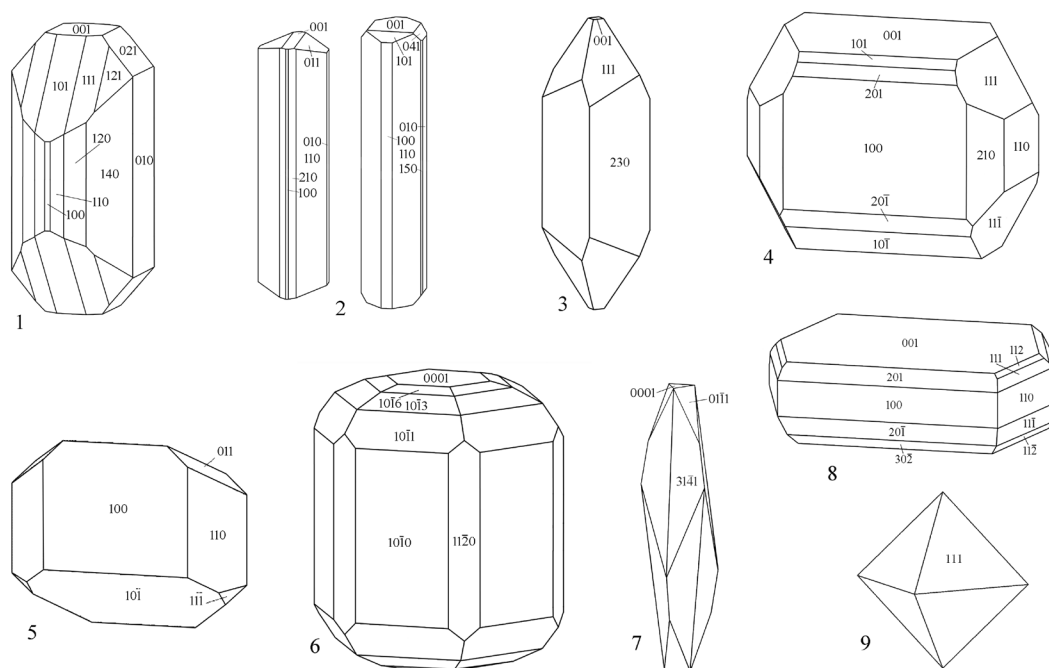


Рис. 5. Форма кристаллов некоторых минералов из шлихов коры выветривания копи № 97.

1 – форстерит; 2 – фторрихтерит; 3 – фергусонит-(Ce); 4 – алланит-(Ce); 5 – монацит-(Ce); 6 – бастнезит-(Ce); 7 – давидит-(Ce); 8 – поляковит-(Ce); 9 – хромит.

Гониометрические измерения В.О. Полякова с уточнениями и дополнениями В.А. Попова.

Fig. 5. Morphology of crystals of some minerals from heavy concentrates of weathering crust of pit no. 97.

1 – forsterite; 2 – fluorrichterite; 3 – fergusonite-(Ce); 4 – allanite-(Ce); 5 – monazite-(Ce); 6 – bastnäsite; 7 – davidite-(Ce); 8 – polyakovite-(Ce); 9 – chromite.

Goniometric measurements of V.O. Polyakov modified by V.A. Popov.

рых выявлены синтаксические вrostки пластинок хромита, а в периферической – синтаксические вrostки клинохлора.

Коричнево-черный флогопит в меланократовых слюдитах находится в парагенезисах со шпинелью и алланитом-(Ce). Он содержит больше Fe: также присутствует Ti, формула $(\text{K}_{0.95}\text{Na}_{0.05})(\text{Mg}_{1.78}\text{Fe}_{0.83}\text{Ti}_{0.12}\text{Mn}_{0.03}\text{Al}_{0.2})(\text{Al}_{1.21}\text{Si}_{2.79})(\text{OH}_{1.75}\text{F}_{0.25})$.

Рихтерит и фторрихтерит $\text{Na}(\text{NaCa})\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ – $\text{Na}(\text{NaCa})\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})\text{F}_2$ широко представлены почти во всех минеральных телах щелочных ультрамафитов. Цвет его призматических кристаллов (рис. 5) варьирует от светло- до ярко-зеленого (рис. 6а, 7), а размер – от первых микрометров до 10 см; встречаются двойники по (100). Многие кристаллы прозрачны, а участки без трещин (рис. 7б) пригодны для огранки. Оптическая зональность в рихтеритах не обнаружена, состав имеет широкие колебания содержаний компонентов (табл. 1).

Алланит-(Ce) $\text{CaCeFe}^{2+}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$ как породообразующий минерал находится в чер-

ном слюдите (рис. 3д и 5) в виде толстотаблитчатых зерен серого цвета размером около 1 мм с участками индукционных поверхностей одновременного роста с биотитом, доломитом и шпинелью. Формула минерала имеет вид: $(\text{Ca}_{1.15}\text{Ce}_{0.44}\text{La}_{0.33}\text{Nd}_{0.06}\text{Pr}_{0.04})(\text{Fe}_{0.74}\text{Al}_{1.94})(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$ (расчет на $\text{Si} = 3$). В отличие от алланита-(Ce) из других копей Ильменских гор, алланит-(Ce) копи № 97 не содержит примеси радиоактивных элементов и нет резкой неоднородности состава в анатомической картине кристаллов.

Клинохлор $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ является породообразующим минералом в небольших телах пегматоидных хлоритолитов. Более поздний (вторичный) железистый клинохлор $\text{Mg}_{3.6}\text{Fe}^{2+}_{1.38}\text{Mn}_{0.02}\text{Fe}^{3+}_{0.4}\text{Al}_{0.6}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ встречается в виде тройников – полных или частичных псевдоморфоз по доломиту (рис. 8).

Альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ выявлен в виде мелких вrostков в слюдите со скаполитом, шпинелью, алланитом-(Ce) и доломитом. В агрегате раннего гранитного пегматита Ca-содержащий альбит

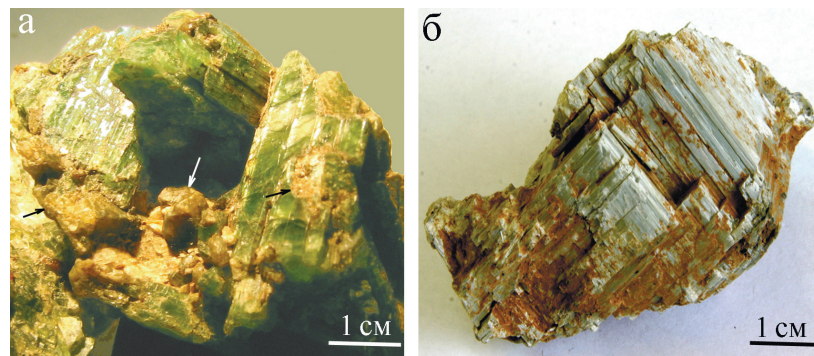


Рис. 6. Желтоватый форстерит (указан стрелками) с зеленым фторрихтеритом в миароловой полости (а) и псевдоморфоза бастита по энстатиту (б) с пленкой лимонита.

Fig. 6. Yellow forsterite (indicated by arrows) with green fluorrichterite in miarolitic cavity (a) and pseudomorphic bastite after enstatite with a limonite film (b).

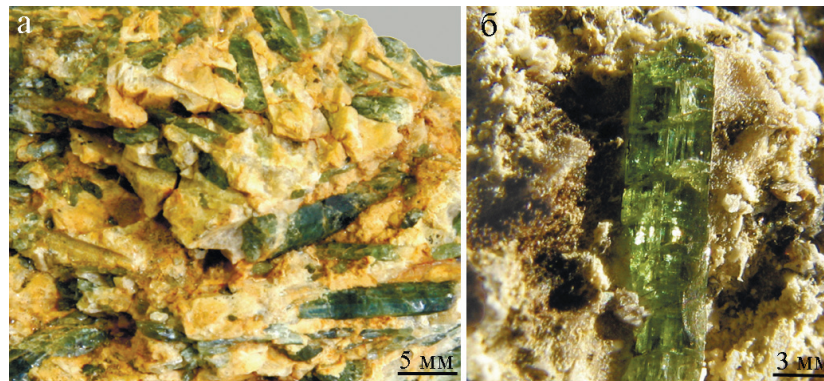


Рис. 7. Рихтерит-доломитовый карбонатит-пегматит (а) с участками прозрачных кристаллов рихтерита (б).

Fig. 7. Richterite-dolomite carbonatite-pegmatite (a) with transparent richterite crystals (b).

Таблица 1

Химический состав (мас. %) рихтерита из щелочных ультрамафитов копи № 97

Table 1

Chemical composition (wt. %) of richterite from alkaline ultramafic rocks in pit no. 97

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	H ₂ O	F	Сумма
1	56.10	0.01	1.24	0.97	1.44	0.20	24.16	8.05	4.24	0.75	–	1.57	1.29	100.02
2	53.98	0.05	1.19	3.33	5.35	0.68	18.31	8.23	4.20	1.11	–	0.99	3.30	100.72
3	56.70	–	0.47	–	2.41	0.35	24.40	9.32	3.49	0.66	0.26	–	0.80	98.86
4	58.04	–	0.55	–	1.94	0.15	24.83	10.12	2.83	0.47	–	–	0.69	99.63
5	56.46	–	1.11	–	2.28	0.33	23.03	8.02	4.83	0.97	–	–	2.05	99.07
Формулы (расчет на 16 катионов)														
1	Na(Ca _{1.22} Na _{0.16} K _{0.13} Mn _{0.02} Fe ²⁺ _{0.17} Fe ³⁺ _{0.1} Al _{0.21})Mg _{5.08} (Si _{7.91} O ₂₂)(OH _{1.26} F _{0.74})													
2	Na(Ca _{1.3} Na _{0.2} K _{0.21} Mn _{0.08} Fe ²⁺ _{0.66} Fe ³⁺ _{0.37} Al _{0.21} Ti _{0.01})Mg _{4.02} (Si _{7.95} O ₂₂)(F _{1.54} OH _{0.46})													
3	Na _{0.95} (Ca _{1.4} K _{0.12} Mn _{0.04} Fe ²⁺ _{0.28} Al _{0.08})Mg _{5.12} (Si _{7.98} O ₂₂)(OH _{1.64} F _{0.36})													
4	Na _{0.77} K _{0.08} (Ca _{1.52} Fe _{0.23} Al _{0.09} Mn _{0.02})Mg _{5.18} (Si _{8.12} O ₂₂)(OH _{1.69} F _{0.31})													
5	Na(Ca _{1.52} Na _{0.32} K _{0.17} Fe _{0.27} Al _{0.18} Mn _{0.04})Mg _{4.84} (Si _{7.96} O ₂₂)(OH _{1.09} F _{0.91})													

Примечание. 1, 2 – (Поляков, Недосекова, 1990); 3–5 – наши данные: 3 – флогопит-оливиновая порода; 4 – флогопит-рихтеритовая порода; 5 – рихтерит-эшинитовый сросток; аналитики Е.И. Чуриной (ан. 3) и М.А. Рассомахина (ан. 4, 5).

Note. 1, 2 – (Polyakov, Nedosekova, 1990); 3–5 – our data: 3 – phlogopite-olivine rock, 4 – phlogopite-richterite rock; 5 – richterite-aeschinite intergrowth; analyst E.I. Churin (an. 3) and M.A. Rassomakhin (an. 4, 5).

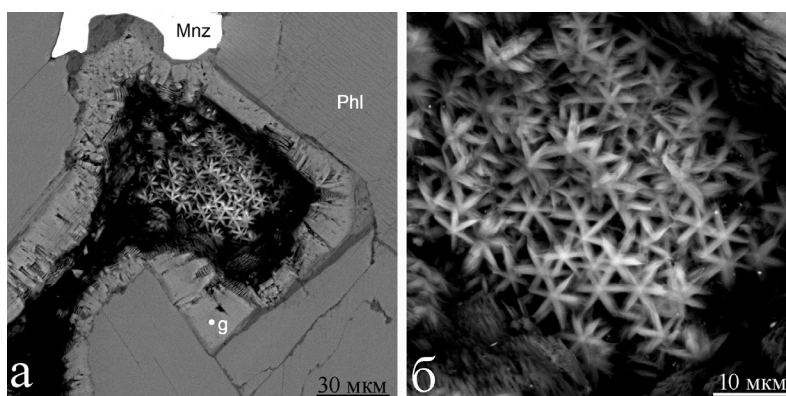


Рис. 8. Неполная псевдоморфоза клинохлора по доломиту в монацит-флогопитовом агрегате (а) в виде сростка тройников (б).

Черное – полость. Здесь и на фото 9, 10б, 11, 13 и 18 – BSE фото.

Fig. 8. Partly pseudomorphic clinocllore after dolomite in monazite-phlogopite aggregate (a) in form of triple intergrowths (б).

Black – cavity. Hereinafter in Figs. 9, 10б, 11, 13 and 18 – BSE photo.

(олигоклаз) образует парагенезисы с флогопитом, Ва-содержащим калиевым полевым шпатом, фторапатитом, цирконом и алланитом-(Се). Состав характеризуется эмпирической формулой $\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16}\text{Al}_{1.12}\text{Si}_{2.88}\text{O}_8$.

Калиевый полевой шпат KAlSi_3O_8 образует зональные и секториальные по содержаниям Ва кристаллы в ассоциации с флогопитом, альбитом и алланитом-(Се) в жиле гранитного пегматита на контакте со щелочным ультрамафитом. В центральной части зерна (точка i) состав минерала отвечает формуле $(\text{K}_{0.93}\text{Ba}_{0.03}\text{Na}_{0.02})\text{Al}_{1.05}\text{Si}_{2.96}\text{O}_8$, а в одной из промежуточных зон – $(\text{K}_{0.69}\text{Ba}_{0.27}\text{Na}_{0.01}\text{Mg}_{0.01})\text{Al}_{1.28}\text{Si}_{2.74}\text{O}_8$ (точка j) (рис. 9)

Корунд Al_2O_3 в виде крупных индивидов размером до 4 см встречен в рыхлой коре выветривания ультрамафитов в северной канаве копи в ассоциации с редким диаспором. Кристаллы неоднородны по цвету – от бесцветных до фиолетово-розовых (рис. 10а). В парагенезисе с корундом наблюдались шпинель, флогопит и прайсверкит (рис. 10б), а также циркон, уранинит, торианит, фергусонит-(Се) и пирротин.

Шпинель MgAl_2O_4 встречается в биотитовых слюдитях и корунд-флогопитовых пегматитах (рис. 10б). Цвет зерен – темно-зеленый, размер 0.1–5 мм. Минерал образовался совместно с корундом, флогопитом и диаспором. Состав шпинели (мас. %): MgO 14.3, Al_2O_3 64.36, MnO 1.25, FeO 16.28, NiO 0.32, ZnO 4.99, сумма 101.51; формула $(\text{Mg}_{0.55}\text{Fe}_{0.31}\text{Zn}_{0.10}\text{Mn}_{0.03}\text{Ni}_{0.01})(\text{Al}_{1.97}\text{Fe}^{3+}_{0.03})\text{O}_4$.

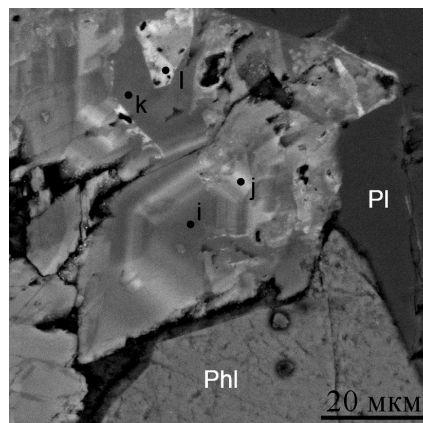


Рис. 9. Зонально-секториальный (i, k, l, j) Ва-содержащий калиевый полевой шпат в сростании с флогопитом (Phl) и олигоклазом (Pl).

Fig. 9. Zonal-sectorial (i, k, l, j) Ba-bearing K-feldspar intergrown with phlogopite (Phl) and oligoclase (Pl).

Прайсверкит $\text{NaMg}_2\text{Al}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ находится в парагенезисе с корундом (рис. 10б). Состав прайсверкита (мас. %): Na_2O 6.23, MgO 17.78, Al_2O_3 35.69, SiO_2 30.36, K_2O 1.32, TiO_2 0.18, FeO 3.63, сумма 95.19. Эмпирическая формула (в расчете на восемь катионов): $\text{Na}_{0.83}\text{K}_{0.12}\text{Mg}_{1.83}\text{Fe}_{0.21}\text{Ti}_{0.01}\text{Al}(\text{Al}_{1.90}\text{Si}_{2.1})_{\Sigma 4.0}(\text{OH})_2$. Возможно, это первая находка в России, что требует доизучения.

Хромселадонит $\text{KCrMg}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ в виде таблитчатых зерен выявлен среди синтаксических сростков паризита-(Се) и бастнезита-(Се) в кальцит-доломитовом карбонатит-пегматите. Эмпирическая формула минерала $(\text{K}_{0.90}\text{Na}_{0.02}\text{Ca}_{0.03})_{\Sigma 0.95}(\text{Mg}_{1.02}\text{Cr}_{0.92}\text{Fe}_{0.10}\text{V}_{0.01})_{\Sigma 1.05}[(\text{Si}_{3.55}\text{Al}_{0.35}\text{Ti}_{0.07}\text{Fe}^{3+}_{0.03})_{\Sigma 4.0}\text{O}_{10}](\text{OH}_{1.64}\text{F}_{0.36})$.

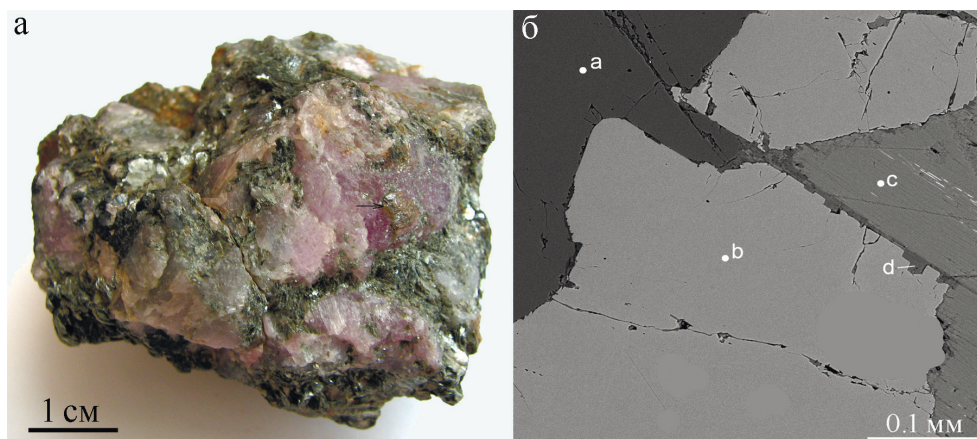


Рис. 10. Корунд в ассоциации с диаспором (указан стрелкой) (а) и парагенезис корунда, шпинели, флогопит с вростками хромита (белое) и прайсверкита (б):

а – корунд; б – шпинель; с – флогопит; d – прайсверкит.

Fig. 10. Corundum in assemblage with diaspore (indicated by arrow) (a) and assemblage of corundum, spinel, phlogopite with chromite inclusions (white) and preiwerkite (б):

a – corundum; b – spinel; c – phlogopite; d – preiwerkite.

Хромит FeCr_2O_4 является акцессорным минералом почти всех пород и пегматитов ультрамафитового тела копи. Обычно его кристаллы обнаруживаются только микроскопически, но в карбонатит-пегматитах встречались индивиды размером до 8 мм. При наличии плоских граней определяется октаэдрический габитус кристаллов, а в большинстве случаев хромит имеет индукционные поверхности с породообразующими минералами. Состав минерала однороден (мас. %): FeO 42.45, MgO 2.06, Al_2O_3 0.32, SiO_2 0.11, TiO_2 0.42, V_2O_5 0.56, Cr_2O_3 47.7, MnO 3.06, ZnO 1.33, сумма 98.01; формула $(\text{Fe}_{0.74}\text{Mg}_{0.11}\text{Mn}_{0.10}\text{Zn}_{0.04})_{\Sigma 0.99}(\text{Cr}_{1.40}\text{Fe}_{0.57}\text{V}_{0.01}\text{Ti}_{0.01}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 2.0}\text{O}_4$ (расчет на три катиона). Хромит нередко встречается в виде плоских синтаксических вростков во флогопите (рис. 10б), и это – особенность данного объекта.

Ильменит FeTiO_3 образует мелкие выделения в разных минеральных телах. В шпинель-флогопитовой породе его состав соответствует пикроильмениту с формулой $\text{Fe}_{0.78}\text{Mg}_{0.18}\text{Mn}_{0.04}(\text{Ti}_{0.99}\text{Si}_{0.01})\text{O}_3$. В доломит-флогопитовой породе его состав более магниезиальный с формулой $\text{Fe}_{0.69}\text{Mg}_{0.29}\text{Mn}_{0.07}\text{Cr}_{0.01}\text{Ca}_{0.01}\text{Nb}_{0.01}\text{Ti}_{0.92}\text{O}_3$.

Диаспор AlOON в сростании с корундом (рис. 10а) и шпинелью установлен в корунд-флогопитовом пегматите. Минерал имеет коричневатый цвет, высокую твердость, хорошую спайность по (010), величина индивидов до 5 мм. Ранее в подобной ситуации диаспор описан в копи № 418 (Рассомахин, Котляров, 2018).

Фергусонит-(Ce) CeNbO_4 как акцессорный минерал встречается в слюдитях, карбонатитах и пегматитовых жилах ультрамафитового тела копи. В большинстве случаев это микроскопические выделения, но некоторые жилы характеризуются крупными (до 3 см) красно-коричневыми кристаллами характерной тетрагональной формы (рис. 5). Кроме обычных форм с гранями {230}, {111} и {001}, встречаются грани {250}, {232} и {6.7.12}. Фергусонит-(Ce) имеет индукционные поверхности одновременного роста с кальцитом, доломитом, флогопитом, рихтеритом, поляковитом-(Ce), монацитом-(Ce), хромитом, корундом (рис. 9), форстеритом и клиногумитом. К настоящему времени накопилось значительное количество анализов фергусонита из разных пород и жильных образований ультрамафитов копи № 97, и в большинстве из них церий преобладает среди РЗЭ. Отмечаются неоднородности состава кристаллов фергусонита. Так, в одном зерне выявлены и фергусонит-(Ce), и **фергусонит-(Y)** (рис. 11): $(\text{Ce}_{0.29}\text{Nd}_{0.18}\text{Y}_{0.16}\text{Th}_{0.09}\text{Ca}_{0.07}\text{La}_{0.07}\text{Pr}_{0.05}\text{Gd}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Sr}_{0.02}\text{Dy}_{0.01}\text{Mn}_{0.01}\text{U}_{0.01})_{\Sigma 1.04}(\text{Nb}_{0.97}\text{Ta}_{0.02}\text{Ti}_{0.01})_{\Sigma 1.0}\text{O}_4$; $(\text{Y}_{0.25}\text{Ce}_{0.21}\text{Nd}_{0.17}\text{Ca}_{0.09}\text{Th}_{0.07}\text{La}_{0.05}\text{Gd}_{0.05}\text{Pr}_{0.03}\text{Sm}_{0.04}\text{Sr}_{0.02}\text{Dy}_{0.02}\text{U}_{0.01})_{\Sigma 0.96}(\text{Nb}_{0.98}\text{Ta}_{0.01}\text{Ti}_{0.01})_{\Sigma 1.0}\text{O}_4$.

Монацит-(Ce) CePO_4 является широко распространенным акцессорным минералом в ультрамафитах копи. В породах его зерна микроскопические, а в пегматитах достигают размера 12 мм. Цвет преобладает коричневый, большинство зерен прозрачные или полупрозрачные вследствие

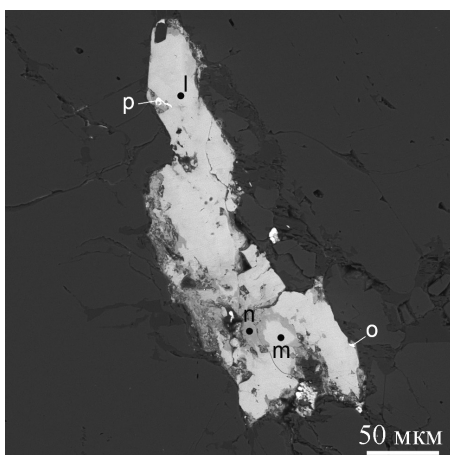


Рис. 11. Корунд (темное) с полиминеральным включением фергусонита-(Ce) (l), фергусонит-(Y) (m), пироклора (n) и торинита (o, p).

Fig. 11. Corundum (dark) with polymineral inclusion of fergusonite-(Ce) (l), fergusonite-(Y) (m), pyrochlore (n) and torianite (o, p).

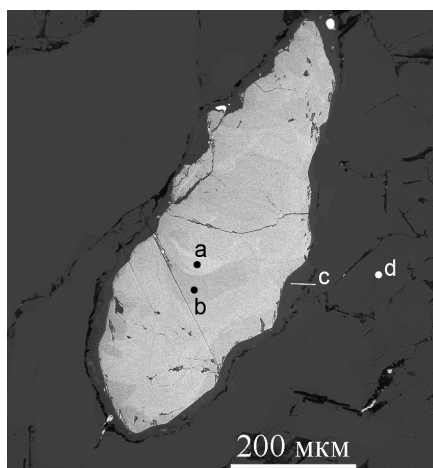
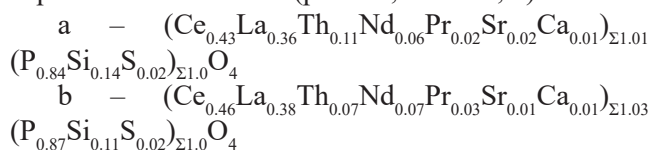


Рис. 13. Зонально-секториальный индивид монацита-(Ce) (a, b) в доломите (d).

Fig. 13. Zonal-sectorial monazite-(Ce) (a, b) in dolomite (d).

замутнения. Индивиды монацита-(Ce) зонально-секториальные по составу (рис. 12). Элементы анатомии кристаллов по химическому составу несколько отличаются, особенно по содержанию Th, например, в зерне монацита-(Ce) из доломитового карбонатит-пегматита (рис. 13, точки a, b):



Монацит-(Ce) ассоциирует с породообразующими и аксессуарными минералами с преобладанием индукционных поверхностей. Идиоморфные



Рис. 12. Монацит-доломитовый сросток (2.5 см) с индукционной поверхностью между минералами.

Fig. 12. Monazite-dolomite intergrowth (2.5 cm in size) with compromise growth surface between minerals.

участки на кристаллах редки, но можно определить таблитчатый габитус кристаллов (рис. 5).

В большинстве анализов монацита из разных парагенезисов щелочных ультрамафитов Ce преобладает над La в формульных коэффициентах (обычно незначительно). В одном анализе монацита из флогопит-рихтеритовой породы с ниобозинитом La немного преобладает над Ce, что позволяет говорить о наличии **монацита-(La)** с формулой $(\text{La}_{0.40}\text{Ce}_{0.39}\text{Th}_{0.14}\text{Nd}_{0.05}\text{Pr}_{0.02})_{\Sigma 1.0}(\text{P}_{0.85}\text{Si}_{0.14}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.0}\text{O}_4$.

Фторкенопироклор (?) (пироклор) в виде мелкого измененного включения совместно с фергусонитом встречен в корунде (рис. 11). Его состав характеризуется дефицитом в позиции А с эмпирической формулой: $(\square_{0.77}\text{Na}_{0.65}\text{Ca}_{0.12}\text{Ce}_{0.13}\text{Nd}_{0.11}\text{Y}_{0.06}\text{La}_{0.03}\text{Sm}_{0.02}\text{Pr}_{0.02}\text{Sr}_{0.02})_{\Sigma 2.0}(\text{Nb}_{1.91}\text{Ti}_{0.06}\text{Si}_{0.03})_{\Sigma 2.0}\text{O}_6(\text{F}_{0.67}\text{OH}_{0.33})$.

Эшинит-(Ce) $\text{Ce}(\text{TiNb})\text{O}_6$ в щелочных ультрамафитах редкий минерал, но в карбонатит-пегматитах он местами образует скопления крупных кристаллов размером до 12 см (рис. 14) с габитусными формами $m\{110\}$, $b\{010\}$ и $x\{021\}$. В карбонатит-пегматитах эшинит-(Ce) образует агрегаты с карбонатами, рихтеритом, флогопитом, фергусонитом-(Ce) и монацитом-(Ce), с которыми он имеет индукционные поверхности (рис. 15). В крупном индивиде поляковита-(Ce) из флогопит-рихтеритовой породы наблюдалось неоднородное включение эшинита-(Ce), часть которого относится к эшиниту-(Ce) с формулой $(\text{Ce}_{0.56}\text{La}_{0.19}\text{Nd}_{0.14}\text{Pr}_{0.04}\text{Y}_{0.02}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.02})_{\Sigma 0.99}(\text{Ti}_{1.21}\text{Nb}_{0.77}\text{Si}_{0.02})\text{O}_6$, а другая – к **ниобозиниту-(Ce)**: $(\text{Ce}_{0.49}\text{La}_{0.14}\text{Nd}_{0.20}\text{Pr}_{0.04}\text{Y}_{0.06}\text{Ca}_{0.03}\text{Th}_{0.03})_{\Sigma 0.99}(\text{Nb}_{1.00}\text{Ti}_{0.97}\text{Si}_{0.03})\text{O}_6$.

Поляковит-(Ce) $\text{Ce}_4\text{MgCr}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_4\text{O}_{22})$ как чевкинит был найден в отвалах старой копи № 97 в 1980 г. Т.П. Нишанбаевым и в 1981 г. – В.Ф. Ждановым. В 1985 г. В.О. Поляков пробил шурф на ульт-



Рис. 14. Кристаллы эшинита-(Ce) в кальцит-доломитовом карбонатит-пегматите.

Fig. 14. Aeschinite-(Ce) crystals in calcite-dolomite carbonatite-pegmatites.

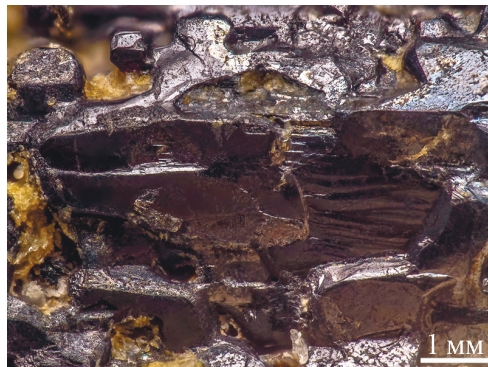


Рис.15. Индукционные поверхности на эшините-(Ce) из кальцит-доломитового агрегата.

Fig.15. Compromise growth surfaces on aeschinite-(Ce) from calcite-dolomite aggregate.



Рис. 16. Поляковит-(Ce) (черный) в рихтерит-доломитовом пегматите.

Образец 5 см.

Fig. 16. Polyakovite (black) in richterite-dolomite pegmatite.

Sample size is 5 cm.



Рис. 17. Кристалл поляковита-(Ce) размером 16 см в сростании с белым доломитом.

Fig. 17. Polyakovite-(Ce) 16 cm in size intergrown with white dolomite.

трамафитовом теле, и в шлихах из рыхлой породы обнаружил множество зерен «чевкинита». Сначала этот минерал был назван «хромово-магниево-чевкинит» (Жданов и др., 1986) и «хромомagneзи-очевкинит» (Поляков, Недосекова, 1990). Позже он был доисследован и утвержден Комиссией по новым минералам как поляковит-(Ce) (Попов и др., 2000). Самые крупные индивиды поляковита-(Ce) в коллекции В.О. Полякова достигали размера 7 см, среди них были и частично ограненные, что дало возможность охарактеризовать форму кристалла (рис. 5). В последующие годы спорадически продолжались находки поляковита-(Ce) (рис. 16) и его исследования. В 2019 г. при расчистке копи найдены новые крупные скопления кристаллов поляковита-(Ce), самый крупный из них имеет размер 16 см (рис. 17). Совместно с поляковитом-(Ce)

сокристаллизовались доломит, кальцит, флогопит, рихтерит, хромит, монацит-(Ce), фергусонит-(Ce) и эшинит-(Ce). Состав поляковита-(Ce) из разных жил копи № 97 несколько отличается (табл. 2) содержаниями оксидов Th, Cr, Ti и других компонентов, отражая родство с другими членами группы чевкинита – чевкинитом-(Ce) и дингдаохенгитом-(Ce).

Давидит-(Ce) $\text{CeY}(\text{Ti}_{10}\text{Fe}_{10})\text{O}_{38}$ как хромистый давидит встречен в шлихе в ассоциации с рихтеритом, флогопитом, поляковитом-(Ce), хромитом, монацитом-(Ce) и бастнезитом-(Ce). Столбчатые кристаллики черного цвета размером до 0.3 мм огранены формами $\{0001\}$, $\{01\bar{1}1\}$ и $\{31\bar{4}1\}$ (рис. 5). Рентгенограмма давидита-(Ce) близка к эталонной; параметры ячейки: a_0 10.44 и c_0 20.86 Å. В составе минерала определены

Химический состав (мас. %) поляковита-(Се) из карбонатитов и пегматитов копи № 97

Таблица 2

Table 2

Chemical composition (wt. %) of polyakovite-(Ce) from carbonatites and pegmatites of pit no. 97

№	MgO	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	SrO	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	ThO ₂	Сумма
1	2.43	19.54	1.01	9.39	7.59	4.94	0.49	0.52	3.82	16.29	24.81	1.99	4.57	2.06	99.45
2	2.08	19.91	1.80	11.80	7.01	5.03	–	–	2.57	16.26	23.34	1.37	3.89	4.27	99.34
3	2.73	19.85	1.60	15.45	5.30	4.80	–	–	–	18.63	24.49	0.77	3.39	0.39	97.86
Формулы (расчет на 13 катионов)															
1	(Ce _{1.92} La _{1.27} Nd _{0.34} Pr _{0.15} Ca _{0.23} Th _{0.10} Y _{0.06} Sr _{0.06})(Mg _{0.76} Fe _{0.14})(Cr _{1.27} Fe _{0.73})(Ti _{1.49} Nb _{0.36})(Si _{4.12} O ₂₂)														
2	Ce _{1.79} La _{1.25} Nd _{0.29} Pr _{0.10} Ca _{0.40} Th _{0.20})(Mg _{0.65} Fe _{0.04})(Cr _{1.16} Fe _{0.84})(Ti _{1.86} Nb _{0.24})(Si _{4.17} O ₂₂)														
3	(Ce _{1.84} La _{1.41} Nd _{0.25} Pr _{0.06} Ca _{0.35} Th _{0.02})(Mg _{0.83} Fe _{0.06})(Cr _{0.86} Fe _{0.76} Ti _{0.38})Ti ₂ (Si _{4.07} O ₂₂)														

Примечание: 1 – карбонатит-пегматит; 2 – флогопит-рихтеритовая жила; 3 – карбонатит. Анализ 3 содержит 0.4 мас. % Al₂O₃ и 0.06 мас. % NiO.

Note. 1 – carbonatite-pegmatite; 2 – phlogopite-richterite vein; 3 – carbonatite. Analysis 3 contains 0.4 wt. % Al₂O₃ and 0.06 wt. % NiO.

(мас. %) TiO₂ (64.5), FeO (18.5), Cr₂O₃ (1.1–3.2), Ce₂O₃ (1.2), La₂O₃ (1.1–1.4), Y₂O₃ (1.4) (Поляков, Недосекова, 1990).

Алланит-(Се) CaCeFeAl₂(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH) обнаружен В.О. Поляковым в шлихе из рыхлой массы отвала в восточном контакте ультрамафитового тела (Поляков, Недосекова, 1990). Его темно-коричневые кристаллы размером до 1 мм имеют таблитчатый облик (рис. 5).

Циркон ZrSiO₄ в небольшом количестве постоянно встречается преимущественно в флогопит-рихтеритовых и флогопит-рихтерит-доломитовых ультрамафитах. Прозрачные желтоватые кристаллы цирконовой огранки достигают размера 5 мм. Самые крупные из них содержат включения флогопита и рихтерита с индукционной поверхностью одновременного роста. По составу это почти чистый циркон, иногда – с небольшой примесью HfO₂. Резко неоднородный по составу циркон встретился в виде включения в корунде: в нем выявлены отличия в содержаниях HfO₂ (5.39 и 1.31 мас. %) и UO₂ (1.02 и 0.28 мас. %).

Цирконолит CaZrTi₂O₇ встречается в виде мелких выделений в флогопит-доломитовой породе совместно с монацитом, цирконом, поляковитом, ильменитом и хромитом. Примечательным в составе цирконолита является высокое содержание Y: (Ca_{0.32}Y_{0.28}Ce_{0.14}Nd_{0.1}Pr_{0.02}Th_{0.06}Mg_{0.12})_{Σ1.03}Zr_{0.95}(Ti_{1.39}Nb_{0.21}Fe_{0.42})_{Σ2.02}O₇. В большинстве анализов минерала Y преобладает над Ca: (Y_{0.49}Ca_{0.30}Ce_{0.03}Nd_{0.04}Sm_{0.02}Gd_{0.02}Mg_{0.07}Al_{0.08})_{Σ1.03}Zr_{0.97}(Ti_{1.45}Fe³⁺_{0.47}Nb_{0.08})_{Σ2.0}O₇. Возможно, такие анализы ближе к цирконолиту-(Y).

Торит ThSiO₄ – распространенный акцессорный минерал почти во всех минеральных телах ультрамафитового тела. Выделения коричневатокрасных кристаллов мелкие; иногда в сечениях кристаллов видна зональность по интенсивности красного цвета. В кальцит-доломитовом карбонатит-пегматите торит по составу характеризуется формулой Th_{0.9}Ca_{0.1}Si_{0.98}P_{0.02}O₄.

Торианит ThO₂ обычно встречается совместно с торитом. Его выделения микроскопические в поляковите-(Се), эшините-(Се) и других минералах. Состав включения торианита в крупном зерне поляковита: Th_{0.99}Si_{0.01}O₂.

Уранинит UO₂ образует мелкое включение в корунде вместе с торианитом и фергусонитом. Уранинит встречается очень редко, и урановая специфика не характерна для ультрамафитов копи № 97.

Рутил TiO₂ изредка встречается среди акцессорных минералов разных парагенезисов в виде мелких зерен, зонально-секториальных по распределению Fe, Nb, иногда Cr.

