

## МИНЕРАЛЫ ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ ЕЛЕНОВСКОГО МЕДНО-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЮЖНЫЙ УРАЛ

И.А. Блинов

*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; blinov@mineralogy.ru*

## MINERALS OF OXIDATION ZONE OF THE ELENOVSKOE COPPER PORPHYRY DEPOSIT, SOUTH URALS

I.A. Blinov

*Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; blinov@mineralogy.ru*

Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии изучены образцы из зоны окисления Еленовского медно-порфирового месторождения на Южном Урале. В гипергенной минеральной ассоциации, помимо гидроксидов Fe и наиболее распространенного малахита, установлены самородные медь и золото, ковеллин (часто содержащий Ag), куприт, тенорит, плюмбогуммит, гоэцит, йодаргирит, атакамит и хризокolla. В окисленных рудах встречаются реликты пирита и большое количество турмалина, представленного дравитом. Некоторые индивиды дравита содержат примесь Cu.

Илл. 3. Табл. 8. Библ. 35.

*Ключевые слова:* Еленовское месторождение, медистое золото, минералы зоны окисления, металлургия бронзового века, турмалин.

Samples of oxidation zone of the Elenovskoe Cu porphyry deposit are studied using optical and scanning electronic microscopy. In addition to Fe hydroxides and abundant malachite, the supergene mineral assemblage includes native Cu and Au, Ag-containing covellite, cuprite, tenorite, plumbogummite, goyazite, iodargyrite, atacamite, and chrysocolla. The oxidized ores contains pyrite relics and high amount of tourmaline (dravite). Some dravite grains contain Cu.

Figures 3. Tables 8. References 35.

*Key words:* Elenovskoe deposit, cuprous gold, supergene minerals, Bronze Age metallurgy, tourmaline.

### Введение

Еленовское медно-порфировое месторождение расположено в Оренбургской области в 28 км северо-восточнее ж/д ст. Профинтерн. Месторождение было обнаружено в 1918–1919 гг. жителем пос. Еленовка А. С. Новиченко и в 1937 г. обследовано И. Л. Рудницким, определившим, что здесь действовал древний рудник (Левитский, 1941). Месторождение служило рудной базой металлургии андроновской (Черных, 1966) или алакульской (Кузьмина, 1962) культур в II тыс. до н.э. Предполагается, что Еленовский рудник мог быть одним из источников сырья для поселения Аркаим,

относящегося к синташтинской историко-культурной общности, функционировавшей в XVII–XV вв. до н.э. (Бушмакин, Зайков, 1997).

Месторождение приурочено к Еленовскому массиву, который находится в южной части Увельско-Еленовского вулканоплутонического пояса и сложен диоритами, гранодиоритами, кварцевыми диоритами и плагиогранитами, залегающими в ядре массива. На территории встречаются также граносиениты (рис. 1) (Тальнов и др., 1986; Минина, Мигачев, 2018).

На месторождении выявлено пять линзовидных рудных тел, представленных рудами двух типов: прожилковыми кварц-турмалиновыми с пиритом и халькопиритом в основных эффузивах и

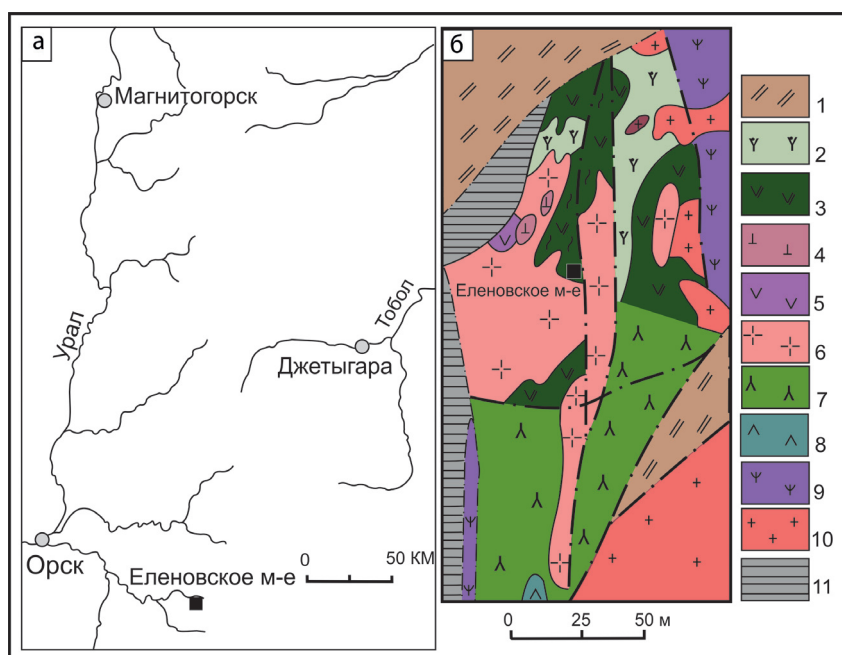


Рис. 1. Географическое положение (а, Бушмакин, Зайков, 1997) и геологическая схема района Еленовского месторождения (б, Контарь, 2013).

1 – раннепротерозойские гнейсы и кристаллические сланцы; 2–7 – среднедевонская вулcano-интрузивная ассоциация: 2 – эффузивно-пирокластическая андезибазальтовая толща, 3 – эффузивно-пирокластическая дацит-андезидацитовая толща, 4 – субвулканические риолиты, 5 – андезиты, андезидациты, 6 – порфировидные плагиограниты, гранодиориты, 7 – базальт-андезибазальтовая формация (туфы пироксен-плагиофировых базальтов, андезибазальтов) позднего девона; 8 – раннекаменноугольные габбродиабазы; 9 – серпентинизированные ультрамафиты; 10 – граниты позднего палеозоя; 11 – позднедевонско-раннекаменноугольные терригенные отложения.

Fig. 1. Geographical setting (а, Bushmakina, Zaykov, 1997) and geological scheme of the Elenovka deposit (б, Kontar, 2013).

1 – Early Proterozoic gneisses and crystalline schists; 2–7 – Middle Devonian volcano-intrusive association: 2 – effusive-pyroclastic andesite stratum, 3 – effusive-pyroclastic dacite-dacitic andesite stratum, 4 – subvolcanic rhyolites, 5 – andesites, dacitic andesites, 6 – porphyry plagiogranites, granodiorites, 7 – Late Devonian basalt-basaltic andesite complex (tuffs of plagiophyric pyroxene basalts, basaltic andesites); 8 – Early Carboniferous gabbrodiabases; 9 – serpentinized ultramafic rocks; 10 – Late Paleozoic granites; 11 – Late Devonian-Carboniferous terrigenous sediments.

прожилково-вкрапленными медно-молибден-полиметаллическими в гидротермально измененных эффузивах и гранитоидах. В кварц-турмалиновых рудных телах среднее содержание Cu превышает 2 %, отношение Cu/Mo = 122, в прожилково-вкрапленных рудах  $Cu_{cp}$  составляет около 0.1 % (до 1.5 %), отношение Cu/Mo = 118 (Тальнов и др., 1986). На месторождении развита зона окисления с интенсивным проявлением карбонатов Cu, преимущественно малахита. В верхних частях зоны окисления содержания Cu колебались от 2.25 до 10.35 %. Для зоны вторичного сульфидного обогащения характерны халькозин, борнит и ковеллин. В рудах распространен турмалин (Зайков и др., 2013).

Еленовское месторождение обрабатывалось открытым способом с 2006 г. ЗАО «Ормет», входящим в холдинг «Русская медная компания».

