

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

**С.В. Прибавкин<sup>1</sup>, А.В. Коровко<sup>1</sup>, Г.Ю. Шардакова<sup>1</sup>, А.В. Антонишин<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН,*

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

*<sup>2</sup>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. Pribavkin<sup>1</sup>, A.V. Korovko<sup>1</sup>, G.Yu. Shardakova<sup>1</sup>, A.V. Antonishin<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS,*

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

*<sup>2</sup>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 $\alpha$  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

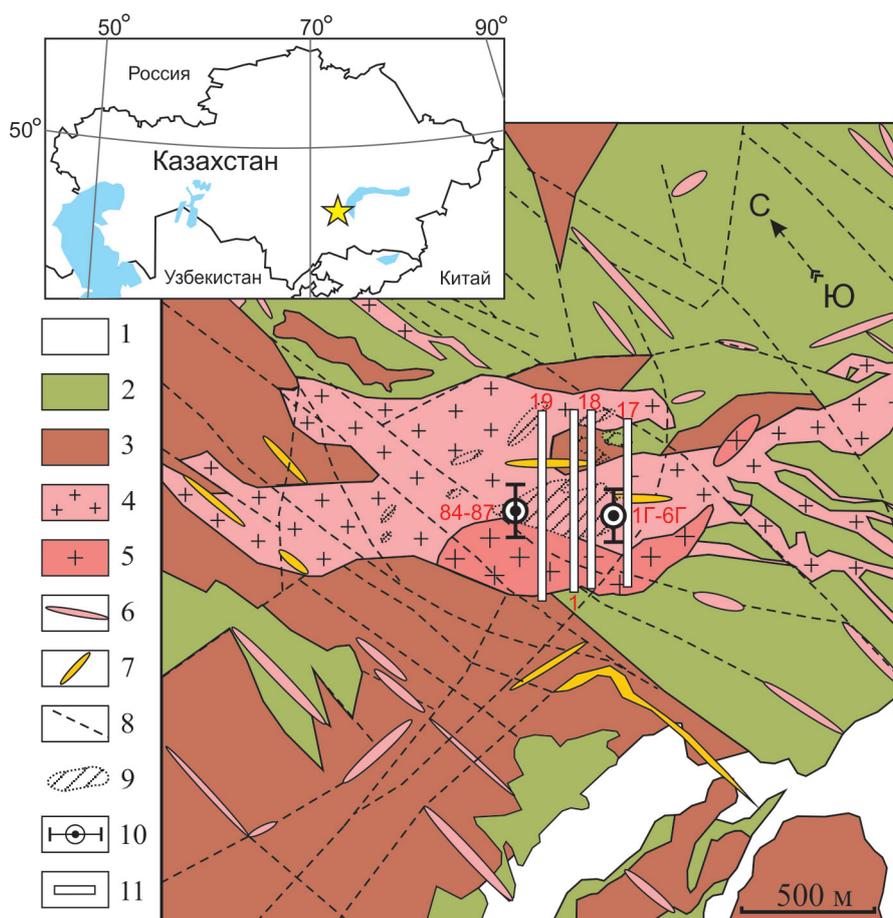


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Южно-Сарышаганского массива по (Цаплин, 1956ф; Изотов и др., 1983ф) с упрощениями и дополнениями.

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.

Малахит  $Cu_2(CO_3)(OH)_2$  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 спертиниита  $[Cu(OH)_2]$ , 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  $(\text{Å}^{-1})$ : 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 спертинииту 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