Кармайлит (Ti,Cr)O₃(OH) вместе с хромитом и поляковитом-(Се) встречен в рихтерит-флогопитовой породе. Его изометричные кристаллы мелкие (~ 50 мкм). Состав минерала соответствует формуле (Ti_{1.1}Cr_{0.5}Fe_{0.22}Na_{0.06}Nb_{0.04}Mn_{0.04}Sr_{0.02}Y_{0.02})O₃(OH).

Бадделейт ZrO₂ в виде мелкого включения во флогопите шпинель-флогопитовой породы имеет состав (мас. %): ZrO₂ 96.4, HfO₂ 2.68, FeO 0.49, TiO₂ 0.34, сумма 99.91.

Доломит CaMg(CO₃)₂ из плотной среднезернистой доломит-флогопитовой породы по составу

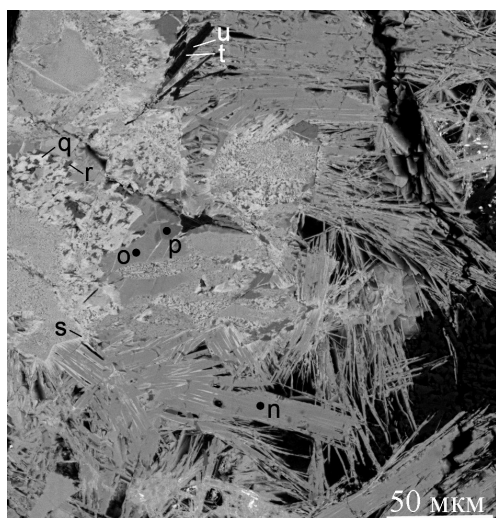


Рис. 18. Синтаксические срастания синхизита-(Ce) (n, r) с бастнезитом-(Ce) (q, s) и таблитчатые вросстки хромселадонита (u, t).

Fig. 18. Syntactic aggregates of synchisite-(Ce) (n, r) with bastnäsite-(Ce) (q, s) and tabular ingrowths of chromeselaodonite (u, t).

характеризуется формулой $\text{Ca}_{0.94}\text{Mg}_{0.98}\text{Fe}_{0.04}\text{Mn}_{0.02}\text{Sr}_{0.02}(\text{CO}_3)_2$. В этой породе вместе с доломитом кристаллизовались монацит-(Ce), рабдофан, ильменит, циркон, хромит, поляковит-(Ce).

Кальцит CaCO_3 из рихтеритовой породы содержит примеси MnO (1.7 мас. %) и MgO (0.5 мас. %).

Бастнезит-(Ce) $\text{Ce}(\text{CO}_3)\text{F}$ в виде многогранных желтых кристаллов размером до 0.3 мм встречен В.О. Поляковым в шлихе из рыхлой массы в западном эндоконтакте тела ультрамафитов (Поляков, Недосекова, 1990). В ассоциации с бастнезитом присутствовали рихтерит, давидит, поляковит-(Ce) и монацит-(Ce). Форма кристаллов бастнезита-(Ce) показана на рис. 5. В доломитовом карбонатит-пегматите бастнезит-(Ce) по составу отвечает формуле $\text{Ce}_{0.38}\text{La}_{0.33}\text{Nd}_{0.06}\text{Pr}_{0.03}\text{Sr}_{0.03}\text{Ca}_{0.13}\text{Fe}_{0.03}\text{Si}_{0.01}(\text{CO}_3)(\text{F}_{0.59}\text{OH}_{0.41})$, но по некоторым анализам с меньшим содержанием F минерал относится к **гидроксилбастнезиту-(Ce)** $\text{Ce}_{0.43}\text{La}_{0.29}\text{Nd}_{0.07}\text{Pr}_{0.02}\text{Sr}_{0.03}\text{Ca}_{0.03}\text{Fe}_{0.09}\text{Si}_{0.03}(\text{CO}_3)(\text{OH}_{0.63}\text{F}_{0.37})$.

В карбонатит-пегматите с крупными кристаллами эшинита наблюдались синтаксические сростки **бастнезита-(La)** $\text{La}_{0.51}\text{Ce}_{0.41}\text{Nd}_{0.05}\text{Pr}_{0.01}\text{Ca}_{0.01}\text{Si}_{0.01}(\text{CO}_3)(\text{F}_{0.53}\text{OH}_{0.47})$ с синхизитом-(La) (рис. 18).

Синхизит-(Ce) $\text{CaCe}(\text{CO}_3)_2\text{F}$ в доломитовом карбонатит-пегматите совместно с бастнезитом-(Ce) образует мелкие таблитчатые выделения с

формулой $\text{Ca}_{0.84}\text{Ce}_{0.5}\text{La}_{0.42}\text{Nd}_{0.09}\text{Pr}_{0.03}\text{Sr}_{0.03}\text{Fe}_{0.03}\text{Y}_{0.02}\text{Si}_{0.05}(\text{CO}_3)_2(\text{F}_{0.76}\text{OH}_{0.24})$. В карбонатит-пегматите с крупными кристаллами эшинита-(Ce) наблюдались синтаксические сростки **синхизита-(La)**: $\text{La}_{0.39}\text{Ce}_{0.38}\text{Nd}_{0.05}\text{Sr}_{0.04}\text{Pr}_{0.02}\text{Y}_{0.01}\text{Si}_{0.02}(\text{CO}_3)_2\text{F}$ с **бастнезитом-(La)** (рис. 18).

Паризит-(Ce) $\text{CaCe}_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$ обнаружен в трещине, секущей крупный индивид поляковита-(Ce) из флогопитового слюдита. Его мелкие сростки имеют состав $\text{Ca}_{0.69}\text{Ce}_{0.9}\text{La}_{0.79}\text{Nd}_{0.14}\text{Pr}_{0.05}\text{Sr}_{0.05}\text{Fe}_{0.21}\text{Si}_{0.16}(\text{CO}_3)_3(\text{F}_{1.5}\text{OH}_{0.5})$.

Бурбанкит $(\text{Na}_2\text{Ca})\text{Sr}_3(\text{CO}_3)_5$ определен в ассоциации с монацитом-(Ce) и эшинитом-(Ce) в кальцит-доломитовом карбонатит-пегматите. Формула минерала $\text{Na}_{1.2}\text{Ca}_{2.09}\text{Mg}_{0.08}\text{Sr}_{0.86}\text{Ce}_{0.91}\text{La}_{0.65}\text{Nd}_{0.14}\text{Pr}_{0.06}(\text{CO}_3)_5$.

Анкилит-(Ce) $\text{SrCe}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ встречен в виде мелких вростков в кальцит-доломитовом агрегате. Состав минерала соответствует формуле $\text{Sr}_{0.68}\text{Ce}_{0.58}\text{Ca}_{0.24}\text{Nd}_{0.11}\text{Pr}_{0.04}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$. В хромит-рихтерит-флогопитовой породе внутри крупного кристалла поляковита-(Ce) выявлено включение хромсодержащего анкилита-(Ce) с расчетной формулой $\text{Sr}_{0.6}\text{Ce}_{0.47}\text{La}_{0.39}\text{Cr}_{0.22}\text{Fe}_{0.13}\text{Nd}_{0.08}\text{Pr}_{0.03}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Апатит-(CaF) $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ – акцессорный и/или второстепенный минерал флогопит-форстеритовой породы, слюдитов и карбонатитов. Во флогопит-форстеритовой породе апатит обогащен Sr и REE: $(\text{Ca}_{4.52}\text{Na}_{0.21}\text{Sr}_{0.09}\text{Ce}_{0.10}\text{La}_{0.05}\text{Nd}_{0.03}\text{Pr}_{0.01}\text{Fe}_{0.05})(\text{P}_{2.91}\text{Si}_{0.03}\text{O}_4)_3(\text{OH}_{0.62}\text{F}_{0.38})$. В шпинель-флогопитовой породе апатит содержит меньше Sr и REE, но присутствует Cl: $(\text{Ca}_{4.81}\text{Na}_{0.10}\text{Sr}_{0.09}\text{Ce}_{0.03}\text{La}_{0.01}\text{Nd}_{0.02})(\text{P}_{2.91}\text{Si}_{0.03}\text{O}_4)_3(\text{F}_{0.65}\text{Cl}_{0.03}\text{OH}_{0.33})$. В обоих случаях в парагенезисе с апатитом кристаллизовался монацит. Большинство наших анализов рассчитываются на гидроксилapatит, но фтор всегда присутствует.

Рабдофан-(Ce) $\text{CePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ совместно с баритом обнаружен в шпинель-флогопитовом слюдите. Состав его зерен отвечает формуле $\text{Ce}_{0.30}\text{La}_{0.19}\text{Nd}_{0.13}\text{Pr}_{0.03}\text{Ca}_{0.22}\text{Fe}_{0.11}(\text{P}_{0.85}\text{S}_{0.12}\text{Si}_{0.05}\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ (расчет H_2O по дефициту суммы анализа).

Барит BaSO_4 как акцессорный минерал выявлен в шпинель-флогопитовом слюдите. Состав барита (мас. %): BaO 61.30, SrO 1.1, CaO 0.88, FeO 0.85, K_2O 0.23, Na_2O 0.26, SiO_2 0.51, SO_3 33.88, сумма 99.01. В агрегате сульфидов флогопит-форстеритовой породы барит также образует мелкое включение.

Из сульфидов во флогопит-форстеритовой породе встречены акцессорные **пирит** FeS_2 (с невы-

сокой примесью Co), **пирротин** $Fe_{1-x}S$, **халькопирит** $CuFeS_2$, а также **пентландит** $(Fe,Ni)_9S_8$ в зернах до 0.5 мм, состав которого, (мас. %): S 32.68, Fe 30.86, Co 1.24, Ni 34.72, сумма 99.50. Карбонаты содержат пирротин и **молибденит** MoS_2 . **Галенит** PbS редок, отмечен в виде микроскопических включений в минералах редкометалльно-редкоземельных парагенезисов карбонатитов и слюдитов.

Самородная медь Cu с невысокой примесью S и Fe встречается в виде дендрита в шпинель-магнетитовой породе в небольшой полости растворения в зерне доломита.

Заключение

Щелочные ультрамафиты копи № 97 являются уникальными образованиями среди минеральных объектов Ильменских гор по разнообразию минеральных парагенезисов и многообразию минералов, число которых к настоящему времени достигло 62-х минеральных видов. Среди минералов впервые в мире были установлены поляковит-(Ce) и фторрихтерит; впервые в России – прайсверкит и кармаклит. Цирконолит-(Y) встречен впервые для Урала и Ильменских гор. Обнаружены новые разновидности пород – доломит-скаполит-шпинель-алланит-биотитовые слюдиты, рихтерит-флогопит-доломит-кальцитовые карбонатиты и карбонатит-пегматиты с большим количеством редких аксессуарных минералов. Для характеристики ряда минералов необходимы дополнительные исследования.

Некоторые минералы щелочных ультрамафитов этой копи известны в Буддымском ультрамафитовом массиве Вишнёвых гор (Недосекова, 2007) и в районе копей № 13 и № 15 Ильменских гор. Проявление поляковита-(Ce), вскрытое выработками копи № 97, является единственным в мире, и здесь найдены его кристаллы размером до 16 см – самые крупные среди минералов группы чевкинита.

Щелочные ультрамафиты в районе копи № 97 являются частью Ильменогорского щелочного комплекса, трассирующего одну из южноуральских рифтовых систем и относящуюся к восточной части Главного Уральского разлома. Таким образом, рассмотренная уникальная минерализация в щелочных ультрамафитах Ильменских гор является важной характеристикой части геологических процессов, идущих в рифтовых системах. В районе копи № 97 также желательно заложение небольшого карьера для научных исследований с целью

определения последовательностей минеральных тел.

Авторы благодарны В.И. Поповой и И.Л. Недосековой за полезные советы в процессе подготовки статьи к публикации.

Литература

Баженов А.Г., Недосекова И.Л., Петерсен Э.У. (1993) Фторрихтерит $Na_2Ca(Mg,Fe)_5[Si_8O_{22}](F,OH)_2$ – новый минеральный вид в группе амфиболов. *Записки ВМО*, 122(3), 98–102.

Жданов В.Ф., Баженова Л.Ф., Поляков В.О. (1986) Хромово-магниевого аналог чевкинита. *Новые и малоизученные минералы и минеральные ассоциации Урала*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 110–111.

Колесниченко С.В., Попов В.А. (2019) Поляковит и другие минералы копи № 97 в Ильменских горах. *Двадцатые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова*. Миасс: ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 31–38.

Мельников М.П. (1882) Ильменские минеральные копи. *Горный журнал*, 1(1), 70–151.

Недосекова И.Л. (2007) Новые данные по карбонатитам Ильмено-Вишневогорского комплекса (Ю. Урал, Россия). *Геология рудных месторождений*, 49 (2), 146–164.

Никандров С.Н., Попов В.А. (1981) О новой разновидности нефелинового гастингситового сиенита в Ильменских горах. *Минералогические исследования в Ильменском заповеднике*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 39–44.

Поляков В.О., Недосекова И.Л. (1990) Минералогия апогипербазитовых фенитов и карбонатитов южной части Ильменских гор. *Минералы месторождений и зон техногенеза рудных районов Урала*. Свердловск: УрО АН СССР, 6–17.

Попов В.А. (2007) Минералогия щелочных ультрамафитов копи № 97 Ильменских гор. *Минералогия Урала-2007*. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 256–258.

Попов В.А., Паутов Л.А., Попова В.И. (2000) Поляковит – новый минерал: результаты доизучения хромово-магниевого чевкинита. *Уральский минералогический сборник № 10*. Миасс: ИМин УрО РАН, 3–10.

Попов В.А., Попова В.И. (2006) Минералогия пегматитов Ильменских гор. *Минералогический альманах*. Т. 9. М.: Ассоциация Эжост, 156 с.

Рассомахин М.А., Котляров В.А. (2018) Минералогия включений в корунде из копи № 418 (Ильменский заповедник, Южный Урал). *Минералогия*, 4(3), 27–35.

Brögger W.C. (1921) Die Eruptivgesteinen des Kristianiagebietes, IV. Das Fengebiet in telemarken, Norwegen. – *Norske Vidensk. Selsk. Skrift*, 1 math-naturv., 9, 210–222.

References

- Bazhenov A.G., Nedosekova I.L., Petersen E.U.** (1993) [Fluorrichterite $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})_3[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F},\text{OH})_2$ – a new mineral species of the amphibole group]. *Zapisky VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **122**(3), 98–102. (in Russian)
- Brögger W.C.** (1921) Die Eruptivgesteinen des Kristianiagebietes, IV. Das Fengebiet in telemarken, Norway.-Norske Vidensk. Selsk. Skrift, 1 math-naturv., (9), 210–222.
- Kolisnichenko S.V., Popov V.A.** (2019) [Polyakovite and other minerals of pit no. 97 in the Ilmeny Mountains]. *12-e Vserossiskie nauchnye chteniya pamyati ilmenskogo mineraloga V.O. Polyakova [Twentieth All-Russian meeting dedicated to memory of Ilmeny mineralogist V.O. Polyakov]*. Miass: IMin SU FRC MG UB RAS, 31–38. (in Russian)
- Melnikov M.P.** (1882) [Ilmensky mineral mines]. *Gorny zhurnal [Mining Journal]*, **1**(1), 70–151. (in Russian)
- Nedosekova I.L.** (2007) New data on carbonatites of the Ilmensky-Vishnevogorsky alkaline complex (the southern Urals, Russia). *Geology of Ore Deposits*, **49**(2), 129–146.
- Nikandrov S.N., Popov V.A.** (1981) [A new variety of nepheline-hastingsite syenite in the Ilmeny Mountains]. *Mineralogicheskie issledovaniya v Ilmenskom zapovednike [Mineralogical studies in the Ilmeny Reserve]*. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 39–44. (in Russian)
- Polyakov V.O., Nedosekova I.L.** (1990) [Mineralogy of fenites and carbonatites after ultramafic rocks of the southern part of the Ilmeny Mountains]. *Mineralogiya mestorozhdeniy i zon tekhnogeneza rudnykh regionov Urala [Minerals of deposits and zones of technogenesis of ore regions of the Urals]*. Sverdlovsk: UB AS USSR, UrO RAN SSSR, 6–17. (in Russian)
- Popov V.A.** (2007) [Mineralogy of alkaline ultramafic rocks of pit no. 97 of the Ilmeny Mountains]. *Mineralogiya Urala-2007 [Mineralogy of the Urals-2007]*. Miass–Yekaterinburg, UB RAS, 256–258. (in Russian)
- Popov V.A., Pautov L.A., Popova V.I.** (2000) [Polyakovite, a new mineral: the results of additional study of chrome-magnesium chevkinite]. *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik № 10 [Ural Mineralogical Collection no. 10]*, Miass, IMin UrO RAN, 3–10. (in Russian)
- Popov V.A., Popova V.I.** (2006) Mineralogy of pegmatites of the Ilmeny Mountains. *Mineralogicheskiy Almanach [Mineralogical Almanac]*, Vol. 9. M., Assotsiatsiya Ekost, 156 p. (in Russian)
- Rassomakhin M.A., Kotlyarov V.A.** (2018) [Mineralogy of inclusions in corundum from mine no. 418 (Ilmeny Reserve, the southern Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **4**(3), 27–35. (in Russian)
- Zhdanov V.F., Bazhenova L.F., Polyakov V.O.** (1986) [Chromium-magnesium analog of chevkinite]. *Novye i maloizuchennyye mineraly i mineralnye assotsiatsii Urala [New and poorly studied minerals and mineral assemblages of the Urals]*. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 110–111. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 1 марта 2020 г.

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ЗЕРНАХ ПЛАТИНЫ ИЗ КАЗАНСКОЙ РОССЫПИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Е.В. Зайкова, И.А. Блинов, В.А. Котляров

*Южно-Уральский научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; zaykova@mineralogy.ru*

MINERAL INCLUSIONS IN PLATINUM GRAINS FROM THE KAZAN PLACER (SOUTH URALS)

E.V. Zaykova, I.A. Blinov, V.A. Kotlyarov

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy,
Miass, Chelyabinsk district, 456317, Russia; zaykova@mineralogy.ru*

Зерна платины из Казанской россыпи на Южном Урале содержат включения самородных металлов (золота, сплавов группы осмия), а также халькогенидов элементов платиновой группы, представленных сульфидами (лауритом, эрликманитом, бауитом), сульфоарсенидами (ирарситом, холлингвортитом), стибипалладинитом, теллуридом (меренскиитом) и селенидами.

Илл. 5. Табл. 7. Библ. 13.

Ключевые слова: Казанская россыпь, платина, самородное золото, сплавы элементов группы осмия, теллуриды, селениды и сульфиды ЭПГ.

Platinum grains from the Kazan placer in the South Urals contain inclusions of native metals (gold, osmium group alloys), as well as PGE chalcogenides: sulfides (laurite, erlichmanite, bauite), sulfoarsenides (irarsite and hollingworthite), stibiopalladinite, telluride (merenskiite) and selenides.

Figures 5. Tables 7. References 13.

Key words: Kazan player, platinum, native gold, alloys of the osmium group elements, tellurides, selenides, sulfides PGE.

Введение

В настоящее время элементы платиновой группы (ЭПГ) отнесены к категории стратегического сырья (Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р «О стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г.»). К группе платиновых металлов относится шесть элементов – Ru, Rh, Pd, Os, Ir и Pt. Южный Урал является одним из регионов, где происходит попутная добыча платиноидов из россыпей золота.

Для россыпей Южного Урала характерно неравномерное распределение минералов платиновой группы (МПГ) с переменным составом (Ir-Os-Ru и Pt-Fe) (Зайков и др., 2016а–в). МПГ часто содержат включения других минералов, в том числе халь-

когениды ЭПГ (Зайков и др., 2018). Информация о минеральных формах нахождения ЭПГ вносит существенный вклад в определение источников и условий образования россыпей (Zaykov et al., 2017).

Одним из объектов, где происходит промышленная добыча золота и ЭПГ, являются россыпи Гогинской россыпной зоны, которая находится в 100–150 км к ЮЮВ от г. Магнитогорска (рис. 1). В состав зоны входит 20 россыпей длиной 1.0–3.0 км и шириной 80–200 м. Тип россыпей карстовый и аллювиально-пролювиальный, возраст мезозойский и миоценовый. Гогинская зона относится к россыпям Южного Урала, образование которых связано с эрозионно-структурными депрессиями, заполнявшихся континентальными осадками мезозоя (Сигов и др., 1971; Баранников, 2006).

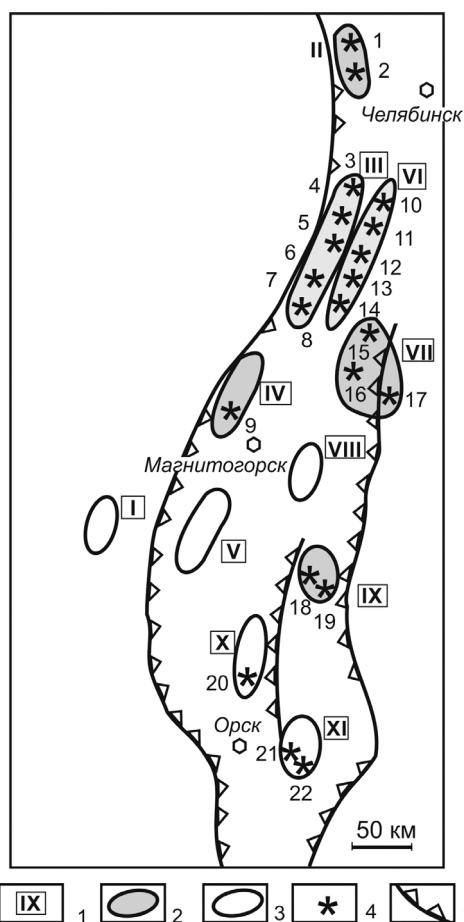


Рис. 1. Схема расположения основных россыпных зон на Южном Урале с данными о составе золота по (Зайков и др., 2016в).

1 – россыпные зоны; 2, 3 – россыпи золота с платиноидами (2) и без платиноидов (3); 4 – места отбора проб; 5 – фрагменты гипербазитовых поясов.

Россыпные зоны: I – Авзяно-Прибельская, II – Кыштымская, III – Миасская, IV – Миндякская, V – Восточно-Ирендыкская, VI – Непряхинская, VII – Кочкарская, VIII – Гумбейская, IX – Гогинская, X – Амамбайская, XI – Суундукская.

Fig. 1. Position of main placer zones in the South Urals with available data on the composition of gold after (Zaykov et al., 2016).

1 – placer zones; 2, 3 – gold placers with (2) and without (3) PGMs; 4 – sampling places; 5 – fragments of ultramafic belts.

Placer zones: I – Avzyan–Pribelskaya, II – Kyshtym, III – Miass, IV – Mindyak, V – East Irendyk, VI – Nepryakhino, VII – Kochkar, VIII – Gumbeyka, IX – Gogino, X – Amambayka, XI – Suunduk.

Казанская россыпь приурочена к Брединской эрозионной депрессии (рис. 2). Россыпь имеет сложное строение и входит в состав одноименного россыпного поля длиной 5 км (Зайков и др., 2016в). На этом поле распространены мезозойские и неоген-

новые золотоносные отложения. В наиболее крупной Владимирской россыпи площадью 0.5×0.8 км золотоносный пласт мелового возраста имеет мощность 1.1 м. Ниже золотоносных пластов залегают карстовые отложения с золотосодержащими «кочками» мощностью до 10 м.

Методы исследований

Материал для исследований в виде платинового концентрата и черного шлиха передан сотрудниками ООО «Миасский прииск» А.Ю. Ивановым и Б.Я. Гисматуллиным. Пробы были отобраны из карьера № 3 Казанской россыпи в июле 2017 г. Обработка проб проводилась К.А. Новоселовым по схеме: 1) классификация по крупности: +2, –2...+1, –1...+0.5, –0.5...+0.25, –0.25 мм; 2) магнитная/электромагнитная сепарация фракций –1...+0.5, –0.5...+0.25, –0.25 мм с помощью магнита Сочнева; 3) разделение немагнитной фракции в бромформе (2.9 г/см^3) с пересчетом класса –0.25 мм.

В пробах встречались зерна золота и ЭПГ, которые были изучены под бинокулярным микроскопом и рассортированы по морфологии В.В. Зайковым. Из нескольких десятков зерен разных морфологических типов были смонтированы полированные брикеты на основе эпоксидной смолы. Состав минералов исследован на растровых электронных микроскопах VEGA3 TESCAN с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments X-act (аналитик А.И. Блинов) и РЭММА 202М ЭДС Link (аналитик В.А. Котляров). При анализе использовался ток 15 нА, ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с. В качестве стандартов использованы чистые металлы ЭПГ и селенид свинца (MINM-25-53 стандарт ASTIMEX, пашка № 01–044).

Результаты исследований

Зерна золота и платины из Казанской россыпи установлены во фракциях –1...+0.5, –0.5...+0.25 и –0.25. Количество платины достигает 73 % от всех исследованных зерен МПГ (рис. 3). Помимо платины встречаются сплавы промежуточного состава Os–Ru–Ir, а также сульфиды и сульфохалькогениды ЭПГ.

Зерна платины имеют уплощенную форму. По химическому составу вся платина относится к ферроплатине или железистой платине (среднее содержание Pt 90.28 мас. %; табл. 1). Резко преобладает платина с содержаниями 89–91 мас. % Pt

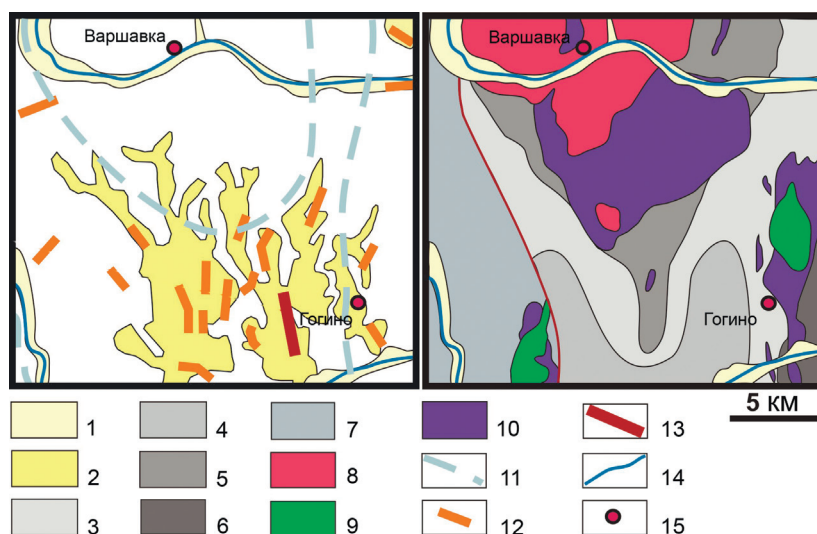


Рис 2. Положение Казанской россypi в Гогинской россypiной зоне (составлено Е.В. Белогуб по материалам геологической карты листа N-41-XXVG, с упрощениями).

1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – неогеновые аллювиальные и пролювиальные отложения; 3 – углеродистые сланцы; 4 – известняки; 5 – слюдяные сланцы; 6 – углисто-глинистые сланцы; 7 – песчаники; 8 – гранитоиды; 9 – габбро; 10 – серпентиниты; 11 – границы Брединской структурно-эрозионной депрессии; 12 – россypi; 13 – Казанская россypь; 14 – реки; 15 – населенные пункты.

Fig. 2. Position of the Kazan placer in the Gogino placer zone (simplified by E.V. Belogub after State Geological Map, sheet N-41-XXVG).

1 – Quaternary alluvium; 2 – Neogene alluvium and proluvium; 3 – carbonaceous schists; 4 – limestones; 5 – micaeous schists; 6 – carbonaceous-clayey schists; 7 – sandstones; 8 – granitoids; 9 – gabbro; 10 – serpentinites; 11 – boundary of the Bredy structural erosion depression; 12 – placers; 13 – Kazan placer; 14 – rivers; 15 – settlements.

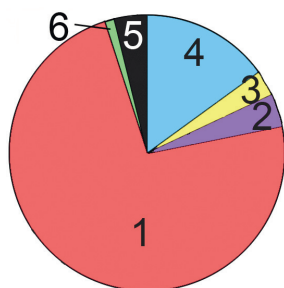


Рис. 3. Содержание отдельных зерен платиноидов различного состава (141 зерно).

1 – платина, изоферроплатина, тетраферроплатина (73 %); 2 – иридий (4 %); 3 – рутений (3 %); 4 – осмий (15 %); 5 – арсениды, сульфиды и сульфоарсениды (4 %); 6 – сростки (1 %).

Fig. 3. Amount of PGM grains of different composition (141 grains in total).

1 – platinum, isoferroplatinum, tetraferroplatinum (73 %); 2 – iridium (3 %); 3 – osmium (15 %); 4 – arsenides, sulfides, sulfoarsenides (4 %); 5 – intergrowths (1 %).

(79 % от количества зерен). В подчиненном количестве встречается платина с содержаниями (мас. %) 92–93 Pt (11 %), 87–88 Pt (6 %), 95 Pt (2 %) и 82 и 76 (1 %). Во всех анализах отмечается примесь Fe: 2.59–9.81 мас. % (среднее содержание Fe

7.36 мас. %). В большинстве анализов определены примеси Cu (0.19–4.02 %), Rh (0.3–4.18 мас. %) и Pd (0.2–2.79 мас. %). Реже отмечаются Os (до 14.64 мас. %), Ir (обычно 1–3 мас. %, в одном случае до 5.62 мас. %), Ru (0.2–2.25 мас. %) и Sb (0.57–3.14 мас. %). Примесь Ni установлена только в трех пробах в концентрациях на пределе чувствительности прибора 0.11–0.12 мас. %.

Зерна платины часто содержат включения других минералов, представленных самородными металлами и халькогенидами ЭПГ.

Самородное золото образует субизометричные включения размером до 20–40 мкм (рис. 4а, б). По химическому составу золото относится к средне- и высокопробному (Петровская, 1973). Для золота характерны примеси Pd (до 3.98 мас. %) и Cu (до 0.58 мас. %) (табл. 2). Содержания Pt обычно не превышают 6 мас. %, в одном анализе достигая 21.16 мас. %. Иногда отмечаются примеси Ir, Fe и Os. Золото из включений в платине резко отличается по составу от свободного комковидного, уплощенного, чешуйчатого золота из россypi, содержание Ag в котором составляет 5–25 мас. %. Это золото часто окружено прерывистой каймой

Таблица 1
Table 1Состав зерен платины из Казанской россыпи (мас.%)
Chemical composition of platinum grains from the Kazan placer (wt. %)

№ п/п	Проба (зерно)	№ анализа	Кол-во анализ.	Os	Ir	Rh	Ru	Pt	Pd	Sb	Cu	Fe	Ni	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	Ка-р2-губ(1)	16140a	1	-	-	-	-	89.45	0.44	-	0.91	8.29	-	99.09	$(Pt_{0.73}Fe_{0.24}Cu_{0.02}Pd_{0.01})_{1.00}$
2	Ка-р2-губ(2)	16140b	1	0.34	-	-	0.09	89.79	0.45	-	0.93	8.39	-	100.00	$(Pt_{0.73}Fe_{0.24}Cu_{0.02}Pd_{0.01})_{1.00}$
3	Ка-р2-губ(3)	16140nv*	2	0.56	-	-	-	89.70	0.14	-	0.93	8.36	-	99.68	$(Pt_{0.73}Fe_{0.24}Cu_{0.02}Os_{0.01})_{1.00}$
4	Ка-р2-губ(4)	16141a	1	-	-	-	-	90.48	0.60	-	1.01	8.06	-	100.15	$(Pt_{0.74}Fe_{0.23}Cu_{0.02}Pd_{0.01})_{1.00}$
5	Ка-р2-губ(5)	16141hm*	2	1.03	-	-	0.26	89.88	-	-	1.25	7.88	-	100.28	$(Pt_{0.73}Fe_{0.23}Cu_{0.03}Os_{0.01})_{1.00}$
6	Ка-р2-губ(6)	16141n	1	-	-	0.98	-	88.81	0.80	-	0.64	7.90	-	99.13	$(Pt_{0.73}Fe_{0.23}Cu_{0.02}Rh_{0.01}Pd_{0.01})_{1.00}$
7	Ка-р2-губ(7)	16141vc'e*	3	1.44	0.71	0.66	0.12	91.23	1.02	-	-	4.53	-	99.70	$(Pt_{0.81}Fe_{0.14}Pd_{0.02}Os_{0.01}Rh_{0.01}Ir_{0.01})_{1.00}$
8	Ка-р2-губ(7)	16141wd*	2	0.19	-	-	-	91.04	0.38	-	-	8.70	-	100.30	$(Pt_{0.74}Fe_{0.25}Pd_{0.01})_{1.00}$
9	Ка-р2-губ(8)	16142c	1	-	-	0.34	-	90.53	1.08	-	2.28	6.73	-	100.97	$(Pt_{0.73}Fe_{0.19}Cu_{0.06}Pd_{0.02})_{1.00}$
10	Ка-р2-губ(9)	16142fh*	2	-	-	-	-	90.86	0.32	-	0.22	8.72	-	100.12	$(Pt_{0.74}Fe_{0.25}Cu_{0.01})_{1.00}$
11	Ка-р2-губ(11)	16142j	1	-	-	1.40	-	94.90	0.56	-	-	2.59	-	99.46	$(Pt_{0.88}Fe_{0.08}Rh_{0.03}Pd_{0.01})_{1.00}$
12	Ка-р2-губ(12)	16143b	1	2.37	-	-	-	89.18	0.77	-	0.40	8.10	-	100.82	$(Pt_{0.73}Fe_{0.23}Os_{0.02}Pd_{0.01}Cu_{0.01})_{1.00}$
13	Ка-р2-губ(13)	16143k	1	-	-	-	-	90.76	0.31	-	0.85	8.36	-	100.28	$(Pt_{0.74}Fe_{0.24}Cu_{0.02})_{1.00}$
14	Ка-р2-губ(14)	16143lp*	2	-	-	-	-	90.50	0.33	-	1.69	7.43	-	99.94	$(Pt_{0.74}Fe_{0.21}Cu_{0.04}Pd_{0.01})_{1.00}$
15	Ка-р2-губ(14)	16143o	1	-	-	-	-	93.38	0.34	-	0.83	4.50	-	99.05	$(Pt_{0.83}Fe_{0.14}Cu_{0.02}Pd_{0.01})_{1.00}$
16	Ка-р2-губ(15)	16143s	1	0.49	-	-	-	89.70	-	-	0.19	8.77	-	99.15	$(Pt_{0.74}Fe_{0.25}Cu_{0.01})_{1.00}$
17	Ка-р2-губ(16)	16143u	1	-	-	-	-	90.45	-	-	0.23	8.35	-	99.03	$(Pt_{0.75}Fe_{0.24}Cu_{0.01})_{1.00}$
18	Ка-р2-губ(17)	16143w	1	-	-	-	-	90.17	0.31	-	0.59	8.24	-	99.32	$(Pt_{0.74}Fe_{0.24}Cu_{0.02})_{1.00}$
19	Ка-р2-губ(18)	16143c'	1	-	-	-	-	90.35	0.22	-	1.13	8.03	-	99.73	$(Pt_{0.74}Fe_{0.23}Cu_{0.03})_{1.00}$
20	Ка-р2-губ(19)	16144a	1	-	-	-	-	90.68	0.27	-	-	9.44	-	100.39	$(Pt_{0.73}Fe_{0.27})_{1.00}$
21	Ка-р2-губ(20)	16144d	1	-	0.89	-	0.27	89.22	0.44	-	0.84	8.14	-	99.80	$(Pt_{0.73}Fe_{0.23}Cu_{0.01}Ir_{0.01}Pd_{0.01}Ru_{0.01})_{1.00}$
22	Ка-р2-губ(22)	16150b	1	14.64	2.82	1.11	1.16	75.58	0.81	-	-	3.17	-	99.29	$(Pt_{0.68}Fe_{0.10}Os_{0.14}Ir_{0.03}Ru_{0.02}Rh_{0.02}Pd_{0.01})_{1.00}$
23	Ка-р2-губ(23)	16150c	1	0.79	1.56	-	-	88.97	-	-	-	8.68	-	100.00	$(Pt_{0.73}Fe_{0.25}Ir_{0.01}Os_{0.01})_{1.00}$
24	Ка-р2-губ(24)	16150j	1	0.44	1.22	0.59	-	88.58	-	-	0.65	7.77	-	99.25	$(Pt_{0.73}Fe_{0.23}Cu_{0.02}Ir_{0.01}Rh_{0.01})_{1.00}$
25	Ка-р2-губ(25)	16150p	1	-	-	-	-	89.76	0.37	-	2.47	7.36	-	99.95	$(Pt_{0.72}Fe_{0.21}Cu_{0.06}Pd_{0.01})_{1.00}$
26	Ка-р2-губ(26)	16150s	1	-	-	-	-	91.42	0.27	-	0.77	8.53	-	100.98	$(Pt_{0.74}Fe_{0.24}Cu_{0.02})_{1.00}$
27	Ка-р2-губ(27)	16150v	1	-	-	-	-	90.94	-	-	0.40	8.66	-	100.00	$(Pt_{0.74}Fe_{0.25}Cu_{0.01})_{1.00}$
28	Ка-р2-губ(28)	16150x	1	-	-	-	-	89.94	0.53	-	0.76	7.80	-	99.04	$(Pt_{0.75}Fe_{0.22}Cu_{0.02}Pd_{0.01})_{1.00}$
29	Ка-р2-ж(3)	16130fg*	2	0.85	-	0.94	-	87.82	1.92	-	2.28	6.11	-	99.92	$(Pt_{0.72}Fe_{0.17}Cu_{0.06}Pd_{0.03}Rh_{0.01}Os_{0.01})_{1.00}$
30	Ка-р2-ж(4)	16130mp*	2	-	-	-	-	91.13	-	-	-	8.87	-	100.00	$(Pt_{0.75}Fe_{0.25})_{1.00}$
31	Ка-р2-ж(5)	16130qr*	2	-	-	-	-	93.90	-	-	-	6.10	-	100.00	$(Pt_{0.82}Fe_{0.18})_{1.00}$
32	Ка-р2-ж(6)	16130w	1	-	-	0.45	-	91.84	-	-	0.98	6.23	-	99.50	$(Pt_{0.78}Fe_{0.18}Cu_{0.03}Rh_{0.01})_{1.00}$