За время эксплуатации древний рудник и отвалы были уничтожены. В настоящее время на месте Еленовского месторождения находится затопленный карьер. Несмотря на то, что месторождение уже отработано, исследование минерального состава гипергенных руд не проводилось. Целью данной работы является характеристика минерального состава гипергенных руд месторождения как возможного источника сырья для металлургии в древности.

#### Методика исследований

Для исследования из отвала были отобраны 10 штучных образцов руд различного текстурно-структурного облика. Текстурно-структурные типы руд определялись макроскопически и при помощи поляризационного микроскопа в отраженном све-

те. Минеральный состав исследован с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 с энерго-дисперсионным анализатором Oxford instruments X-act (ИМин УрО РАН, аналитик И.А. Блинов). Ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с.

### Результаты исследований

Руды из зоны окисления имеют густо-вкрапленную текстуру, образованную агрегатами малахита, выделяющимися на фоне реликтовых слабо ожелезненных силикатов матрицы. «Медная зелень» среди реликтовых силикатов (турмалина, кварца, полевых шпатов) образует гнезда и пятна размером до первых сантиметров.

Самородные металлы представлены медью и золотом. Изометричные зерна реликтов меди размером первые микрометры встречаются в центральной части агрегатов куприта (рис. 2а). В составе отмечается примесь Fe до 0.39 мас. % (табл. 1). Единичные зерна золота размером 0.1–0.5 мкм ассоциируют с ковеллином и малахитом и образуют каймы вокруг реликтового пирита, ассоциируя с гидроксидами железа (рис. 2б). В составе золота отмечаются примеси Ag (до 20.54 мас. %) и Cu (до 13.11 мас. %) (табл. 1).

Вторичные сульфиды представлены акантитом, ковеллином и халькозином. Ковеллин и халькозин распространены умеренно и образуют многочисленные, часто трещиноватые зерна с корродированной поверхностью. По трещинам вокруг зерен развиты малахит, реже атакамит и хризоколлы. Размер агрегатов сульфидов меди достигает нескольких миллиметров. Минералы не стехиометричны по составу (табл. 1). В составе ковеллина и халькозина присутствует Fe: до 2.34 мас. % в ковеллине и 2.94 мас. % в халькозине. Ковеллин также содержит Ag (до 1.28 мас. %). Редкий акантит образует включения в малахите размером до 2–3 мкм. Часто ассоциирует с серебросодержащим ковеллином и йодаргиритом.

Оксиды меди представлены чаще купритом, реже – теноритом. Куприт образует отдельные кристаллы и их срастания размером 10–20 мкм, часто с корродированными границами и ассоциирует с малахитом, атакамитом, реже – теноритом (рис. 2в). Размер крупных агрегатов куприта может достигать нескольких миллиметров. Для куприта характерна примесь FeO (до 0.72 мас. %) (табл. 2). Тенорит образует совместные агрегаты с купритом,

где он, скорее всего, замещает последний (рис. 2г). В отдельных случаях встречаются самостоятельные зерна тенорита в малахите.

Широко распространенные гидроксиды Fe образуют «пятна», сплошные тонкозернистые или скрытокристаллические массы. Также они выполняют прожилки мощностью от нескольких десятков микрометров до первых миллиметров. В их составе отмечаются примеси Cu, Zn, As. Содержания CuO варьируют от 2.97 до 12.55 мас. % (табл. 3). Высокие содержания CuO могут быть связаны с тонкими вкраплениями малахита или других минералов меди.

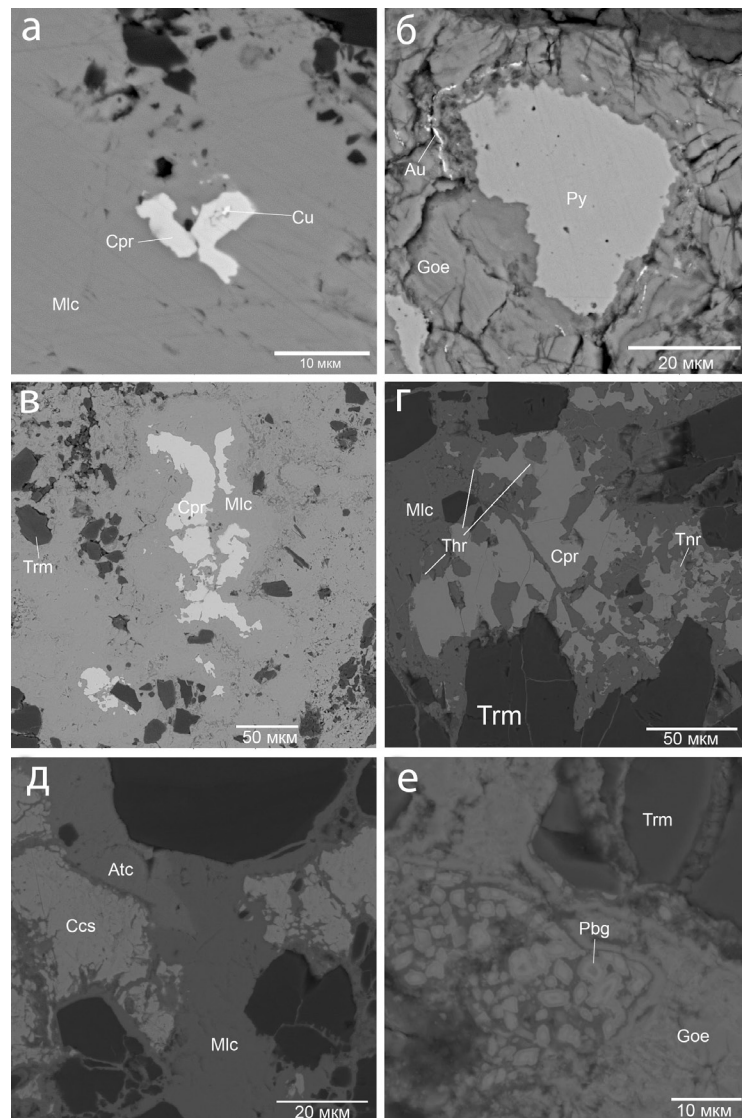
Атакамит формирует сплошные массы, реже пятна и прожилки, в которых находится вместе с гидроксидами Fe и малахитом (рис. 2д). Размер его агрегатов варьирует от 5–10 мкм до нескольких миллиметров. Минерал ассоциирует с халькозином и ковеллином, реже – самородной медью, теноритом, купритом и йодаргиритом. (табл. 4). В составе отмечаются примеси железа, достигающие 1.89 мас.% FeO. В целом, минерал зачастую имеет недостаток в катионах. Возможно, это связано с разрушением минерала под электронным пучком.

Йодаргирит (диагностирован по качественному ЭДС) образует редкие включения в малахите размером от 0.5 до 1.5 мкм. Часто ассоциирует с атакамитом.

Гипергенные карбонаты представлены, главным образом, малахитом, который образует спутанно-волокнистые, реже радиально-лучистые агрегаты размером от 0.1 до 3–4 мкм. Малахит также слагает сплошные массы и прожилки, цементирует агрегаты хризоколлы, выполняет пустоты. В его составе отмечается варьирующая примесь Fe, которая достигает 7.16 мас. % FeO (табл. 5).