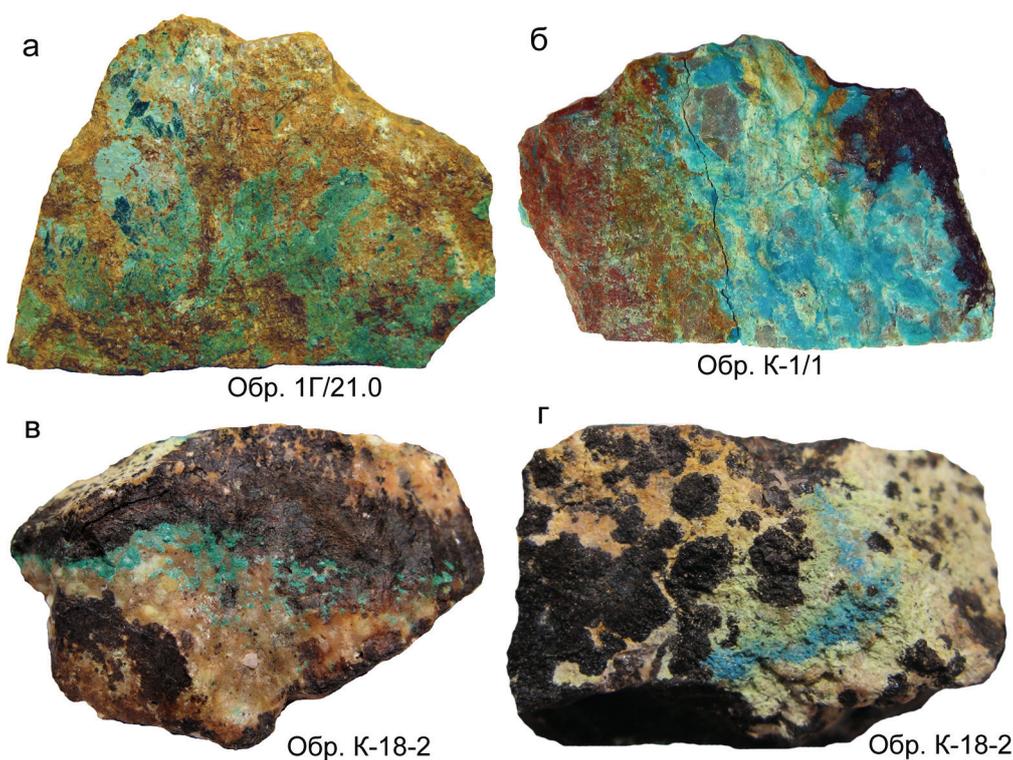


Рис. 2. Образцы с вторичными минералами меди из зоны окисления рудопроявления Сарышаган.

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).