33	Ка-p2-ж(7)	16130c'	1	-	-	-	0.51	-	89.89	-	0.81	7.80	-	99.01	(Pt _{0,74} Fe _{0,23} Cu _{0,02} Rh _{0,01}) _{1,00}
34	Ка-p2-ж(8)	16131d	1	-	-	0.35	1.05	-	92.14	-	2.48	3.02	-	99.05	(Pt _{0,82} Fe _{0,09} Cu _{0,07} Rh _{0,02}) _{1,00}
35	Ка-p2-ж(10)	16131j	1	-	-	-	0.35	-	89.38	-	2.44	6.90	-	99.08	(Pt _{0,73} Fe _{0,20} Cu _{0,06} Rh _{0,01}) _{1,00}
36	Ка-p2-ж(13)	16131p	1	-	-	-	1.50	-	93.90	-	0.56	3.95	-	99.90	(Pt _{0,84} Fe _{0,12} Rh _{0,03} Pd _{0,01}) _{1,00}
37	Ка-p2-ж(14)	16131twya*	4	-	-	0.09	0.34	1.79	88.48	-	2.76	6.69	-	100.14	(Pt _{0,71} Fe _{0,19} Cu _{0,07} Rh _{0,01} Sb _{0,02}) _{1,00}
38	Ка-p2-ж(16)	16132kp*	2	-	1.12	0.21	2.54	-	87.23	-	1.08	7.46	-	99.64	(Pt _{0,70} Fe _{0,21} Rh _{0,04} Cu _{0,03} Ru _{0,02}) _{1,00}
39	Ка-p2-ж(18)	16132t	1	-	-	0.45	0.49	-	94.84	-	-	3.44	-	99.22	(Pt _{0,87} Fe _{0,11} Rh _{0,02} Pd _{0,01}) _{1,00}
40	Ка-p2-ж(19)	16132v	1	-	-	0.60	0.55	-	89.71	-	-	8.40	-	99.26	(Pt _{0,87} Fe _{0,11} Rh _{0,01} Pd _{0,01}) _{1,00}
41	Ка-p2-ж(20)	16132y	1	-	-	0.38	1.07	-	92.66	-	2.46	3.21	-	99.78	(Pt _{0,74} Fe _{0,24} Cu _{0,07} Rh _{0,02}) _{1,00}
42	Ка-p2-м(1)	16166bc*	2	-	-	1.10	0.30	-	89.50	-	0.57	8.47	-	99.94	(Pt _{0,73} Fe _{0,24} Pd _{0,02} Cu _{0,01}) _{1,00}
43	Ка-p2-м(3)	16166e	1	1.07	-	-	0.97	-	89.43	-	1.99	6.92	-	100.38	(Pt _{0,73} Fe _{0,20} Cu _{0,05} Rh _{0,01} Os _{0,01}) _{1,00}
44	Ка-p2-м(4)	16166l	1	-	-	-	-	-	90.60	-	2.43	6.93	-	99.96	(Pt _{0,74} Fe _{0,20} Cu _{0,06}) _{1,00}
45	Ка-p2-м(6)	16166o	1	-	-	0.53	-	-	90.45	-	-	9.81	-	100.79	(Pt _{0,72} Fe _{0,27} Cu _{0,01}) _{1,00}
46	Ка-p2-м(7)	16166rs*	2	-	-	-	-	-	90.72	-	0.39	8.63	-	99.74	(Pt _{0,74} Fe _{0,25} Cu _{0,01}) _{1,00}
47	Ка-p2-м(8)	16166z	1	-	-	-	-	-	88.81	-	2.51	6.52	-	99.82	(Pt _{0,73} Fe _{0,18} Cu _{0,06} Sb _{0,03}) _{1,00}
48	Ка-p2-м(9)	16167b	1	-	-	-	-	-	91.45	-	-	9.006	-	100.87	(Pt _{0,74} Fe _{0,26}) _{1,00}
49	Ка-p2-м(10)	16167c	1	-	-	-	-	-	91.67	-	0.30	8.99	-	100.96	(Pt _{0,74} Fe _{0,25} Cu _{0,01}) _{1,00}
50	Ка-p2-м(11)	16167h	1	-	-	-	-	-	91.04	-	0.98	8.44	-	100.46	(Pt _{0,74} Fe _{0,24} Cu _{0,02}) _{1,00}
51	Ка-p2-м(12)	16167j	1	-	-	-	-	-	89.31	-	2.32	7.43	-	99.006	(Pt _{0,73} Fe _{0,21} Cu _{0,06}) _{1,00}
52	Ка-p2-м(13)	16167o	1	-	-	-	-	-	90.43	-	1.28	8.29	-	100.00	(Pt _{0,73} Fe _{0,24} Cu _{0,03}) _{1,00}
53	Ка-p2-м(14)	16167r	1	-	-	-	-	-	90.97	-	-	9.03	-	100.00	(Pt _{0,74} Fe _{0,26}) _{1,00}
54	Ка-p2-м(15)	16167w	1	-	-	-	-	-	91.01	-	0.80	8.28	-	100.66	(Pt _{0,74} Fe _{0,23} Cu _{0,02} Sb _{0,01}) _{1,00}
55	Ка-p2-м(17)	16168de*	2	-	-	0.42	-	0.57	90.41	-	0.92	8.05	-	99.79	(Pt _{0,74} Fe _{0,23} Cu _{0,02} Pd _{0,01}) _{1,00}
56	Ка-p2-м(18)	16168f	1	1.06	-	0.50	0.94	-	88.37	-	0.72	8.81	-	100.40	(Pt _{0,70} Fe _{0,25} Cu _{0,02} Rh _{0,01} Ir _{0,01} Pd _{0,01}) _{1,00}
57	Ка-p2-м(19)	16168k	1	-	-	0.61	0.48	-	89.82	-	1.24	7.50	-	99.65	(Pt _{0,74} Fe _{0,21} Cu _{0,03} Pd _{0,01} Rh _{0,01}) _{1,00}
58	Ка-p2-м(20)	16168l	1	-	-	-	-	-	91.34	-	0.90	8.44	-	100.67	(Pt _{0,74} Fe _{0,24} Cu _{0,02}) _{1,00}
59	Ка-p2-м(21)	16168s	1	-	-	-	-	-	90.15	-	1.53	8.32	-	100.00	(Pt _{0,73} Fe _{0,23} Cu _{0,04}) _{1,00}
60	Ка-p2-м(22)	16168t	1	-	-	-	-	-	90.18	-	0.48	8.80	-	100.09	(Pt _{0,73} Fe _{0,25} Cu _{0,01} Pd _{0,01}) _{1,00}
61	Ка-p2-м(23)	16168b'	1	-	-	-	-	1.04	90.69	-	0.97	8.01	-	100.71	(Pt _{0,74} Fe _{0,23} Cu _{0,02} Sb _{0,01}) _{1,00}
62	Ка-p2-м(24)	16175bc*	2	-	-	0.27	-	-	90.34	-	-	9.11	-	99.72	(Pt _{0,74} Fe _{0,26}) _{1,00}
63	Ка-p2-м(25)	16175e	1	-	-	-	-	-	91.39	-	1.15	8.05	-	100.59	(Pt _{0,74} Fe _{0,23} Cu _{0,03}) _{1,00}
64	Ка-p2-м(26)	16175f	1	-	-	-	-	-	91.81	-	-	8.98	-	100.79	(Pt _{0,75} Fe _{0,25}) _{1,00}
65	Ка-p2-м(27)	16175i	1	-	-	0.56	-	-	89.83	-	0.32	8.58	-	99.30	(Pt _{0,74} Fe _{0,24} Pd _{0,01} Cu _{0,01}) _{1,00}
66	Ка-p2-м(28)	16175j	1	-	-	0.36	0.36	-	90.68	-	0.79	8.22	-	100.41	(Pt _{0,74} Fe _{0,23} Cu _{0,02} Rh _{0,01}) _{1,00}
67	Ка-p2-м(29)	16175q	1	-	-	0.56	-	-	89.81	-	0.33	8.64	-	99.34	(Pt _{0,73} Fe _{0,25} Pd _{0,01} Cu _{0,01}) _{1,00}
68	Ка-p2-м(30)	16175r	1	-	-	0.61	-	-	90.51	-	-	9.60	-	100.72	(Pt _{0,72} Fe _{0,27} Pd _{0,01}) _{1,00}
69	Ка-p2-м(31)	16175v	1	-	-	-	-	-	90.23	-	0.24	8.69	-	99.16	(Pt _{0,74} Fe _{0,25} Cu _{0,01}) _{1,00}
70	Ка-p2-м(32)	16175w	1	-	-	-	-	-	90.03	-	1.19	7.88	-	99.10	(Pt _{0,74} Fe _{0,23} Cu _{0,03}) _{1,00}

Окончание таблицы 1

№ п/п	Проба (зерно)	№ анализа	Кол-во анализ.	Os	Ir	Rh	Ru	Pt	Pd	Sb	Cu	Fe	Ni	Сумма	Кристаллохимическая формула
71	Ка-р2-м(33)	16176а	1	—	—	0.89	—	89.86	0.64	—	4.02	3.63	—	99.03	$(Pt_{0.76}Fe_{0.11}Cu_{0.11}Rh_{0.01}Pd_{0.01})_{1.00}$
72	Ка-р2-м(34)	16176h	1	—	—	—	—	90.89	0.47	—	1.86	7.63	—	100.85	$(Pt_{0.73}Fe_{0.21}Cu_{0.05}Pd_{0.01})_{1.00}$
73	Ка-р2-м(35)	16176j	1	—	—	—	—	90.13	0.76	—	0.22	8.89	—	100.00	$(Pt_{0.73}Fe_{0.25}Cu_{0.01}Pd_{0.01})_{1.00}$
74	Ка-р2-м(36)	16176l	1	—	—	—	—	90.37	1.26	—	3.18	5.19	—	100.00	$(Pt_{0.75}Fe_{0.15}Cu_{0.08}Pd_{0.02})_{1.00}$
75	Ка-2рС-Рт(2)	23229ma*	2	—	—	—	—	91.32	—	1.32	—	7.16	—	99.80	$(Pt_{0.77}Fe_{0.21}Sb_{0.02})_{1.00}$
76	Ка-2рС-Рт(6)	23230e	1	—	—	0.71	—	91.62	—	—	—	7.46	—	99.78	$(Pt_{0.77}Fe_{0.22}Rh_{0.01})_{1.00}$
77	Ка-2рС-Рт(6а)	23231def*	3	—	—	0.23	—	91.48	—	—	—	7.95	—	99.66	$(Pt_{0.77}Fe_{0.23})_{1.00}$
78	Ка-2рС-Рт(7)	23232a	1	—	—	0.68	—	91.25	—	—	—	7.71	—	99.65	$(Pt_{0.76}Fe_{0.23}Rh_{0.01})_{1.00}$
79	Ка-2рС-Рт(8)	23233a	1	—	—	0.39	—	92.27	—	—	—	7.35	—	100.01	$(Pt_{0.78}Fe_{0.22})_{1.00}$
80	Ка-2рС-Рт(9)	23233cd*	2	—	—	0.08	—	91.52	—	0.83	0.68	6.40	—	99.52	$(Pt_{0.78}Fe_{0.19}Cu_{0.02}Sb_{0.01})_{1.00}$
81	Ка-2рС-Рт(12)	23233g	1	—	—	1.14	—	91.03	—	—	—	7.63	—	99.80	$(Pt_{0.76}Fe_{0.22})_{1.00}$
82	Ка-2рС-Рт(14)	23234a	1	—	—	1.45	—	90.29	—	—	—	7.40	—	99.13	$(Pt_{0.76}Fe_{0.22}Rh_{0.02})_{1.00}$
83	Ка-2рС-Рт(2)	23217ab*	2	—	—	1.48	—	92.80	—	—	0.31	4.98	—	99.57	$(Pt_{0.81}Fe_{0.15}Rh_{0.03}Cu_{0.01})_{1.00}$
84	Ка-2рС-Рт(4)	23218a	1	—	—	0.56	—	91.70	—	—	—	7.28	—	99.55	$(Pt_{0.78}Fe_{0.21}Rh_{0.01})_{1.00}$
85	Ка-2рС-Рт(5)	23218e	1	—	—	2.84	—	93.02	—	—	—	4.02	—	99.87	$(Pt_{0.83}Fe_{0.12}Rh_{0.05})_{1.00}$
86	Ка-2рС-Рт(14)	23219a	1	—	—	3.37	—	92.90	—	—	0.39	3.17	—	99.83	$(Pt_{0.83}Fe_{0.10}Rh_{0.06}Cu_{0.01})_{1.00}$
87	Ка-2рС-Рт(15)	23219g	1	—	—	—	—	91.12	—	—	—	8.53	—	99.65	$(Pt_{0.75}Fe_{0.25})_{1.00}$
88	Ка-2рС-Рт(16)	23220a	1	—	—	—	—	92.17	—	—	0.21	7.34	—	99.71	$(Pt_{0.78}Fe_{0.22})_{1.00}$
89	Ка-2рС-Рт(8)	23221a	1	—	—	0.29	—	91.41	—	—	0.72	6.75	—	99.17	$(Pt_{0.78}Fe_{0.20}Cu_{0.02})_{1.00}$
90	Ка-2рС-Рт(9)	23222a	1	—	—	—	—	92.37	—	—	—	7.45	0.04	99.86	$(Pt_{0.78}Fe_{0.22})_{1.00}$
91	Ка-2рС-Рт(10)	23223al*	2	—	—	0.89	—	91.89	—	—	—	7.08	—	99.86	$(Pt_{0.78}Fe_{0.21}Rh_{0.01})_{1.00}$
92	Ка-2рС-Рт(11)	23224ab*	2	—	—	—	—	92.19	—	—	1.39	6.12	—	99.70	$(Pt_{0.78}Fe_{0.18}Cu_{0.04})_{1.00}$
93	Ка-2рС-Рт(12)	23224cf*	2	—	—	0.34	—	92.5	—	—	0.26	6.42	—	99.52	$(Pt_{0.79}Fe_{0.19}Cu_{0.01}Rh_{0.01})_{1.00}$
94	Ка-2рС-Рт(18)	23225b	1	—	—	2.22	—	90.22	—	—	—	7.15	—	99.59	$(Pt_{0.76}Fe_{0.21}Rh_{0.03})_{1.00}$
95	Ка-2рС-Рт(19)	23225f	1	—	—	1.07	—	90.69	—	—	—	7.65	—	99.40	$(Pt_{0.76}Fe_{0.22}Rh_{0.02})_{1.00}$
96	Ка-р2-хр(1)	16139f	1	—	—	—	—	86.57	—	3.14	2.91	7.38	—	100.00	$(Pt_{0.69}Fe_{0.20}Cu_{0.07}Sb_{0.04})_{1.00}$
97	Ка-р2-хр(2)	16139j	1	3.18	5.62	4.18	—	81.54	0.75	—	0.66	4.07	—	100.00	$(Pt_{0.63}Fe_{0.11}Rh_{0.06}Ir_{0.06}Os_{0.03}Cu_{0.02})_{1.00}$
98	Ка-р2-хр(8)	16163i	1	—	—	—	—	90.80	—	—	1.02	8.18	—	100.00	$(Pt_{0.74}Fe_{0.23}Cu_{0.03})_{1.00}$
99	Ка-р2-Аu(2)	16137ef*	2	1.08	—	0.24	0.22	89.20	0.58	—	0.42	8.26	—	100.00	$(Pt_{0.68}Fe_{0.22}Pd_{0.08}Cu_{0.01}Os_{0.01})_{1.00}$
100	Ка-р2-Аu(6)	16137f	1	—	—	—	—	90.10	0.41	—	0.97	8.52	—	100.00	$(Pt_{0.69}Fe_{0.23}Pd_{0.06}Cu_{0.02})_{1.00}$
101	Ка-р2-Аu(6)	16137z	1	—	—	0.62	—	89.07	1.08	—	2.42	6.81	—	100.00	$(Pt_{0.63}Fe_{0.17}Pd_{0.14}Cu_{0.05}Rh_{0.01})_{1.00}$
102	Ка1-ср(5)	22216abc*	3	—	—	—	—	91.33	—	—	—	8.45	0.11	99.88	$(Pt_{0.75}Fe_{0.25})_{1.00}$
103	Ка1-ср(10)	22216hgi*	3	0.16	—	—	—	92.67	—	—	0.50	6.55	0.02	99.90	$(Pt_{0.79}Fe_{0.20}Cu_{0.01})_{1.00}$

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: формула минерала рассчитана на сумму металлов, равную 1; * – средние значения, количество букв соответствует количеству проанализированных точек.

Note. Here and in Tables 2, 3: the mineral formula is recalculated to metal sum of 1; * – average values, the number of letters correspond to the number of analyzed points.

Таблица 2
Table 2

Состав золота из включений в зернах платины из Казанской россыпи (мас. %)

Chemical composition of gold inclusions in platinum grains from the Kazan placer (wt. %)

№ п/п	№ зерна	№ анализа	Кол-во ан.	Au	Ag	Cu	Pt	Pd	Os	Ir	Fe	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	Ка10ср(10)01	22217d	1	87.04	0.43	1.59	2.61	8.23	—	—	—	99.9	(Au _{0,78} Pd _{0,14} Cu _{0,04} Ag _{0,02} Pt) _{0,02/1,00}
2	Ка10ср(10)02	22217e	1	85.86	0.57	1.34	3.76	8.34	—	—	—	99.87	(Au _{0,78} Pd _{0,14} Cu _{0,03} PtAg _{0,02/1,00})
3	Ка10ср(10)03	22217f	1	84.75	0.81	1.47	5.06	7.55	—	—	—	99.64	(Au _{0,77} Pt _{0,13} Pt _{0,05} Cu _{0,04} Ag _{0,01/1,00})
4	Ка10ср(10)04	22217h	1	85.9	0.43	1.34	2.88	9.12	—	—	—	99.67	(Au _{0,78} Pd _{0,15} Pt _{0,03} Ag _{0,03} Cu) _{0,02/1,00}
5	Ка10ср(10)05	22217u	1	85.77	—	0.84	—	7.32	6.07	—	—	100.00	(Au _{0,79} Pd _{0,13} Os _{0,06} Cu) _{0,02/1,00}
6	Ка0р20м(3)	16166g	1	85.46	—	1.60	4.06	9.48	—	—	0.14	100.75	(Au _{0,76} Pd _{0,16} Cu _{0,04} Pt) _{0,04/1,00}
7	Ка0р20м(8)	16166w	1	91.23	—	2.12	3.45	3.76	—	—	—	100.55	(Au _{0,84} Pd _{0,07} Cu _{0,06} Pt) _{0,03/1,00}
8	Ка0р20м(11)	16167i	1	86.59	14.37	—	—	—	—	—	—	100.96	(Au _{0,77} Ag _{0,23/1,00})
9	Ка0р20м(15)	16167v	1	89.07	—	1.01	5.81	—	—	—	0.15	100.11	(Au _{0,90} Pt _{0,06} Cu _{0,03} Fe _{0,01/1,00})
10	Ка0р20м(19)	16168j	1	87.21	—	1.21	3.49	—	—	—	—	100.10	(Au _{0,92} Cu _{0,04} Pt) _{0,04/1,00}
11	Ка0р20м(25)	16175d	1	89.1	—	2.30	2.28	6.13	—	—	—	99.81	(Au _{0,81} Pd _{0,10} Cu _{0,07} Pt) _{0,02/1,00}
12	Ка0р20м(28)	16175k	1	86.23	—	1.22	3.90	9.41	—	—	0.20	100.96	(Au _{0,77} Pt _{0,16} Pt _{0,03} Fe _{0,03/1,00})
13	Ка0р20м(31)	16175u	1	91.21	—	0.49	3.55	3.84	—	—	—	99.08	(Au _{0,88} Pt _{0,07} Cu) _{0,02/1,00}
14	Ка0р20м(32)	16175z	1	73.27	—	1.63	18.53	3.34	2.02	—	1.37	100.16	(Au _{0,67} Pt _{0,17} Cu _{0,06} Fe _{0,04} Os) _{0,02/1,00}
15	Ка0р20ж(6)	16130v	1	88.75	—	—	—	11.25	—	—	—	100.00	(Au _{0,81} Pd _{0,19/1,00})
16	Ка0р20ж(10)	16131i	1	92.13	—	4.58	—	3.29	—	—	—	100.00	(Au _{0,82} Cu _{0,13} Pd) _{0,05/1,00}
17	Ка0р20ж(14)	16131r	1	89.88	—	5.02	—	5.10	—	—	—	100.00	(Au _{0,78} Cu _{0,14} Pd) _{0,08/1,00}
18	Ка0р20ж(14)	16131x	1	95.44	—	0.58	—	3.98	—	—	—	100.00	(Au _{0,91} Pd _{0,07} Cu) _{0,02/1,00}
19	Ка0р20ж	16132d	1	87.24	1.22	5.50	—	6.04	—	—	—	100.00	(Au _{0,74} Cu _{0,14} Pd _{0,10} Ag _{0,02/1,00})
20	Ка0р20губ(3)	16140k	1	83.32	0.28	1.01	6.3	7.50	0.42	—	0.45	99.28	(Au _{0,76} Pd _{0,13} Pt _{0,06} Cu _{0,03} Fe _{0,01/1,00} Ag _{0,01/1,00})
21	Ка0р20губ(3)	16140l	1	85.44	0.31	2.16	5.08	7.23	—	—	0.18	100.39	(Au _{0,76} Pd _{0,12} Cu _{0,06} Pt _{0,05} Fe) _{0,01/1,00}
22	Ка0р20губ(3)	16140w	1	84.88	—	1.70	3.89	7.83	1.09	0.36	0.26	100	(Au _{0,76} Pt _{0,13} Cu _{0,05} Pt _{0,04} Os _{0,01/1,00} Fe) _{0,01/1,00}
23	Ка0р20губ(5)	16141g	1	88.27	2.89	0.43	2.35	5.50	—	—	0	99.43	(Au _{0,82} Pt _{0,10} Ag _{0,05} Pt _{0,02} Cu) _{0,01/1,00}
24	Ка0р20губ(5)	16141i	1	87.79	4.87	0.40	0.00	5.91	—	—	0	98.96	(Au _{0,81} Pd _{0,10} Ag _{0,08} Cu) _{0,01/1,00}
25	Ка0р20губ(13)	16143i	1	91.94	—	2.23	3.75	2.08	—	—	0	100	(Au _{0,86} Cu _{0,06} Pd _{0,04} Pt) _{0,04/1,00}
26	Ка0р20губ(14)	16143m	1	71.76	—	3.44	21.16	3.99	—	—	0.48	100.82	(Au _{0,64} Pt _{0,19} Cu _{0,09} Pd _{0,06} Fe) _{0,02/1,00}
27	Ка0р20губ(14)	16143q	1	84.52	0.28	3.58	3.45	8.07	—	—	—	99.90	(Au _{0,74} Pd _{0,13} Cu _{0,10} Pt) _{0,03/1,00}
28	Ка0р20губ(15)	16143r	1	91.45	—	0.30	4.73	3.11	—	—	0.16	99.74	(Au _{0,88} Pd _{0,06} Pt _{0,05} Cu) _{0,01/1,00}
29	Ка0р20губ(16)	16143t	1	94.43	0.82	—	1.77	2.09	—	—	—	99.11	(Au _{0,95} Pd _{0,04} Pt _{0,02} Ag _{0,01/1,00})
30	Ка0р20губ(23)	16150d	1	87.63	—	0.26	4.27	7.99	—	—	0.24	100.39	(Au _{0,81} Pd _{0,13} Pt _{0,04} Fe _{0,01/1,00} Cu) _{0,01/1,00}
31	Ка0р20губ(26)	16150r	1	83.51	0.29	1.56	3.40	10.90	—	—	—	99.66	(Au _{0,74} Pt _{0,18} Cu _{0,04} Pt _{0,03} Ag _{0,01/1,00})
32	Ка02пС0Pt(2)	23229jkl*	3	98.12	—	—	—	1.16	—	—	—	99.27	(Au _{0,98} Pd) _{0,02/1,00}
33	Ка02пС0Pt(8)	23221b	1	86.64	—	2.78	—	9.92	—	—	—	99.34	(Au _{0,76} Pd _{0,16} Cu) _{0,08/1,00}
34	Ка02пС0Pt(8)	23221c	1	87.23	—	3.01	—	9.51	—	—	—	99.74	(Au _{0,76} Pd _{0,16} Cu) _{0,08/1,00}
35	Ка02пС0Pt(8)	23221d	1	85.66	—	3.07	—	10.28	—	—	—	99.01	(Au _{0,75} Pd _{0,17} Cu) _{0,08/1,00}
36	Ка02пС0Pt(8)	23221ghi*	3	86.71	—	3.11	—	9.82	—	—	—	99.63	(Au _{0,76} Pd _{0,16} Cu) _{0,08/1,00}
37	Ка02пС0Pt(8)	23221j	1	86.36	—	3.19	—	10.24	—	—	—	99.79	(Au _{0,75} Pd _{0,16} Cu) _{0,09/1,00}
38	Ка02пС0Pt(9)	23222f	1	91.70	—	—	—	8.30	—	—	—	100.00	(Au _{0,86} Pd _{0,14/1,00})

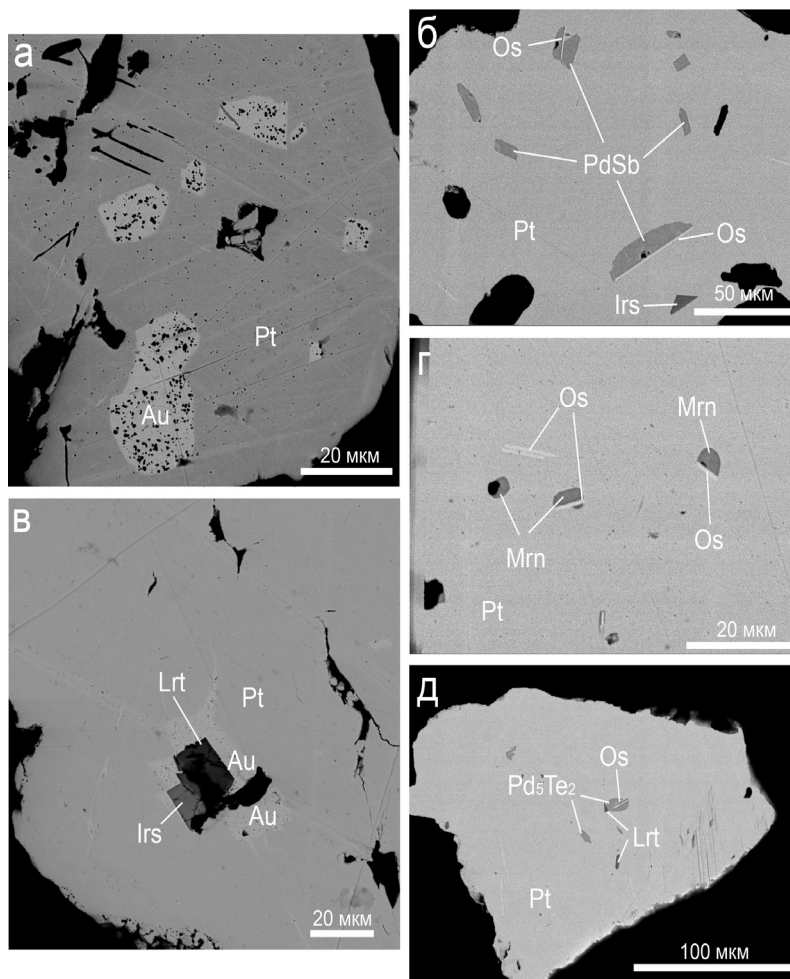


Рис. 4. Минеральные включения в изоферроплатине (Pt).

а – самородное золото (Au); б – сростки осмия (Os) и стибипалладинита (PdSb), зерна ирарсита (Irs); в – сросток золота, ирарсита и лаурита (Lrt); г – сростки осмия и меренскиита (Mrn); д – сростки осмия, лаурита и минерала с идеализированной формулой Pd_5Te_2 .

Fig. 4. Mineral inclusions in isoferroplatinum (Pt).

а – native gold (Au); б – intergrowths of osmium (Os) and stibiopalladinite (PdSb), irarsite grains (Irs); в – intergrowth of gold, irarsite and laurite (Lrt); г – intergrowths of osmium and merenskiite (Mrn); д – intergrowths of osmium, laurite and mineral with idealized formula Pd_5Te_2 .

новообразованного высокопробного золота (Au 96–99 мас. %, Ag 1–2 мас. %). В отдельных случаях в составе золота отмечается примесь Cu (до 0.32 мас. %) (рис. 5).

Самородный осмий встречается в виде кристаллов с удлинёнными сечениями толщиной до 5–10 мкм до 20 мкм в длину (рис. 4б) и ассоциирует с золотом и халькогенидами ЭПГ. Состав минерала сильно варьирует (табл. 3). Содержание Os составляет 43.58–76.68 мас. %. Во всех анализах зафиксирован Ir (15.4–43.67 мас. %). Часто в составе минерала отмечаются Ru (0.57–26.06 мас. %), Rh (0.12–1.01 мас. %) и Fe (0.14–0.7 мас. %). Платина определена только в двух анализах: ее содержания не превышают 1.53 мас. %.

Сульфиды представлены лауритом, эрликманитом, бауитом и не диагностированным точно минералом с формулой, близкой к $(Ir,Os)_3S_2$ (табл. 4).

Лаурит (RuS_2) образует кристаллы, близкие к прямоугольному сечению размером до 10–20 мкм (рис. 4в), и ассоциирует с золотом и сульфоарсенидами ЭПГ. Содержание Os в пределах одного кристалла может варьировать от 23.29 до 27.15 мас. %. Содержит примеси Os, Rh, Pt, Se и As.

Эрликманит встречен в одном образце, где он вместе с богатым Os лауритом образует кайму вокруг платины мощностью до 20–40 мкм. В кайме наблюдаются включения многочисленных кристаллов осмия. В составе минерала отмечаются высокие содержания Ru вплоть до состава лаурита.

Таблица 3
Table 3

Состав включений осмия, иридия, рутения и родия в платине из Казанской россыпи (мас. %) /
Chemical composition of osmium, iridium, ruthenium and rhodium inclusions in platinum from the Kazan placer (wt. %)

№ п/п	Проба (зерно)	№ анализа	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Fe	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	Ка-р2-губ(3)	16140m	94.78		3.47	1.08	1.04	0.28	—	100.64	(Os _{0.90} Ru _{0.06} Rh _{0.02} Pt _{0.01}) _{1.00}
2	Ка-р2-губ(3)	16140x	96.11	—	0.56	0.36	1.64	0.67	—	99.35	(Os _{0.95} Pt _{0.02} Pd _{0.01} Ru _{0.01} Rh _{0.01}) _{1.00}
3	Ка-р2-губ(4)	16141b	90.79	1.08	0.41	0.63	4.93	0.69	0.52	99.05	(Os _{0.89} Pt _{0.05} Fe _{0.02} Pd _{0.01} Ir _{0.01} Rh _{0.01} Ru _{0.01}) _{1.00}
4	Ка-р2-губ(6)	16141o	88.10	—	0.64	0.53	9.08	—	0.77	99.12	(Os _{0.87} Pt _{0.09} Fe _{0.02} Ru _{0.01} Rh _{0.01}) _{1.00}
5	Ка-р2-губ(7)	16141t	75.83	15.82	2.74	0.60	4.64	—	0.38	100.00	(Os _{0.73} Ir _{0.15} Ru _{0.05} Pt _{0.05} Fe _{0.01} Rh _{0.01}) _{1.00}
6	Ка-р2-губ(13)	16143j*	91.45	6.50	—	0.49	—	0.41	0.28	100.00	(Os _{0.89} Ir _{0.10} Pt _{0.08} Fe _{0.02} Rh _{0.03} Pd _{0.01}) _{1.00}
7	Ка-р2-Au(6)	16137m	76.78	10.63	1.49	1.67	8.49	—	0.94	—	(Os _{0.73} Ir _{0.10} Pt _{0.08} Fe _{0.03} Rh _{0.03} Ru _{0.03}) _{1.00}
8	Ка-р2-Au(13)	16137y	88.92	7.21	2.44	0.37	1.06	—	—	100.00	(Os _{0.87} Ir _{0.07} Ru _{0.04} Pt _{0.01} Rh _{0.01}) _{1.00}
9	Ка-р2-м(3)	16166f	96.50	—	0.55	—	2.63	—	0.28	99.97	(Os _{0.95} Pt _{0.03} Ru _{0.01} Fe _{0.01}) _{1.00}
10	Ка-р2-м(15)	16167u	73.46	2.00	—	—	22.54	—	2.00	100.00	(Os _{0.70} Pt _{0.21} Fe _{0.07} Ir _{0.02}) _{1.00}
11	Ка-р2-м(18)	16168g	85.61	9.68	0.81	0.30	2.58	—	0.21	99.20	(Os _{0.85} Ir _{0.10} Pt _{0.02} Ru _{0.01} Fe _{0.01} Rh _{0.01}) _{1.00}
12	Ка-р2-м(18)	16168h	79.83	14.71	1.90	0.43	3.19	—	0.22	100.28	(Os _{0.78} Ir _{0.14} Ru _{0.03} Pt _{0.03} Rh _{0.01} Fe _{0.01}) _{1.00}
13	Ка-р2-м(21)	16168r	94.54	—	—	—	5.46	—	—	100.00	(Os _{0.95} Pt _{0.05}) _{1.00}
14	Ка-р2-м(23)	16168a'	62.39	28.57	0.46	0.67	6.97	—	0.61	99.68	(Os _{0.61} Ir _{0.28} Pt _{0.07} Fe _{0.02} Rh _{0.01} Ru _{0.01}) _{1.00}
15	Ка-р2-м(29)	16175p	83.39	6.67	1.86	1.00	5.49	—	0.69	99.11	(Os _{0.81} Ir _{0.06} Pt _{0.05} Ru _{0.03} Fe _{0.02} Rh _{0.02}) _{1.00}
16	Ка-р2-ж(3)	16130d	93.17	3.01	0.41	—	2.84	—	—	99.43	(Os _{0.93} Ir _{0.03} Pt _{0.03} Ru _{0.01}) _{1.00}
17	Ка-р2-ж(4)	16130k	87.62		1.26	2.43	8.15		0.54	100.00	(Os _{0.84} Pt _{0.08} Fe _{0.02} Rh _{0.04} Ru _{0.02} Fe _{0.02}) _{1.00}
18	Ка-р2-ж(6)	16130u	66.54	23.00	1.71	0.69	6.71	—	0.45	99.10	(Os _{0.65} Ir _{0.22} Pt _{0.07} Ru _{0.03} Fe _{0.02} Rh _{0.01}) _{1.00}
19	Ка-р2-ж(7)	16130b'	90.13	3.01	1.11	—	5.42	—	0.56	100.24	(Os _{0.88} Pt _{0.05} Ir _{0.03} Ru _{0.02} Fe _{0.02}) _{1.00}
20	Ка-р2-ж(16)	16132j	86.67	2.70	2.57	0.45	6.61	—	0.60	99.59	(Os _{0.84} Pt _{0.06} Ir _{0.05} Fe _{0.02} Rh _{0.02}) _{1.00}
21	Ка-р2-ж(16)	16132o	84.49	3.35	2.66	0.53	7.51	—	0.84	99.38	(Os _{0.81} Pt _{0.07} Ir _{0.05} Fe _{0.03} Rh _{0.03}) _{1.00}
22	Ка-р2-ж(19)	16132u	68.78	7.91	0.44	2.18	18.78	—	1.91	100.00	(Os _{0.65} Pt _{0.17} Ir _{0.07} Fe _{0.06} Rh _{0.04} Ru _{0.01}) _{1.00}
23	Ка-р2-ж(2)	16139h	69.64	23.26	2.14	1.35	3.37	—	0.23	100.00	(Os _{0.68} Ir _{0.22} Pt _{0.03} Rh _{0.02} Fe _{0.01}) _{1.00}
24	Ка-2рС-Пт(6а)	23231a	12.35	74.11	1.04	2.36	9.37	—	0.58	99.81	(Ir _{0.71} Os _{0.12} Pt _{0.09} Rh _{0.04} Ru _{0.02} Fe _{0.02}) _{1.00}
25	Ка-2рС-Пт(6а)	23231b	12.24	75.85	0.74	2.09	8.45	—	—	99.39	(Ir _{0.75} Os _{0.12} Pt _{0.08} Rh _{0.04} Ru _{0.01}) _{1.00}
26	Ка-2рС-Пт(6а)	23231c	11.80	77.09	0.70	1.85	8.41	—	—	99.85	(Ir _{0.76} Os _{0.12} Pt _{0.08} Rh _{0.03} Ru _{0.01}) _{1.00}
27	Ка-2рС-Пт(3)	23217d	88.35	11.47	—	—	—	—	—	99.82	(Os _{0.89} Ir _{0.11}) _{1.00}
28	Ка-2рС-Пт(3)	23217e	82.29	16.95	0.41	—	—	—	—	99.65	(Os _{0.82} Ir _{0.17} Ru _{0.01}) _{1.00}
29	Ка-2рС-Пт(3)	23217f	81.61	16.73	1.49	—	—	—	—	99.83	(Os _{0.81} Ir _{0.16} Ru _{0.03}) _{1.00}
30	Ка-2рС-Пт(4)	23218c	84.41	12.36	2.14	0.31	—	—	—	99.22	(Os _{0.83} Ir _{0.12} Ru _{0.04} Rh _{0.01}) _{1.00}
31	Ка-2рС-Пт(4)	23218d	80.09	18.05	0.49	0.23	—	—	0.6	99.46	(Os _{0.79} Ir _{0.18} Fe _{0.02} Ru _{0.01}) _{1.00}
32	Ка-2рС-Пт(8)	23221e	86.21	12.19	1.49	—	—	—	—	99.89	(Os _{0.85} Ir _{0.12} Ru _{0.03}) _{1.00}

Примечание. * – анализ содержит 0.87 мас. % Cu.
Note. * – analysis contains 0.87 wt. % Cu

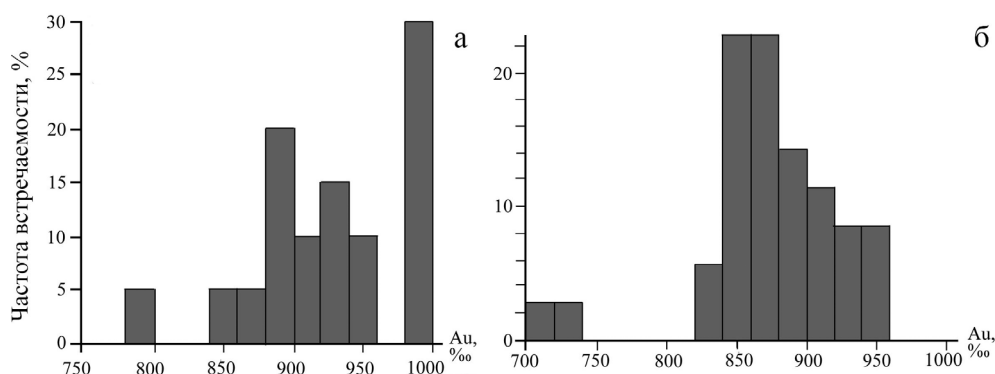


Рис. 5. Пробность золота Казанской россыпи.