Минералы семейства алунита выявлены в двух образцах. В обоих случаях они представлены фосфатами – гояцитом и плюмбогуммитом. Гояцит образует землистые массы с многочисленными тонкими включениями гидрослюды и рассеченные прожилками и просечками малахита. Минерал диагностирован по качественному анализу с преобладающими спектральными линиями O, Sr, Al и P.

Плюмбогуммит образует часто зональные кристаллы размером до 10–15 мкм (рис. 1е). На фоне более яркого плюмбогуммита в отраженных электронных выделются более темные зоны мощностью около 1–2 мкм. Из-за размеров определить состав этих зон не представляется возможным. По качественным



*Рис. 2.* Взаимоотношения минералов зоны окисления Еленовского месторождения: а – самородная медь (Cu), замещенная купритом (Cpr); б – самородное золото (Au) в лимонитовой (Goe) псевдоморфозе по пириту (Py); в – куприт с корродированный малахитом (Mlc); г – куприт, замещенный теноритом (Tnr) и малахитом; д – агрегат атакамита (Atc) и малахита, развивающийся по халькозину (Ccs); е – зональные кристаллы плюмбогуммита (Pbg).

Изображения в отраженных электронах. Trm – турмалин.

*Fig. 2.* Mineral aggregates of oxidation zone of the Elenovskoe deposit.

а – native copper (Cu) replaced by cuprite (Cpr); б – native gold (Au) in Fe hydroxides (Goe) after pyrite (Py); в – cuprite corroded by malachite (Mlc); г – cuprite replaced by tenorite (Tnr) and malachite; д – aggregate of atacamite (Atc) and malachite after chalcocite (Ccs); е – zonal plumbogummite crystals (Pbg). BSE-image. Trm – tourmaline.

оценкам в них наблюдается уменьшение содержания Pb и увеличение содержания Sr (табл. 6).

Из гипергенных «рудных» силикатов распространены хризоколлы и медистый, реже медисто-железистый и марганцовистый опал. Эти минералы не имеют упорядоченной кристаллической структуры и характеризуются переменным составом (табл. 7). В связи с этим названия минералов носят условный характер. Силикаты образуют пятна,

сгустки, прожилки. Их размер варьирует от первых микрометров до первых сантиметров. Минералы ассоциируют с малахитом, гидроксидами Fe, атакамитом, реже купритом. В составе хризоколлы и медистого опала обычно присутствует примесь Fe (до 10 мас. %). В медисто-железистом опале содержания Fe преобладают над содержаниями Cu (20 и 19 мас. %, соответственно). В марганцовистом опале содержания Mn преобладают над Fe и Cu.

Таблица 1

## Состав самородных металлов и сульфидов (мас. %)

Table 1

## Composition of native metals and sulfides (wt. %)

Анализ	S	Fe	Cu	Ag	Au	Сумма	Минерал	Кристаллохимическая формула
18219a	—	0.19	99.64	—	—	99.83	медь	$(\text{Cu}_{1.00}\text{Fe}_{0.002})_{1.00}$
18313x	—	0.39	99.42	—	—	99.80	медь	$(\text{Cu}_{1.00}\text{Fe}_{0.004})_{1.00}$
18220k	—	—	13.11	20.54	66.34	100.0	золото	$(\text{Au}_{0.46}\text{Cu}_{0.28}\text{Ag}_{0.26})_{1.00}$
18304h	29.58	0.47	70.12	—	—	100.16	ковеллин	$(\text{Cu}_{1.19}\text{Fe}_{0.01})_{1.20}\text{S}_{1.00}$
18305a	29.61	0.45	68.89	0.71	—	99.65	ковеллин	$(\text{Cu}_{1.17}\text{Fe}_{0.01}\text{Ag}_{0.01})_{1.19}\text{S}_{1.00}$
18305e	32.24	0.56	66.52	1.28	—	100.59	ковеллин	$(\text{Cu}_{1.04}\text{Fe}_{0.01}\text{Ag}_{0.01})_{1.06}\text{S}_{1.00}$
18306b	30.21	0.6	69.19	0.27	—	100.27	ковеллин	$(\text{Cu}_{1.15}\text{Fe}_{0.01})_{1.16}\text{S}_{1.00}$
18312d	32.33	0.46	68.00	—	—	100.80	ковеллин	$(\text{Cu}_{1.06}\text{Fe}_{0.01})_{1.07}\text{S}_{1.00}$
18313f	30.86	2.34	66.95	0.48	—	100.63	ковеллин	$(\text{Cu}_{1.09}\text{Fe}_{0.04})_{1.13}\text{S}_{1.00}$
18306f	32.83	0.23	67.65	—	—	100.71	ковеллин	$\text{Cu}_{1.04}\text{S}_{1.00}$
18219d	22.07	—	77.93	—	—	100.0	халькозин	$\text{Cu}_{1.78}\text{S}_{1.00}$
18304b	20.81	0.42	79.57	—	—	100.8	халькозин	$(\text{Cu}_{1.93}\text{Fe}_{0.01})_{1.94}\text{S}_{1.00}$
18304e	21.30	0.32	79.00	—	—	100.63	халькозин	$(\text{Cu}_{1.87}\text{Fe}_{0.01})_{1.88}\text{S}_{1.00}$
18304g	22.51	0.28	77.07	—	—	99.87	халькозин	$(\text{Cu}_{1.72}\text{Fe}_{0.01})_{1.73}\text{S}_{1.00}$
18304i	21.61	—	78.63	—	—	100.24	халькозин	$\text{Cu}_{1.83}\text{S}_{1.00}$
18313e	20.78	1.55	78.19	—	—	100.52	халькозин	$(\text{Cu}_{1.89}\text{Fe}_{0.04})_{1.94}\text{S}_{1.00}$
18313h	21.52	2.94	76.26	—	—	100.72	халькозин	$(\text{Cu}_{1.78}\text{Fe}_{0.08})_{1.86}\text{S}_{1.00}$
18313l	21.30	2.02	77.39	—	—	100.72	халькозин	$(\text{Cu}_{1.83}\text{Fe}_{0.05})_{1.88}\text{S}_{1.00}$

Примечание. Кристаллохимические формулы сульфидов рассчитаны на S = 1.

Note. Crystallochemical sulfide formulas are calculated using normalization of S = 1 anion.

Таблица 2

## Состав оксидов меди (мас. %)

Table 2

## Composition of Cu oxides (wt. %)

Анализ	FeO	Cu <sub>2</sub> O	CuO	Сумма	Минерал	Кристаллохимическая формула
18219b	—	100.14	—	100.14	куприт	$\text{Cu}_2\text{O}$
18225a	—	100.14	—	100.14	куприт	$\text{Cu}_2\text{O}$
18304f	0.72	98.82	—	99.53	куприт	$(\text{Cu}_{1.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{O}$
18313a	0.66	100.07	—	100.73	куприт	$(\text{Cu}_{1.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{O}$
18313b	0.71	100.13	—	100.84	куприт	$(\text{Cu}_{0.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{O}$
18313t	0.34	99.32	—	99.66	куприт	$(\text{Cu}_{1.99}\text{Fe}_{0.01})_{2.00}\text{O}$
18313u	0.45	—	98.78	99.23	тенорит	$(\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{0.01})_{1.00}\text{O}$
18313c	0.56	—	100.26	100.82	тенорит	$(\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{0.01})_{1.00}\text{O}$

Примечание. Формулы рассчитаны на сумму катионов = 2 (куприт) и 1 (тенорит).

Note. Formulas are calculated for the sum of cations = 2 (cuprite) and 1 (tenorite).