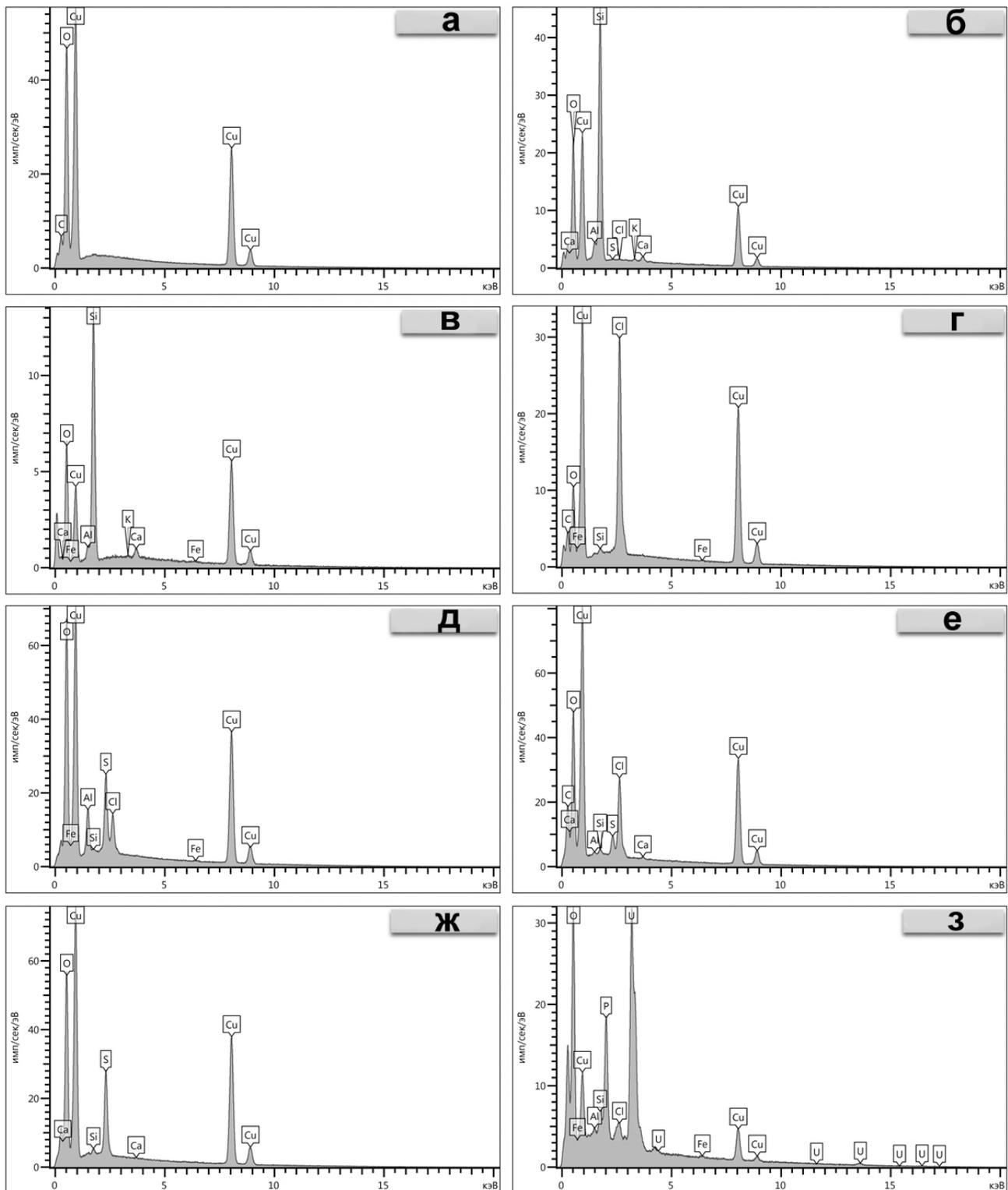


Рис. 3. Энергодисперсионные спектры медьсодержащих минералов.

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.