а – центральная часть золотин (n = 29); б – включения золота в платине (n = 35).

Fig. 5. Fineness of gold from the Kazan placer.

a – central part of gold (n = 29); б – inclusions of gold in platinum (n = 35).

Баум (Rh_3S_3) (?) выявлен в виде единичного включения размером до 30 мкм с удлинённым сечением в платине. В составе отмечаются высокие содержания Cu (до 23.54 мас. %).

Минерал с формулой, близкой к $(Ir,Os)_3S_2$, образует внешнюю кайму мощностью до 30 мкм вокруг зерна самородного иридия. Соотношение между Ir и Os в минерале слабо варьирует. Отмечаются примеси Fe, Bi и Ru. В настоящее время минерал с такой формулой не известен, однако находки минерала подобного состава известны на месторождении Витватерсранд (ЮАР) (Томас, Murphy, 1978).

Сульфоарсениды представлены ирарситом и холлингуортитом (?) (табл. 5).

Ирарсит найден в двух зернах платины, где он образует кристаллы с треугольным или четырёхугольным сечением размером до 10–15 мкм (рис. 4б). Минерал ассоциирует с золотом, осмием, лауритом и недиагностированными соединениями с формулой, близкой к $Pd_{10}Sb_3Te$. Ирарсит не стехиометричен, что для него типично (mindat.org).

Холлингуортит (?) выявлен в одном зерне платины, где он образует «россыпь» кристаллов трапециевидного сечения размером до 40–50 мкм (рис. 4б). Ассоциирует с самородным осмием и стибнопалладинитом. Подобно ирарситу минерал не стехиометричен.

Минералы Sb представлены стибнопалладинитом и не диагностированным точно соединением с формулой, близкой к $Pd_{10}Sb_3Te$ (табл. 6).

Стибнопалладинит выявлен в одном зерне платины, где вместе с холлингуортитом он образует многочисленные зерна вытянутой прямоугольной формы до 50 мкм в длину (рис. 4б). Часто сростается с осмием. В составе стибнопалладинита от-

мечаются высокие содержания Pt (до 42.63 мас. %) (табл. 6).

Минерал с формулой, близкой к $Pd_{10}Sb_3Te$, выявлен в двух зернах платины в виде включений (рис. 4в). Минерал образует сростки и кристаллы с изометричным сечением размером до 20–40 мкм, ассоциирует с осмием и ирарситом. Соотношения между основными компонентами значительно варьируют даже в пределах одного зерна, отмечаются примеси Pt, Fe и As (табл. 6).

Теллуриды представлены меренскиитом, теллуридом палладия с примерной формулой Pd_5Te_2 и теллуридом платины с формулой, близкой к Pt_5Te_8 (табл. 7).

Меренскиит выявлен в одном зерне платины, где он образует округлые зерна размером до 5–7 мкм (рис. 4г) и ассоциирует с осмием. В составе минерала отмечается примесь Sb.

Минерал с формулой, близкой к Pd_5Te_2 встречен в одном зерне платины (рис. 4д), где он образует округлые зерна размером до 10–15 мкм и ассоциирует с осмием и лауритом. В составе минерала отмечается примесь Sb.

Минерал с формулой, близкой к Pt_5Te_8 выявлен в одном зерне платины, где он образует сростки с осмием и минералом $\sim Pd_{10}Sb_3Te$. Размер сростка достигает 15 мкм, а размер зерна $\sim Pt_5Te_8$ составляет около 7 мкм. В составе минерала отмечается примесь Rh и Pd.

Среди включений в платине также отмечаются сульфиды родия и рутения со значительной примесью селена, вплоть до формального соответствия классу селенидов (Белогуб и др., 2019). В одном случае существенная примесь Se присутствует в теллуриде Pt.

Таблица 4
Table 4

Состав сульфидов ЭПГ из Казанской россыпи (мас. %)
Chemical composition of PGE sulfides from the Kazan placer (wt. %)

№ п/п	№ анализа	S	Fe	Ni	Cu	As	Se	Ru	Rh	Os	Pd	Ir	Pt	Bi	Сумма	Кристаллохимическая формула
Лаурит																
1	16141k	35.78	—	—	—	2.76	—	51.12	5.23	1.86	—	2.98	0.26	—	99.98	$(Ru_{0.88}Rh_{0.09}Ir_{0.03}Os_{0.02})_{1.01}(S_{1.94}As_{0.06})_{2.00}$
2	16166t	29.24	—	—	—	2.34	5.93	35.54	3.40	23.29	—	—	0.65	—	100.39	$(Ru_{0.69}Os_{0.23}Rh_{0.06}Pt_{0.01})_{1.00}(S_{1.79}Se_{0.15}As_{0.06})_{2.00}$
3	16166u	29.03	—	—	—	2.41	5.17	32.50	3.18	27.15	—	—	0.56	—	100.00	$(Ru_{0.64}Os_{0.23}Rh_{0.06}Pt_{0.01})_{0.99}(S_{1.81}Se_{0.13}As_{0.06})_{2.00}$
4	23225d	38.34	—	—	—	—	—	50.71	10.94	—	—	—	—	—	100.00	$(Ru_{0.84}Rh_{0.18}Ir_{0.10})_{2.00}S$
5	23225g	38.28	—	—	—	—	—	55.78	5.94	—	—	—	—	—	100.00	$(Ru_{0.92}Rh_{0.10}Ir_{0.10})_{2.00}S$
6	23226k	30.86	—	—	—	—	—	22.64	1.09	40.77	—	4.60	—	—	99.96	$(Ru_{0.46}Os_{0.45}Ir_{0.05}Rh_{0.02})_{0.98}S_{2.00}$
Эричманит																
7	23226e	30.35	—	—	—	—	—	18.54	—	39.03	—	11.80	—	—	99.71	$(Os_{0.43}Ru_{0.39}Ir_{0.13}Rh_{0.05})_{2.00}S$
8	23226f	25.02	—	—	—	—	—	12.23	0.51	45.89	—	15.72	—	—	99.38	$(Os_{0.62}Ru_{0.31}Ir_{0.21}Rh_{0.01})_{1.15}S_{2.00}$
Баунит																
9	22232a	36.03	0.42	0.35	17.73	—	—	—	45.47	—	—	—	—	—	100.00	$(Rh_{1.18}Cu_{0.75}Fe_{0.02}Ni_{0.02})_{1.96}S_{3.00}$
10	22232b	35.68	0.58	0.10	17.51	—	—	—	45.86	—	0.27	—	—	—	100.00	$(Rh_{1.20}Cu_{0.75}Fe_{0.03}Pd_{0.01})_{1.99}S_{3.00}$
11	22232c	36.28	—	—	21.09	—	—	—	42.59	—	—	—	—	—	100.00	$(Rh_{1.09}Cu_{0.89}Ir_{0.98})_{3.00}S$
12	22232d	35.77	—	—	23.54	—	—	—	40.69	—	—	—	—	—	100.00	$(Rh_{1.06}Cu_{1.00})_{2.06}S_{3.00}$
Минерал состава Ir ₃ S ₂																
13	23226b	10.42	0.58	—	—	—	—	2.27	0.00	35.14	—	50.38	—	0.45	99.24	$(Ir_{1.60}Os_{1.13}Ru_{0.14}Fe_{0.06}Bi_{0.01})_{2.94}S_{2.00}$
14	23226c	9.65	—	—	—	—	—	—	—	33.03	—	56.06	—	0.64	99.37	$(Ir_{1.92}Os_{1.14}Bi_{0.02})_{3.08}S_{2.00}$

Примечание. Формулы минералов рассчитаны на два (лаурит и эричманит) и три (баунит) аниона. Прочерк – элемент не определен.
Note. The formulas are recalculated to two (laurite and erlichmanite) and three (baurite) anions. Dash – not determined.

Таблица 5
Table 5

Химический состав сульфосолей ЭПГ Казанской россыпи (мас. %)
Chemical composition of PGE sulfoarsenides from the Kazan placer (wt. %)

№ п/п	№ анализа	S	As	Se	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Сумма	Кристаллохимическая формула
Ирарсит												
1	23229g	14.79	24.32	—	1.26	17.14	—	5.42	36.93	—	99.85	$(Ru_{0.03}Os_{0.06}Rh_{0.36}Ir_{0.42}As_{0.70})_{1.00}S$
2	16141j	11.38	37.90	1.61	1.72	13.2	0.28	1.17	31.71	0.58	99.56	$(Pt_{0.01}Pd_{0.01}Ir_{0.46}Os_{0.02}Ru_{0.05}Rh_{0.36})_{0.91}(Se_{0.06}As_{1.42})_{1.48}S_{1.00}$
Холлингурит												
3	16141d	16.48	32.51	2.78	8.95	21.9	—	8.65	8.03	0.81	100.13	$(Pt_{0.01}Ir_{0.08}Os_{0.09}Ru_{0.17}Rh_{0.41})_{0.76}(Se_{0.07}As_{0.84})_{0.91}S_{1.00}$
4	16141e	14.96	37.94	2.05	5.50	26.55	0.33	5.25	7.60	0.79	100.98	$(Pt_{0.01}Pd_{0.01}Os_{0.06}Ir_{0.08}Ru_{0.12}Rh_{0.05})_{0.83}(Se_{0.06}As_{1.08})_{1.14}S_{1.00}$

Примечание. Формулы минералов рассчитаны на один атом серы.
Note. The formulas are recalculated to one S atom.

Таблица 6
Table 6

Состав минералов Sb из Казанской россыпи (мас. %)

Chemical composition of Sb minerals from the Kazan placer (wt. %)

№ п/п	№ ан.	Fe	Cu	As	Ru	Rh	Pd	Sb	Te	Pt	Ag	Сумма	Кристаллохимическая формула
Стибиопалладинит													
1	23229b	–	–	–	–	–	41.42	26.71	–	31.31	–	99.44	(Pt _{1,47} Pd _{3,57} Sb _{5,04}) _{2,00}
2	23229c	–	–	–	–	–	42.35	27.21	–	28.53	1.49	99.57	(Ag _{0,12} Pt _{1,31} Pd _{3,58} Sb _{5,02}) _{2,00}
3	23229d	–	–	–	–	–	42.63	27.07	–	27.95	2.07	99.73	(Ag _{0,17} Pt _{1,29} Pd _{3,63} Sb _{5,09}) _{2,00}
4	23229e	–	–	–	–	–	40.43	26.82	–	30.20	1.73	99.18	(Ag _{0,15} Pt _{1,41} Pd _{3,47} Sb _{5,02}) _{2,00}
5	23229f	–	–	–	–	–	42.75	26.88	–	30.05	–	99.68	(Pt _{1,40} Pd _{3,66} Sb _{5,06}) _{2,00}
6	23229h	–	–	–	–	–	42.22	26.71	–	30.28	–	99.21	(Pt _{1,42} Pd _{3,64} Sb _{5,06}) _{2,00}
7	23229i	–	–	–	–	–	42.27	26.64	–	30.86	–	99.78	(Pt _{1,45} Pd _{3,65} Sb _{5,10}) _{2,00}
~Pd ₁₀ Sb ₃ Te													
8	16140d	–	–	0.50	–	–	60.19	23.57	5.76	9.97	–	100.00	(Pt _{0,77} Pd _{8,52} As _{0,10} Sb _{2,90}) _{3,00} Te _{0,68}
9	16140f	0.39	–	–	–	–	59.02	22.1	6.59	11.9	–	100.00	(Fe _{0,12} Pt _{1,01} Pd _{9,22} As _{0,10} Sb _{3,00}) _{3,00} Te _{0,85}
10	16140g	0.97	0.22	–	–	–	56.98	18.77	7.69	15.37	–	100.00	(Cu _{0,07} Fe _{0,34} Pt _{1,54} Pd _{10,48} As _{0,10} Sb _{3,00}) _{3,00} Te _{1,17}
11	16140h	–	–	–	0.18	–	59.79	23.35	6.11	9.71	–	99.14	(Ru _{0,03} Pt _{0,78} Pd _{8,84} As _{0,10} Sb _{3,00}) _{3,00} Te _{0,75}
12	16140i	–	–	–	–	–	61.03	22.17	8.35	8.78	–	100.34	(Pt _{0,74} Pd _{9,51} As _{0,10} Sb _{3,00}) _{3,00} Te _{1,08}
13	16140j	0.40	–	–	–	0.46	57.84	20.66	10.34	10.12	–	99.83	(Rh _{0,08} Fe _{0,13} Pt _{0,92} Pd _{9,67} As _{0,10} Sb _{3,00}) _{3,00} Te _{1,43}
14	16141c	–	–	2.56	–	0.39	62.9	20.92	8.08	5.26	–	100.11	(Rh _{0,06} Pt _{0,39} Pd _{8,66} As _{0,10} Sb _{3,00}) _{3,00} Te _{0,92}
15	16141f	–	–	1.87	–	–	63.25	21.03	7.44	5.43	–	99.02	(Pt _{0,42} Pd _{9,07} As _{0,38} Sb _{2,62}) _{3,00} Te _{0,88}

Примечание. Формулы стибиопалладинита рассчитана на два аниона, минерала с идеализированной формулой Pd₁₀Sb₃Te – на сумму (Sb + As), равную 3.
Note. The formulas of stibopalladinite are recalculated to two anions. The formulas of the idealized mineral Pd₁₀Sb₃Te are recalculated to Sb + As sum of 3.

Таблица 7
Table 7

Состав теллуридов ЭПГ Казанской россыпи (мас. %)

Chemical composition of PGE tellurides from the Kazan placer (wt. %)

№ п/п	№ ан.	Fe	Se	Rh	Pd	As	Sb	Te	Pt	Сумма	Кристаллохимическая формула
Меренскит											
1	24016e	–	–	–	62.65	–	1.20	36.14	–	100.00	Pd _{5,01} (Te _{0,97} Sb _{0,03}) _{1,00}
2	24016f	–	–	–	63.48	–	3.17	33.35	–	100.00	Pd _{5,08} (Te _{0,91} Sb _{0,09}) _{1,00}
3	24016g	–	–	–	61.89	–	3.81	34.3	–	100.00	Pd _{1,94} (Te _{0,90} Sb _{0,10}) _{1,00}
~Pd ₅ Te ₂											
4	23225c	–	–	–	67.42	–	7.93	23.93	–	99.29	Pd _{5,02} (Te _{1,49} Sb _{0,51}) _{2,00}
5	23225e	–	–	–	68.62	2.04	10.9	17.88	–	99.43	Pd _{5,03} (Te _{1,09} Sb _{0,69} As _{0,21}) _{2,00}
~Pt ₅ Te ₈											
6	16140e	0.36	1.23	10.19	2.44	–	–	55.36	30.79	100.36	(Pt _{2,80} Rh _{1,75} Pd _{0,41} Fe _{0,11}) _{5,07} (Te _{7,72} Se _{0,28}) _{8,00}

Примечание. Формулы минералов рассчитаны на два (Pd₅Te₂) и восемь (Pt₅Te₈) атомов Te и сумму Te и Sb, равную 1 (меренскит).
Note. The formulas of minerals are recalculated to two (Pd₅Te₂) and eight (Pt₅Te₈) Te atoms and Te + Sb sum of 1 (merenskiite).

Хромшпинелиды (феррохромиты и магнетиохромиты) ранее были описаны В.В. Зайковым с соавторами (2018). Они образуют округлые изометричные зерна размером до около 30–70 мкм.

Обсуждение результатов и заключение

Подобно платине из других россыпей (Миасская, Байрамгуловская и Малоиремельская) платина Казанской россыпи содержит множество включений халькогенидов ЭПГ (Зайков и др., 2016а, б). По мнению И.Д. Толстых с соавторами (1997) сульфиды, селениды и теллуриды ЭПГ формируются при эпигенетическом воздействии на типичные минералы ЭПГ офиолитов поздних гидротерм.

По данным ЛА-ИСП-МС анализа (Артемьев, Зайков, 2018), платина Казанской россыпи обогащена (по сравнению с Малоиремельской) золотом в 50 раз, серебром – в 5 раз, ртутью – в 10 раз и молибденом – в 50 раз. Вероятно, большая степень обогащения платины Казанской россыпи многими халькофильными и благороднометалльными элементами связана с недалеким переносом от коренного источника эрозии. Важными структурными примесями для определения источника платины, вне зависимости от окатанности и степени преобразования, могут служить содержания Fe, Co, Ni, V и Cr.

Хромшпинелиды Казанской россыпи имеют более низкие содержания Cr по сравнению с хромшпинелидами Ингульской, Малоиремельской и Байрамгуловской россыпей (Зайков и др., 2018). Существует дискуссия о возможных источниках формирования Казанской россыпи (Зайков и др., 2018). Возможно, что близким источником минералов группы платины могли быть ультрамафит-габбровые ассоциации, распространенные в пределах Гогинского массива.

Авторы благодарят Е.В. Белогуб, И.Ю. Мелекесцеву за консультации и К.А. Новоселова за участие в анализе проб. Работа выполнена в рамках государственной бюджетной темы «Минералого-геохимическая эволюция и металлогения гидротермальных, аутигенных и гипергенных рудообразующих систем» № НИОКТР АААА-А19-119061790049-3.

Литература

Артемьев Д.А., Зайков В.В. (2018) Методика ЛА-ИСП-МС анализа и элементы-примеси в самородной

платине из россыпей Южного Урала. *Геоархеология и археологическая минералогия-2018*. Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 161–165.

Бараников А.Г. (2006) Золотоносность Гогинского рудно-россыпного района (Южный Урала). Екатеринбург, УГГУ, 197 с.

Белогуб Е.В., Зайкова Е.В., Котляров В.А., Шиловских В.В., Бритвин С.Н., Паутов Л.А. (2019) Селен в минералах элементов группы платины из золотоносных россыпей Южного Урала. *Минералогические музеи 2019. Минералогия вчера, сегодня, завтра. Материалы конференции*. Санкт-Петербург, СПбГУ, 87–89.

Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. (2016а) Зональные зерна рутения из Малоиремельской россыпи (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2016. От минералогенеза к месторождениям*. Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 219–224.

Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. (2016б) Сростки минералов ЭПГ в Миасской россыпной зоне (Южный Урал) и их коренные источники. *Минералогия*, 4, 31–47.

Зайков В.В., Таиров А.Д., Зайкова Е.В., Юминов А.М., Котляров В.А. (2016в) Благородные металлы в рудах и древних золотых изделиях Центральной Евразии. Челябинск, Каменный пояс, 314 с.

Зайков В.В., Савельев Д.Е., Зайкова Е.В. (2018) Природа микровключений хромшпинелидов в зернах платиноидов из золотых россыпей Южного Урала. *Записки РМО*, (5). 27–40.

Петровская Н.В. (1973) Самородное золото. М., Наука, 345 с.

Сигов А.П., Ломаев А.В., Сигов В.Л., Стороженко Л.Е., Хрыпов В.Н., Шуб И.З. (1971) Россыпи Урала, условия их образования, размещения и элементы геоморфологического прогноза. *Геоморфология*, 1, 28–38.

Толстых Н.Д., Кривенко А.П., Поспелова Л.Н. (1997) Необычные соединения иридия, осмия и рутения с селеном, теллуром и мышьяком из россыпей реки Золотой (Западный Саян). *Записки ВМО*, ч. СХХVI, (6), 23–34.

Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Kraynev Yu.D. (2017) Gold and platinum group minerals in placers of the South Urals: composition, microinclusions of ore minerals and primary sources. *Ore Geology Reviews*, 85, 299–320

Toma S.A., Murphy S. (1978) Exsolution of gold from detrital platinum-group metal grains from Witwatersrand auriferous conglomerates. *Canadian Mineralogist*, 16, 641–650. www.mindat.org

References

- Artem'ev D.A., Zaykov V.V.** (2018) [LA-ISP-MS analysis and trace elements in native platinum from the Southern Urals placers]. *Geoarheologiya i arheologicheskaya mineralogiya-2018 [Geoarchaeology and archaeological mineralogy-2018]*. Miass, IMin UB RAS, 161–165. (in Russian)
- Barannikov A.G.** (2006). [The Gogino gold-bearing placer district (Southern Urals)]. Yekaterinburg, UGGU, 197 p. (in Russian)
- Belogub E.V., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Shilovskikh V.V., Britvin S.N., Pautov L.A.** (2019) [Selenium in minerals of platinum group elements from gold-bearing placers of the southern Urals]. *Mineralogicheskie muzei-2019. Mineralogiya vchera, segodnya, zavtra. [Mineralogical museums-2019. Mineralogy: yesterday, today and tomorrow]*. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 87–89 (in Russian)
- Petrovskaya N.V.** (1997). Native gold. Moscow, Nauka, 345 p. (in Russian).
- Sigov A.P., Lomaev A.V., Sigov V.L., Storozhenko L.E., Khrypov V.N., Shub I.Z.** (1971) [The Urals placers, conditions of their formation, location and elements of geomorphological forecast]. *Geomorfologiya [Geomorphology]*, 1, 28–38. (in Russian).
- Tolstykh N.D., Krivenko A.P., Pospelova L.N.** (1997). [Unusual compounds of iridium, osmium and ruthenium with selenium, tellurium and arsenic from placers of the Zolotaya River (western Sayan)]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, (6), 23–34. (in Russian).
- Toma S.A., Murphy S.** (1978) Exsolution of gold from detrital platinum-group metal grains from Witwatersrand auriferous conglomerates. *Canadian Mineralogist*, 16, 641–650.
www.mindat.org
- Zaykov V.V., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Krainev Yu.D.** (2016a). [Zonal ruthenium grains from the Maly Iemel placer (South Urals)] *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2016. Ot mineralogeneza k mestorozhdeniyam [Metallogeny of ancient and modern oceans-2016. From mineralogenesis to deposits]*. Miass, IMin UB RAS, 219–224. (in Russian)
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Krainev Yu.D.** (2016b) [Intergrowths of PGE minerals in the Miass placer zone and their primary sources]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 4, 31–47. (in Russian)
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Krainev Yu.D.** (2017). Gold and platinum group minerals in placers of the South Urals: composition, microinclusions of ore minerals and primary sources. *Ore Geology Reviews*, 85, 299–320.
- Zaykov V.V., Savel'ev D.E., Zaykova E.V.** (2018). [Nature of microinclusions of chrome spinel in grains of platinum group metals from gold placers in the South Urals]. *Zapiski RMO [proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, (5), 27–40. (in Russian).
- Zaykov V.V., Tairov A.D., Zaikova E.V., Yuminov A.M., Kotlyarov V.A.** (2016b) [Precious metals in ores and ancient gold products of Central Eurasia]. Chelyabinsk, Kamennyi poyas, 314 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 13 января 2020 г.

ТЕРРИУОЛЛАСЕИТ ИЗ КОЧКАРСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЮЖНЫЙ УРАЛ: ПЕРВАЯ НАХОДКА В РОССИИ

А.В. Касаткин¹, Р. Шкода²

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Ленинский пр. 18/2, г. Москва, 119071 Россия; anatoly.kasatkin@gmail.com

²Масариков университет, ул. Котлариска 2, г. Брно, 61137 Чехия

TERRYWALLACEITE FROM THE KOCHKAR AU DEPOSIT, SOUTH URALS: FIRST FIND IN RUSSIA

A.V. Kasatkin¹, R. Škoda²

¹Fersman Mineralogical Museum of RAS, Leninskiy Pr. 18/2, Moscow, 119071 Russia; anatoly.kasatkin@gmail.com

²Masaryk University, Kotlářská 2, Brno, 61137 Czech Republic

Терриуолласеит $\text{AgPb}(\text{Sb,Bi})_3\text{S}_6$, редкая сульфосоли лиллианитовой гомологической серии, установлен нами в образце из Кочкарского золоторудного месторождения (Челябинская обл.). Он образует зерна неправильной формы размером до 0.4×0.3 мм и ассоциирует с Sb-содержащим висмутином, тетраэдритом-(Fe), арсенопиритом и минералами ряда тинтинаит–кобеллит. Эмпирическая формула терриуолласеита (средняя по восьми анализам): $(\text{Ag}_{0.97}\text{Cu}_{0.07})_{\Sigma 1.04}(\text{Pb}_{0.94}\text{Cd}_{0.02})_{\Sigma 0.96}(\text{Bi}_{1.84}\text{Sb}_{1.17})_{\Sigma 3.01}(\text{S}_{5.99}\text{Se}_{0.01})_{\Sigma 6.00}$. Параметры моноклинной элементарной ячейки: $a = 6.992(2)$, $b = 19.328(4)$, $c = 8.381(10)$ Å, $\beta = 107.68(7)^\circ$, $V = 1079(1)$ Å³. Это первая достоверная находка данного минерала в России.

Илл. 3. Табл. 3. Библ. 24.

Ключевые слова: терриуолласеит, Кочкарское золоторудное месторождение, Южный Урал, первая находка минерала в России, лиллианитовая гомологическая серия.

Terrywallaceite, $\text{AgPb}(\text{Sb,Bi})_3\text{S}_6$, a rare sulfosalt of the lillianite homologous series, was found in a sample from the Kochkar Au deposit (Chelyabinsk oblast). It occurs as anhedral grains up to 0.4×0.3 mm and is associated with Sb-bearing bismuthinite, tetrahedrite-(Fe), arsenopyrite and minerals of the tintinaite–kobellite series. Its average empirical formula based on eight analyses is as follows: $(\text{Ag}_{0.97}\text{Cu}_{0.07})_{\Sigma 1.04}(\text{Pb}_{0.94}\text{Cd}_{0.02})_{\Sigma 0.96}(\text{Bi}_{1.84}\text{Sb}_{1.17})_{\Sigma 3.01}(\text{S}_{5.99}\text{Se}_{0.01})_{\Sigma 6.00}$. The monoclinic unit cell dimensions are $a = 6.992(2)$, $b = 19.328(4)$, $c = 8.381(10)$ Å, $\beta = 107.68(7)^\circ$, $V = 1079(1)$ Å³. This is the first reliable find of the mineral in Russia.

Figures 3. Tables 3. References 24.

Key words: terrywallaceite, Kochkar Au deposit, South Urals, first find of mineral in Russia, lillianite homologous series.

Введение

Терриуолласеит $\text{AgPb}(\text{Sb,Bi})_3\text{S}_6$ в качестве нового минерального вида был описан в образце из рудника Гермения (гор. 390, жила 14), департамент Уанкавелика, Перу. Свое название он получил в честь бывшего профессора Университета Аризо-

ны и куратора местного минералогического музея Терри С. Уолласа-младшего (Terry S. Wallace Jr.). На этом месторождении минерал образует черные пластинчатые кристаллы с металлическим блеском размером до 0.5 мм и ассоциирует с тетраэдритом, густавитом, баритом и пиритом (Yang et al., 2013). До присвоения терриуолласеиту статуса

минерального вида Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов ММА Р. Пажоут и М. Душек расшифровали кристаллическую структуру сульфосоли $\text{AgPb}(\text{Bi}_2\text{Sb})_{23}\text{S}_{66}$ из рудного района Кутна Гора, в 60 км восточнее Праги (Чехия), которую они трактовали как «Sb-обогащенный густавит» (Pažout, Dušek, 2009). Впоследствии данный образец также был отнесен к терриолласеиту (Yang et al., 2013; Pažout, 2017). Изучив с помощью электронно-зондового и рентгенодифракционного методов дополнительные образцы из жилы Староческе Пасмо рудного района Кутна Гора, Р. Пажоут обнаружил в них целый ряд сульфоселей лиллианитовой гомологической серии, включая минералы ряда густавит–терриолласеит–староческеит–андорит, демонстрирующие даже в рамках одного зерна взаимные переходы друг в друга (Pažout, 2017).

Терриолласеит был диагностирован электронно-зондовым методом в рудах медно-оловянного месторождения Цзялонг (провинция Гуанси, Южный Китай) в ассоциации с галенитом, самородным висмутом, халькопиритом и пирротинном (Liu et al., 2018) и полиметаллического месторождения Поопо (департамент Оруро, Боливия) в виде вростков в джемсоните или псевдоморфоз по нему (Togres et al., 2019). В другом боливийском объекте – руднике Анимас, департамент Потоси – терриолласеит отмечался без приведения каких-либо аналитических данных (Togro et al., 2019).

Нами эта редкая сульфосоль установлена в образце, отобранном на Кочкарском золоторудном месторождении (Пластовский район, Челябинская обл) и переданном в 1975 г. Ю.С. Кобяшевым в одну из частных коллекций под названием «иорданит». В 2018 г. образец поступил на диагностику к первому автору настоящей работы. В результате проведенных исследований установлено отсутствие иорданита в образце и присутствие Sb-содержащего висмутита, тетраэдрита-(Fe) и минералов ряда тинтинаит–кобеллит. Находка тинтинаита была описана как первая достоверная на Урале, а, возможно, и в России (Касаткин, 2019). Впоследствии, в результате новых анализов в образце были дополнительно обнаружены арсенопирит и терриолласеит. Описанная ниже находка терриолласеита является первой для Урала и России, а в мире, вероятно, является шестой для данного минерального вида.

Краткая историческая и геологическая характеристика объекта

Кочкарское месторождение золота является одним из старейших и крупнейших на Южном Урале. Начало его разработки датируется серединой XIX века. После того, как в 1842 г. указом Николая I был разрешен частный горный промысел на казачьих землях, в Пластовском районе, чьи земли принадлежали Оренбургскому казачьему войску, начали активно создаваться прииски, обрабатывавшие золотоносные россыпи. В 1868 г. в плотике одной из таких россыпей была найдена первая коренная жила с рудным золотом, после чего приоритетным на месторождении стал подземный способ добычи (Хайрятдинов, Федосеев, 2017).

За время существования месторождения из него добыто более 300 т золота. В настоящее время разработка месторождения осуществляется компанией ОАО «Южуралзолото Группа Компаний». Добыча ведется открытыми и подземными горными выработками. Среднее содержание золота в руде составляет 11 г/т. Предполагаемые золотые запасы месторождения на начало 2019 г. составляли около 10 т (https://goldomania.ru/gold_deposits/russia/kochkarskoe.html).

Кочкарское месторождение расположено в пределах дайкообразного Пластовского интрузива длиной около 30 км, принадлежащего к инверсионной адамеллит-гранодиорит-плагиогранитной формации и имеющего раннекаменноугольный возраст (Бородаевский и др., 1984; Спиридонов, 1995). Вертикальная протяженность Пластовского интрузива составляет 6–8 км. В пределах интрузива развиты сеть разломов, обусловивших его блоковое строение, и многочисленные трещины скола, вмещающие дорудные и внутрирудные дайки гранитоид-порфириров, микродиоритов и спессартинов, большое число (более тысячи) золотоносных кварцевых и карбонат-кварцевых жил, а также послерудные дайки лампрофириров. Западная часть интрузива, вмещающая Кочкарское месторождение, находится в пределах Восточноуральского антиклинория на восточном склоне гранито-гнейсовокупольной структуры, в ядре которой расположен позднеорогенный Борисовский плутон биотитовых гранитов (P₁) и пегматитоносных лейкогранитов (P₂) (~260 млн лет). Граниты Борисовского массива рассекают адамеллиты и постгранитоидные дайки и оруденелые метасоматиты Пластовского массива

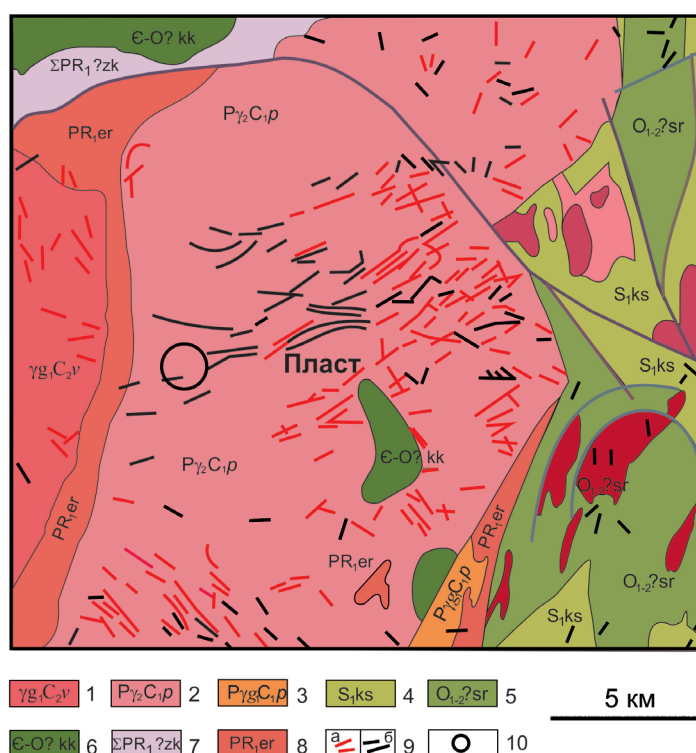


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кочкарского рудного поля по (Хайрятдинов, Федосеев, 2017).

1 – варшавский комплекс: гранитогнейсы, жильные полевошпатовые пегматиты; 2, 3 – пластовский комплекс: 2 – биотитовые плагиограниты и плагиогранито-гнейсы, 3 – жильные плагиограниты, плагиоаплиты, плагиопегматиты, метасоматиты; 4 – кособродская толща: туфы андезитобазальтов, андезитов, дацитов и риодацитов; 5 – саргазинская толща: вулканомиктовые песчаники, базальтовые брекчии, кремнистые алевролиты; 6 – кукушкинская толща: аркозовые, реже кварцевые метаспесчаники, метакогломераты и метаалевролиты; 7 – западно-кочкарский комплекс: антигорит-оливиновые породы, метагабброиды, клинопироксениты, горнблендиты; 8 – еремкинская толща: мигматизированные плагиосланцы, биотитовые плагиосланцы, полевошпатовые гнейсы; 9 – жилы: а – гранитные, б – гранит-пегматитовые; 10 – Кочкарское золоторудное месторождение.

Fig. 1. Schematic geological map of the Kochkar ore fields after (Khairyatdinov, Fedoseev, 2017).

1 – Varshavka complex: granite gneisses, vein feldspar pegmatites; 2, 3 – Plast complex: 2 – biotite plagiogranites and plagiogranite gneisses, 3 – vein plagiogranites, plagiopplites, metasomatites; 4 – Kosoy Brod Sequence: tuffs of basaltic andesites, andesites, dacites, and rhyodacites; 5 – Sargazy Sequence: volcanomictic sandstones, basaltic breccias, siliceous siltstones; 6 – Kukushka Sequence: arkose (rare quartz) metasandstones, metaconglomerates and metasiltstones; 7 – West Kochkar complex: antigorite-olivine rocks, metagabbroids, clinopyroxenites, hornblendites; 8 – Eremkino Sequence: migmatized plagiосhists, biotite plagiосhists, feldspar gneisses; 9 – veins: a – granite, б – granite pegmatite; 10 – Kochkar gold deposit.

и содержат их ксенолиты. Вертикальная мощность Борисовского гранитного массива составляет около 10 км, его восточный контакт погружается под Пластовский массив (рис. 1).

Большинство даек подверглось глубокому метаморфизму, превратившему их в характерную для Кочкарского месторождения темную породу — «табашку», состоящую из биотита, амфибола, полевых шпатов, эпидота, хлорита, граната, турмалина, кварца и карбонатов (Бородаевский и др., 1984; Спиридонов, 1996). Максимальное число даек «табашек» совпадает с общим контуром рас-

пространения оруденения, которое на Кочкарском месторождении представлено жилами и жильными зонами золотокварцевых убого сульфидных руд. Золотоносные кварцевые жилы локализованы в крутопадающих разрывах, которые в значительной мере наследуют более древнюю дайковую систему. Жилы развиты преимущественно вдоль контактов или внутри даек «табашек». Протяженность рудных жил по простиранию обычно составляет 300–600 м, по падению – до 1000 м и более. Мощности жил чаще всего варьируют от 0.5 до 1.0 м, угол падения – 80–90°.

Несмотря на то, что изученный нами образец поступил без подробной геологической привязки, по составу встреченных в нем минералов предполагается, что он был отобран из юго-западного блока месторождения, вскрытого шахтами Трифоновская и Партизан. Только для метаморфизованных руд этого блока характерна серебряная минерализация, и, в частности, именно здесь, в Трифоновской жиле был найден и описан густавит – единственный из Ag-содержащих членов лиллианитовой гомологической серии, установленный на месторождении до нашей находки (Спиридонов, 1996). Для этих руд также отмечены преобладание арсенопирита над пиритом и обогащенность висмутина сурьмой (Спиридонов, 1996), характерные и для изученного нами образца.

К сожалению, имеющаяся информация не дает однозначного представления о последовательности минералообразования в изученном нами образце. Тем не менее, можно предположить, что блеклая руда и Sb-содержащий висмутин кристаллизовались раньше Bi-Sb-сульфосолей (терриуолласеита и тинтинаита–кобеллита), и, в таком случае, первые могли стать источником Ag, Bi и Sb для вторых.

Методы исследования

Образец исследован в лабораториях Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана РАН (г. Москва), Департамента геологических наук факультета науки Масарикова университета (г. Брно, Чехия) и Департамента наук о Земле Университета Падуи (г. Падуа, Италия).

Оптические свойства минералов изучались в аншлифах с помощью рудного микроскопа, микроморфология и химический состав – методами сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа с применением как энергодисперсионного, так и волново-дисперсионного спектрометров.