Таблица 3

## Состав гидроксидов железа (мас. %)

Table 3

## Composition of Fe hydroxides (wt. %)

Анализ	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	CuO	ZnO	As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
18220l	—	—	6.34	—	1.66	0.17	0.70	—	70.62	12.55	—	—	92.04
18236a	0.25	0.64	3.40	0.83	1.67	0.60	0.39	3.13	49.67	10.62	—	—	71.21
18305g	0.61	7.89	6.29	0.57	0.45	0.22	0.44	—	62.49	6.87	—	0.64	86.46
18306e	0.17	2.12	4.18	0.33	0.47	—	—	—	63.89	5.78	0.25	—	77.18
18312b	—	2.41	7.27	1.19	—	—	0.29	—	63.68	6.42	—	0.81	82.07
18312i	—	2.20	6.24	1.26	—	—	0.24	—	64.75	2.97	—	0.67	78.34
18313k	0.25	0.58	5.09	0.38	0.27	—	0.34	—	79.09	6.59	—	—	92.6

Таблица 4

**Состав атакамита (мас. %)**  
**Composition of atacamite (wt. %)**

Table 4

Анализ	Cl	FeO	CuO	ОН	–O=ОН	Сумма	Кристаллохимическая формула
18304a	17.41	–	71.30	25.00	14.34	99.37	$\text{Cu}_{1.83}\text{Cl}_{1.00}(\text{OH})_{3.00}$
18304d	17.56	0.64	71.57	25.21	14.40	100.44	$(\text{Cu}_{1.82}\text{Fe}_{0.02})_{1.84}\text{Cl}_{1.00}(\text{OH})_{3.00}$
18313i	15.89	1.89	71.89	22.80	14.46	97.59	$(\text{Cu}_{2.02}\text{Fe}_{0.06})_{2.08}\text{Cl}_{1.00}(\text{OH})_{3.00}$
18313v	16.83	0.50	71.11	24.20	14.30	98.22	$(\text{Cu}_{1.89}\text{Fe}_{0.01})_{1.90}\text{Cl}_{1.00}(\text{OH})_{3.00}$

*Примечание.* Формула минерала рассчитана на Cl = 1. Количество гидроксогруппы ОН рассчитано как теоретическое на 3 ф.е.

*Note.* Mineral formula is calculated using Cl = 1. The number of OH groups is calculated as theoretical for 3 f.u.

Таблица 5

**Состав малахита (мас. %)**  
**Malachite composition (wt. %)**

Table 5

Анализ	FeO	CuO	Сумма	Кристаллохимическая формула
18219c	0.31	71.76	72.08	$(\text{Cu}_{1.99}\text{Fe}_{0.01})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18219e	–	71.95	71.95	$\text{Cu}_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18219g	0.53	71.68	72.21	$(\text{Cu}_{1.98}\text{Fe}_{0.02})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18220c	–	71.89	71.89	$\text{Cu}_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18220h	1.11	71.02	72.13	$(\text{Cu}_{1.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18225b	–	71.1	71.1	$\text{Cu}_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18225d	–	71.45	71.45	$\text{Cu}_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18236c	0.76	69.73	70.49	$(\text{Cu}_{1.98}\text{Fe}_{0.02})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18236e	0.81	70.08	70.89	$(\text{Cu}_{1.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18303d	1.59	71.13	72.72	$(\text{Cu}_{1.95}\text{Fe}_{0.05})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18304c	0.42	71.37	71.8	$(\text{Cu}_{1.99}\text{Fe}_{0.01})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18304j	0.33	72.28	72.61	$(\text{Cu}_{1.99}\text{Fe}_{0.01})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18305b	1.48	70.26	71.73	$(\text{Cu}_{1.95}\text{Fe}_{0.05})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18305f	7.16	64.87	72.03	$(\text{Cu}_{1.78}\text{Fe}_{0.22})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18306a	4.14	67.96	72.1	$(\text{Cu}_{1.87}\text{Fe}_{0.13})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18306d	2.36	69.84	72.2	$(\text{Cu}_{1.93}\text{Fe}_{0.07})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18306g	1.15	70.98	72.13	$(\text{Cu}_{1.96}\text{Fe}_{0.04})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18312a	1.07	71.59	72.66	$(\text{Cu}_{1.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18312e	1.51	69.76	71.27	$(\text{Cu}_{1.95}\text{Fe}_{0.05})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18313d	0.90	71.27	72.18	$(\text{Cu}_{1.97}\text{Fe}_{0.03})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18313j	2.35	70.53	72.88	$(\text{Cu}_{1.93}\text{Fe}_{0.07})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18313o	1.70	70.07	71.77	$(\text{Cu}_{1.95}\text{Fe}_{0.05})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$
18313w	0.35	72.21	72.57	$(\text{Cu}_{1.99}\text{Fe}_{0.01})_{2.00}\text{CO}_3(\text{OH})_2$

*Примечание.* Формула малахита рассчитана на сумму катионов k = 2. CO<sub>3</sub> и ОН – теоретические.

*Note.* Malachite formula is calculated on the sum of cations k = 2. CO<sub>3</sub> and OH contents are theoretical.

Таблица 6

**Состав плюмбогумита (мас. %)**  
**Plumbogummite composition (wt. %)**

Table 6

Анализ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	FeO	CuO	SrO	BaO	PbO	Сумма
18312h	25.81	16.89	8.35	0.99	2.73	6.68	0.89	3.27	–	15.07	80.67
18312j	24.41	18.32	5.70	0.30	2.41	4.75	1.83	1.82	0.56	23.25	83.35
18312h	$(\text{Pb}_{0.39}\text{Ca}_{0.28}\text{Sr}_{0.18}\text{K}_{0.12})_{0.99}(\text{Al}_{2.95}\text{Fe}_{0.54}\text{Cu}_{0.07})_{3.56}[(\text{PO}_4)_{1.39}(\text{SO}_4)_{0.61}]_{2.00}(\text{OH})_6$										
18312j	$(\text{Pb}_{0.63}\text{Ca}_{0.26}\text{Sr}_{0.11}\text{K}_{0.04}\text{Ba}_{0.02})_{1.06}(\text{Al}_{2.91}\text{Fe}_{0.40}\text{Cu}_{0.14})_{3.45}[(\text{PO}_4)_{1.57}(\text{SO}_4)_{0.43}]_{2.00}(\text{OH})_6$										

*Примечание.* Формула рассчитана на сумму анионов = 2. Количество ОН-групп теоретическое.

*Note.* Formula is calculated for the sum of anions = 2. The number of OH-groups is theoretical.

Таблица 7

## Состав хризоколлы и опала (мас. %)

Table 7

## Composition of chrysocolla and opal (wt. %)

Анализ	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	FeO	CoO	CuO	PbO	Сумма
18220a	0.33	0.27	38.97	–	0.12	0.25	–	0.20	–	47.40	–	87.56
18220b	7.91	–	43.97	–	0.09	0.27	–	0.48	–	35.52	–	88.25
18303a	0.42	1.57	36.78	0.24	0.11	1.44	–	3.46	–	47.10	–	91.14
18303b	0.61	0.96	45.00	0.27	0.25	1.18	–	20.23	–	19.25	–	87.75
18303c	0.45	0.99	25.48	–	0.11	1.09	20.74	18.08	0.55	11.03	0.47	78.99
18303e	0.57	1.42	40.08	–	–	1.97	–	10.45	–	35.61	–	90.09
18313n	0.58	1.01	39.68	–	–	0.94	–	1.28	–	45.48	–	88.98
18220a	Хризоколла											
18220b	Медистый опал											
18303a	Хризоколла											
18303b	Медисто-железистый опал											
18303c	Марганцовистый опал											
18303e	Медисто-железистый опал											
18313n	Медистый опал											

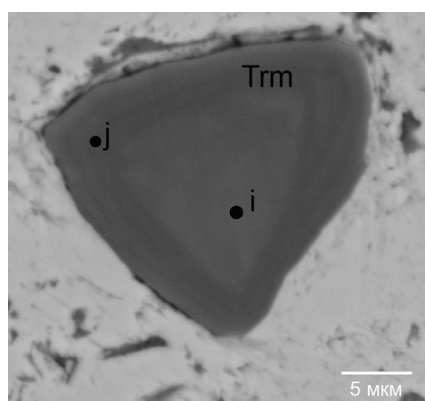


Рис. 3. Зональный кристалл турмалина в гидроксидно-железистой матрице.