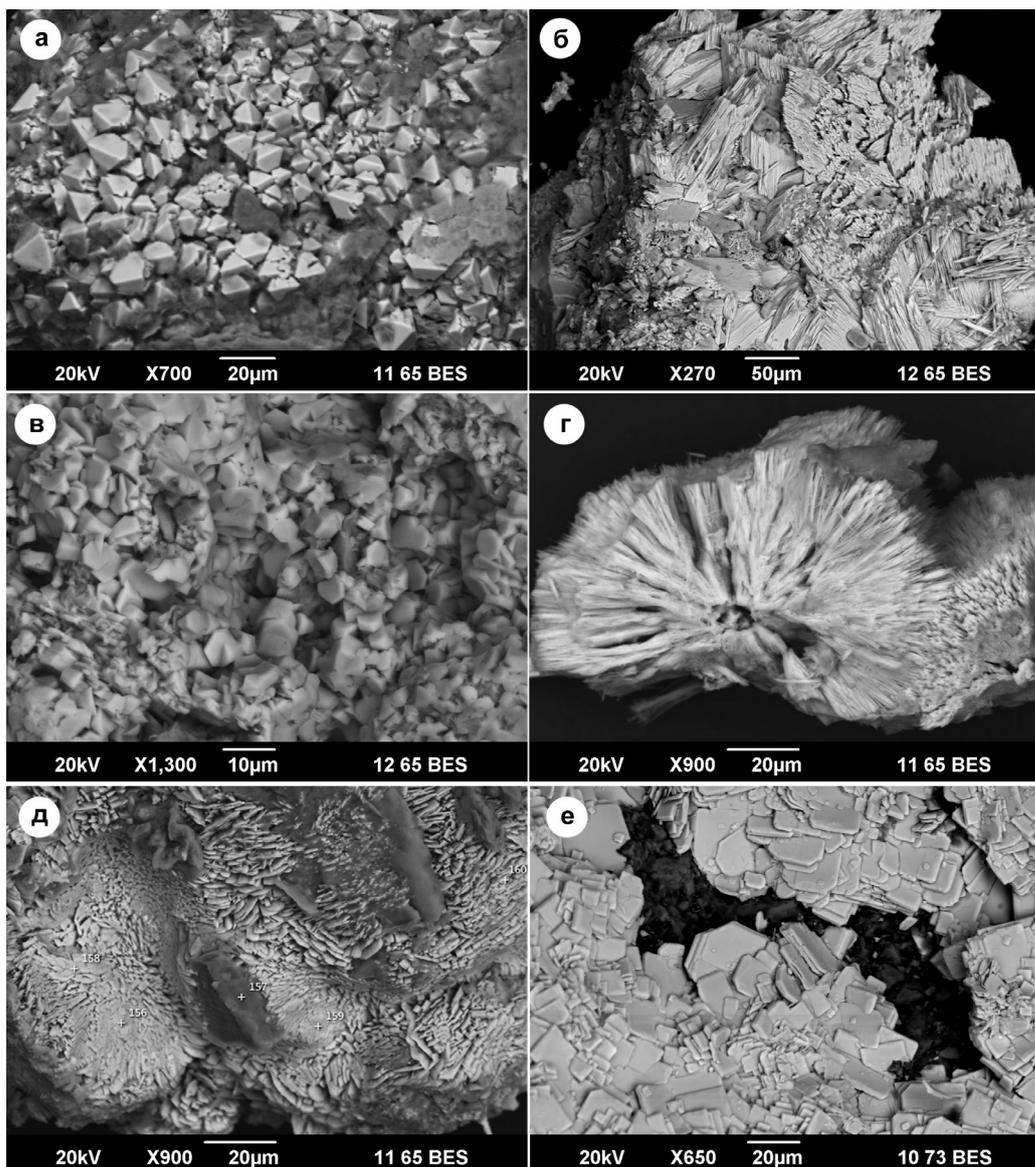


Рис. 4. Морфология минералов меди из зоны окисления рудопоявления Сарышаган.

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 Чукикамата 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 осаждается 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  $\text{SiO}_2$  и низким  $\text{P}_{\text{CO}_2}$ . 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  $\text{Cu}$ , особенно на участках понижения рельефа, занятых солончаками.

Особо отметим наличие повышенных концентраций  $\text{U}$ , 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  $\text{U}$  минерализации трещинно-инфильтрационного типа (Петров и др., 1995; Кисляков, Щеточкин, 2000). В связи с ограниченностью материала минералы  $\text{U}$  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  $\text{U}$  и типе  $\text{U}$ -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  $\text{Cu}$  показало их концентрацию в трещинных зонах с образованием прожилков и скоплений мощностью до первых сантиметров. Такая локализация  $\text{Cu}$  в форме легко растворимых солей кислородных кислот в коре выветривания резко контрастирует с локализацией  $\text{Cu}$  в форме тонкой рассеянной вкрапленности сульфидов в гранит-порфирах. В этой связи локализация и обогащение  $\text{Cu}$  трещинных зон может рассматриваться как положительный фактор при постановке отработки окисленных руд методом подземного выщелачивания. Кроме того, повышенные концентрации  $\text{U}$  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  $\text{Cu}$ , отражающее формирование зоны окисления в условиях засушливого климата; 2) зональное распределение по разрезу вторичных минералов  $\text{Cu}$  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., Язиков 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.*