Анализ с использованием энергодисперсионного спектрометра проводился на сканирующем электронном микроскопе CamScan-4D с системой анализа INCA при ускоряющем напряжении 20 кВ, поглощенном токе 5 нА и на металлическом кобальте, использованном в качестве эталона (аналитик А.В. Касаткин). Анализ на волново-дисперсионном спектрометре проводился на микроанализаторе Cameca SX 100 (аналитик Р. Шкода). Условия анализа: ускоряющее напряжение 25 кВ, сила тока

электронного зонда 10 нА, диаметр электронного зонда на поверхности образца – 2 мкм, время накопления импульсов на пике 10 с, на фоне – 5 с). Определявшиеся элементы, аналитические рентгеновские линии и стандарты: $SK\alpha$ – халькопирит; $CuK\alpha$ – Cu; $AsL\beta$ – парараммельсбергит; $SeL\beta$ и $PbM\alpha$ – PbSe; $AgL\alpha$ – Ag; $CdL\beta$ – Cd; $SbL\beta$ – Sb; $BiM\beta$ – Bi.

Для получения рентгенодифракционных данных предварительно изученные электронно-зондовым методом зерна извлекались из шлифов и анализировались с помощью монокристалльного дифрактометра Agilent SuperNova с детектором Pilatus 200K Dectris, на $MoK\alpha$ -излучении при ускоряющем напряжении 50 кВ и силе тока 0.8 мА (аналитик Ф. Нестола). Расстояние образец-детектор составляло 68 мм, время экспозиции 60 мин.

Результаты

Изученный образец содержит свинцово-серые массивные сульфидно-сульфосолевые агрегаты с металлическим блеском в сростании с кварцем (рис. 2). Изучение этих агрегатов электронно-зондовым методом показывает, что они сложены, главным образом, блеклой рудой и висмутином с подчиненным количеством арсенопирита. Для блеклой руды характерно резкое преобладание Cu над Ag, Sb над As и Fe над Zn. Согласно недавно принятой номенклатуре блеклых руд, такой состав отвечает тетраэдриту-(Fe) (Biagioni et al., 2020). Висмутин существенно обогащен Sb (до 22 мас. %). В тетраэдрите-(Fe) и Sb-содержащем висмутине фиксируются многочисленные вростки минералов ряда тинтинаит–кобеллит размером до 0.8 мм. Соотношение Sb и Bi в сульфосолях этого ряда колеблется: большая часть точек составов лежит в поле тинтинаита ($Sb > Bi$), меньшая отвечает его Bi-аналогу – кобеллиту. Химический состав всех минералов приведен в таблице 1. Для тинтинаита–кобеллита также получены параметры ромбической элементарной ячейки: $a = 22.464(12) \text{ \AA}$, $b = 34.023(9) \text{ \AA}$, $c = 4.0334(14) \text{ \AA}$, $V = 3083(2) \text{ \AA}^3$ (монокристалльные рентгеновские данные).

Терриуолласеит обнаружен в виде редких зерен неправильной формы размером до 0.4×0.3 мм, сростающихся с тетраэдритом-(Fe) и Sb-содержащим висмутином (рис. 3). Цвет терриуолласеита свинцово-серый, блеск металлический. Наблюдается отчетливая спайность, вероятно, по



Рис. 2. Свинцово-серые массивные агрегаты тесно срастающихся между собой терриуолласеита, Sb-содержащего висмутина, тетраэдрита-(Fe), арсенопирита и минералов ряда тинтинаит–кобеллит.

Размер образца 1.5 × 1.5 × 0.8 см. Фото А.Д. Касаткина.

Fig. 2. Massive lead gray aggregates of terrywallaceite intimately intergrown with Sb-bearing bismuthinite, tetraehdrite-(Fe), arsenopyrite and minerals of the tintinaite–kobellite series.

Sample size is 1.5 × 1.5 × 0.8 cm. Photo by A.D. Kasatkin.

Таблица 1

Химический состав (мас. %) сульфидов и сульфосолей, ассоциирующих с терриуолласеитом из Кочкарского месторождения

Table 1

Chemical composition (wt. %) of sulfides and sulfosalts associated with terrywallaceite from the Kochkar deposit

№ п/п	Cu	Ag	Fe	Zn	Cd	Pb	As	Sb	Bi	S	Se	Сумма
1	33.47	7.87	6.02	0.40	0.26	–	0.81	27.16	0.34	24.63	–	100.96
2	–	–	–	–	–	–	–	21.13	58.06	21.60	–	100.79
3	–	–	34.87	–	–	–	45.04	–	–	19.65	–	99.56
4	2.06	–	–	–	–	35.06	–	17.77	25.78	18.93	–	99.60
5	2.28	0.89	–	–	0.16	33.22	0.05	16.62	29.31	19.25	0.08	101.86
Эмпирические формулы												
1	$(\text{Cu}_{8.88}\text{Ag}_{1.23})_{\Sigma 10.11}(\text{Fe}_{1.82}\text{Zn}_{0.10}\text{Cd}_{0.04})_{\Sigma 1.96}(\text{Sb}_{3.76}\text{As}_{0.18}\text{Bi}_{0.03})_{\Sigma 3.97}\text{S}_{12.96}$											
2	$(\text{Bi}_{1.23}\text{Sb}_{0.77})_{\Sigma 2.00}\text{S}_{2.99}$											
3	$\text{Fe}_{1.02}\text{As}_{0.98}\text{S}_{1.00}$											
4	$\text{Pb}_{10.04}\text{Cu}_{1.92}(\text{Sb}_{8.66}\text{Bi}_{7.32})_{\Sigma 15.98}\text{S}_{35.05}$											
5	$(\text{Pb}_{9.31}\text{Ag}_{0.48}\text{Cd}_{0.08})_{\Sigma 9.87}\text{Cu}_{2.08}(\text{Bi}_{8.15}\text{Sb}_{7.93}\text{As}_{0.04})_{\Sigma 16.12}(\text{S}_{34.87}\text{Se}_{0.06})_{\Sigma 34.93}$											

Примечание. 1 – Тетраэдрит-(Fe); 2 – Sb-содержащий висмутин; 3 – арсенопирит; 4 – тинтинаит; 5 – кобеллит. Каждый из номеров по порядку – среднее по результатам трех анализов. Здесь и далее, прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Формулы рассчитаны на сумму всех атомов, равную 29 (№ 1), 5 (№ 2), 3 (№ 3) и 63 (№ 4, 5).

Note. 1 – Tetrahedrite-(Fe); 2 – Sb-bearing bismuthinite; 3 – arsenopyrite; 4 – tintinaite; 5 – kobellite. Each number is an average of three analyses. Here and hereinafter, dash – the content of the element is below detection limit. The formulas are recalculated to atom sum of 29 (no. 1), 5 (no. 2), 3, (no. 3) and 63 (nos. 4, 5).

Таблица 2

Химический состав терриуолласента из Кочкарского и других месторождений (мас. %) /
Table 2
Chemical composition (wt. % and apfu) of terrywallasente from the Kochkar and other deposits

№ ан	Cu	Ag	Pb	Cd	Bi	Sb	As	S	Se	Сумма	Коэффициенты в формуле										N_{chem}	L %	x	Bi/ (Bi + Sb)
											Cu	Ag	Pb	Cd	Bi	Sb	As	S	Se					
1	0.47	10.56	19.41	0.30	38.23	13.87	–	19.04	0.05	101.93	0.07	0.99	0.94	0.03	1.84	1.15	–	5.98	0.01	4.00	100	1.00	0.62	
2	0.44	10.35	19.02	0.30	37.9	13.81	–	18.91	0.06	100.79	0.07	0.97	0.93	0.03	1.84	1.15	–	5.99	0.01	4.00	100	1.00	0.62	
3	0.46	10.51	19.14	0.30	37.49	14.1	–	18.99	0.12	101.11	0.07	0.98	0.93	0.03	1.81	1.17	–	5.98	0.02	4.26	97.67	1.11	0.61	
4	0.46	10.41	19.08	0.26	37.81	14.25	–	18.83	–	101.1	0.07	0.98	0.93	0.02	1.84	1.19	–	5.96	–	4.00	105	1.05	0.61	
5	0.47	9.98	19.15	–	37.28	14.01	–	18.82	0.06	99.77	0.08	0.95	0.95	–	1.83	1.18	–	6.01	0.01	3.88	103.9	0.98	0.61	
6	0.44	10.04	19.16	0.20	38.17	13.87	–	18.83	0.06	100.77	0.07	0.95	0.94	0.02	1.86	1.16	–	5.99	0.01	4.13	101.2	1.08	0.62	
7	0.5	10.02	19.19	0.17	37.31	14.05	0.06	18.87	–	100.17	0.08	0.95	0.94	0.02	1.82	1.18	0.01	6.00	–	4.13	101.2	1.08	0.61	
8	0.41	10.16	19.12	0.10	37.45	13.73	0.03	18.67	0.03	99.7	0.07	0.97	0.95	0.01	1.84	1.16	–	6.00	–	4.18	100.71	1.10	0.61	
9	0.46	10.25	19.16	0.20	37.7	13.96	0.01	18.87	0.05	100.66	0.07	0.97	0.94	0.02	1.84	1.17	–	5.99	0.01	4.09	101.22	1.06	0.61	
10	–	11.19	18.22	–	31.1	18.94	0.45	19.32	–	99.24	–	1.02	0.87	–	1.47	1.53	0.06	5.94	–	3.94	106.25	1.03	0.49	
11*	0.03	10.33	20.41	0.01	39.4	12.18	–	18.63	0.08	101.08	–	0.99	1.02	–	1.95	1.03	–	6.00	0.01	4.02	98.75	0.99	0.65	
12**	0.19	10.09	19.03	0.19	26.55	20.12	–	19.51	–	98.29	0.03	0.91	0.89	0.02	1.24	1.61	–	5.92	–	3.88	103.3	0.97	0.44	
13***	0.43	9.80	21.38	–	34.08	13.95	0.21	19.05	0.79	100.27	0.07	0.91	1.04	–	1.64	1.15	0.03	5.96	0.1	4.31	93.56	1.08	0.59	

Примечание. Терриуолласент из: 1–9 – Кочкарского месторождения (данная работа, 9 – среднее значение); 10 – рудника Герминия, Перу (Yang et al., 2013); 11 – рудного района Кутна Гора, Чехия, среднее значение по 6 образцам, рассчитано нами по данным (Pažout, 2017); 12 – месторождения Поопо, Боливия, среднее значение для 2 анализов, рассчитано нами по данным (Torres et al., 2019); 13 – месторождения Цзялонг, Китай (Liu et al., 2018).

Анализы содержат: * – Fe 0.01 мас.%, ** – (мас.%/а.ф.): Fe 0.84/0.15, Zn 1.43/0.21, Ge 0.09/0.01, Sn 0.25/0.02; *** – (мас.%/а.ф.) Fe 0.58/0.10.

Формульные коэффициенты рассчитаны на сумму всех атомов, равную 11.

Note. Terrywallasente from: 1–9 – Kochkar deposit (this study; 9 – average value); 10 – Herminia Mine, Peru (Yang et al., 2013); 11 – Kutná Hora ore district, Czech Republic, average of 6 samples; our calculation is based on data of (Pažout, 2017); 12 – Poopo deposit, Bolivia, average of 2 analyses; our calculation is based on data of (Torres et al., 2019); 13 – Jialong deposit, China (Liu et al., 2018).

The analyses include: * – Fe 0.01 wt. %, ** – (wt. %/apfu): Fe 0.84/0.15, Zn 1.43/0.21, Ge 0.09/0.01, Sn 0.25/0.02; *** – (wt. %/apfu) Fe 0.58/0.10.

The formulas are recalculated to atom sum of 11.

Рис. 3. Зерно терриуолласеита (Trw) в сростании с тетраэдритом-(Fe) (Tet) и Sb-содержащим висмутинитом (Bsm).

BSE фото.

Fig. 3. Terrywallaceite (Trw) grain intergrown with tetrahedrite-(Fe) (Tet) and Sb-bearing bismuthinite (Bsm).

BSE photo.

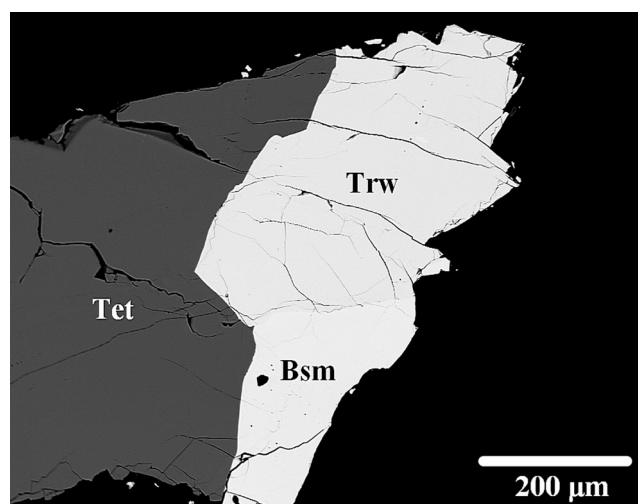


Таблица 3

Параметры элементарных ячеек терриуолласеита из Кочкарского и других месторождений

Table 3

Unit cell dimensions of terrywallaceite from the Kochkar and other deposits

№	<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	β , °	<i>V</i> , Å ³
1	6.992(2)	19.328(4)	8.381(10)	107.68(7)	1079(1)
2	6.9764(4)	19.3507(10)	8.3870(4)	107.519(2)	1079.7(1)
3	7.0455(6)	19.5294(17)	8.3412(1)	107.446(10)	1094.9(2)
4	7.068(6)	19.612(14)	8.216(7)	107.29(6)	1087.4(1)
5	7.056(9)	19.592(14)	8.235(9)	107.34(8)	1086.6(1)

Примечание. Все параметры ячеек уточнены по монокристалльным данным. Терриуолласеит из: 1 – Кочкарского месторождения (наши данные); 2 – рудника Герминия, Перу (Yang et al., 2013); 3 – рудного района Кутна Гора, Чехия (Pažout, Dušek, 2009); 4, 5 – рудного района Кутна Гора, Чехия (Pažout, 2017).

Note. All unit cell dimensions are refined on the basis of single-crystal diffraction data. Terrywallaceite from: 1 – Kochkar deposit (this study); 2 – Herminia Mine, Peru (Yang et al., 2013); 3 – Kutná Hora ore district, Czech Republic (Pažout, Dušek, 2009); 4, 5 – Kutná Hora ore district, Czech Republic (Pažout, 2017).

{010}, по аналогии с голотипом из Перу (Yang et al., 2013). В отраженном свете минерал белый, в скрещенных николях – слабо анизотропный, от голубовато-серого до темно-серого. Наблюдаются слабые двуотражение и плеохроизм, от белого до светло-серого.

Химический состав уральского терриуолласеита в сравнении с терриуолласеитом из других местонахождений (рудник Герминия, Перу; рудный район Кутна Гора, Чехия; месторождения Поопо, Боливия, и Цзялонг, Китай) показан в табл. 2. Параметры элементарных ячеек терриуолласеита из разных месторождений приведены в табл. 3.

Обсуждение

Терриуолласеит является одним из членов лиллианитовой гомологической серии, объединя-

ющей сульфосоли, структуры которых рассматриваются как производные от структуры лиллианита $Pb_3Bi_2S_6$. Они состоят из чередующихся слоев с галенитоподобной структурой, сдвоенных по плоскости, соответствующей (131) у галенита, и расположенных параллельно (010). Между галенитоподобными слоями в плоскости двойникования находятся координационные полиэдры в виде тригональных призм, занятые атомами Pb. В октаэдрах галенитоподобных слоев размещаются атомы Ag, Pb, Bi и Sb, и именно здесь может иметь место изоморфное гетеровалентное замещение по схеме $2Pb^{2+} \leftrightarrow Ag^+ + Bi^{3+}(Sb^{3+})$, именуемой густавитовой (Makovicky, Karup-Möller, 1977; Makovicky, Tora, 2014).

Общая формула минералов лиллианитовой гомологической серии – $Pb_{N-1-2x}Bi_{2+x}AgS_{xN+2}$ (Makovicky, Tora, 2014), где гомологический порядковый номер *N* соответствует количеству окта-

здоров в определенном сечении галенитоподобного слоя, а x – это коэффициент гетеровалентного густавитового замещения. Как известно, значение N можно определить, либо зная кристаллическую структуру минерала (N_{cryst}), либо исходя из данных химического анализа (N_{chem}). В терриуолласеите структурно обусловленное целочисленное значение $N_{\text{cryst}} = 4$, а для определения N_{chem} используется формула $N_{\text{chem}} = [1 / (\text{Bi} + 0.5\text{Pb} - 0.5)] - 1$, где значения Bi и Pb соответствуют количеству атомов на формулу, определяемому по данным химического анализа при расчете на $\text{Ag} + \text{Pb} + \text{Bi} = 1$ (Makovicky, Tora, 2014; Makovicky, 2019). Для среднего химического состава терриуолласеита из Кочкарского месторождения (табл. 2, ан. 9) по этой формуле $N_{\text{chem}} = 4.09$, что хорошо согласуется с $N_{\text{cryst}} = 4$ и, как мы надеемся, свидетельствует о высоком качестве наших электронно-зондовых анализов. Для расчета коэффициента густавитового замещения применяется формула $x = [(L\%) * (N_{\text{chem}} - 2)] / 200$, где $L\%$ – это процент густавитового замещения. Он рассчитывается по формуле $L\% = 1 - [(2\text{Bi} - \text{Pb} - 1) / 6(\text{Bi} + 0.5\text{Pb} - 5/6)]$, где Bi и Pb нормализованы на $\text{Ag} + \text{Pb} + \text{Bi} = 1$ (Makovicky, Tora, 2014; Makovicky, 2019), и является еще одной важной характеристикой минералов лиллианитовой гомологической серии (см. ниже).

Все минералы данной серии принято делить на Bi -члены (лиллианитовая ветвь) и Sb -члены (андоритовая ветвь). Несмотря на то, что идеальная формула терриуолласеита записывается как $\text{AgPb}(\text{Sb},\text{Bi})_3\text{S}_6$, его относят к висмутовым членам. Объясняется это следующим обстоятельством. В структуре минерала присутствуют четыре октаэдрических позиции: одна занята Ag в координации $4 + 2$, а три других (M1 , M2 , M3) – смешанные Bi - Sb -позиции в координации $3 + 3$, причем в двух позициях (M1 и M2) $\text{Bi} > \text{Sb}$, в то время как большая часть Sb предпочитает концентрироваться в позиции M3 (Yang et al., 2013). Таким образом, корректная структурная формула терриуолласеита записывается как $\text{AgPb}(\text{Sb},\text{Bi})(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{S}_6$ (Yang et al., 2013; Pažout, 2017). В этом принципиальное отличие терриуолласеита от изотипного ему густавита $\text{AgPbBi}_3\text{S}_6$, в структуре которого в каждой из трех позиций M1 , M2 и M3 доминирует висмут (Makovicky, Tora, 2011).

До описания терриуолласеита вопрос взаимозамещения Bi и Sb в структурах представителей лиллианитовой гомологической серии глубоко не исследовался. Большой вклад в это был сделан

Р. Пажоутом, обнаружившим в образцах из рудного района Кутна Гора непрерывный ряд твердых растворов сульфосолей лиллианитовой гомологической серии с $N_{\text{cryst}} = 4$: густавита, терриуолласеита, староческеита и андорита. Им было предложено считать взаимозамещение $\text{Bi}^{3+} \leftrightarrow \text{Sb}^{3+}$ вторым важнейшим замещением для данной гомологической серии после густавитового, а соотношение атомных количеств $\text{Bi} / (\text{Bi} + \text{Sb})$, определяемое исходя из электронно-зондовых данных – показателем, необходимым для отнесения того или иного образца к конкретному минеральному виду, наряду с параметрами $L\%$ и x . Исходя из сказанного, к густавиту было предложено относить образцы, имеющие составы с $L\% = 60-109$ и $\text{Bi} / (\text{Bi} + \text{Sb}) > 0.75$, к терриуолласеиту – с $L\% = 85-113$ и $\text{Bi} / (\text{Bi} + \text{Sb}) < 0.75$, к староческеиту – с $L\% = 65-75$ и $\text{Bi} / (\text{Bi} + \text{Sb}) \approx 0.50$ и к андориту-IV – с $L\% = 85-93$ и $\text{Bi} / (\text{Bi} + \text{Sb}) < 0.50$ (Pažout, 2017). Особняком здесь стоит староческеит $\text{Ag}_{0.70}\text{Pb}_{1.60}(\text{Bi}_{1.35}\text{Sb}_{1.35})_{\Sigma 2.70}\text{S}_6$ (Pažout, Sejkora, 2018). В отличие от остальных минералов этого ряда, кристаллизующихся в моноклинной сингонии и пространственной группе $P2_1/c$, староческеит имеет ромбическую симметрию с пространственной группой $Cmcm$, представляя собой новый гомеотип ряда густавит–андорит (Pažout, 2017).

Кристаллическая структура образца из Кочкарского месторождения не уточнялась, и его принадлежность к терриуолласеиту базируется на электронно-зондовых и монокристалльных рентгеновских данных. По своему химическому составу (табл. 2, ан. 1–8) уральский минерал однороден и по средним параметрам ($L = 101.22\%$, $x = 1.06$, $\text{Bi} / (\text{Bi} + \text{Sb}) = 0.61$) соответствует полю терриуолласеита в соответствии с рекомендациями Р. Пажоута. В химическом отношении образец из Кочкарского месторождения наиболее близок к терриуолласеиту из Чехии (табл. 2, ан. 11), в то время как образцы из других месторождений существенно отличаются либо по показателю $L\%$, либо по соотношению $\text{Bi} / (\text{Bi} + \text{Sb})$ (табл. 2, ан. 10, 12, 13; рис. 4). Сравнение параметров моноклинных элементарных ячеек уральского образца и структурно изученных образцов из Перу и Чехии также однозначно подтверждает принадлежность минерала из Кочкарского месторождения к терриуолласеиту (табл. 3).

Заключение

На страницах журнала «Минералогии» регулярно публикуются статьи и сообщения о находках

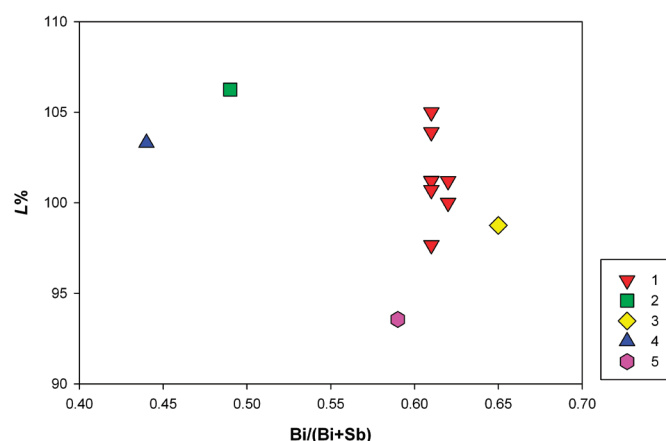


Рис. 4. Соотношение параметра $Bi / (Bi + Sb)$ и процента густавитового замещения ($L\%$) в терриуолласеите из Кочкарского месторождения и других объектов.

1 – Кочкарское месторождение; 2 – рудник Гермения, Перу; 3 – рудный район Кутна Гора, Чехия; 4 – месторождение Поопо, Боливия; 5 – месторождение Цзялонг, Китай.

Fig. 4. Correlation between $Bi/(Bi + Sb)$ ratio and percent of gustavite substitution ($L\%$) in terrywallaceite from the Kochkar and other deposits.

1 – Kochkar deposit; 2 – Herminia Mine, Peru; 3 – Kutná Hora ore district, Czech Republic; 4 – Poopó deposit, Bolivia; 5 – Jialong deposit, China.

редких российских минералов. Многие из таких находок являются первыми на территории нашей страны или ее отдельных регионов (например, Касаткин и др., 2015, 2019а, б; Попова и др., 2019а,б; Прибавкин и др., 2017; Шведов и др., 2019), а описываемые при этом минералы пополняют общероссийский и региональные кадастры. Помимо свежесобранного каменного материала важным источником для таких находок являются старые образцы из музейных собраний и частных систематических коллекций. Переизучение их современными аналитическими методами нередко приводит к результатам, подобным тем, что описаны в настоящей статье. Полагаем, что данное направление в исследовательской деятельности стоит всячески развивать, ибо в нем – залог новых открытий и интересных публикаций.

Авторы благодарны Ф. Нестоле (Университет г. Падуа, Италия) – за монокристалльную съемку терриуолласеита, а И.В. Пекову – за ценные комментарии и редакторскую правку статьи.

Литература

Бородаевский Н.И., Черемисин А.А., Яновский В.М., Покусаев В.И. (1984) Кочкарское месторождение. Золоторудные месторождения. Т. 1. М., Недра, 54–95.

Касаткин А.В. (2019) Новые находки редких минералов на территории постсоветских государств. *Минералогический Альманах*, **24**(2), 4–47.

Касаткин А.В., Еланчинцев С.Г., Нестола Ф. (2015) Дингдаохенгит-(Ce) с Обуховского увала, Южный Урал: первая находка в России. *Минералогия*, **3**, 3–7.

Касаткин А.В., Шкода Р., Кузнецов А.М. (2019а) Алланит-(Nd) из Сапфириновой копи, Южный Урал: первая находка в России. *Минералогия*, **5**(1), 15–23.

Касаткин А.В., Шкода Р., Нестола Ф., Кузнецов А.М., Белогуб Е.В., Агаханов А.А. (2019б) Рентгенит-(Ce) и другие фторкарбонаты РЗЭ из жилы № 35, Вишнёвые горы, Южный Урал. *Минералогия*, **5**(2), 10–22.

Попова В.И., Попов В.А., Блинов И.А., Котляров В.А., Касаткин А.В., Шкода Р., Лебедева С.М. (2019а) Новые находки редких минералов в пегматитах Вишнёвых гор на Южном Урале. *Минералогия*, **5**(1), 3–14.

Попова В.И., Попов В.А., Касаткин А.В., Кузнецов А.М. (2019б) Минералы группы эшинита из Вишнёвых гор (Южный Урал). *Минералогия*, **5**(3), 16–25.

Прибавкин С.В., Козлов П.С., Мазур С.В., Готтман И.А., Замятин Д.А., Сустанов С.Г. (2017) Самородный висмут, вейлендит и бейерит — первая находка в аллювиальных золотоносных россыпях Заангарья Енисейского Кряжа. *Минералогия*, **2**, 3–13.

Спиридонов Э.М. (1995) Минералогия метаморфизованного Кочкарского плутогенного золото-кварцевого месторождения, Южный Урал. 1. Золото-теллуридные руды (новые минералы $Bi-Pb-Te-S$; кочкарит, раклиджит, алексит, золото, монтбрейит, теллуриды и сульфиды Bi). *Записки ВМО*, **124**(6), 24–39.

Спиридонов Э.М. (1996) Минералогия метаморфизованного Кочкарского плутогенного золото-квар-

цевого месторождения, Южный Урал. 2. Золото-висмутиновые руды (галенит-шапбахит, Bi- и Bi-Sb-прустит, As-Bi-стефанит, густавит, золото, Bi-гессит, хедлиит, теллуржозеит, икунолит, галеновисмутит, бончевит, висмут). *Записки ВМО*, **125**(6), 1–10.

Хайрятдинов Р.К., Федосеев В.В. (2017) История добычи золота на Южном Урале. *Горный журнал*, **9**, 46–50.

Шведов Г.И., Перфилова О.Ю., Мавринская С.А., Сильянов С.А., Лобастов Б.М. (2019) Ленгенбахит Кочковского золоторудного месторождения (Забайкальский край). *Минералогия*, **5**(4), 30–38.

Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. (2020) The tetrahedrite group: nomenclature and classification. *American Mineralogist*, в печати, DOI: <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>.

Liu J., Chen W., Liu Q. (2018) Sb-Bi alloys and Ag-Cu-Pb-Sb-Bi sulphosalts in the Jialong Cu-Sn deposit in North Guangxi, South China. *Minerals*, **8**(1), 26.

Makovicky E. (2019) Algorithms for calculations of homologue order N in the homologous series of sulfosalts. *European Journal of Mineralogy*, **31**, 83–97.

Makovicky E., Karup-Möller S. (1977) Chemistry and crystallography of the lillianite homologous series. Part 1. General properties and definitions. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlugen*, **130**, 264–287.

Makovicky E., Topa D. (2011) The crystal structure of gustavite, $\text{PbAgBi}_3\text{S}_6$. Analysis of twinning and polytypism using the OD approach. *European Journal of Mineralogy*, **23**, 537–550.

Makovicky E., Topa D. (2014) Chemistry and crystallography of the lillianite homologous series. Part 1. General properties and definitions. *Mineralogical Magazine*, **78**(2), 387–414.

Pažout R. (2017) Lillianite homologues from Kutná Hora ore district, Czech Republic: a case of large-scale Sb for Bi substitution. *Journal of Geosciences*, **62**, 37–57.

Pažout R., Dušek M. (2009) Natural monoclinic $\text{AgPb}(\text{Bi}_2\text{Sb})_3\text{S}_6$, Sb-rich gustavite. *Acta Crystallographica*, **C65**, i77–i80.

Pažout R., Sejkora J. (2018) Staročeskéite, $\text{Ag}_{0.70}\text{Pb}_{1.60}(\text{Bi}_{1.35}\text{Sb}_{1.35})_{\Sigma 2.70}\text{S}_6$, from Kutná Hora, Czech Republic, a new member of the lillianite homologous series. *Mineralogical Magazine*, **82**(4), 993–1005.

Torres B., Melgarejo J.C., Torró L., Camprubí A., Castillo-Oliver M., Artiaga D., Campeny M., Tauler E., Jiménez-Franco A., Alfonso P., Arce-Burgoa O.R. (2019) The Poopó polymetallic epithermal deposit, Bolivia: mineralogy, genetic constraints, and distribution of critical elements. *Minerals*, **9**(8), 472.

Torró L., Cazorla M., Melgarejo J.C., Camprubí A., Tarrés M., Gemmrich L., Campeny M., Artiaga D., Torres B., Martínez A., Mollinedo D., Alfonso P., Arce-Burgoa O.R. (2019) Indium mineralization in the volcanic dome-hosted Ánimas-Chocaya-Siete Suyos polymetallic deposit, Potosí, Bolivia. *Minerals*, **9**(10), 604.

Yang H., Downs R.T., Evans S.H., Pinch W.W. (2013) Terrywallaceite, $\text{AgPb}(\text{Sb,Bi})_3\text{S}_6$, isotypic with gustavite, a new mineral from Mina Herminia, Julcani mining district, Huancavelica, Peru. *American Mineralogist*, **98**(7), 1310–1314.

References

Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. (2020) The tetrahedrite group: nomenclature and classification. *American Mineralogist*, in press, DOI: <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>.

Borodaevskiy N.I., Cheremisin A.A., Yanovskiy V.M., Pokusaev V.I. (1984) [Kochkar deposit]. In: *Zolotorudnye mestorozhdeniya [Gold deposits]*. Vol. 1., Moscow, Nedra, 54–95 (in Russian).

Kasatkin A.V. (2019) New findings of rare minerals from former Soviet Union countries. *Mineralogical Almanac*, **24**(2), 4–47.

Kasatkin A.V., Epanchintsev S.G., Nestola F. (2015) [Dingdaohengite-(Ce) from Obukhovskiy Uval, South Urals: first find in Russia]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **3**, 3–7 (in Russian).

Kasatkin A.V., Škoda R., Kuznetsov A.M. (2019a) [Allanite-(Nd) from Sapfirinovaya Pit, Southern Urals: first find in Russia]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **5**(1), 15–23 (in Russian).

Kasatkin A.V., Škoda R., Nestola F., Kuznetsov A.M., Belogub E.V., Agakhanov A.A. (2019b) [Röntgenite-(Ce) and other REE fluorocarbonates from vein no. 35, Vishnevye Mountains, Southern Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **5**(2), 10–22 (in Russian).

Khayryatdinov R.K., Fedoseev V.V. (2017) [History of gold mining at the South Urals]. *Gorny Zhurnal [Mining Magazine]*, **9**, 46–50 (in Russian).

Liu J., Chen W., Liu Q. (2018) Sb-Bi alloys and Ag-Cu-Pb-Sb-Bi sulphosalts in the Jialong Cu-Sn deposit in North Guangxi, South China. *Minerals*, **8**(1), 26.

Makovicky E. (2019) Algorithms for calculations of homologue order N in the homologous series of sulfosalts. *European Journal of Mineralogy*, **31**, 83–97.

Makovicky E., Karup-Möller S. (1977) Chemistry and crystallography of the lillianite homologous series. Part 1. General properties and definitions. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlugen*, **130**, 264–287.

Makovicky E., Topa D. (2011) The crystal structure of gustavite, $\text{PbAgBi}_3\text{S}_6$. Analysis of twinning and polytypism using the OD approach. *European Journal of Mineralogy*, **23**, 537–550.

Makovicky E., Topa D. (2014) Chemistry and crystallography of the lillianite homologous series. Part 1. General properties and definitions. *Mineralogical Magazine*, **78**(2), 387–414.

Pažout R. (2017) Lillianite homologues from Kutná Hora ore district, Czech Republic: a case of large-scale Sb for Bi substitution. *Journal of Geosciences*, **62**, 37–57.

- Pažout R., Dušek M.** (2009) Natural monoclinic $\text{AgPb}(\text{Bi}_2\text{Sb})_3\text{S}_6$, Sb-rich gustavite. *Acta Crystallographica*, **C65**, i77–i80.
- Pažout R., Sejkora J.** (2018) Staročeskéite, $\text{Ag}_{0.70}\text{Pb}_{1.60}(\text{Bi}_{1.35}\text{Sb}_{1.35})_{\Sigma 2.70}\text{S}_6$, from Kutná Hora, Czech Republic, a new member of the lillianite homologous series. *Mineralogical Magazine*, **82**(4), 993–1005.
- Popova V.I., Popov V.A., Blinov I.A., Kotlyarov V.A., Kasatkin A.V., Škoda R., Lebedeva S.M.** (2019a) [New findings of rare minerals in pegmatites of Vishnevye Mountains in the South Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **5**(1), 3–14 (in Russian).
- Popova V.I., Popov V.A., Kasatkin A.V., Kuznetsov A.M.** (2019b) [Aeschynite group minerals from Vishnevye Mountains (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **5**(3), 16–25 (in Russian).
- Pribavkin S.V., Kozlov P.S., Mazur S.V., Gottman I.A., Zamyatin D.A., Sustavov S.G.** (2017) [The first finding of native bismuth, waylandite and beyerite in alluvial gold placer deposits of Angara Region, Yenisey ridge]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **2**, 3–13 (in Russian).
- Shvedov G.I., Perfilova O.Yu., Mavrinskaya S.A., Sil'yanov S.A., Lobastov B.M.** (2019) [Lengenbachite from the Kochkovskoe gold deposit (Zabayalsky Krai)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **5**(4), 30–38 (in Russian).
- Spiridonov E.M.** (1995) [Mineralogy of the Kochkar metamorphosed plutogene gold-quartz deposit, South Urals. 1. Gold-telluride ores (new Bi-Pb-Te-S minerals; kochkarite, ruklidgeite, alexite, gold, montbrayite, Bi tellurides and sulfides)]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **124**(6), 24–39 (in Russian).
- Spiridonov E.M.** (1996) [Mineralogy of the Kochkar metamorphosed plutogene gold-quartz deposit, South Urals. 2. Gold-bismuthinite ores (galena-schappbachite, Bi- and Bi-Sb-proustite, As-Bi-stephanite, gustavite, gold, Bi hessite, hedleyite, tellurjoseite, ikonolite, galenobismuthinite, bontschevite, bismuth)]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **125**(6), 1–10 (in Russian).
- Torres B., Melgarejo J.C., Torró L., Camprubí A., Castillo-Oliver M., Artiaga D., Campeny M., Tauler E., Jiménez-Franco A., Alfonso P., Arce-Burgoa O.R.** (2019) The Poopó polymetallic epithermal deposit, Bolivia: mineralogy, genetic constraints, and distribution of critical elements. *Minerals*, **9**(8), 472.
- Torró L., Cazorla M., Melgarejo J.C., Camprubí A., Tarrés M., Gemmrich L., Campeny M., Artiaga D., Torres B., Martínez A., Mollinedo D., Alfonso P., Arce-Burgoa O.R.** (2019) Indium mineralization in the volcanic dome-hosted Ánimas–Chocaya–Siete Suyos polymetallic deposit, Potosí, Bolivia. *Minerals*, **9**(10), 604.
- Yang H., Downs R.T., Evans S.H., Pinch W.W.** (2013) Terrywallaceite, $\text{AgPb}(\text{Sb},\text{Bi})_3\text{S}_6$, isotypic with gustavite, a new mineral from Mina Herminia, Julcani mining district, Huancavelica, Peru. *American Mineralogist*, **98**(7), 1310–1314.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2020 г.

**МИНЕРАЛЫ МЕДИ ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ
Cu(Mo)-ПОРФИРОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ САРЫШАГАН
(ЗАПАДНОЕ ПРИБАЛХАШЬЕ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАЗАХСТАН)**

С.В. Прибавкин¹, А.В. Коровко¹, Г.Ю. Шардакова¹, А.В. Антонишин²

¹*Институт геологии и геохимии УрО РАН,*

ул. Академика Вонсовского 15, г. Екатеринбург, 620016, Россия; pribavkin@igg.uran.ru

²*ООО «Shagala Mining», пр. Бухар Жырау, 49, г. Караганда, Казахстан*

**COPPER MINERALS FROM THE OXIDATION ZONE OF
THE SARYSHAGAN Cu(Mo)-PORPHYRY DEPOSIT
(WESTERN BALKHASH REGION, CENTRAL KAZAKHSTAN)**

S.V. Pribavkin¹, A.V. Korovko¹, G.Yu. Shardakova¹, A.V. Antonishin²

¹*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS,*

ul. Akademika Vonsovskogo 15, Yekaterinburg, 620016 Russia; pribavkin@igg.uran.ru

²*ООО «Shagala Mining», pr. Bukhar Zhyrau 49, Karaganda, Kazakhstan*

В работе описаны вторичные минералы меди из зоны окисления Cu(Mo)-порфинового рудопроявления Сарышаган (Западное Прибалхашье, Центральный Казахстан). Показано их зональное распределение по разрезу зоны окисления. В нижней части разреза развиты малахит и хризоколла, выше доминируют хризоколла и хлориды меди. Последние широко развиты в подпочвенном горизонте гипсовых сыпучек, где представлены атакамитом, спанголитом и достоверно не диагностированными фазами. Установлено развитие урановой минерализации гидрогенного типа.