Изображение в отраженных электронах. Точкам на рисунке соответствуют анализы 18220i и 18220j из табл. 8 соответственно.

Fig. 3. Zonal tourmaline crystal in Fe hydroxides.

BSE-image. Points correspond to analyses 18220i and 18220j in Table 8, respectively.

Сульфидная минерализация имела вкрапленную и густовкрапленную текстуру, которая наследуется окисленными рудами. Среди реликтовых минералов распространены кварц, плагиоклаз и калиевые полевые шпаты, слюды и турмалин. Ранее турмалин рассматривался как минерал-индикатор для привязки рудных артефактов к Еленовскому месторождению как источнику руды. Средний состав турмалина соответствует промежуточному члену ряда шерл-дравит (Бушмакин, Зайков, 1997). Наши исследования показали, что турмалин сохра-

няется в окисленных рудах и образует идиоморфные кристаллы размером до первых миллиметров. На изображениях в отраженных электронах его кристаллы отчетливо зональны с зонами разной мощности (рис. 3). Минерал имеет переменный состав (табл. 8). В некоторых кристаллах и зонах присутствует Cu, содержания которой достигают 2.05 мас. % CuO. Наибольшие вариации наблюдаются для FeO в пределах от 6.06 до 11.89 мас. %.

## Обсуждение результатов и выводы

Самородная медь и золото известны в зонах окисления многих месторождений меди, в том числе Урала (Эммонс, 1935; Смирнов, 1955; Яхонтова, Зверева, 2000). Самородная медь из зон окисления обычно не содержит каких-либо примесей и часто замещается оксидами (Белогуб, 2009).

Золото из зоны окисления Еленовского месторождения содержит высокие содержания Cu. В последнее время появилось много данных о находках гипергенного золота с примесью Cu из зон окисления. Так, в золотоносных сидеритовых бурых железняках Юбилейного колчеданного месторождения золото содержит 2.6–34.04 мас. % Cu (Блинов и др., 2016), при этом гипогенное золото из сульфидных руд содержит только примесь Ag и, в редких случаях, незначительное количество Hg (Целуйко, 2017). До 1.16 мас. % Cu и 5.49 % Hg содержится в золоте из железной шляпы месторождения Балта-Тау (Зайков и др., 2003). В то же

Таблица 8

Table 8

**Состав турмалина (мас. %)**  
**Tourmaline composition (wt. %)**

Анализ	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	CuO	Сумма
18219h	1.86	7.30	25.97	34.87	1.45	1.41	11.18	1.13	85.18
18220i	1.89	4.92	29.98	34.51	0.88	0.35	11.89	2.05	86.48
18220j	1.96	6.76	32.47	35.33	0.95	0.42	6.06	2.02	85.97
18236b	2.01	7.87	25.90	35.68	1.83	1.50	11.77	–	86.56
18236b	2.02	7.90	25.99	35.81	1.84	1.50	11.81	–	86.87
18219h	(Na <sub>0.62</sub> Ca <sub>0.27</sub> ) <sub>0.89</sub> (Mg <sub>2.76</sub> Cu <sub>0.15</sub> Fe <sub>0.09</sub> ) <sub>3.00</sub> (Al <sub>5.26</sub> Fe <sub>1.51</sub> Ti <sub>0.23</sub> ) <sub>7.00</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )(BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>4</sub>								
18220i	(Na <sub>0.64</sub> Ca <sub>0.16</sub> ) <sub>0.80</sub> (Mg <sub>1.88</sub> Fe <sub>0.85</sub> Cu <sub>0.27</sub> ) <sub>3.00</sub> (Al <sub>6.13</sub> Fe <sub>0.87</sub> Ti <sub>0.06</sub> ) <sub>7.06</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )(BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>4</sub>								
18220j	(Na <sub>0.64</sub> Ca <sub>0.17</sub> ) <sub>0.82</sub> (Mg <sub>2.52</sub> Cu <sub>0.26</sub> Fe <sub>0.22</sub> ) <sub>3.00</sub> (Al <sub>6.49</sub> Fe <sub>0.64</sub> Ti <sub>0.07</sub> ) <sub>7.20</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )(BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>4</sub>								
18236b	(Na <sub>0.65</sub> Ca <sub>0.33</sub> ) <sub>0.98</sub> (Mg <sub>2.91</sub> Fe <sub>0.09</sub> ) <sub>3.00</sub> (Al <sub>5.12</sub> Fe <sub>1.56</sub> Ti <sub>0.24</sub> ) <sub>6.92</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )(BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>4</sub>								
18236b	(Na <sub>0.66</sub> Ca <sub>0.33</sub> ) <sub>0.99</sub> (Mg <sub>2.91</sub> Fe <sub>0.09</sub> ) <sub>3.00</sub> (Al <sub>5.12</sub> Fe <sub>1.56</sub> Ti <sub>0.24</sub> ) <sub>6.92</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )(BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>4</sub>								

*Примечание.* ЭДС не определены содержания B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. OH и B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – теоретические. Формулы рассчитаны на 6 атомов Si.

*Note.* B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents were not defined using EDS. OH and B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents are theoretical. Formulas are calculated by 6 Si atoms.

время, в золоте из подзоны выщелачивания других колчеданных объектов содержания Cu низкие (до 0.2 мас. % на Осеннем месторождении, Белогуб, 2009ф) или отсутствуют (Гайское (Трофимов и др., 1992; Сергеев и др., 1994) и Западно-Озерное (Belogub et al., 2003) месторождения).

Обогащенное Cu золото встречено в бурых железняках не только месторождений колчеданного семейства. В золоте из железной шляпы Верхне-Аршинского стратиформного месторождения Zn содержания Cu составляли 1.37–1.81 мас. %, несмотря на то, что первичные руды не содержат Cu, а в зоне окисления она встречена только в составе природной латуни (Блинов, 2015). В верхней части зоны окисления Гумешевского медно-скарново-порфирикового месторождения содержания Cu в самородном золоте достигают 1.1 мас. % и более, при этом на нижних горизонтах золото не содержит Cu (Азовскова и др., 2016, 2017). Следует отметить, что в нижних частях зон окисления колчеданных месторождений гипергенное золото также не содержит значимые количества Cu. «Современное» медьсодержащее золото размером до 1 мкм установлено в торфяниках, в которые стекают дренажные воды отвалов Ново-Урского золото-сульфидного месторождения (Кемеровская область) (Мягкая и др., 2013). О.Б. Азовскова с соавторами (2017) полагают, что медистое золото на Гумешевском месторождении имеет гипергенно-гипогенный характер и может быть связано с процессами аргиллизации, завершающими развитие порфириновых си-

стем. Однако для колчеданных систем аргиллизация не характерна, а, учитывая тесную ассоциацию медистого золота с карбонатами Cu и типичными гипергенными галогенидами, можно сделать вывод о том, что происхождение медистого золота на Еленовском месторождении, также, как и на рассмотренных выше объектах, связано с гипергенными процессами.