Илл. 4. Табл. 1. Библ. 23.

Ключевые слова: месторождения меди, зона окисления, малахит, хризоколла, атакамит, метаторбернит, Казахстан.

The paper describes secondary Cu minerals from the oxidation zone of the Saryshagan Cu (Mo)-porphyry occurrence (Western Balkhash region, Central Kazakhstan). The zonal distribution of secondary Cu minerals is shown along the section of the oxidation zone. Malachite and chrysocolla are found in the lower part of the section, whereas chrysocolla and Cu chlorides are dominant in the upper zone. Cu chlorides include atacamite, spangolite and unidentified minerals and are associated with gypsum. The local presence of fissure-hydrogenic U mineralization is established.

Figures 4. Table 1. References 23.

Key words: oxidation zone, copper deposits, malachite, chrysocolla, atacamite, metatorbernite, Kazakhstan.

Введение

На территории Центрального Казахстана известны крупные промышленные месторождения медно-порфинового и медно-молибден-порфинового типов: Коунрад, Бозшаколь, Нурказган и другие (Магматические..., 1983; Геологическое...,

2000; Геологическая..., 2004; Мирошниченко, Жуков, 2006; Berger et al., 2014 и др.). Сведения об эндо- и экзогенной минерализации этих объектов приведены в ряде монографий (Чухров, 1950, 1960; Смирнов, 1951) и множестве публикаций о находках отдельных минералов.

В последние годы в Казахстане ведутся интенсивные ревизия и оценка территорий, перспективных на выявление промышленного медного оруденения порфирирового типа. Одним из таких объектов является рудопроявление Сарышаган на площади Шагала (Западное Прибалхашье, Центральный Казахстан), где развиты окисленные и сульфидные руды.

В настоящее время на рудопроявлении компанией ООО «Shagala Mining» возобновлены разведочные горно-буровые работы. Вскрыты преимущественно массивные гранит-порфиры, разбитые разноориентированными и разноамплитудными тектонически ослабленными зонами мощностью от первых сантиметров до первых метров, вдоль которых до глубин в 50 м проявлены процессы выветривания и развита зона окисления. Глубже в измененных гранит-порфирах выявлены разномасштабные зоны неравномерно распределенных прожилково-вкрапленных тонкозернистых халькопирит-пиритовых руд с содержанием рудных минералов до 5–8 %.

Одной из важных геолого-экономических задач является установление минерального состава первичных, полуокисленных и окисленных руд проявления Сарышаган с целью корректного выделения их основных промышленно-технологических типов и оптимальной комплексной переработки. В связи с этим авторами ведётся изучение меденосной коры выветривания, первые результаты которого изложены в данной статье.

Геологическое строение рудопроявления Сарышаган

Рудопроявление Сарышаган расположено западнее оз. Балхаш и приурочено к Южно-Сарышаганской интрузии, сложенной массивными биотит-кварц-полевошпатовыми мезо-полифировыми гранит-порфирами. Интрузивное тело имеет сложную форму и вытянуто в северо-западном направлении на 2 км при мощности 0.6–0.8 км (рис. 1). Гранит-порфиры местами сильно катаклазированы и гидротермально изменены. По ним развиваются карбонат-хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты с неравномерной прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией штокверкового типа.

Поисковыми и разведочными работами в 80-е годы XX века на рудопроявлении выявлено три крупных субгоризонтальных этажных линзовидных тела вкрапленных сульфидных руд. Пер-

вое, самое крупное из них, вскрыто скважинами на глубине около 140 м, второе – на глубинах 104–229 м и третье – на глубинах 250–287 м в центральной части массива. Размеры рудных тел по простиранию варьируют от 750 до 1900 м, по падению – от 200 до 800 м при мощности 8–123 м. По оценкам разных авторов прогнозные ресурсы меди по категории P_1 составляют от 175 до 874 тыс. т. Средние содержания в рудах Cu около 0.3 %. В рудах преобладают пирит и халькопирит. Второстепенные рудные минералы – молибденит, сфалерит, галенит, пирротин.

По данным геологоразведочных работ (Полетаев и др., 1983) зона окисления распространяется до глубины 20 м и на отдельных участках – до 35–40 м. В процессе разведочных работ без описания были установлены каолинит, галлуазит, гипс, гематит, гидрогематит, гетит, гидроксиды Mn, хризокolla, малахит, атакамит, ванадинит, куприт, тенорит, самородная медь, халькозин, ковеллин (Полетаев и др., 1983). Прогнозные ресурсы меди в зоне окисления не оценены.

Материал и методы исследования

Для изучения были отобраны образцы выветрелых метасоматически измененных гранит-порфиров, вскрытых канавами №№ 1, 17, 18 и 19 (пробы К-1/1, К-1/П, К-1/Л, К-17, К-18-2, К-18-4, К-19-2), а также колонковыми скважинами №№ 84, 85, 87, 1Г и 6Г (образцы 84/45.7, 85/6.2, 85/28.8, 87/33.5, 1Г/6.0, 1Г/8.0, 1Г/12.0, 1Г/16.0, 1Г/21.0, 1Г/24.6, 1Г/28.1, 6Г/19.5), позиция которых показана на рис. 1.

Составы пород и минералов проанализированы в ЦКП «Геоаналитик» лаборатории ФХМА (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург). Минеральный состав штучных проб из пройденных канав и из керна скважин определен на СЭМ с ЭДС приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитики И.А. Готтман, Л.В. Леонова) и рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (CuK α излучение), включая расчет содержаний минеральных фаз по программе SiroQuant v.4 (аналитик Т.Я. Гуляева).

Минералогия зоны окисления

В пределах рудопроявления Сарышаган канавами (глубина 1.0–1.5 м) и скважинами повсеместно вскрыты структурные дресвяно-глинисто-песчаные коры выветривания гидрослюдистого типа как

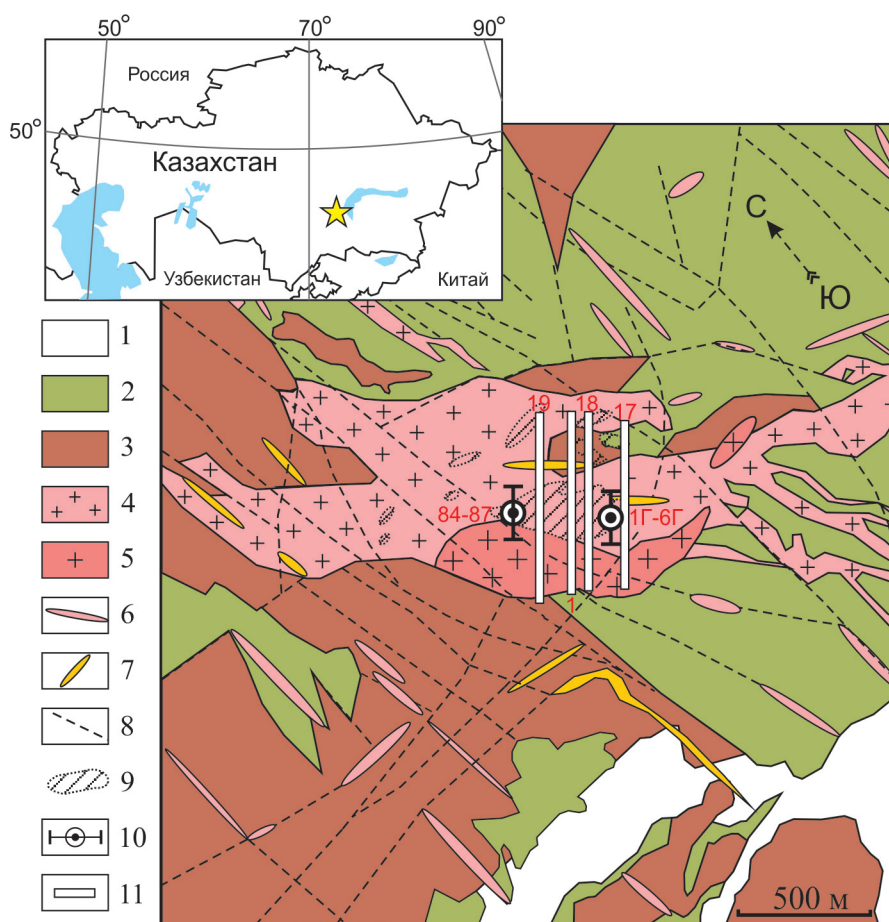


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Южно-Сарышаганского массива по (Цаплин, 1956ф; Изотов и др., 1983ф) с упрощениями и дополнениями.

1 – четвертичные отложения (пески, суглинки); 2 – алевролиты, песчаники, туфопесчаники, конгломераты, силур; 3 – туфы и субвулканические тела риодацитов, девон; 4 – среднезернистые гранит-порфиры; 5 – средне-мелкозернистые плагиогранит-порфиры; 6 – дайки граносиенит-порфириров; 7 – дайки фельзитов, гранит-порфириров; 8 – разрывные нарушения, 9 – проекция контуров рудных тел, 10 – профили скважин №№ 84–87 и 1Г–6Г; 11 – канавы №№ 1, 17, 18, 19.

Fig. 1. Schematic geological map of the South Saryshagan pluton simplified and modified after (Tsaplin, 1956; Izotov et al., 1983).

1 – Quaternary sediments (sands, loams); 2 – Silurian siltstones, sandstones, tuff sandstones, conglomerates; 3 – Devonian tuffs and subvolcanic bodies of rhyodacites; 4 – coarse-grained porphyry granites; 5 – fine- and medium-grained porphyry plagiogranites; 6 – dikes of porphyry granosyenites; 7 – dikes of felsites and porphyry granites; 8 – faults, 9 – ore bodies; 10 – profiles of boreholes nos. 84–87 and 1Г–6Г; 11 – trenches nos. 1, 17, 18, 19.

по гранит-порфирам массива, так и вмещающим породам. В их составе преобладают кварц, полевые шпаты, мусковит 2М1, монтмориллонит и гипс; в меньших количествах присутствуют плохо упорядоченный гетит и доломит (таблица). Глубина развития кор выветривания, в среднем, составляет 10–20 м, понижаясь вдоль крутопадающих тектонических зон до 40–50 м. Вдоль последних гранит-порфиры ранее подверглись гидротермальной проработке и в последующем наиболее интенсивно выветрены. К этим зонам на участках развития

первичной сульфидной минерализации приурочены пятнисто-гнездовые, жилкообразные и прожилковые выделения вторичных минералов меди, которые окрашены в различные оттенки зеленого и синего цветов. Среди них широко развиты малахит, хризоколл, атакамит и другие минералы Cu (рис. 2). Минералы Cu в исследованных образцах представлены карбонатами, силикатами, сульфатами, хлоридами и уранил-фосфатами.

Malachite $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ встречен исключительно в скважинах на глубинах более 6 м, ниже

Таблица
Результаты рентгенофазового анализа образцов из коры выветривания рудопроявления Сарышаган
 Table
Results of X-ray phase analysis of weathering crust samples of the Saryshagan occurrence

№ пробы	Минеральная фаза	%
К-1/П	Монтмориллонит	42
	Плагиоклаз	20
	Кварц	10
	Гипс	20
	Мусковит 2М1	5
	Доломит	3
К-1/Л	Кварц	39
	Мусковит 2М1	30
	Плагиоклаз	10
	Монтмориллонит	10
	Гипс	5
	Гидрогетит	6
К-1/1*	Атакамит	35
	Кварц	30
	Мусковит 2М1	10
	Метаторбернит	10
	Плагиоклаз	10
	Гипс	5
	Смектиты	сл.

Примечание. Содержания кристаллических фаз приведены к 100 %.* – не учтено присутствие около 20 % рентгеноаморфной хризоколлы.

Note. The content of crystalline phases is 100 %.* – the sample contains ~20 % of X-ray amorphous chryso-colla.

уровня грунтовых вод. Он образует самостоятельные или совместные с хризоколлой выделения без признаков замещения одного минерала другим (рис. 3а). Кристаллы малахита имеют игольчатый облик, собраны в расходящиеся пучки или веера, их размер не превышает 3 мм. Они легко растворяются в HCl с выделением пузырьков газа. На ЭДС спектрах минерала присутствуют линии Cu, O и C (рис. 3а). Отложение малахита происходило совместно или позже отложения хризоколлы, что видно по нарастанию кристаллов малахита на почки хризоколлы в полостях. Напротив, в зоне выше уровня грунтовых вод, соответствующей зоне неполного насыщения (зоне аэрации), отмечаются лишь псевдоморфозы хризоколлы по малахиту.

Хризоколла $Cu_{2-x}Al_x(H_{2-x}Si_2O_5)(OH)_{4b} \cdot nH_2O$ встречена почти во всех исследованных образцах из канав и скважин выше уровня грунтовых вод. По цвету могут быть выделены две разновидности хризоколлы: голубая и цвета морской волны.

Первая разновидность широко развита на верхнем уровне грунтовых вод совместно с малахитом, вторая – выше этого уровня. В образцах, в которых присутствуют обе разновидности, первая слагает зальбанды прожилков, каверн, а вторая выполняет их центральные части. Для голубой хризоколлы характерны натечные скорлуповатые агрегаты с трещинами усыхания.

Во время измерения химического состава голубая хризоколла растрескивается, что указывает на присутствие в ее структуре значительного количества молекулярной воды. В составе доминируют Cu, Si и O, в небольшом количестве присутствуют Al и Ca (рис. 3б). Соотношение $(Cu + Ca + Al) / Si$ варьирует от 0.65 до 0.75, указывая на дефицит Cu. Иногда голубая хризоколла неоднородна по строению и составу: ее внешняя оболочка имеет более высокое $(Cu + Ca + Al) / Si$ отношение, достигающее 0.80, и является более устойчивой к воздействию электронного зонда. Такие неоднородности состава хризоколлы установлены вблизи земной поверхности, что, по нашему мнению, свидетельствует о нестабильности минерала в зоне аэрации. Значительные отклонения в составе от стехиометрии хризоколлы могут быть объяснены тем, что она является не самостоятельным минералом, а может представлять смесь спертинита $[Cu(OH)_2]$, воды и аморфного кремнезема (Farges et al., 2007). Рентгеноструктурный анализ такой хризоколлы (обр. 85/6.2) демонстрирует нечеткую рентгеновскую картину с очень слабыми размытыми пиками в области (Å^{-1}) : 16.2(15), 4.44(80), 4.32(60), 4.10(69), 2.89(72), 2.54(52), 1.63(36), 1.48(43), 1.31(21), принадлежащими хризоколле, а не спертиниту или иному силикату Cu.

Хризоколла цвета морской волны (рис. 2б) широко распространена вблизи земной поверхности. Она состоит из хаотично расположенных длиннопризматических, игольчатых кристаллов размером менее 15 мкм по удлинению, обладающих в скрещенных николях красными и синими интерференционными окрасками первого порядка. Рефлексы на дифрактограммах почти не выражены. В отличие от голубой разновидности, она устойчива под пучком электронов, а ее химический состав характеризуется $(Cu + Ca + Al) / Si$ отношением, равным единице, и отвечает стехиометрии хризоколлы (рис. 3в).

Голубая хризоколла часто содержит слои бежевой, бледно-салатовой, бирюзовой окраски. В их составе преобладают Cu, Al, Si и O, присутствуют примеси Fe, Ca, Mg и Ti. Ранее такие составы были

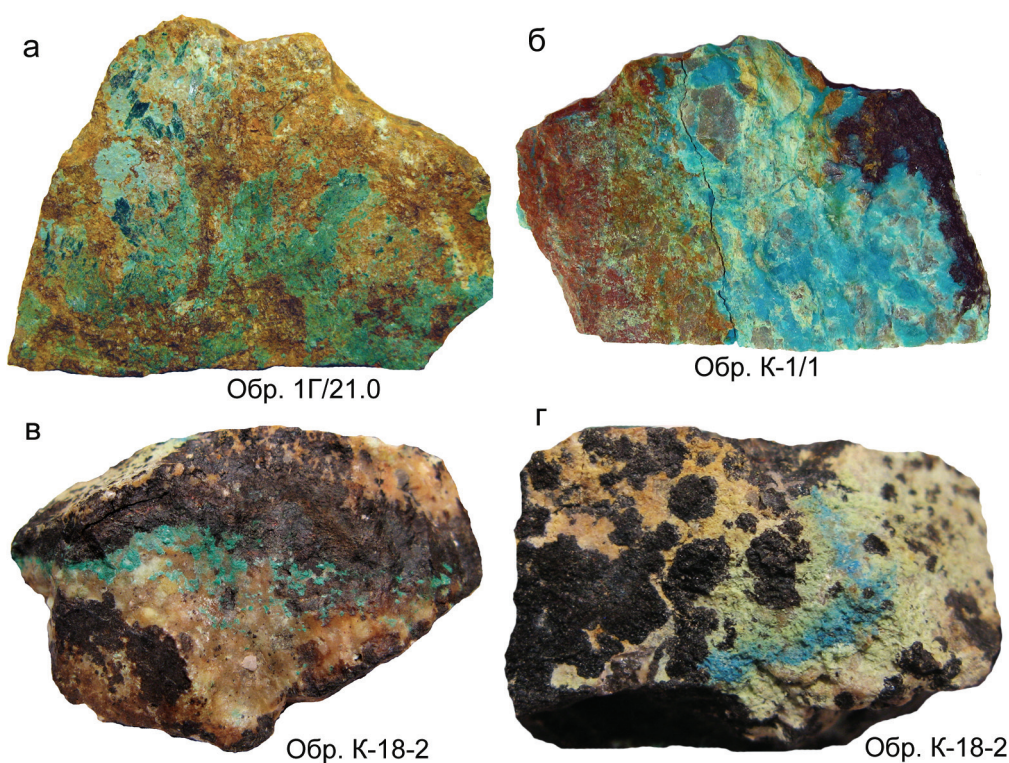


Рис. 2. Образцы с вторичными минералами меди из зоны окисления рудопроявления Сарышаган. а – зеленые кристаллы малахита в окружении голубой хризоколлы; б – прожилки хризоколлы в гематитизированном гранит-порфире; в – выцветы зеленого атакамита на поверхности гранита; г – голубой спанголит и черные гидроксиды Mn.

Размер образцов 3–4 см.

Fig. 2. Samples with secondary Cu minerals from oxidation zone of the Saryshagan occurrence.

а – green malachite crystals surrounded by blue chrysocolla; б – chrysocolla veins in hematitized porphyry granite; в – green atacamite on granite; г – blue spangolite and Mn hydroxides.

The size of samples is 3–4 cm.

описаны на Джекказганском медном месторождении как медмонтит, структурные исследования которого в последствии показали, что медмонтит является смесью переменных количеств хризоколлы и мусковитовой слюды (Чухров и др., 1968). В данном случае отсутствие в составе К, скорее, указывает на примесь в хризоколле глинистых минералов, например каолинита. О присутствии последних также говорят данные рентгеноструктурного анализа образцов хризоколлы и измененных вмещающих пород.

Хлориды Cu представлены атакамитом, спанголитом и, предположительно, коннеллитом. Эти минералы развиты в зоне аэрации, где они образуют тонкие корочки на хризоколле, гипсе или скопления среди глинистых минералов. Среди них наиболее часто встречается *атакамит* $Cu_2Cl(OH)_3$. Его окраска варьирует от зеленой до изумрудной с темно-серым оттенком; кристаллы встречаются

как прозрачные, так и матовые. Атакамит образует кристаллы короткопризматического облика с хорошо развитыми ромбическими призмами (рис. 4а), иногда со следами коррозии на гранях и многочисленными порами и реже слагает таблитчатые или досчатые кристаллы (рис. 4б), нарастающие на ранее образованные индивиды этого же минерала. Размер кристаллов колеблется от 20 до 100 мкм. Основные линии на рентгенограмме, Å(I): 5.49(100), 5.03(90), 2.28(80), 2.78(80), 2.76(40), 1.61(40). В химическом составе присутствуют Cu, Cl и O (рис. 4г); содержание атомов Cu в два раза больше содержания атомов Cl.

Спанголит $Cu_6Al(SO_4)(OH)_{12}Cl \cdot 3(H_2O)$ встречается в виде голубых налетов, состоящих из микрокристаллов дитригонально-пирамидального облика размером 5–10 мкм (рис. 4в). В составе присутствуют Cu, Al, Cl, S и O; соотношения элементов близки к идеальной формуле минерала (рис. 3д).

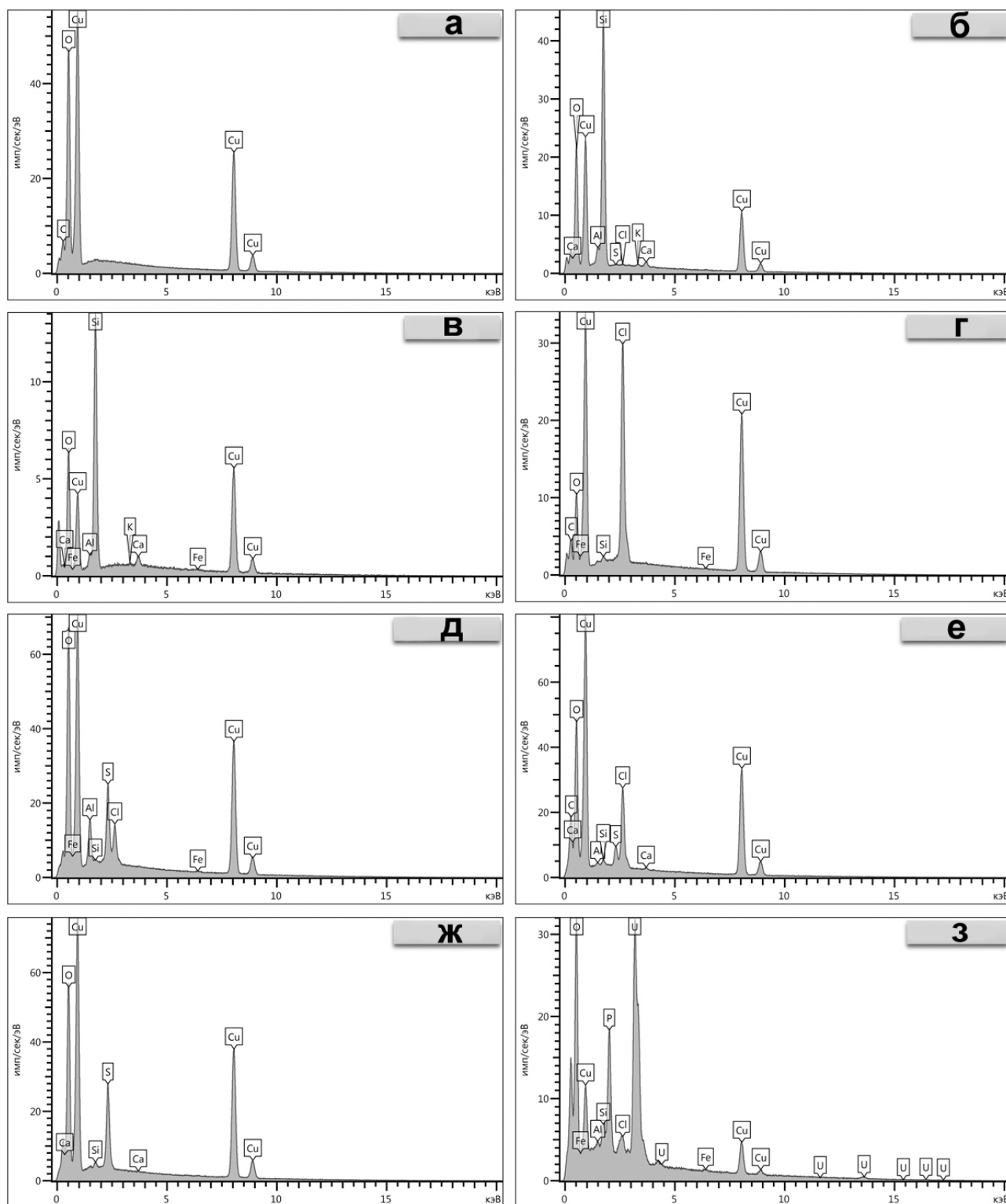


Рис. 3. Энергодисперсионные спектры медьсодержащих минералов.

а – малахит; б – голубая хризоколла с дефицитом Cu; в – хризоколла цвета морской волны; г – атакамит; д – спанголит; е – серосодержащий хлорид Cu; ж – сульфат Cu, предположительно, брошантит; з – метаторбернит.

Fig. 3. Energy dispersive spectra of Cu-bearing minerals.

а – malachite; б – light blue chrysocolla with Cu deficit; в – aquamarine chrysocolla; г – atacamite; д – spangolite; е – S-bearing Cu chloride; ж – Cu sulfate, probably, brochantite; з – metatorbernite.

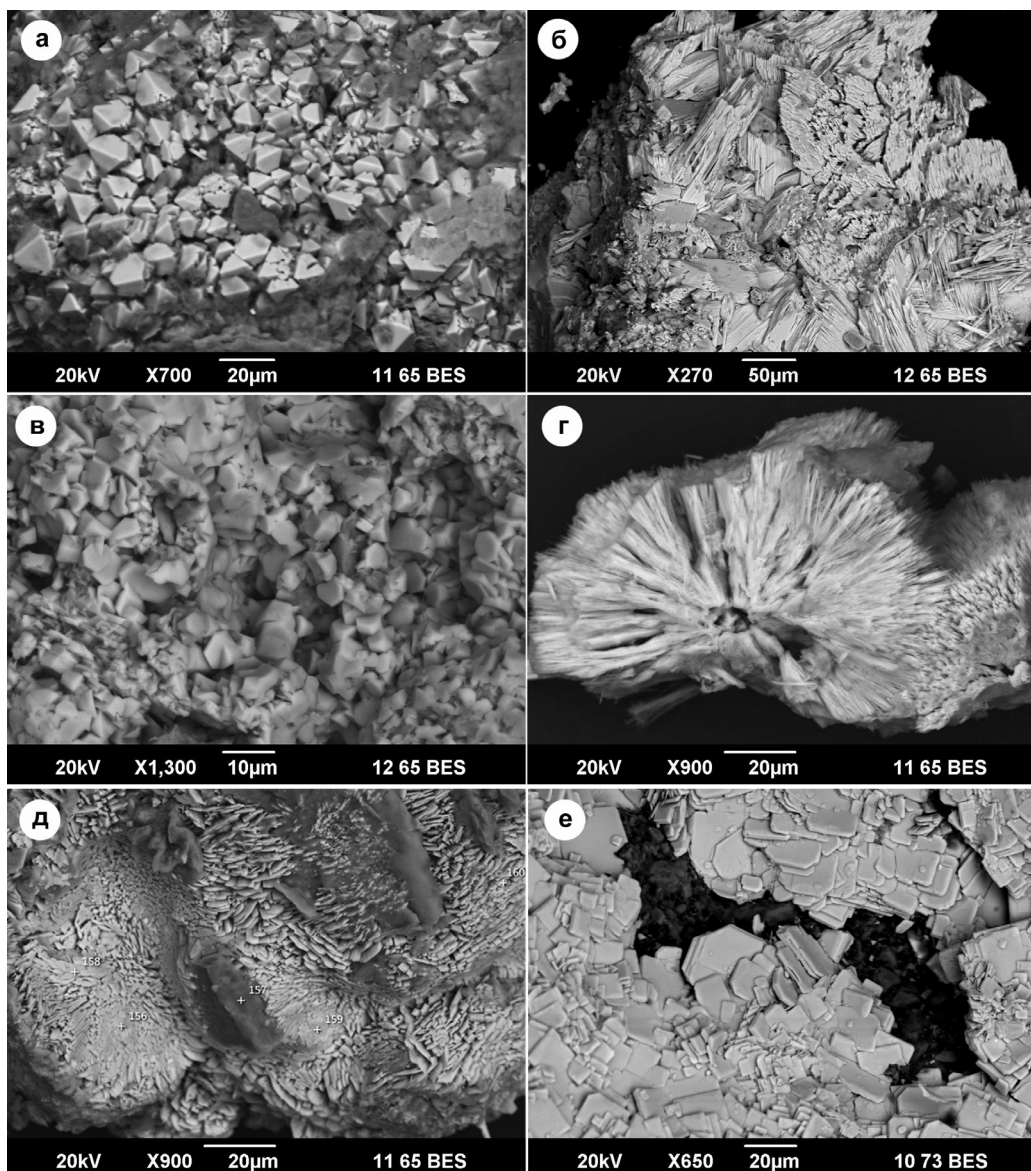


Рис. 4. Морфология минералов меди из зоны окисления рудопроявления Сарышаган.

а – кристаллы атакамита с развитыми ромбическими призмами; б – щепковидные кристаллы атакамита; в – друза кристаллов спанголита; г – сферолит серосодержащего хлорида Cu; д – расщепленные кристаллы сульфата Cu, предположительно, брошантита; е – плитчатые кристаллы метаторбернита на хризоколле.

BSE фото. Фото а, в, г, д – обр. К-18-2; фото б – обр. К-19-2; фото е – обр. К-1/1.

Fig. 4. Morphology of Cu minerals from oxidation zone of the Saryshagan occurrence.

а – atacamite crystals with rhombic prisms; б – lath atacamite crystals; в – druse of spangolite crystals; г – spherulite of S-bearing Cu chloride; д – split crystals of Cu sulfate, probably, brochantite; е – platy metatorbernite crystals on chrysocolla. BSE images. Photos а, в, г, д – sample K-18-2; photo б – sample K-19-2; photo е – sample K-1/1.

Еще один хлорсодержащий минерал формирует тонкие корки с многочисленными порами испарения, а также слагает волокнистые агрегаты и неплотные сферолиты диаметром до 100 мкм, состоящие из игольчатых кристаллов (рис. 4г). Окраска минерала синяя. Он ассоциирует с сульфатом Cu, покрывая поверхности гипса и атакамита. В составе присутствуют Cu, Cl, S и O, а также небольшая

примесь Ca, Si и Al (рис. 3е). Морфология, окраска и соотношения элементов в составе близки коннеллиту.

Сульфат Cu в форме собранных в сферолиты расщепленных кристаллов досчатой формы установлен совместно с гипсом и сульфатсодержащими хлоридами (рис. 4д). Размер кристаллов менее 30 мкм. Окраска минерала светло-синяя. В составе

присутствуют Cu, S и O (рис. 3ж); отношение Cu к S равно 4. Содержание O примерно в 10 раз больше содержания S. Такой состав близок *брошантиту*, однако нельзя исключать и иные фазы сходного состава.

Метаторбернит $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ заполняет или инкрустирует трещины, секущие минералы зоны окисления, что указывает на его позднее отложение. Метаторбернит имеет зеленую окраску и сильный стеклянный (до алмазного) блеск. Кристаллы в форме тетрагональных табличек часто расположены в виде черепицы или собраны подобно лепесткам розы (рис. 4е). Их размер не превышает 50 мкм, в огранке преобладают простые формы: {001}, {011}, {101}, {110}. Основные линии на рентгенограмме, Å(1): 3.67(100), 8.65(100), 3.48(80), 3.23(70), 4.92(60). По данным ЭД спектрометра в химическом составе доминируют Cu, U, P и O, иногда отмечается присутствие Si, Al, Fe и Cl, обусловленное минеральными включениями атакамита и хризоколлы (рис. 3з).

Среди остальных минералов зоны окисления широко развиты гипс разной морфологии (в форме скрученных кристаллов, лепешек, гипсовых роз, частично растворенных зерен и агрегатов), гидроксиды Mn, содержащие переменное количество CuO (до 20 мас. %) и небольшое количество CoO (< 2 мас. %). Редко встречаются гипергенные гидроксил-апатит и флюорит.

Обсуждение результатов

Согласно данным (Чухров, 1950, с. 62), наличие атакамита в зоне окисления медных месторождений Казахстана указывает на связь его появления не только с засушливым климатом, но и с особенностями рельефа: «...атакамит наименее характерен для месторождений, приуроченных к повышенным участкам рельефа (Коунрад, Коктасджаргас, Беркара). Это объясняется незначительным содержанием или отсутствием хлора в окружающих породах и почвах вследствие его сноса в пониженные участки рельефа». С этой точки зрения, расположение рудопроявления Сарышаган на равнинной территории с участками, занятыми солончаками (Сваричевская, 1965) весьма благоприятно для засоления грунтовых вод и появления в зоне испарения хлоридов Cu. Классическим примером развития атакамита в подобной обстановке являются окисленные руды молибден-медно-порфинового месторождения Чуккамата в пустыне Атакама, Чили (Dold, 2006).

На этом месторождении в условиях гипераридного климата интенсивное испарение влаги приводит к пересыщению грунтовых вод относительно кремнезема, ионов SO_4^{2-} , Cl^- и отложению кварца, хризоколлы, атакамита, гипса.

Другим ключевым минералом, характеризующим процесс окисления сульфидных руд, является хризоколла – индикатор нейтральных или щелочных условий формирования зон гипергенеза на месторождениях с Cu минерализацией. Как показывают измерения кислотности рудничных вод и термодинамическое моделирование, жидкости, из которых осаждаются хризоколла, обычно имеют pH от 5 до 9 (Williamson, 1994; Yates et al. 1998; Chavez, 2000). В то же время, для образования коллоидных частиц силиката Cu необходимы достаточные концентрации SiO_2 . Источником кремниевой кислоты служат выветривающиеся силикатные породы, залегающие у поверхности или испытывающие воздействие серной кислоты, получаемой в результате окисления сульфидов. При этом климатические условия, характеризующиеся небольшим количеством осадков и усиленным процессом испарения, способствуют осаждению Cu и SiO_2 ниже по разрезу зоны аэрации и формированию сульфатного и сульфатно-хлоридного состава грунтовых вод.

Формирование малахита в зоне окисления требует наличие давления CO_2 в растворе на уровне $10^{-1.5}$ – $10^{-2.5}$ атм (Rose, 1989; Dold, 2006; De Putter et al., 2010). Такие условия реализуются в подземных водах, тогда как для вод в равновесии с атмосферой P_{CO_2} обычно ниже $10^{-3.4}$ атм. Таким образом, малахит легко образуется в среде полного насыщения подземными водами, т.е. ниже зоны просачивания/испарения. Отсутствие на этом уровне азурита свидетельствует об относительно низком давлении CO_2 и повышенной щелочности растворов.

Специфика состава вод областей с аридным типом климата, заключающаяся в их повышенной минерализованности в направлении ионов $HCO_3^- \rightarrow SO_4^{2-} \rightarrow Cl^-$ (Посохов, 1969), обуславливает широкое развитие малахита, хризоколлы, гипса, атакамита и их закономерное распределение по разрезу. В нижней части разреза в зоне насыщения развит малахит (иногда совместно с хризоколлой), что определяется наличием растворенного CO_2 , отчасти выделяющегося за счет реакции кислых сульфатсодержащих вод с карбонатами метасоматически измененных пород. Выше этой зоны широко развита хризоколла в виде колломорфных агрегатов, отлагающаяся из растворов с высоким содер-

жанием растворенного SiO_2 и низким P_{CO_2} . Наличие в этой зоне псевдоморфоз хризоколлы по малахиту может быть объяснено повышением уровня эрозийного среза и понижением, соответственно, уровня грунтовых вод вследствие неотектонического воздымания территории Западного и Северного Прибалхашья.

В зоне интенсивного испарения и ниже почвенного горизонта за счет нейтрализации минерализованных вод сульфатного профиля формируется гипсовая сыпучка. Здесь же развиты хлориды и сульфаты Cu , особенно на участках понижения рельефа, занятых солончаками.

Особо отметим наличие повышенных концентраций U , фиксируемых в пройденных скважинах данными гамма-каротажа на глубинах 6–9 м. Эта глубина совпадает с зоной колебания уровня грунтовых вод, что позволяет предполагать присутствие на площади исследуемого участка U минерализации трещинно-инфильтрационного типа (Петров и др., 1995; Кисляков, Щеточкин, 2000). В связи с ограниченностью материала минералы U в этой зоне пока не обнаружены. Тем не менее, их присутствие в форме метаторбернита, выполняющего сеть тончайших трещин, наложенных на образования коры выветривания, установлено в локальных участках верхней части разреза зоны аэрации. В этой связи встает вопрос об источнике U и типе U -минерализации, что может явиться предметом отдельного исследования. Можно предположить, что появление в зоне аэрации метаторбернита связано с колебанием уровня минерализованных грунтовых вод, граница которых в настоящее время понижена. Причиной такого явления могли быть как неравномерное глыбовое неотектоническое воздымание территории, так и колебания уровня оз. Балхаш, северная часть вод которого интенсивно засолена.

Исследование вторичных минералов Cu показало их концентрацию в трещинных зонах с образованием прожилков и скоплений мощностью до первых сантиметров. Такая локализация Cu в форме легко растворимых солей кислородных кислот в коре выветривания резко контрастирует с локализацией Cu в форме тонкой рассеянной вкрапленности сульфидов в гранит-порфирах. В этой связи локализация и обогащение Cu трещинных зон может рассматриваться как положительный фактор при постановке отработки окисленных руд методом подземного выщелачивания. Кроме того, повышенные концентрации U в образованиях верхней части

коры выветривания на рудопоявлении обуславливают необходимость проведения более детальных исследований по выделению и комплексной оценке различных промышленно-технологических типов руд с учетом того, что в данном регионе имеются эффективные схемы переработки подобных образований.

Заключение

В результате исследований минералогии зоны окисления $\text{Cu}(\text{Mo})$ -порфирового рудопоявления Сарышаган, Центральный Казахстан, установлено: 1) широкое развитие силикатов и хлоридов Cu , отражающее формирование зоны окисления в условиях засушливого климата; 2) зональное распределение по разрезу вторичных минералов Cu в зависимости от положения уровня грунтовых вод, их состава и типа; 3) присутствие в верхних горизонтах зоны окисления уранил-фосфатной минерализации гидрогенного трещинно-инфильтрационного типа, наложенной на образования зоны окисления.

Работа выполнена в рамках договора № 1901 на выполнение научного сопровождения и комплекса лабораторных исследований в процессе работ по геологическому доизучению площади Шагала (Центральный Казахстан), а также государственного задания ИГГ УрО РАН, № госрегистрации АААА-А18-118052590034-0.

Литература

- Геологическая карта Казахстана (2004) Масштаб 1:1000000. Алматы, МПР и ООС РК.
- Геологическое строение Казахстана (2000) Алматы, МПР и ООС РК, 394 с.
- Изотов В.В., Скрипченко А.Ф., Земзюлин Д.П. и др.** (1983ф) Отчет о детальных поисковых работах в пределах Западно-Балхашского синклинория за 1978–1983 гг. Джамантузская партия. Джезказганская обл., Караганда.
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н.** (2000) Гидрогенное рудообразование. М., ЗАО Геоинформмарк, 608 с.
- Магматические комплексы Казахстана: Джунгаро-Балхашская складчатая система (1983) Алма-Ата, Наука, 216 с.
- Мирошниченко Л.А., Жуков Н.М.** (2006) Геодинамические обстановки формирования и перспективные оценки меденосных металлогенических комплексов Казахстана. *Известия НАН РК, Серия геологическая*, (6), 10–17.

Петров Н.Н., Язык В.Г., Аубакиров Х.Б., Плеханов В.Н., Вершков А.Ф., Лухтин В.Ф. (1995) Урановые месторождения Казахстана: (экзогенные). Алматы, Гылым, 264 с.

Полетаев А.И., Мельникова Л.В., Нуртуганов П.М., Тимофеева С.Н. (1983ф) Отчет по теме «Оценка перспектив Сарышаганского и Сокурского рудных узлов» за 1980–1983 гг. (заключительный) Алмата, Министерство геологии Казахской ССР, КАЗИМС.

Посохов Е.В. (1969) Формирование химического состава подземных вод. Л., Гидрометеоздат, издание 2-е, 332 с.

Сваричевская З.А. (1965) Геоморфология Казахстана и Средней Азии. Л., ЛГУ, 295 с.

Смирнов С.С. (1951) Зона окисления сульфидных месторождений. М., АН СССР, 335 с.

Цаплин Г.В. (1956ф) Отчет Куланской геологоразведочной партии за 1955–1956 гг. МГ и ОН КазССР, Южно-Казахстанское геологическое управление. Караганда.

Чухров Ф.В. (1950) Зона окисления сульфидных месторождений степной части Казахстана. М., АН СССР, 244 с.

Чухров Ф.В. (1960) Минералогия и зональность Восточного Коунрада. М., АН СССР. Тр. ИГЕМ. Вып. 50, 239 с.

Чухров Ф.В., Звягин Б.Б., Горшков А.И., Ермилова Л.П., Рудницкая Е.С. (1968) О природе медмонтитов. *Известия Академии наук СССР, Серия геологическая*, (7), 67–71.

Berger B.R., Mars J.C., Denning P.D., Phillips J.D., Hammarstrom J.M., Zientek M.L., Dicken C.L., Drew L.J. et al. (2014) Porphyry copper assessment of western Central Asia. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5090–N*, 219 p.

Chavez W.X. (2000) Supergene oxidation of copper deposits: zoning and distribution of copper oxide minerals. *SEG Newsletter*, 41, 10–21.

De Putter T., Mees F., Decree S., Dewaele S. (2010) Malachite, an indicator of major Pliocene Cu remobilization in a karstic environment (Katanga, Democratic Republic of Congo). *Ore Geology Reviews*, 38(1–2), 90–100.

Dold B. (2006) Geochemical modelling of the exotic mineralization of the Exotica deposit at Chuquicamata, Chile. *Actas 11th Congreso Geológico Chileno: Geología Económica*, 2, 247–250.

Farges F., Benzerara K., Brown G.E. (2007) Chrysocolla redefined as spertiniite / Hedman B. and Painetta P. (eds), *AIP Conference Proceedings*, 882. *13th International Conference on X-Ray Absorption Fine Structure (XAFS13)*, 223–225.

Rose A.W. (1989) Mobility of copper and other heavy metals in sedimentary environments. In: Boyle R.W., Brown A.C., Jefferson C.W., Jowett E.C., Kirkham R.V. (Eds.), *Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits: Geological Association of Canada, Special Paper*, 36, 97–110.

Williamson M.A. (1994) Precipitation and solubility of chrysocolla in near-neutral pH mine drainage solutions, south-central Wyoming. *GSA Abstracts*, 26, A353.

Yates D.M., Joyce K.J., Heaney P.J. (1998) Complexation of copper with polymeric silica in aqueous solution. *Applied Geochemistry*, 13, 235–241.

References

Berger B.R., Mars J.C., Denning P.D., Phillips J.D., Hammarstrom J.M., Zientek M.L., Dicken C.L., Drew L.J. et al. (2014) Porphyry copper assessment of western Central Asia. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5090–N*, 219 p.

Chavez W.X. (2000) Supergene oxidation of copper deposits: zoning and distribution of copper oxide minerals. *SEG Newsletter*, 41, 10–21.

Chukhrov F.V. (1950) [Oxidation zone of sulfide deposits in steppe part of Kazakhstan]. Moscow, AN USSR, 244 p. (in Russian)

Chukhrov F.V. (1960) [Mineralogy and zonality of East Kounrad]. Moscow, AN USSR. Tr. IGEM. Is. 50, 239 p. (in Russian)

Chukhrov F.V., Zvyagin B.B., Gorshkov A.I., Ermilova L.P., Rudnitskaya E.S. (1968) [Nature of medmontites]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya [News of Academy of Sciences of the USSR, geological series]*, (7), 67–71. (in Russian)

De Putter T., Mees F., Decree S., Dewaele S. (2010) Malachite, an indicator of major Pliocene Cu remobilization in a karstic environment (Katanga, Democratic Republic of Congo). *Ore Geology Reviews*, 38(1–2), 90–100.

Dold B. (2006) Geochemical modelling of the exotic mineralization of the Exotica deposit at Chuquicamata, Chile. *Actas 11th Congreso Geológico Chileno: Geología Económica*, 2, 247–250.

Farges F., Benzerara K., Brown G.E. (2007) Chrysocolla redefined as spertiniite. In: Hedman B. and Painetta P. (eds), *AIP Conference Proceedings*, 882. *13th International Conference on X-Ray Absorption Fine Structure (XAFS13)*, 223–225.

[Geological map of Kazakhstan on 1:1000000 scale] (2004). Алматы, МРР и ООС РК (in Russian)

[Geological structure of Kazakhstan] (2000) Алматы, МРР и ООС РК. 394 p. (in Russian)

Izotov V.V., Skripchenko A.F., Zemzyulin D.P. et al. (1983) [Report on detailed survey works within the Western Balkhash Synclinorium for 1978–1983]. The Dzhamantus Party. Dzhzhkazgan region, Karaganda. (in Russian)

[Igneous complexes of Kazakhstan: Dzhungar-Balkhash fold system] (1983) Alma-Ata, Nauka, 216 p. (in Russian)

Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M. (2006) [Geodynamic settings of formation and prospects of Cu-bearing metallogenic complexes of Kazakhstan]. *Izvestiya NAN RK, seriya geologicheskaya [News of NAS RK, geological series]*, (6), 10–17. (in Russian)

- Petrov N.N., Yazikov V.G., Aubakirov Kh.B., Plekhanov V.N., Vershkov A.F., Lukhtin V.F.** (1995) [Exogenic U deposits of Kazakhstan]. Almaty, Gylym, 264 p. (in Russian)
- Poletaev A.I., Mel'nikova L.V., Nurtuganov P.M., Timofeeva S.N.** (1983) [Report on «Assessment of prospects of the Saryshagan and Sokur ore clusters» for 1980–1983]. Alma-Ata, Ministry of Geology of the Kazakh SSR, KazIMS. (in Russian)
- Posokhov E.V.** (1969) [The formation of chemical composition of groundwater]. Leningrad, Gidrometizdat, second edition, 332 p. (in Russian)
- Rose A.W.** (1989) Mobility of copper and other heavy metals in sedimentary environments. In: Boyle R.W., Brown A.C., Jefferson C.W., Jowett E.C., Kirkham R.V. (eds.), *Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits: Geological Association of Canada, Special Paper*, **36**, 97–110.
- Svarichevskaya Z.A.** (1965) [Geomorphology of Kazakhstan and Central Asia]. Leningrad, LGU, 259 p. (in Russian)
- Smirnov S.S.** (1951) [Oxidation zone of sulfide deposits]. Moscow, AN SSSR, 335 p. (in Russian)
- Tsaplin G.V.** (1956) [Report of the Kulan Exploration Party for 1955–1956]. Karaganda, MG KazSSR. (in Russian)
- Williamson M.A.** (1994) Precipitation and solubility of chrysocolla in near-neutral pH mine drainage solutions, south-central Wyoming. *GSA Abstracts*, **26**, A353.
- Yates D.M., Joyce K.J., Heaney P.J.** (1998) Complexation of copper with polymeric silica in aqueous solution. *Applied Geochemistry*, **13**, 235–241.

Статья поступила в редакцию 27 января 2020 г.

ТУРМАЛИН ИЗ ПОЗДНИХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА МУРТЫКТЫ, РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН

М.А. Рассомахин, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов, П.В. Хворов

*Южно-Уральский федеральный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; Miha_Rassomahin@mail.ru*

TOURMALINE FROM LATE QUARTZ VEINS OF THE MURTYKTY GOLD DEPOSIT, REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

M.A. Rassomakhin, E.V. Belogub, K.A. Novoselov, P.V. Khvorov

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; Miha_Rassomahin@mail.ru*

Изучен турмалин – промежуточный член ряда оксишерл-оксидравит-оксимагнезиофойтит-бозиит с преобладанием оксидравитового-бозиитового миналов из поздних кальцит-кварцевых жил Восточной зоны месторождения золота Муртыкты (Республика Башкортостан). Сульфидная минерализация в этих жилах представлена единичными халькопиритом, пиритом, сфалеритом и галенитом. Среди аксессуарных минералов установлены ксенотим-(Y), ванадийсодержащий рутил и тонкое высокопробное золото. Гипергенная минерализация, связанная с разложением карбонатов, сульфидов и породообразующих силикатов, представлена каолинитом, гидроксидами Mn (халькофанит, псиломелан) и Fe (гетит, рентгеноаморфные лимонитовые охры), развитыми преимущественно в полостях жилы; халькопирит замещается купритом и малахитом. Состав изученного турмалина близок к метаморфогенному дравиту орогенных золоторудных месторождений и турмалину золото-порфиновых месторождений, переходных от порфиновых к эпитермальным. Рассматривается два вероятных источника В для образования турмалина: осадки палеоостроводужного комплекса и гранодиориты Мансуровского массива.

Илл. 9 Табл. 1 Библ. 36

Ключевые слова: турмалин, бор, золото, ксенотим-(Y), Муртыкты, Башкортостан

Tourmaline, an intermediate member of the oxyschorl–oxydravite–oxymagnesio-foitite-bosiite series with a predominance of the oxy-dravite-bosiite end-member, was studied from late calcite-quartz veins in the eastern zone of the Murtykty gold deposit (Republic of Bashkortostan). Sulfide mineralization in veins includes rare chalcopyrite, pyrite, sphalerite and galena. Accessory minerals are xenotime-(Y), vanadium-containing rutile and fine high-fineness gold. Supergene mineralization resulted from decomposition of carbonates, sulfides and rock-forming silicates includes kaolinite, hydroxides of Mn (chalcophanite, psilomelane) and Fe (goethite and limonite ochers), mainly developed in vein cavities ; chalcopyrite is replaced by cuprite and malachite. The composition of tourmaline is close to metamorphic dravite of orogenic gold deposits and tourmaline of gold-porphyry deposits, transitioning from porphyry to epithermal. Two possible B sources for the formation of tourmaline are considered: sedimentary rocks of the paleoisland-arc complex and granodiorites of the Mansurovo pluton.

Figures 9. Table 1. References 36.

Key words: tourmaline, boron, gold, xenotime-(Y), Murtykty deposit, Republic of Bashkortostan.

Введение

Турмалин встречается во многих геологических обстановках. Он образуется в магматических породах, пегматитах, метасоматитах, гидротермальных жилах и метаморфических породах в широком диапазоне РТ-условий (Henry, Guidotti, 1985; Koval et al., 1991; Hinsberg et al., 2011; Slack, Trumbull, 2011). Кристаллохимическая формула супергруппы турмалина $X(Y_3)Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$, где позиция X занята крупными катионами (Ca, Na, K, Pb) или вакантна, Y – средними или мелкими катионами с зарядом +2 и +3 (Al, Fe²⁺, Fe³⁺, Li, Mg²⁺, Mn²⁺, Ti), Z – мелкими катионами с зарядом +3, T – Si с незначительной возможностью замещения на В и Al, V – гидроксильной группой, W – как гидроксил, так и O²⁻ и F (Henry et al., 2011). Для турмалина свойственны широкие изоморфные замещения, в частности в позиции Y , и связанная с ними возможность упорядочения катионов в позиции Y (Watenphul et al., 2016; Vereshchagin et al., 2018).

Основной поток информации о турмалинах до недавнего времени был связан с изучением гранитов и связанных с ними пегматитов (London et al., 1996; Henry, Dutrow, 2018). В то же время, типоморфные особенности турмалина из месторождений цветных и благородных металлов рассматривались в работах В.И. Кузьмина с соавторами (1979), Ф. Пирайно и Р. Смайтиса (Pirajno, Smithies, 1992), И.А. Бакшеева с соавторами (Baksheev et al., 2012 и др.) и многими другими. В результате этих исследований наиболее детально были изучены турмалины медно-порфириновых и медно-молибден-порфириновых месторождений (Бакшеев, Плотинская, 2011; Baksheev et al., 2012, Voudouris et al., 2019) и жильных олово-вольфрамовых месторождений, связанных с гранитоидным магматизмом (Pirajno, Smithies, 1992; Jiang et al., 2008; Nekouvaght Tak, Bazargani-Guilani, 2009). Орогенные месторождения золота также часто сопровождаются турмалиновой минерализацией (Dommang et al., 1993; Deksissa, Koeberl, 2002; Hazarika, Mishtra, 2015).

На основе обработки большого количества анализов В.И. Кузьминым с соавторами (1979) показано, что примесь Mn характерна для турмалина из редкометалльных месторождений, в то время как его содержания в турмалине из оловорудных и полиметаллических ассоциаций не превышают 0.2 мас. % (в среднем, 0.05 и 0.04 мас. %, соответственно). Для кварцево-жильных месторождений Sn и Sn-W Намибии установлено, что шерл

со значением FeO / (FeO + MgO) 0.8–1.0 типичен для жильных систем оловоносных гранитов, в то время как турмалин этого же ряда, но с повышенным содержанием Mg, характерен для удаленных от гранитов, но генетически связанных с ними жил с отношением FeO / (FeO + MgO) = 0.6–0.8 (Pirajno, Smithies, 1992). Сходная картина установлена для оловорудного месторождения Хнилек (Словакия), где на основании изучения изотопии В было показано увеличение содержания дравитового минала в турмалине поздних стадий рудообразования, когда в процесс, помимо магматогенного, вовлекался также метаморфогенный флюид (Jiang et al., 2008).

Турмалин из медно- и медно-молибден-порфириновых месторождений характеризуется секториальностью и осцилляторной зональностью, часто образует несколько генераций с постепенным возрастанием магнезиальности. Для него также характерны повышенные содержания Cu и Sn (Baksheev et al., 2012). Турмалин из золото-сульфидно-кварцевых и золотосодержащих порфириновых месторождений Забайкалья и Монголии соответствует окситурмалину серии шерл-дравит с характерным повышенным содержанием примеси As (Koval et al., 1991). На Cu-Au-Mo месторождении Факос (Греция) турмалин из серицитовых метасоматитов принадлежит серии оксидравит-оксишерл и обогащен железом по сравнению с оксидравитом-магнезиофойтитом из цемента более поздних брекчий, что трактуется как свидетельство промежуточного положения месторождения между порфириновыми и эпitherмальными (Voudouris et al., 2019).

Турмалин золоторудных месторождений изучен слабее. На орогенном месторождении золота Хатти (зеленокаменный пояс Хатти-Маски, Индия) турмалин представлен дравит-оксидравитом с отношением Mg / (Mg + Fe) = 0.77 и значительным дефицитом заполнения позиции А, что рассматривается как свидетельство его кристаллизации из метаморфогенных, богатых Mg флюидов с низкой соленостью (Hazarika, Mishtra, 2015). Турмалин, образованный при диагенезе и низкотемпературном метаморфизме, имеет, преимущественно, дравитовый-оксидравитовый состав, хотя он может наследовать повышенные содержания Fe обломочного турмалина гранитоидного происхождения (Henry, Dutrow, 2012).

На рудных месторождениях Урала турмалин как основной концентратор В описан на Березовском и Кочкарском месторождениях золота, связанных с гранитоидным магматизмом, и Еленовском

медно-порфириновом месторождении. Однако, борная минерализация известна также и на месторождениях, локализованных в вулканогенно-осадочных толщах. Находки аксинита известны на Учалинском медноколчеданном месторождении (Плетнев, 1995а), Уразовском и Кожаевском месторождениях марганца (Барсанов, 1951; Плетнев, 1995б). Вопрос происхождения борной минерализации и, в частности, турмалина в вулканогенно-осадочных комплексах Южного Урала остается открытым.

Первые находки обломков кристаллов кварца с включениями турмалина на горе Муртыкты (Республика Башкортостан) были сделаны в 80-х годах XX в. В 1999 г. при вскрышных работах в карьере Восточной зоны месторождения золота Муртыкты (восточный склон одноименной горы) геологом Башкирской золотодобывающей компании И.Б. Купцовым были обнаружены жилы кварца с включениями карбонатов и игольчатого голубовато-серого минерала, предположительно определенного им как турмалин.

Цель работы – установление генезиса поздних турмалиносодержащих жил на месторождении золота Муртыкты на основе выявления типоморфных особенностей турмалина и оценки условий его формирования.

Методы исследования

Образцы жил для исследования (более 30 шт.) были отобраны из карьера Восточной зоны в 2006 и 2019 гг. Состав турмалина изучен в 5 образцах из различных жил, включая кварц-турмалиновые агрегаты с различным соотношением основных минералов и фрагменты турмалинового «войлока» из полостей жилы. Состав зон и секторов роста определен для четырех кристаллов из разных образцов, также получены анализы для отдельных кристаллов.

Состав турмалина и сопутствующих минералов изучен в полированных препаратах при помощи растрового электронного микроскопа Tescan Vega 3 sbu с энерго-дисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments X-act (аналитик М.А. Рассомахин, ускоряющее напряжение 20 кВ, «живое» время 120 с, эталоны МАС (Micro-analysis consultants LTD, рег. № 1362) и MINM25-53, (Astimex Scientific Limited, серийный номер 01-044).). Все железо в анализах турмалина пересчитано как Fe_2O_3 для достижения реалистичных расчетных сумм. Формулы рассчитаны на 15 катионов, занимающих позиции

Y , Z и T ; содержания V_2O_5 и H_2O – по стехиометрии с учетом электронейтральности формулы.

Диагностика минералов (турмалин, смеси гипергенных минералов) была подтверждена методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-6000, Cu-K α излучение с графитовым монохроматором, скорость съемки 1°/мин (аналитики П. В. Хворов, Е.Д. Зенович). Параметры элементарной ячейки (ПЭЯ) турмалина рассчитаны по порошковым дифрактограммам для трех проб турмалина (выделенного из кварца-волосатика, корки на кристалле кварца и «войлока»). ПЭЯ рассчитаны методом наименьших квадратов по 17 (первые две пробы) и 9 интенсивным отражениям, не перекрывающимся с кварцем и возможным примесям гипергенных оксидов марганца, в диапазоне 6–1.5 Å. В качестве внутреннего эталона использован кварц. Содержания цветных металлов оценены при помощи портативного рентгенофлуоресцентного анализатора INNOV-X, аналитик Е.Д. Зенович. Все работы выполнены в ЦКП при ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (Миасс). Для рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализа использованы дубликаты проб, для которых получен состав турмалина.

Геологическая позиция

Месторождение золота Муртыкты расположено в 13–15 км от г. Учалы Республики Башкортостан, между деревнями Сафарово, Мансурово и Ильинка, в 20 км от гигантского Учалинского медноколчеданного месторождения. Месторождение расположено в северной части Восточно-Магнитогорской палеоостровной дуги среди вулканогенно-осадочных пород карамалыташской свиты D₂ef-zv в непосредственной близости к Шартымскому разлому. Геологическая структура месторождения в целом соответствует направлению Главного Уральского разлома (Знаменский, 1992; Сазонов и др., 1999). Простираение пород северо-восточное под углами 5–20°. Направление расланцевания изменяется от (аз. пад.) 100 до 280–290 при углах 70–85°. Месторождение сложено измененными вулканитами базальтового, андезитобазальтового состава и их туфами, кремнистыми пелитолитами, вулканомиктовыми песчаниками и алевропелитами (рис. 1). Преобразования выражены в серицитизации, карбонатизации и хлоритизации пород, а также образовании наложенного пирита.

На месторождении выделено три рудные зоны – Восточная, Промежуточная и Западная. На мо-

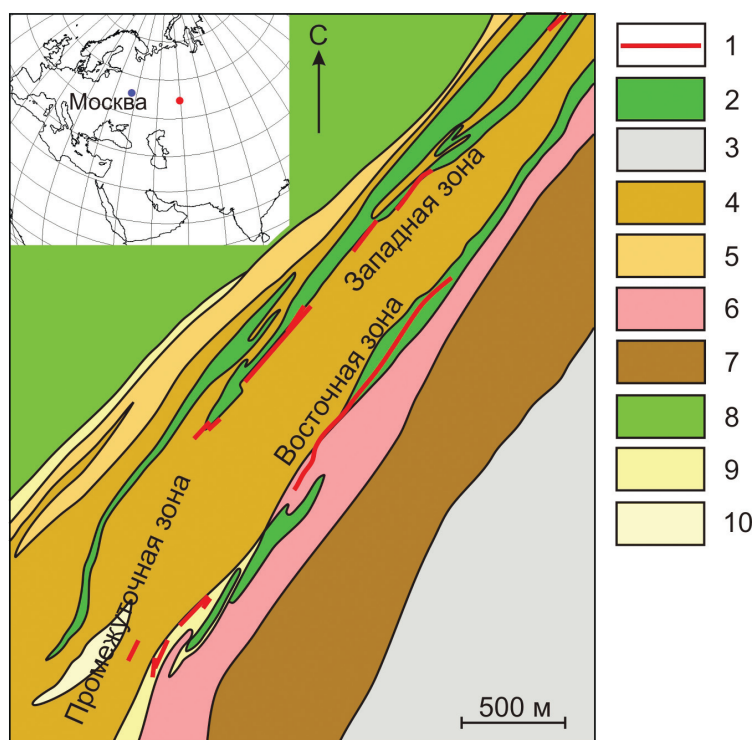


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Муртыкты (по неопубликованным материалам В.В. Козлова, с упрощениями).

1 – жилые зоны; 2 – диабазы; 3 – туфобрекчии, туфопесчаники D_3fr ; 4 – туфопесчаники D_2e ; 5 – лавобрекчии D_2e ; 6 – кремнистые сланцы D_2e ; 7 – туфы, туфобрекчии D_2gv ; 8 – андезибазальты D_{1-2} ; 9 – карбонат-серicits-кварцевые породы; 10 – кварц-серicitsовые породы.

Fig. 1. Geological map of the Murtykty deposit (simplified after unpublished materials of V.V. Kozlov).

1 – vein zones; 2 – diabases; 3 – Frasnian tuff breccias, tuff sandstones; 4 – Eifel tuff sandstones; 5 – Eifel lava breccias; 6 – Eifel siliceous schists; 7 – Givetian tuffs, tuff breccias; 8 – Early-Middle Devonian basaltic andesites; 9 – carbonate-sericite-quartz rocks; 10 – quartz-sericite rocks.

мент написания статьи на всех трех зонах были заложены отдельные карьеры, представляющие собой узкие, вытянутые согласно рудными телам и залеганию пород (азимут $\sim 20-40^\circ$) выработки. К месторождению Муртыкты также иногда относят участок Ик-Давлят, расположенный в 5 км к северу в той же геологической структуре. Золото на месторождении приурочено к метасоматически измененным породам, распределено неравномерно, без отчетливой связи с пиритовой минерализацией. Однако породы, обогащенные сульфидами полиметаллической ассоциации и теллуридами, содержат также повышенные количества Au и Ag (Падучина и др., 2019). В настоящее время месторождение Муртыкты обрабатывается открытым способом АО НПФ «Башкирская золотодобывающая компания».

Поздние кварцевые и кварц-карбонатные жилы наиболее широко распространены в Восточной зоне месторождения и, реже, в Западной и Промежуточной зонах. В Восточной зоне они образуют кулисообразные серии, секущие вулканогенно-оса-

дочные породы и выклинивающиеся на незначительной глубине (рис. 2) (Новоселов и др., 2008).

Мощность жил варьирует от первых сантиметров до 1 м, простирание, в целом, северо-западное, падение на северо-запад под углом $\sim 70^\circ$. В целом, для рудного поля поздние жилы характеризуются кварц-карбонатным составом, но отличаются по соотношению кварца и карбонатов и набору акцессорных минералов. Карбонаты встречаются в жилах всех зон, в то время как турмалин характерен только для Восточной зоны. Акцессорная минерализация распределена неравномерно как в масштабе месторождения, так и в жилах.

Минералогия поздних жил Восточной зоны

Основной минерал жил – *кварц*, образующий просвечивающие массы молочно-белого цвета. *Карбонаты* более характерны для жил восточной стенки карьера. Они, в основном, представлены одиночными ромбоэдрическими кристаллами и



Рис. 2. Борт карьера с серией кварцевых жил.
Высота уступа в среднем 5 м.

Fig. 2. A quarry wall with a series of quartz veins.
The height of the ledge is 5 m, on average.

их сростками, изолированно заключенными в кварце. Среди карбонатов преобладает *кальцит*, однако, встречаются также карбонаты ряда *доломит-анкерит*. В верхних горизонтах месторождения карбонаты в жилах практически были полностью разложены.

Спорадически в жилах восточной стенки современного карьера Восточной зоны встречаются участки прозрачного кварца и полости размером от первых до 40 см. Стенки полостей образованы кристаллами прозрачного кварца размером до 15 см с включениями синеватого турмалина. Кварц-волосатик нарастает на более ранний молочно-белый кварц и, иногда, образует на нем скипетровидные кристаллы. Содержание турмалина в «волосатике» составляет от первых процентов до его преобладания над кварцем. Полости могут быть заполнены войлокоподобным агрегатом, состоящим из игольчатого турмалина и гидроксидов Fe/Mn (рис. 3). Взаимоотношения турмалина и карбонатов неясны: нами не найдено ни одного образца с турмалином, содержащего свежий карбонат. Однако, турмалин в полостях часто покрыт железомарганцевыми охрами, образовавшимися в результате разложения карбонатов и иногда содержит включения таких охр.

В кварце жил встречены единичные включения *галенита*, *сфалерита*, *халькопирита*, *пирита*, *золота*, *рутила* и *ксенотима*. Размер выделений халькопирита в кварцевых жилах западной стенки карьера в 2006 г. достигал 2–3 см. Размер выделений других сульфидов имеют размер 20–50 мкм, золото – до 20 мкм (рис. 4).

Состав халькопирита и галенита соответствуют стехиометрической формуле. Пирит обогащен As (S 48.52, Fe 45.15, As 6.2, сумма 99.87, мас. %), при этом в лимоните, образовавшемся по пириту, содержание As значительно ниже (~1 мас. % As_2O_5). В сфалерите ЭД спектры фиксируют незначительную примесь Fe. Золото высокопробное, содержание Ag в нем колеблется в пределах первых процентов.

Рутил встречается в кварце в виде включений размером менее 20 мкм. Он также обнаружен в плоскости («зеркале») скольжения в кварце в виде сплошной массы, состоящей из параллельно-шестоватого агрегата тончайших иголочек (рис. 5). Рутил содержит примесь V (TiO_2 97.44, V_2O_5 2.05, сумма 99.49 мас. %).

В одной из жил, отличающейся большим содержанием неизмененного карбоната, обнаружены парагенетические сростания турмалина с кальцитом и ксенотимом-(Y) (рис. 6). Состав ксенотима (мас. %): P_2O_5 34.55, CaO 0.19, Y_2O_3 39.67, Nd_2O_3 1.47, Sm_2O_3 2.34, Eu_2O_3 2.49, Gd_2O_3 9.20, Dy_2O_3 4.50, Er_2O_3 2.91, Yb_2O_3 3.33, сумма 100.65.

Гипергенные преобразования жил сводятся к разложению Mn- и Fe-содержащих карбонатов (кальцита, доломита) с образованием железистых и марганцевых охр, часто развитых по трещинам спайности с образованием «ящичных» структур (рис. 7а), замещению халькопирита оксидами и малахитом, пирита – гетитом и лимонитовыми охрами.

На кристаллы кварца в пустотах нарастают черные почковидные агрегаты с плотной внеш-

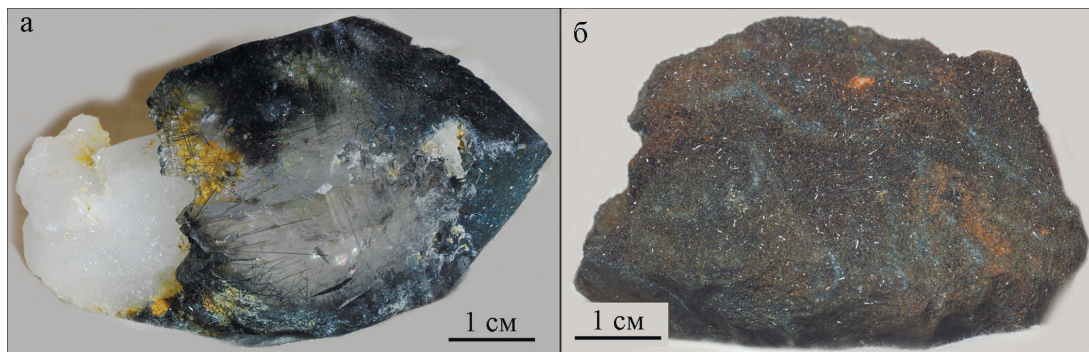


Рис. 3. Формы выделения турмалина из кварцевых жил месторождения Муртыкты.

а – скипетровидный кристалл кварца с включениями игл турмалина; б – войлокоподобный агрегат турмалина из полости кварцевой жилы.

Fig. 3. Morphology of tourmaline in quartz veins of the Murtykty deposit.

а – scepter quartz crystal with inclusions of acicular tourmaline; б – felt-like tourmaline aggregate from the cavity of the quartz vein.

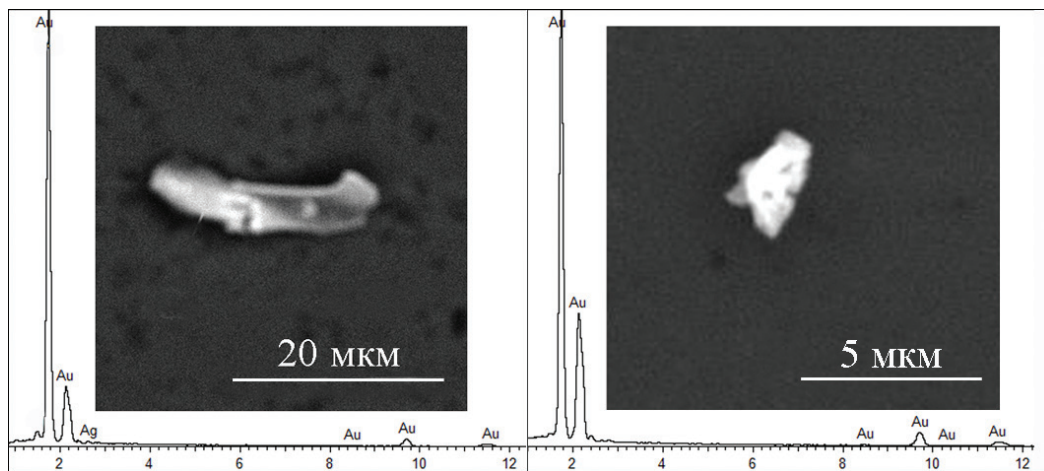


Рис. 4. Включения золота в кварце из жил месторождения Муртыкты.

BSE фото и энергодисперсионные спектры.

Fig. 4. Gold inclusions in quartz from veins of the Murtykty deposit.

BSE photo and ED spectra.

ней коркой. В разрезе почек вскрывается ажурный агрегат глинистого минерала с просечками безжелезистого гидроксида марганца с примесями Cu и Zn и «сгустками» Pb-Zn-Ba-содержащего гидроксида марганца (рис. 7б). Рентгенограмма вещества близка к рентгенограмме минералов группы криптомелана (халькофанит, PDF 45-1320) с примесью псиломелана (табл. XL, Frenzel., 1980). Ячеистое строение агрегата обусловило его очень низкую плотность – отдельные образцы плавают в воде.

Иногда войлокоподобный турмалин содержит включения белого мучнистого вещества, рентгенограмма которого соответствует каолиниту с очень низкой упорядоченностью.

Турмалин образует полупрозрачные игольчатые кристаллы длиной от 2–3 мм до 3 см и толщиной от 0.05 до 0.5 мм. Макроскопически минерал

имеет стально-серый до серовато-голубого, почти черного цвет. Дихроизм макроскопически проявлен слабо. Под микроскопом цвет минерала серо-голубой по Ng и бесцветный по Np, участками в турмалине развиты пятна ожелезнения, иногда включения охристого материала наблюдаются непосредственно в кристалле. Головки кристаллов иногда расщепленные, параллельно-шестоватые, «шерстяные». Оптически минерал аномально двуосный с небольшим углом оптических осей, удлинение отрицательное, угасание прямое. Показатели преломления $n_g = 1.648$ $n_p = 1.630$, двупреломление 0.018.

Состав турмалина колеблется как в пределах одного образца, так и в образцах, отобранных из различных участков карьера и представленных агрегатами разной морфологии. В поперечном се-

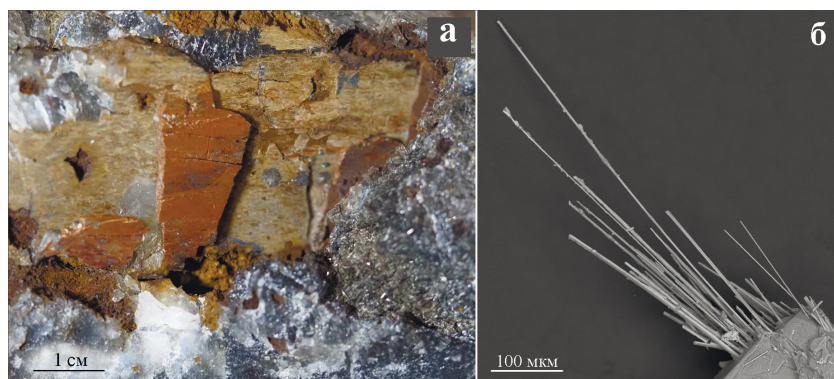


Рис. 5. Рутил из кварцевых жил месторождения Муртыкты.

а – массивный агрегат рутила в кварце с включениями турмалина; б – BSE-фото пучка иголок рутила из краевой части массивного агрегата.

Fig. 5. Rutile from quartz veins of the Murtykty deposit.

а – massive aggregate of rutile in quartz with tourmaline inclusions; б – BSE photo of an radial intergrowth of acicular rutile in the marginal part of massive aggregate.

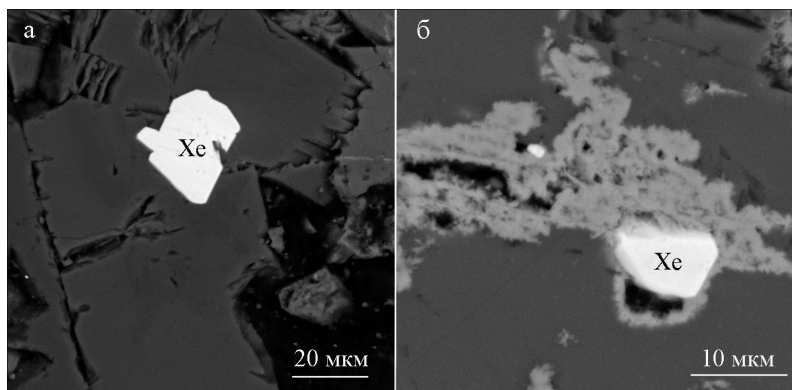


Рис. 6. Кристаллы ксенотима-(Y).

а – в турмалине; б – на границе карбоната с лимонитом. BSE фото.

Fig. 6. Xenotime-(Y) crystals.

а – in tourmaline; б – at the boundary of carbonate with limonite. BSE photo.

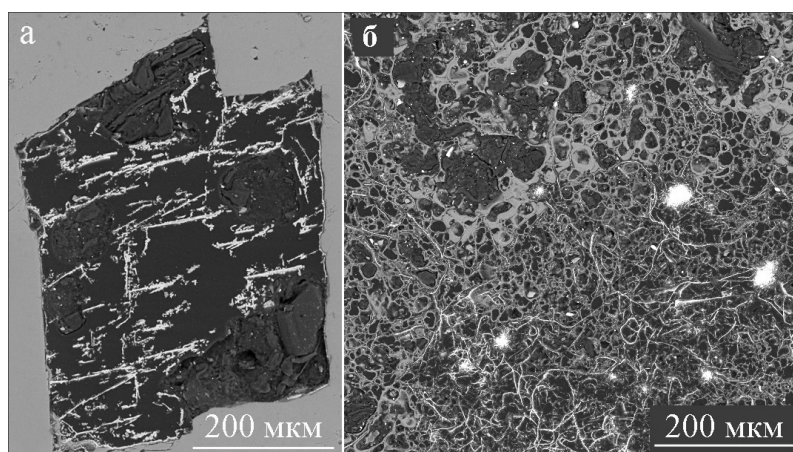


Рис. 7. Гипергенные минералы в кварцевых жилах месторождения Муртыкты.

а – ящичная структура лимонита в полностью разложившемся карбонате; б – агрегат гидроксидов Mn и глинистых минералов. BSE фото.

Fig. 7. Supergeny minerals in quartz veins of the Murtykty deposit.

а – box structure of limonite in decomposed carbonate; б – aggregate of Mn hydroxides and clay minerals. BSE photo.

чении проявлена зональность и секториальность, обусловленная колебаниями содержаний натрия, железа и магния (рис. 8, табл.). Магнезиальность изученных турмалинов $\#Mg = Mg/(Mg + Fe)$ варьирует в пределах 0.6–0.8. В некоторых зонах кристаллов установлены незначительные примеси титана и ванадия.