Сульфиды, такие как акантит, халькозин и ковеллин, типичны для зон окисления медных месторождений (Смирнов, 1955). Серебро является типичной примесью в ковеллине (mindat.org).

Оксиды меди – куприт и тенорит – типичные минералы зон окисления месторождений Урала. Они встречены как на колчеданных (Осеннее, Джусинское, Бабарыкинское и др.), так и на медно-порфириковых (Михеевское, Томинское) месторождениях (Белогуб, 2009). На Еленовском месторождении тенорит образуется, замещая куприт, который, в свою очередь, замещает самородную медь. Аналогичный двухступенчатый механизм образования тенорита возможен и на других месторождениях.

Хризоколла вместе с железистым и марганцовистым опалом распространена на месторождениях многих формационных типов, чаще всего, на месторождениях с низким содержанием пирита в рудах и, как следствие, низкой кислотностью рудничных вод и образуется в последнюю стадию минералообразования, когда воды обогащены кремнеземом (Смирнов, 1955; Яхонтова, Зверев, 2000).



Химически чистый малахит Еленовского месторождения содержит только небольшое количество Fe. На других месторождениях малахит может содержать примеси Zn и Pb (Белогуб, 2009, Блинов и др., 2016, 2017). На Ишкининском и Южно-Контрольном колчеданных месторождениях в отдельных случаях может образовываться розазит (Белогуб, 2009).

Плюмбогуммит также известен в зонах окисления южноуральских месторождений: Александринском колчеданном (Новоселов, 2000) и Амурском SEDEX (Блинов, 2015). Наличие гоэита свидетельствует о вовлечении Sr в процесс гипергенного минералообразования.

Йодаргирит редкий минерал, отмеченный в бурых железняках колчеданных месторождений – Блявинском (Шадлун, 1948), Гайском (Зайков, Сергеев, 1993); Балта-Тау (Зайков и др., 2003), Александринском (Сергеев и др., 1996; Блинов и др., 2017), Кабанском (Блинов, Бутняков, 2017), а также стратиформных цинковых Амурском и Верхне-Аршинском (Блинов, 2015) месторождениях. Традиционно считается, что распространение галогенидов Ag и Cu указывает на аридные условия формирования зоны окисления (Чухров, 1950; Смирнов, 1955; Boyle, 1997).

Особенностью гипергенной ассоциации Еленовского месторождения является развитие атакамита, связанного с аридными климатическими условиями развития зоны окисления. Ранее он был описан в зонах окисления Блявинского (Герман-Русакова, 1962) и Ишкининского (Мелекесцева, Зайков, 2003) колчеданных месторождений. Эти месторождения располагаются в Оренбургской области и также находятся в аридных климатических условиях.

Несмотря на то, что Еленовское месторождение отличается по характеру минерализации от колчеданных и стратиформных месторождений, минеральный состав его зоны окисления, в целом, сходен.

На основании взаимоотношений минералов можно составить последовательность образования минералов меди. В первую очередь, сформировались сульфиды (ковеллин и халькозин), а также самородные металлы. Золото образуется вблизи контакта гидроксидов Fe с реликтовыми сульфидами (пиритом), медь – в пустотах и трещинах. После меди образовались оксиды – куприт, который часто замещает медь. В свою очередь, куприт замещается малахитом и реже теноритом. Далее отлагались

атакамит, малахит и хризоколла. Позднее малахит частично замещал атакамит. Подобные явления описаны на рудниках Богословска (ныне Карпинск, Средний Урал) (Энциклопедический..., 1890). Гидроксиды Fe, скорее всего, были сквозными и формировались на всем протяжении образования зоны окисления.

Примечательной является находка медистого турмалина. Первые находки турмалинов с концентрацией до 2 мас. % CuO были сделаны в конце 1980-х гг. в пегматитовом месторождении Баталья в Бразилии. Позднее там же был обнаружен турмалин с содержанием CuO 3.59 мас. %. Турмалин с содержаниями CuO ~2 % обнаружен на других пегматитовых месторождениях Бразилии, Нигерии, Мозамбика, Намибии. Синтетический турмалин содержит до 13.79 мас. % CuO (Верещагин, 2015). В турмалине медно-порфировых месторождений Биргильдинско-Томинского рудного узла (Южный Урал) содержания CuO были ниже предела обнаружения ЭДС (0.2 мас. %) (Бакшеев и др., 2012).

Таким образом, минеральный состав зоны окисления Еленовского медно-порфирового месторождения сходен с таковым месторождений других формационных типов, расположенных на Южном Урале, главным образом, колчеданными. Наибольшее сходство проявляется с месторождениями, находящимися в этой же климатической зоне. Обнаружение ассоциации медистого золота с атакамитом, хризоколлой и реликтовым медистым турмалином в реликтах руд на древних поселениях может свидетельствовать, что окисленные руды Еленовского медно-порфирового месторождения служили источником сырья в древности. Наличие Ag в рудах при металлургическом переделе в эпоху бронзы должно наследоваться в выплавляемом металле.

*Автор выражает благодарность В.В. Зайкову за предоставленные образцы, Е.В. Белогуб – за плодотворное обсуждение и критику работы. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-00-00030 КОМФИ.*

## Литература

Азовскова О.Б., Малюгин А.А., Ровнушкин М.Ю. (2016) Самородное золото из рудоносного карста Гумешевского месторождения, Средний Урал. *Металлогения древних и современных океанов-2016. От минералогенеза к месторождениям*. Миасс, ИМин УрО РАН, 172–176.

- Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Халилова А.Ф.** (2017) Типоморфные особенности самородного золота в корах выветривания Гумешевского месторождения. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*, Пермь, ПГНИУ, 3–8.
- Бакшеев И.А., Плотинская О.Ю., Япаскурт В.О., Вигасина М.Ф., Брызгалов И.А., Грознова Е.О., Марушенко Л.И.** (2012) Турмалин месторождений Биргильдинско-Томинского рудного узла, Южный Урал. *Геология рудных месторождений*, 54(6) 540–556.
- Белогуб Е.В.** (2009) Гипергенез сульфидных месторождений Южного Урала. *Дис. ... д-ра геол.-мин. наук*, Миасс, 537 с.
- Блинов И.А.** (2015) Самородные металлы, селениды, галогениды и ассоциирующие минералы из бурых железняков Амурского и Верхне-Аршинского месторождений (Южный Урал). *Литосфера*, (1), 65–74.
- Блинов И.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А.** (2016) Гипергенные самородные металлы, интерметаллиды, сульфиды и селениды в бурых железняках Юбилейного месторождения, Южный Урал. *Металлогения древних и современных океанов-2016. От минералогенеза к месторождениям*. Миасс, ИМин УрО РАН, 106–110.
- Блинов И.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А.** (2017) Минералогия золота и серебра в бурых железняках Александринского месторождения (Южный Урал). *Минералогия*, 3(3), 28–36.
- Блинов И.А., Бутняков А.В.** (2017) Минералы зоны окисления Кабанского колчеданного месторождения (Средний Урал) *Металлогения древних и современных океанов-2017. Дифференциация и причины разнообразия рудных месторождений*. Миасс, ИМин УрО РАН, 70–74.
- Бушмакин А.Ф., Зайков В.В.** (1997) Еленовское медно-турмалиновое месторождение – вероятный источник руды для медеплавильного производства Аркаима. *Уральский минералогический сборник*, 7, 116–122.
- Верещагин О.С.** (2015) Кристаллохимия природных и синтетических турмалинов, содержащих 3d элементы. *Дис. ... канд. геол.-мин. наук*, Санкт-Петербург, 165.
- Герман-Русакова Л.Д.** (1962) Миграция элементов в зоне окисления Блявинского медноколчеданного месторождения на Южном Урале. *Труды института геологии рудных месторождений*, Москва, АН СССР, 128 с.
- Зайков В.В., Белогуб Е.В., Котляров В.А.** (2003) Галогениды серебра и самородное золото из зоны окисления месторождения Балта-Тау (Южный Урал). *Минералогия Урала. Т. 2. Материалы IV Всероссийского совещания*. Миасс, ИМин УрО РАН, 16–20.
- Зайков В.В., Сергеев Н.Б.** (1993) Зона гипергенеза серноколчеданной залежи Гайского месторождения (Южный Урал). *Геология рудных месторождений*, 4, 20–32.
- Зайков В.В., Юминов А.М., Анкушев М.Н., Ткачев В. В., Носкевич В.В., Епимахов А.В.** (2013) Горно-металлургические центры бронзового века в Зауралье и Мугоджарах. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Геoarхеология. Этнология. Антропология»*, 1(2), 174–195.
- Контарь Е. С.** (2013) Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 199 с.
- Кузьмина Е.Е.** (1962) Археологические исследования памятников Еленовского микрорайона андроновской культуры. *Краткие сообщения Института археологии*, 88, 84–92.
- Левитский Л.П.** (1941) О древних рудниках. М.–Л., Госгеоллитиздат, 56 с.
- Мелекесцева И.Ю., Зайков В.В.** (2003) Руды Ишкининского кобальт-медноколчеданного месторождения (Южный Урал). Миасс, ИМин УрО РАН, 122 с.
- Минина О.В., Мигачев И.Ф.** (2018) Медно-порфиновые провинции и зоны Южного Урала (прогнозно-металлогеническое районирование). *Отечественная геология*, 4, 26–41.
- Мягкая И.Н., Лазарева Е.В, Густайтис М.А., Заякина С.Б., Полякова Е.В., Жмодик С.М.** (2013) Золото в системе сульфидные отходы и торфяник как модель поведения в геологических процессах. *Доклады академии наук*, 453(2), 201–206.
- Новоселов К.А.** (2000) Зоны окисления над слепыми колчеданными залежами Александринского и Западно-Озерного месторождений (Южный Урал). *Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук*, Санкт-Петербург, 16 с.
- Сергеев Н.Б., Бугельский Ю.Ю., Кузнецова О.Ю.** (1996) Распределение золота в зоне окисления колчеданных месторождений Урала: влияние состава первичных руд и климата. *Геология рудных месторождений*, 38(4), 321–333.
- Сергеев Н.Б., Зайков В.В., Лапутина И.П., Трофимов О.В.** (1994) Золото и серебро в зоне гипергенеза серноколчеданной залежи Гайского месторождения (Южный Урал). *Геология рудных месторождений*, 36(2), 169–183.
- Смирнов С.С.** (1955) Зона окисления сульфидных месторождений. Издание третье. М.–Л., Издательство Академии наук СССР, 232 с.
- Тальнов Е.С., Кригер М.А., Рихтер Я.А., Карпов А.М.** (1986) Геология и медно-порфировая минерализация Еленовского рудного района (Южный Урал). *Металлогения Южного Урала*. Уфа, БФАН СССР, 71–78.
- Трофимов О.В., Зайков В.В., Сергеев Н.Б., Масленникова С.П.** (1992) Зона окисления Гайского медноколчеданного месторождения. Миасс, ИМин УрО РАН, 62 с.
- Целуйко А.С.** (2017) Минералы золота и серебра в рудных фациях Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2017. Дифференциация и причины*

разнообразия рудных месторождений. Миасс, ИМин УрО РАН, 74–78.

**Черных Е.Н.** (1966) История древнейшей металлургии Восточной Европы. М., Наука, 144 с.

**Чухров Ф.В.** (1950) Зона окисления сульфидных месторождений степной части Казахстана (особенности и закономерности парагенезиса минералов). М., АН СССР, 244 с.

**Шадлун Т.Н.** (1948) Минералогия зоны окисления колчеданного месторождения Блява на Южном Урале. Труды ИГН АН СССР, серия рудных месторождений, 96(11), 58 с.

**Эммонс В.** (1935) Вторичное обогащение рудных месторождений. М.–Л., Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР. 479 с.

Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона (1890), II, Атакамит. Электронная версия.

**Яхонтова Л.К., Зверева В. П.** (2000) Основы минералогии гипергенеза: Учеб. пособие. Владивосток, Дальнаука, 331 с.

**Belogub E.V., Novoselov K.A., Spiro B., Yakovleva B.** (2003) Mineralogical and sulphur isotopic features of the supergene profile of Zapadno-Ozernoye massive sulphide and gold-bearing gossan deposit, South Urals. *Mineralogical Magazine*, 67(2), 339–354.

**Boyle D.R.** (1997) Iodargyrite as an indicator of arid climatic conditions and its association with gold-bearing glacial tills of the Chibougamau – Chapais area, Quebec. *Canadian Mineralogist*, 35(1), 23–34.

## References

**Azovskova O.B., Malyugin A.A., Rovnushkin M.Yu.** (2016) [Native gold from ore-bearing karst of the Gumeshevskoe deposit, Central Urals]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2016. Ot mineralogeneza k mestorozhdeniyam [Metallogeny of ancient and modern oceans-2016. From mineralogenesis to deposits]*. Miass, IMin UrO RAN, 172–176. (in Russian)

**Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Khalilova A.F.** (2017) [Typomorphic features of native gold from weathering mantle of the Gumeshevskoe deposit]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo. [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]*. Perm, PGNIU, 3–8. (in Russian)

**Bakshiev I.A., Plotinskaya O.Yu., Yapaskurt V.O., Vigasina M.F., Bryzgalov I.A., Groznova E.O., Marushchenko L.I.** (2012) Tourmaline from deposits of the Birgil'da–Tomino ore cluster, South Urals. *Geology of Ore Deposits*, 54(6), 458–473.

**Belogub E.V.** (2009) [Supergene profile of sulfide deposits of the South Urals]. *[Dissertation of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora geologo-mineralogicheskikh nauk.* Miass, 537 p. (in Russian)

**Belogub E.V., Novoselov K.A., Spiro B., Yakovleva B.** (2003) Mineralogical and sulphur isotopic features of the supergene profile of Zapadno-Ozernoye massive sulphide and gold-bearing gossan deposit, South Urals. *Mineralogical Magazine*, 67(2), 339–354.