Суммы анализов, при условии отнесения всего железа к Fe^{2+} и расчета содержаний H_2O и B_2O_3 по стехиометрии, превышают 100 %, что связано, по-видимому, с принадлежностью турмалинов к оксидразновидностям с замещением $O^{2-} \Rightarrow (OH)$. Действительно, пересчет содержаний железа на Fe_2O_3 и расчет содержания H_2O с учетом замещения $OH \Rightarrow O^{2-}$ приводит к получению более реалистичных сумм (табл.). Известно, что определение состава турмалина микрорентгеноспектральными методами сопряжено с методическими трудностями (McGee, Anovitz, 1996). Тем не менее, поскольку анализы в данной работе получены в одинаковых условиях на одном приборе с использованием одинаковых эталонов, мы считаем возможным использовать их для оценки тенденций изменения состава турмалина.

По количеству вакансий и Al в позициях X и Y выделяется 2 группы анализов, образующие разграниченные поля, попадающие на диаграмме составов в области оксидравита и магнезиофойтита/оксимагнезиофойтита (рис. 9). Анализы, попадающие в разные поля, характеризуют не только разные образцы, но даже разные зоны и сектора в пределах одного кристалла (красные точки на рис. 9), при этом в области оксидравита наблюдается тен-

денция увеличения количества вакансий с уменьшением магнезиальности турмалина. Колебания состава вдоль удлинения не превышают колебаний в различных зонах поперечного сечения.

Рентгенофлюоресцентным анализом установлено присутствие в турмалинах цинка до 0.15 мас. %.

Дифрактограммы образцов турмалина, отобранных из включений в кварце, корок на нем и «ваты» близки между собой и сходны с дифрактограммой дравита (PDF 21-0164). Частные отражения широкие, часто несимметричные, что согласуется с неоднородным составом минерала. ПЭЯ колеблются $a_0 = 15.92 - 15.93$, $c_0 = 7.18 - 7.22$ Å. В связи с тем, что ПЭЯ получены по порошковой дифрактограмме, корректно выявить зависимость между составом турмалина и ПЭЯ на данном этапе невозможно. Несколько уменьшенная величина a_0 , по сравнению с дравитом (15.96(2), www.mindat.org), согласуются с замещением более мелким катионом Al^{3+} более крупных Mg^{2+} и Fe^{3+} в позиции Y.

Обсуждение и выводы

Условия образования

Поздние карбонат-кварцевые жилы в пределах месторождения Муртыкты распространены закономерно. В Промежуточной зоне обохранные кварцевые жилы мощностью до нескольких сантиметров отмечались на верхних горизонтах в северной части карьера в 2000-е гг., но турмалин и рудная минерализация в них не были выявле-

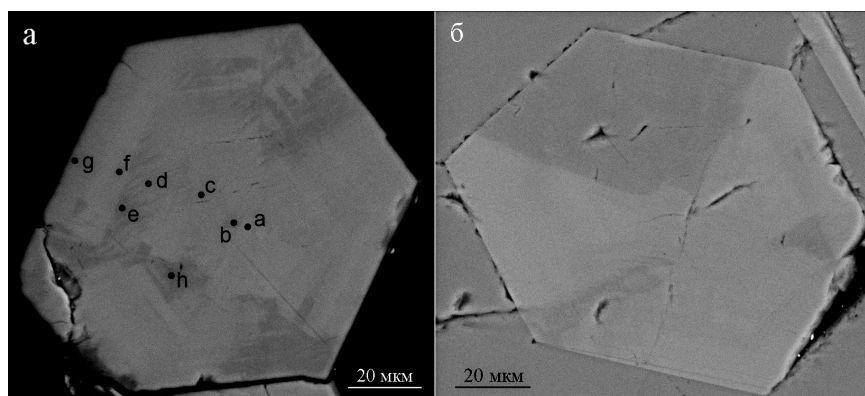


Рис. 8. Зонально-секториальный (а) и секториальный (б) кристаллы турмалина месторождения Муртыкты. BSE фото. Анализы точек а–h см. табл.

Fig. 8. Zonal-sectorial (a) and sectorial (б) tourmaline crystals of the Murtykty deposit. BSE photo. For analyses of points a–h, see Table.

Таблица
TableХимический состав турмалина месторождения Муртыкты
Chemical composition of tourmaline of the Murtykty deposit

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ *	мас. %										Коэффициенты в формуле, $\sum_{\text{катионов}} Y_{i=Z, T} = 15$					
						MgO	Na ₂ O	B ₂ O ₃ **	H ₂ O**	Сумма	Na	Mg	Al	Fe ³⁺	Ti	V	Si	O	ОН		
1	37.63	0.45	34.56	-	7.11	6.57	2.22	10.87	2.64	102.05	0.69	1.57	6.51	0.86	0.05	0.00	6.01	1.19	2.81		
2	38.04	-	36.83	0.16	4.95	7.00	2.66	11.27	2.86	103.77	0.80	1.61	6.70	0.57	0.00	0.25	5.87	1.05	2.95		
3	38.03	0.20	35.75	-	5.78	6.82	2.52	10.99	2.65	102.74	0.77	1.61	6.66	0.69	0.02	0.00	6.02	1.20	2.80		
4	37.31	-	35.57	-	6.04	6.58	2.70	10.84	2.58	101.62	0.84	1.57	6.72	0.73	0.00	0.00	5.98	1.25	2.75		
5	38.06	-	37.51	-	3.84	7.05	2.96	11.08	2.66	103.16	0.90	1.65	6.93	0.45	0.00	0.00	5.97	1.22	2.78		
6	37.64	-	34.74	-	6.56	6.48	2.58	10.80	2.51	101.30	0.81	1.55	6.59	0.79	0.00	0.00	6.06	1.31	2.69		
7	36.73	-	34.23	0.33	6.15	6.59	2.58	10.99	2.80	100.41	0.79	1.55	6.38	0.73	0.00	0.53	5.81	1.04	2.96		
8	38.58	-	38.35	-	3.39	7.10	3.05	11.23	2.67	104.36	0.92	1.64	7.00	0.39	0.00	0.00	5.97	1.25	2.75		
9	39.09	-	35.58	-	5.72	7.55	1.48	11.19	3.12	103.73	0.45	1.75	6.51	0.67	0.00	0.00	6.07	0.77	3.23		
10	38.55	-	34.86	-	6.19	7.44	2.46	11.05	2.80	103.35	0.75	1.74	6.46	0.73	0.00	0.00	6.06	1.07	2.93		
11	39.24	-	37.75	-	4	7.36	3.18	11.32	2.65	105.50	0.95	1.68	6.83	0.46	0.00	0.00	6.02	1.29	2.71		
12	38.93	-	35.51	-	6.49	7.27	2.44	11.18	2.80	104.62	0.74	1.68	6.51	0.76	0.00	0.00	6.05	1.10	2.90		
13	39.07	-	35.10	-	6.2	7.65	2.67	11.18	2.79	104.67	0.80	1.77	6.43	0.73	0.00	0.00	6.07	1.10	2.90		
14	38.79	-	34.68	-	6.7	7.32	2.25	11.08	2.81	103.63	0.68	1.71	6.41	0.79	0.00	0.00	6.08	1.06	2.94		
15	38.13	-	34.31	-	5.71	7.38	2.39	10.88	2.74	101.54	0.74	1.76	6.46	0.69	0.00	0.00	6.09	1.08	2.92		
16	38.24	-	33.94	-	6.52	7.42	2.32	10.92	2.78	102.14	0.72	1.76	6.37	0.78	0.00	0.00	6.09	1.04	2.96		
17	37.91	-	33.62	-	6.34	7.43	2.43	10.82	2.74	101.29	0.76	1.78	6.37	0.77	0.00	0.00	6.09	1.07	2.93		
18	37.66	-	33.47	0.20	7.22	6.93	2.28	11.00	2.83	101.59	0.70	1.63	6.23	0.86	0.00	0.32	5.95	1.02	2.98		
19	38.67	-	37.72	-	3.94	7.01	3.18	11.19	2.56	104.27	0.96	1.62	6.91	0.46	0.00	0.00	6.01	1.34	2.66		
20	38.13	-	37.69	-	3.82	6.98	3.26	11.10	2.56	103.54	0.99	1.63	6.95	0.45	0.00	0.00	5.97	1.33	2.67		
21	38.87	-	37.69	-	3.88	7.08	3.13	11.21	2.58	104.44	0.94	1.64	6.89	0.45	0.00	0.00	6.03	1.33	2.67		
22	38.85	-	37.15	-	4.76	7.01	3.22	11.20	2.54	104.73	0.97	1.62	6.79	0.56	0.00	0.00	6.03	1.38	2.62		
23	38.17	-	34.63	-	6.16	7.29	2.42	10.95	2.76	102.38	0.74	1.73	6.48	0.74	0.00	0.00	6.06	1.08	2.92		
24	37.97	-	33.86	-	6.63	7.08	2.28	10.82	2.70	101.34	0.71	1.69	6.41	0.80	0.00	0.00	6.10	1.11	2.89		
25	39.36	-	38.21	-	4.77	7.06	2.92	11.41	2.71	106.44	0.86	1.60	6.86	0.55	0.00	0.00	5.99	1.25	2.75		
26	38.86	0.57	36.13	-	7.09	6.86	2.55	11.29	2.69	106.04	0.76	1.57	6.56	0.82	0.07	0.00	5.98	1.24	2.76		
27	39.51	0.20	36.97	-	6.07	7.04	3.00	11.39	2.62	106.79	0.89	1.60	6.65	0.70	0.02	0.00	6.03	1.34	2.66		
28	39.36	-	36.78	-	6.36	7.22	2.90	11.38	2.73	106.73	0.86	1.64	6.62	0.73	0.00	0.00	6.01	1.22	2.78		
29	38.53	-	38.63	-	3.9	7.01	3.18	11.29	2.66	105.20	0.95	1.61	7.01	0.45	0.00	0.00	5.93	1.27	2.73		
30	38.58	0.04	34.45	-	6.39	7.17	2.38	10.97	2.70	102.68	0.73	1.69	6.43	0.76	0.00	0.00	6.11	1.15	2.85		
31	38.91	-	36.80	-	5.32	7.12	2.80	11.23	2.69	104.87	0.84	1.64	6.71	0.62	0.00	0.00	6.02	1.22	2.78		
32	37.61	-	34.71	-	6.26	6.87	2.10	10.83	2.76	101.14	0.65	1.64	6.57	0.76	0.00	0.00	6.04	1.05	2.95		

Окончание таблицы

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ *	MgO	Na ₂ O	B ₂ O ₃ **	H ₂ O**	Сумма	Na	Mg	Al	Fe ³⁺	Ti	V	Si	O	ОН
мас. %																			
33	37.81	-	34.33	-	6.33	7.15	2.43	10.86	2.72	101.62	0.75	1.71	6.48	0.76	0.00	0.00	6.05	1.10	2.90
34	38.44	-	37.54	-	3.88	6.88	2.84	11.11	2.61	103.30	0.86	1.60	6.92	0.46	0.00	0.00	6.01	1.27	2.73
35	38.07	-	34.93	-	6.28	6.73	2.69	10.89	2.53	102.12	0.83	1.60	6.57	0.75	0.00	0.00	6.07	1.31	2.69
36	38.42	-	35.54	-	6.08	7.28	1.58	11.09	3.06	103.06	0.48	1.70	6.56	0.72	0.00	0.00	6.02	0.80	3.20
37	38.66	-	35.47	-	5.98	7.27	1.66	11.10	3.01	103.15	0.50	1.70	6.55	0.70	0.00	0.00	6.05	0.86	3.14
38	38.83	-	35.38	-	6.09	7.29	1.67	11.12	3.00	103.38	0.51	1.70	6.52	0.72	0.00	0.00	6.07	0.88	3.12
39	39.46	-	35.53	-	5.94	7.39	1.37	11.22	3.08	103.99	0.41	1.71	6.49	0.69	0.00	0.00	6.11	0.82	3.18
40	38.25	0.51	34.81	-	7.36	6.78	2.29	11.04	2.68	103.72	0.70	1.59	6.46	0.87	0.06	0.00	6.02	1.19	2.81
41	39.14	-	35.98	-	5.75	7.36	1.72	11.22	3.02	104.19	0.52	1.70	6.57	0.67	0.00	0.00	6.06	0.88	3.12
42	38.96	-	35.32	-	5.83	7.34	1.65	11.11	2.99	103.20	0.50	1.71	6.51	0.69	0.00	0.00	6.09	0.88	3.12
43	37.53	-	34.62	-	6.42	6.99	1.57	10.84	2.96	100.94	0.49	1.67	6.54	0.77	0.00	0.00	6.02	0.83	3.17
44	37.56	-	34.26	-	5.88	7.26	1.47	10.80	3.02	100.24	0.46	1.74	6.50	0.71	0.00	0.00	6.05	0.76	3.24
45	37.65	-	36.37	-	4.6	6.95	2.94	10.93	2.60	102.04	0.91	1.65	6.82	0.55	0.00	0.00	5.99	1.25	2.75

Примечание. Анализы 1–8, 9–15, 16–25 и 26–30 выполнены для четырех различных кристаллов турмалина, 1–8 соответствуют точкам а–h на рис. 8а, соответственно; * – все железо рассчитано как Fe³⁺, ** – V₂O₅ и H₂O рассчитано по стехиометрии, прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Analysis 1–8, 9–15, 16–25 and 26–30 made for four different tourmaline crystals, 1–8 correspond to points a–h at fig. 8a, respectively; * – all iron is recalculated as Fe³⁺, ** – V₂O₅ and H₂O are recalculated after stoichiometry; dash – below detection limit.

ны. Спорадически секущие неминерализованные кварцевые и кварц-карбонатные жилы встречались в карьере Западной Зоны, но в них также не был отмечен турмалин. Нужно отметить, что, по свидетельству ведущего специалиста НПФ БЗК И.Б. Фадиной, такие карбонат-кварцевые жилы, в целом, не содержали промышленных концентраций Au. Однако на месторождении Ик-Давлят в секущих сланцеватость сантиметровых кварцевых жилах с промышленными концентрациями Au турмалин отсутствовал (Белогуб и др., 2006). Таким образом, в пределах собственно месторождения Муртыкты турмалин встречается только на ограниченном участке, а секущие сланцеватость существенно кварцевые жилы имеют либо неодинаковую природу, либо являются следствием зональности в пределах зоны развития поздних секущих жил.

Температура образования поздних жил с халькопиритом в Восточной зоне месторождения по данным изучения двух и трехфазных флюидных включений в кварце составила 180–200°. Температура эвтектики соответствует солевой системе Na₂SO₄–K₂SO₄–CO₂–H₂O и солености около 4.0–4.7 мас. % NaCl-экв., давление оценивается в 500 кбар. Поздние кварцевые жилы Восточной зоны формировались при несколько более низких температурах, чем сходные кварц-карбонатные жилы Промежуточной и Западной зон (Семибратова, Юминов, 2007).

В.Н. Сазонов (1998) предполагал полигенный и полихронный характер формирования месторождения Муртыкты. Начальный этап связывался с вулканогенно-осадочным процессом, последующие – с метасоматозом березитовой формации, обусловленным влиянием интрузивного магматизма, при этом температуры начала метасоматического рудообразования оценены как 410–360 °С, окончания – менее 200 °С. Таким образом, температура формирования изученных жил попадает в «рудный» температурный интервал, а турмалин может нести типоморфные признаки, указывающие на источник вещества, по крайней мере, завершающих этапов рудообразования.

Типоморфизм турмалина

Турмалины месторождения Муртыкты по составу попадают в поле оксидравит-оксимагнезиофойтит (рис. 9), а по предполагаемому абсолютному преобладанию железа в окисной

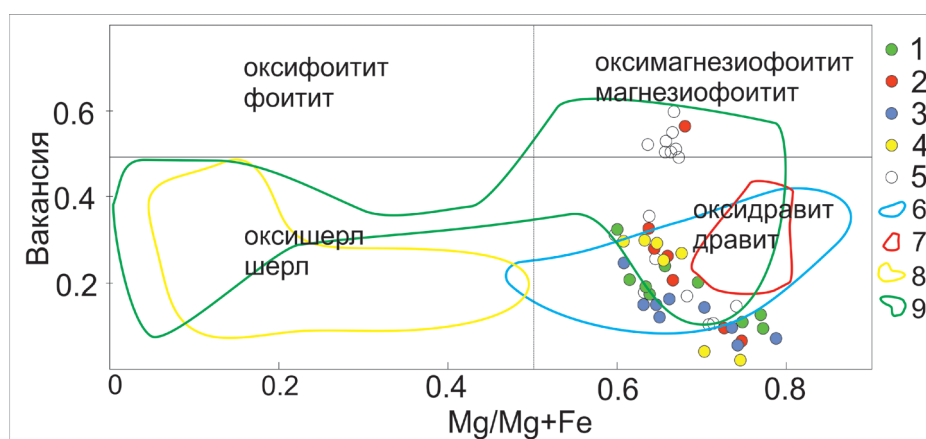


Рис. 9. Состав турмалина из кварцевых жил месторождения Муртыкты (1–5) по сравнению с составами турмалина из месторождений различного генезиса (6–9).

1 – точки составов (таблица); 2–4 – различные зоны и секторы отдельных кристаллов; 5 – образцы из разных жил. Поля составов турмалина из месторождений: 6 – Cu-Mo-Au-Te порфирового Факос, Греция (Voudouris et al., 2019); 7 – орогенного золота Хатти, Индия (Hazarika, Mishra, 2015); 8, 9 – оловорудного Хнилец, Словакия (Jiang et al., 2008): 8 – гранитов; 9 – вмещающих метаморфических пород.

Fig. 9. Composition of tourmaline from quartz veins of the Murtykty deposit (1–5) compared with compositions of tourmaline from various deposits (6–9).

1 – points of composition (Table); 2–4 – various zones and sectors of individual crystals; 5 – samples from different veins. Compositional fields of tourmaline from deposits: 6 – Fakos Cu-Mo-Au-Te porphyry, Greece (Voudouris et al., 2019); 7 – Hatti orogenic gold, India (Hazarika, Mishra, 2015); 8, 9 – Hnilec tin, Slovakia (Jiang et al., 2008): 8 – granites; 9 – host metamorphic rocks.

форме могут быть отнесены к ряду оксимагнезиофойтит–бозит. Они достаточно высокомагнезиальные и не содержат типичных для порфировых месторождений примесей металлов и As (Baksheev et al., 2012), также как и типичных для гранитов примесей Mn и F (Кузьмин и др., 1979, London et al., 1996 и др.).

Состав изученных турмалинов близок к метаморфогенным дравитам и оксидравитам орогенных золоторудных месторождений (Hazarika, Mishra, 2015), поздним стадиям формирования оловорудного месторождения Хнилец, связанными с вовлечением в процесс метаморфогенных флюидов (Jiang et al., 2008) и турмалинов месторождения золота, которое рассматривается как переходное от порфирового к эпитермальному (Voudouris et al., 2019). Сходство с типичными низкотемпературными метаморфогенными дравитами безрудных толщ состоит в присутствии магнезиофойтитового минала (Henry, Dutrow, 2012). Бозит как новый минеральный вид был впервые описан на месторождении Дарасун в содержащих золото, пирит, арсенопирит и другие сульфиды карбонатно-кварцевых жилах, связанных с субвулканической гранодиорит-порфировой интрузией (Ertl et al., 2016). Нужно отметить, что на этом месторождении бозит – самый ранний из турмалинов, а более поздние

генерации представлены оксидравитом и дравитом, в то время, как в турмалинах месторождения Муртыкты тенденция уменьшения содержания железа в более поздних зонах не прослеживается.

Таким образом, минеральная ассоциация, геологические условия нахождения и состав турмалина не позволяют однозначно связать его с магматическим процессом.

Источник бора

Хотя минералы бора в области развития вулканогенно-осадочных комплексов Южного Урала часто образуют значительные скопления (например, мощные кварц-манганаксинитовые жилы на месторождениях марганца (Брусницын, 2013) или карбонатно-аксинитовые жилы в дайках диабазы из окрестностей г. Миасса (авторские данные)), источник В в них остается дискуссионным.

Для изученных кварцевых жил месторождения Муртыкты можно предположить два источника: бор мог быть перераспределен из захороненных океанических осадков во время коллизии и связанного с ней динамометаморфизма или поступать из В- и РЗЭ-содержащих гидротермальных растворов, связанных с массивами гранитоидов (Мансуровский, D₂, расположен в 6 км к западу от место-

рождения) или диоритов (Сангалыкский, D_2 , 5 км к северо-западу). Возможность образования минерализованных кварцевых жил на таком расстоянии от интрузивных массивов не вызывает сомнений, однако для самих массивов турмалин не характерен.

Перенос В из захороненных морских осадков и его минеральная фиксация при диагенезе показаны на примере обогащения В слоистых силикатов, выносимых с больших глубин грязевыми вулканами (Korf, Deyhle, 2002; Sokol et al., 2019). При метаморфизме и метасоматических преобразованиях океанических осадков, образовавшихся в условиях Магнитогорской палеоостровной дуги, могли формироваться содержащие бор флюиды, из которых образовался турмалин. В пользу этой гипотезы свидетельствует наличие борной минерализации на месторождениях марганца, расположенных в близкой геологической позиции на незначительном расстоянии от месторождения Муртыкты, на которых не зафиксировано влияние магматических массивов.

На основании имеющихся данных однозначно судить о генезисе рассмотренных жил преждевременно. Однако для месторождения Муртыкты нельзя исключать вероятность комплексного процесса, включающего преобразования боросодержащих осадков морского происхождения флюидом, связанным с магматическими массивами района.

Работа поддержана проектом фундаментальных научных исследований по программам РАН (№ АААА-А18-11060900540). Авторы благодарны руководству и сотрудникам НПФ БЗК за содействие в работе на карьерах месторождения Муртыкты и О.С. Верещагину за конструктивные замечания, позволившие значительно улучшить статью.

Литература

Бакшеев И.А., Плотинская О.Ю. (2011) Турмалин месторождений Биргильдинско-Томинского рудного узла. *Минералогия Урала-2011. Материалы VI Всероссийского совещания*. Миасс: ИМин УрО РАН, 129–133.

Барсанов Г.П. О изоморфном ряде аксинита и новом минеральном виде севергинита (1951) Труды Минералогического Музея, **3**, 10–18.

Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Котляров В.А., Фаина И.Б. (2006) Минералогия окисленных руд золото-полиметаллического месторождения Ик-Давлят (Южный Урал). *Записки РМО*. **135**(5), 35–43.

Брусницын А.И. (2013) Минералогия марганцевоносных метасадков Южного Урала. СПб: СПбГУ, 160 с.

Знаменский С.Е. (1992) Структура и закономерности размещения золото-полиметаллического оруденения Ильинского рудного поля. Уфа, БФАН СССР, 80 с.

Кузьмин В.И., Добровольская Н.В., Солнцева Л.С. (1979) Турмалин и его использование при поисково-оценочных работах. М., Недра, 270 с.

Новоселов К.А., Белогуб Е.В. (2008) Восточная зона золото-сульфидного месторождения Муртыкты (материалы к путеводителю по Ильинскому рудному полю, Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов–2008. Рудоносные комплексы и рудные фацции*. Миасс: ИМин УрО РАН, 203–210.

Падучина Ю.А., Чухарева Н.С., Новоселов К.А., Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Артемьев Д.А., Рассомахин М.А. (2019) Минералогия благородных металлов месторождения золота Муртыкты, Южный Урал. *Минералогия*, **5**(2), 57–68.

Плетнев П.А. (1995а) Минералогия гондитов и метавулканитов пренит-пумпеллиитовой фацции Кожавского Мп месторождения, Южный Урал. *Уральская летняя минералогическая школа-95*. Екатеринбург: УГГГА, 58–60.

Плетнев П.А. (1995б) Минералогия гондитов и метавулканитов пренит-пумпеллиитовой фацции Учалинского колчеданного месторождения, Южный Урал. *Уральская летняя минералогическая школа-95*. Екатеринбург, УГГГА, 60–64.

Сазонов В.Н. (1998) Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов (геодинамические обстановки и РТХ-параметры образования, прогностическое значение). Екатеринбург, УГГГА, 181 с.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (1999) Месторождения золота Урала. Екатеринбург, УГГГА, 570 с.

Семибратова Е.В., Юминов А.М. (2007) Условия образования поздних золотоносных жил Ильинского рудного поля (Учалинский район) по данным термобарогеохимического анализа. *Металлогения древних и современных океанов–2007. Гидротермальные и гипергенные рудоносные системы*. Миасс: ИМин УрО РАН, 13–19.

Baksheev I., Prokof'ev V.Y., Zraisky G., Chitalin A., Yapaskurt V., Nikolaev Y., Tikhomirov P., Nagornaya E., Rogacheva L., Gorelikova N., Kononov O. (2012) Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry style deposits. *European Journal of Mineralogy*, **24**, 957–979.

Deksissa D., Koeberl C. (2002) Geochemistry and petrography of gold-quartz-tourmaline veins of the Okote area, southern Ethiopia: implications for gold exploration. *Mineralogy and Petrology*, **75**, 101–122.

Dommanget A., Milesi J.P., Diallo M. (1993) The Loulo gold and tourmaline-bearing deposit. *Mineralium Deposita*, **28**, 253–263.

- Ertl A., Baksheev I.A., Giester G., Lengauer C.L., Prokofiev V.Yu., Zorina L.D.** (2016) Bosiite, $\text{NaFe}^{3+}_3(\text{Al}_4\text{Mg}_2)(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$, a new ferric member of the tourmaline supergroup from the Darasun gold deposit, Transbaikalia, Russia. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 581–591.
- Frenzel G.** (1980) The manganese ore minerals. In: Varentsov I.M., Grasselly G.Y. (eds.) *Geology and geochemistry of manganese I*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 25–157.
- Hazarika P., Mishra B.** (2015) Tourmaline as fluid source indicator in the late Archean Huttu orogenic gold deposit. In: *Mineral Resources in a Sustainable World*, Nancy, 465–467.
- Henry D., Guidotti Ch.** (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, **70**(1), 1–15.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2012) Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic condition: its petrologic applicability. *Lithos*, **154** 16–32.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2018) Tourmaline studies through time: contributions to scientific advancements. *Journal of Geosciences*, **63**(2), 77–98.
- Henry D., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F.** (2011) Nomenclature of the tourmaline supergroup minerals. *American Mineralogist*, **96**, 895–913.
- Hinsberg V., Henry D., Marschall H.** (2011) Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *Canadian Mineralogist*, **49**(1), 1–16.
- Jiang S.-J., Radvanec M., Nakamura E., Palmer M., Kobayashi K., Zhao H.-X., Zhao K.-D.** (2008) Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution. *Lithos*, **106**(1–2), 1–11.
- Kopf A., Deyhle A.** (2002) Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling. *Chemical Geology*, **192**, 195–210.
- Koval P.V., Zorina L.D., Kitajev N.A., Spiridonov A.M., Ariunbileg S.** (1991) The use of tourmaline in geochemical prospecting for gold and copper mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**(1–3), 349–360.
- London D., Morgan G., Wolf M.** (1996) Boron in granitic rocks and their contact aureoles. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 299–330.
- McGee J., Anovitz L.** (1996) Electron probe microanalysis of geologic materials for boron. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 771–788.
- Nekouvaght Tak M.A., Bazargani-Guilani K.** (2009) Chemical variation of tourmaline and source of hydrothermal solutions in Nezam Abad W-(Sn) ore deposit, Sanandaj-Sirjan zone, West-Central Iran. *Journal of Sciences*, **20**(2), 115–126.
- Pirajno F., Smithies R.H.** (1992) The FeO/(FeO + MgO) ratio of tourmaline: a useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, **42**(2–3), 371–381.
- Slack J.F., Trumbull R.B.** (2011) Tourmaline as a recorder of ore-forming processes. *Elements*, **7**(5), 321–326.
- Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O.** (2019) Boron fate in an onshore mud volcanic environment: case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone. *Chemical Geology*, **525**, 58–81.
- Vereshchagin O.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Rozhdestvenskaya I.V., Zolotarev A.A.** (2018) Incorporation of 3d elements in tourmalines: structural adjustments and stability. *European Journal of Mineralogy*, **30**(5), 917–928.
- Voudouris P., Baksheev I.A., Mavrogonatos C., Spry P.G., Djiba A., Bismayer U., Papagkikas K., Katsara A.** (2019) Tourmaline from the Fakos porphyry-epithermal Cu-Mo-Au-Te prospect, Limnos island, Greece: mineral-chemistry and genetic implications. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **7**, 329–330.
- Watenphul A., Burgröde M., Schluter J., Horn I., Malcherek T., Mihailova B.** (2016) Exploring the potential of Raman spectroscopy for crystallochemical analyses of complex hydrous silicates: II. Tourmalines. *American Mineralogist*, **101**, 970–985.

References

- Baksheev I.A., Plotinskaya O.Yu.** (2011) [Tourmaline of the deposits of the Birgilda-Tominsky ore cluster]. *Mineralogiya Urala-2011. Materialy VI Vserossiyskogo soveshchaniya [Mineralogy of the Urals-2011. Materials of the VI All-Russian Meeting]*. Miass, IMin UrO RAN, 129–133. (in Russian)
- Baksheev I., Prokof'ev V.Y., Zaraisky G., Chitalin A., Yapaskurt V., Nikolaev Y., Tikhomirov P., Nagornaya E., Rogacheva L., Gorelikova N., Kononov O.** (2012) Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry style deposits. *European Journal of Mineralogy*, **24**, 957–979.
- Barsanov G.P.** (1951) About isomorphous series of axinite and severginite – the new mineral. *Trudy Mineralogicheskogo Muzeya [Proceedings of the Mineralogical Museum]*, **3**, 10–18.
- Belogub E.V., Novoselov K.A., Kotlyarov V.A., Fadina I.B.** (2006) [Mineralogy of oxidized ores of the Ik-Davlyat gold-polymetallic deposit (South Urals)]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **135**(5), 35–43. (in Russian)
- Brusnitsyn A.I.** (2013) [Mineralogy of manganese-bearing sedimentary rocks of the South Urals]. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 160 p. (in Russian)

- Deksissa D., Koeberl C.** (2002) Geochemistry and petrography of gold-quartz-tourmaline veins of the Okote area, southern Ethiopia: implications for gold exploration. *Mineralogy and Petrology*, **75**, 101–122.
- Dommanget A., Milesi J.P. & Diallo M.** (1993) The Loulo gold and tourmaline-bearing deposit. *Mineralium Deposita*, **28**, 253–263.
- Ertl A., Baksheev I.A., Giester G., Lengauer C.L., Prokofiev V.Yu., Zorina L.D.** (2016) Bosiite, $\text{NaFe}^{3+}(\text{Al}_4\text{Mg}_2)(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$, a new ferric member of the tourmaline supergroup from the Darasun gold deposit, Transbaikalia, Russia. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 581–591.
- Frenzel G.** (1980) The manganese ore minerals. In: Varentsov I.M., Grasselly G.Y. (eds.) *Geology and geochemistry of manganese I*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 25–157.
- Hazarika P., Mishra B.** (2015) Tourmaline as fluid source indicator in the late Archean Huttu orogenic gold deposit. In: *Mineral Resources in a Sustainable World*, Nancy, 465–467.
- Henry D., Guidotti Ch.** (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, **70**(1), 1–15.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2012) Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic condition. *Lithos*, **154**, 16–32.
- Henry D.J., Dutrow B.L.** (2018) Tourmaline studies through time: contributions to scientific advancements. *Journal of Geosciences*, **63**(2), 77–98.
- Henry D., Novák M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F.** (2011) Nomenclature of the tourmaline supergroup minerals. *American Mineralogist*, **96**, 895–913.
- Hinsberg V., Henry D., Marschall H.** (2011) Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *Canadian Mineralogist*, **49**(1), 1–16.
- Jiang S.-J., Radvanec M., Nakamura E., Palmer M., Kobayashi K., Zhao H.-X., Zhao K.-D.** (2008) Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution. *Lithos*, **106**(1–2), 1–11.
- Kopf A., Deyhle A.** (2002) Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling. *Chemical Geology*, **192**, 195–210.
- Koval P.V., Zorina L.D., Kitajev N.A., Spiridonov A.M., Ariunbileg S.** (1991) The use of tourmaline in geochemical prospecting for gold and copper mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**(1–3), 349–360.
- Kuz'min V.I., Dobrovolskaya N.V., Solntseva L.S.** (1979) [Tourmaline and its use in surveying works]. Moscow, Nedra, 270 p. (in Russian)
- London D., Morgan G., Wolf M.** (1996) Boron in granitic rocks and their contact aureoles. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 299–330.
- McGee J., Anovitz L.** (1996) Electron probe microanalysis of geologic materials for boron. *Reviews in Mineralogy*, **33**, 771–788.
- Nekouvaht Tak M.A., Bazargani-Guilani K.** (2009) Chemical variation of tourmaline and source of hydrothermal solutions in Nezam Abad W-(Sn) ore deposit, Sanandaj-Sirjan zone, West-Central Iran. *Journal of Sciences*, **20**(2), 115–126.
- Novoselov K. A., Belogub E. V.** (2008) [Eastern zone of the Murtykty gold-sulfide deposit (materials for the guidebook to the Ilyinsky ore field, Southern Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov–2008. Rudonosnye kompleksy i rudnye fatsii [Metallogeny of ancient and modern oceans–2008. Ore-bearing complexes and ore facies]*. Miass, IMin UrO RAN, 203–210. (in Russian)
- Paduchina Yu.A., Chukhareva N.S., Novoselov K.A., Palenova E.E., Belogub E.V., Blinov I.A., Artem'ev D.A., Rassomakhin M.A.** (2019) [Mineralogy of precious metals of the Murtykty gold deposit, South Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **5**(2), 57–68. (in Russian)
- Pirajno F., Smithies R.H.** (1992) The FeO/(FeO + MgO) ratio of tourmaline: A useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, **42**(2–3), 371–381.
- Pletnev P.A.** (1995a) [Mineralogy of gondites and metavolcanic rocks of prehnite-pumpelleite facies of the Kozhaevo Mn deposit, South Urals]. *Ural'skaya letnyaya mineralogicheskaya shkola-95 [Ural Summer Mineralogical School-95]*. Yekaterinburg, UGGGA, 58–60. (in Russian)
- Pletnev P.A.** (1995b) [Mineralogy of gondites and metavolcanic rocks of prehnite-pumpelleite facies of the Uchaly massive sulfide deposits, South Urals]. *Ural'skaya letnyaya mineralogicheskaya shkola-95 [Ural Summer Mineralogical School-95]*. Yekaterinburg, UGGGA, 60–64.
- Sazonov V.N.** (1998) [Gold-bearing metasomatic complexes of mobile zones (geodynamic settings and PTX formation parameters and their prospects)]. Yekaterinburg, UGGGA, 181 p. (in Russian)
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A.** (1999) [Gold deposits of the Urals]. Yekaterinburg, UGGGA, 570 p. (in Russian)
- Semibratova E.V., Yuminov A.M.** (2007) [Formation conditions of late gold-bearing veins of the Ilyinsky ore field (Uchaly district) according to thermobarogeochemical analysis]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov–2007. Gidrotermal'nye i gipergennyne rudonosnye systemy [Metallogeny of ancient and modern oceans–2007. Hydrothermal and supergene ore-bearing systems]*, Miass, IMin UrO RAN, 13–19. (in Russian)
- Slack J.F., Trumbull R.B.** (2011) Tourmaline as a recorder of ore-forming processes. *Elements*, **7**(5), 321–326.

Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O. (2019) Boron fate in an onshore mud volcanic environment: case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone. *Chemical Geology*, **525**, 58–81.

Vereshchagin O.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Rozhdestvenskaya I.V., Zolotarev A.A. (2018) Incorporation of 3d elements in tourmalines: structural adjustments and stability. *European Journal of Mineralogy*, **30**(5), 917–928.

Voudouris P., Baksheev I.A., Mavrogonatos C., Spry P.G., Djiba A., Bismayer U., Papagkikas K., Katsara A. (2019) Tourmaline from the Fakos porphyry-epithermal Cu-Mo-Au-Te prospect, Limnos island, Greece: mineral-chemistry and genetic implications. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **7**, 329–330.

Watenphul A., Burgrode M., Schluter J., Horn I., Malcherek T., Mihailova B. (2016) Exploring the potential of Raman spectroscopy for crystallochemical analyses of complex hydrous silicates: II. Tourmalines. *American Mineralogist*, **101**, 970–985.

Znamensky S.E. (1992) [Structure and location of gold-polymetallic mineralization of the Ilyinsky ore field]. Ufa, BFAN SSSR, 80 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 25 марта 2020 г.

МИНЕРАЛОГИЯ

Том 6 № 1 2020

ISSN 2313-545X



Технический редактор:

И.Ю. Мелекесцева

Оригинал-макет:

О.Л. Бусловская

Корректор:

И.А. Спирина

Подписано в печать 27.03.2020. Дата выхода в свет:

Формат 60 × 80%. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5.1. Уч.-изд. л. 5.2. Тираж 200 экз. Заказ №
Институт минералогии УрО РАН: 456317, г. Миасс Челябинской обл., Ильменский заповедник

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ООО «Типография Для Вас»
620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Розы Люксембург, 52А, офис 3.
Распространяется бесплатно.

СОДЕРЖАНИЕ

Том 6 № 1 2020

МИНЕРАЛЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

<i>В.И. Полова, А.В. Касаткин, В.А. Попов, С.Н. Никандров, Е.П. Макагонов, А.М. Кузнецов, Р. Шкода</i>	3
<i>Цеолитовая минерализация в пегматитах и поздних прожилках Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса (Южный Урал)</i>	
<i>В.А. Попов, М.А. Рассомахин, С.В. Колисниченко</i>	17
<i>Уникальное проявление поляковита-(Ce) в Ильменских горах, Южный Урал – новые находки</i>	
<i>Е.В. Зайкова, И.А. Блинов, В.А. Котляров</i>	33
<i>Минеральные включения в зернах платины из Казанской россыпи (Южный Урал)</i>	
<i>А.В. Касаткин, Р. Шкода</i>	47
<i>Терриуолласеит из Кочкарского золоторудного месторождения, Южный Урал: первая находка в России</i>	
<i>С.В. Прибавкин, А.В. Коровко, Г.Ю. Шардакова, А.В. Антонишин</i>	58
<i>Минералы меди зоны окисления Cu(Mo)-порфирирового рудопроявления Сарышаган (Западное Прибалхашье, Центральный Казахстан)</i>	
<i>М.А. Рассомахин, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов, П.В. Хворов</i>	69
<i>Турмалин из поздних кварцевых жил месторождения золота Муртыкты, Южный Урал, Башкортостан</i>	