**Blinov I.A.** (2015) [Native metals, selenides, halides and associated minerals from brown iron ore of the Amur and Verkhne-Arshinsky deposits (South Ural)]. *Litosfera [Lithosphere]*, (1), 65–74. (in Russian)

**Blinov I.A., Belogub E.V., Novoselov K.A.** (2016). [Supergene native metals, intermetallides, sulphides and selenides in brown iron ore of the Yubileynoe deposit, South Ural]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2016. Ot mineralogeneza k mestorozhdeniyam. [Metallogeny of ancient and modern oceans-2016. From mineralogenesis to deposits]*, Miass, IMin UrO RAN, 106–110. (in Russian)

**Blinov I.A., Belogub E.V., Novoselov K.A.** (2017) [Mineralogy of gold and silver of gossans of the Aleksandrinskoe deposit (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 3(3), 28–36. (in Russian)

**Blinov I.A., Butniakov A.V.** (2017) [Minerals of oxidation zone of the Kaban massive sulfide deposit (Central Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2017. Differentsiatsiya i prichiny raznoobraziya rudnykh mestorozhdeniy [Metallogeny of ancient and modern oceans-2017. Differentiation and reasons of diversity of mineral deposits]*. Miass, IMin UrO RAN, 70–74. (in Russian)

**Boyle D.R.** (1997) Iodargyrite as an indicator of arid climatic conditions and its association with gold-bearing glacial tills of the Chibougamau – Chapais area, Quebec. *Canadian Mineralogist*, 35(1). 23–34.

**Bushmakina A.F., Zaikov V.V.** (1997) [Elenovka copper-tourmaline deposit – a probable ore source for copper metallurgy of Arkaim]. *Ural'skiy mineralogicheskii sbornik [Uralian mineralogical collection]*, (7), 116–122. (in Russian)

**Chernykh E.N.** (1966) [History of ancient metallurgy of Eastern Europe]. Moscow, Nauka., 144 p. (in Russian)

**Chukhrov F.V.** (1950) [Oxidation zone of sulfide deposits of a steppe part of Kazakhstan (features and patterns of mineral assemblages)]. Moscow, AN SSSR, 244 p. (in Russian)

**Emmons W.** (1935) [Secondary enrichment of ore deposits]. Moscow–Leningrad: NKTP USSR, 479 p. (in Russian)

**Encyclopedic dictionary of F.A. Brockhaus and I.A. Efron (1890), Volume II, Atacamite. Electron version.** (in Russian)

**German-Rusakova L.D.** (1962) [Migration of elements in oxidation zone of the Blyava copper-sulfide deposit of the Southern Urals]. *Trudy instituta geologii rudnykh mestorozhdeniy. [Proceedings of the Institute of Geology of Ore Deposits]*. Moscow, AN SSSR, 128 p. (in Russian)

**Kontar E.S.** (2013) [Geological and economic types of Cu, Zn and Pb deposits of the Urals (geological setting,

evolution, prospects)]. Yekaterinburg, Izd-vo UGSU, 199 p. (in Russian)

**Kuzmina E.E.** (1962) [Archaeological study of monuments of the Elenovka area of the Andronovo culture]. *Kratkiye soobshcheniya Instituta arkheologii [Brief reports of the Institute of Archeology]*, **88**, 84–92. (in Russian)

**Levitsky L.P.** (1941) [About ancient mines]. Moscow–Leningrad, Gosgeollitizdat, 56 p. (in Russian)

**Melekestseva I.Yu., Zaikov V.V.** (2003) [Ores of the Ishkinino Co-Cu massive sulfide deposit (South Urals)]. Miass, IMin UrO RAN. 122 p. (in Russian)

**Minina O.V., Migachyov I.F.** (2018) [Porphyry copper provinces and zones of the Southern Urals (predictive metallogenic zoning)]. *Otechestvennaya geologiya. [National geology]*, (4), 26–41 (in Russian)

**Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaitis M.A., Zayakina S.B., Zhmodik S.M., Polyakova E.V.** (2013) Gold in the sulfide waste-peat bog system as a behavior model in geological processes. *Doklady Earth Sciences*, **453**(1), 1132–1136.

**Novoselov K.A.** (2000) [Oxidation zones over the blind massive sulfide deposits of the Aleksandrinskoe and Zapadno-Ozernoe deposits (Southern Urals)]. [Abstract of PhD thesis]. *Avtoreferat dissertatsii kandidata g.-m. n. St.-Petersburg*, 18 p. (in Russian)

**Sergeev N.B., Bugelsky Yu.Yu., Kuznetsova O.Yu.** (1996) [Distribution of gold in oxidation zone of massive sulfide deposits of the Urals: the effect of composition of primary ores and climate]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **38**(4), 321–333. (in Russian)

**Sergeev N.B., Zaykov V.V., Laputina I.P., Trofimov O.V.** (1994) [Gold and silver in supergenesis zone of a massive sulfide orebody of the Gay deposit (South Urals)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **36**(2), 169–183. (in Russian)

**Shadlun T.N.** (1948) [Mineralogy of oxidation zone of the Blyava massive sulfide deposit of the South Urals]. *Trudy Instituta geologii AN SSSR, seriya rudnykh mestorozhdeniy [Proceedings of the Institute of Geology, Academy of Sciences of the USSR, series of ore deposits]*, Moscow, **96**(11), 58 p. (in Russian)

**Smirnov S.S.** (1955) [Oxidation zone of sulfide deposits]. Moscow–Leningrad, AN SSSR. 232 p. (in Russian)

**Tal'nov E.S., Krieger M.A., Richter Ya.A., Karpov A.M.** (1986) [Geology and copper-porphyry mineralization of the Elenovka ore region (Southern Urals)] *Metallogeniya Yuzhnogo Urala. [Metallogeny of the Southern Urals]*. Ufa, BFAN SSSR, 71–78. (in Russian)

**Trofimov O.V., Zaykov V.V., Sergeev N.B., Maslennikova S.P.** (1992) [Oxidation zone of the Gay copper massive sulfide deposit]. Miass, IMin UrO RAN, 62 p. (in Russian)

**Tseluyko A.S.** (2017) [Au and Ag minerals of ore facies of the Yubileynoe copper massive sulfide deposit (South Urals)]. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2017. Differentsiatsiya i prichiny raznoobraziya*

*rudnykh mestorozhdeniy. [Metallogeny of ancient and modern oceans-2017. Differentiation and reasons of diversity of ore deposits.]*. Miass, IMin UrO RAN, 70–74. (in Russian)

**Vereshchagin O.S.** (2015) [Crystal chemistry of natural and synthetic tourmalines containing 3d elements]. [PhD thesis]. *Avtoreferat dissertatsii kandidata g.-m. n. St.-Petersburg*, 165 p. (in Russian)

**Yakhontova L.K., Zvereva V.P.** (2000) [Fundamentals of supergenesis mineralogy: a tutorial]. Vladivostok, Dal'nauka, 331 p. (in Russian)

**Zaykov V.V., Belogub E.V., Kotlyarov V.A.** (2003) [Silver halogenides and native gold of the oxidation zone of the Balta-Tau deposit (South Urals)]. *Mineralogiya Urala – materialy IV Vserossiyskogo soveshchaniya [Mineralogy of the Urals. Proceedings of IV All-Russian Conference]*. Miass, IMin UrO RAN, 16–20. (in Russian)

**Zaykov V.V., Sergeev N.B.** (1993) [Supergenes zone of the massive sulfide orebody of the Gay deposit (South Urals)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (4), 20–32. (in Russian)

**Zaykov V.V., Yuminov A.M., Ankushev M.N., Tkachyov V. V., Noskevich V.V., Yepimakhov A.V.** (2013) [Mining and metallurgical centers of the Bronze Age in the Trans-Urals and Mugodzhary]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Geoarkheologiya. Etnologiya. Antropologiya» [News of the Irkutsk State University. Series «Geoarcheology. Ethnology. Anthropology»]*, **1**(2), 174–195. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 28 марта 2019 г.