

## МИНЕРАЛОГИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В РУДАХ ЗОЛОТО-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮБИЛЕЙНОЕ (КАЗАХСТАН)

**О.Ю. Плотинская**

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер. 35, г. Москва, 119017 Россия; plotin@igem.ru*

## MINERALOGY OF PRECIOUS METALS IN ORES OF THE YUBILEINOE PORPHYRY GOLD DEPOSIT (KAZAKHSTAN)

**O.Yu. Plotinskaya**

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS,  
Staromonenty per. 35, Moscow, 119017 Russia; plotin@igem.ru*

Изучена минералогия Au и Ag в рудах золото-порфирового месторождения Юбилейное (Казахстан). Основной минеральной формой является самородное золото. Его пробы варьировать от 970‰ в магнетит-гематитовой ассоциации до 733–860‰ в пирит-халькопиритовой ассоциации. Серебро присутствует в виде примеси в самородном золоте и изредка – в теллуридной форме. В ассоциации с самородным золотом установлены также минералы Bi и Pb – раклиджит, галеноклаусталит и тетрадимит-кавацулит. Применение хлоритового термометра показало, что минералы Au, Ag и Bi отлагались при температурах 250–230 °С. Установленные минеральные формы и ассоциации благородных металлов месторождения Юбилейное являются типичными для золото-порфировых месторождений.

Илл. 5. Табл. 3. Библ. 17.

*Ключевые слова:* Урал, Казахстан, порфировые месторождения, месторождение Юбилейное, минералогия, золото, серебро.

Gold and silver mineralogy is studied in ores of the Yubileinoe porphyry gold deposit (Kazakhstan). Native gold is the major gold mineral. Its fineness varies from 970‰ in magnetite-hematite assemblage to 733–860‰ in pyrite-chalcopyrite assemblage. Silver occurs as admixture in native gold and, occasionally, as silver telluride. Native gold is associated with Bi and Pb minerals: rucklidgeite, galenaclaustalite, and tetradymite-kawazulite. According to chlorite geothermometry, the Au, Ag and Bi minerals precipitated at temperatures of 250–230 °C. These features are typical of the porphyry gold deposits worldwide.

Figures 5. Tables 3. References 17.

*Key words:* Urals, Kazakhstan, porphyry deposits, Yubileinoe deposit, mineralogy, gold, silver.

### Введение

Месторождения порфирового семейства являются одним из основных источников Au – их доля в мировой добыче составляет около 20 % (Sillitoe, 2010). Это определяет важность изучения минеральных форм и ассоциаций благородных металлов (прежде всего, Au и Ag) на порфировых месторождениях. На порфировых месторождениях Южного Урала содержания Au, как правило, низкие и редко превышают 0.2 г/т (Андреев и др., 2018). В связи с этим, особый интерес представляют редкие для

Урала месторождения золото-порфирового типа. На данный момент единственным представителем этого типа на Южном Урале является месторождение Юбилейное (Грабежев, Белгородский, 1992; Plotinskaya et al., 2017).

Основой настоящего исследования стала коллекция образцов пород и руд месторождения, переданная автору А.И. Грабежовым (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург). Первые данные по минералогии руд были опубликованы ранее (Plotinskaya et al., 2017; Плотинская и др., 2018) и целью данной статьи является более де-

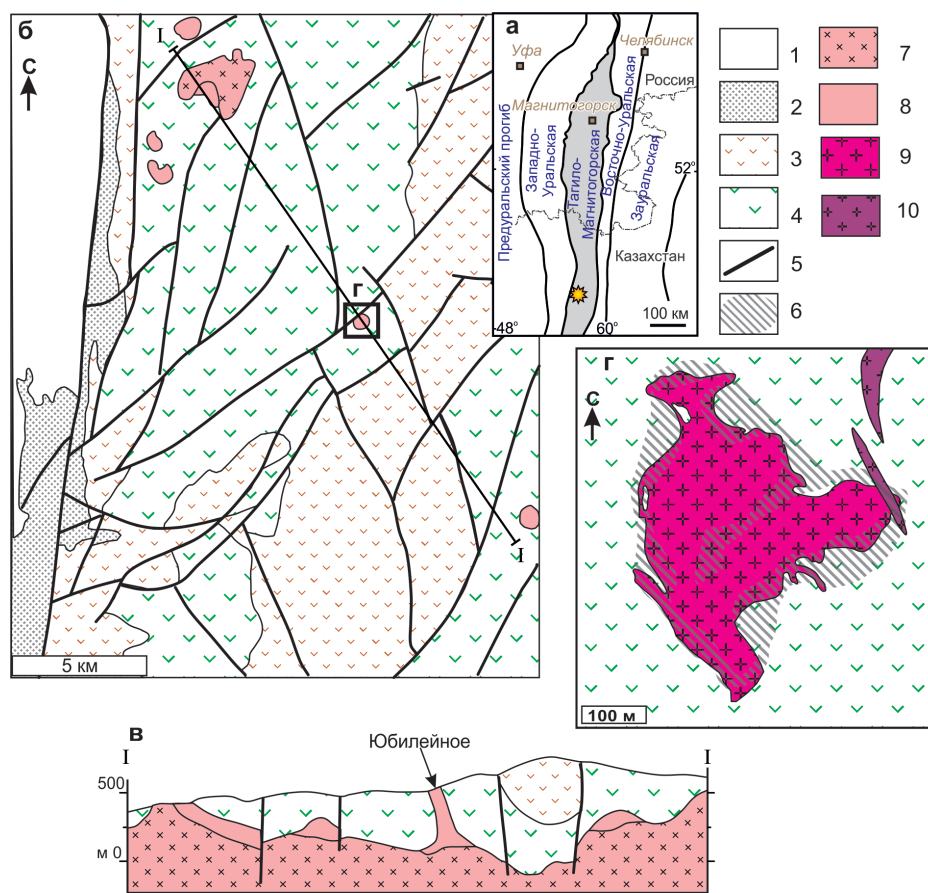


Рис. 1. Положение месторождения Юбилейное на тектонической схеме Южного Урала (а), схематическая геологическая карта (б) и разрез района месторождения (в) по (Seltmann et al., 2014), карта месторождения (г) по (Нарвайт и др., 1974).

1 – мезокайнозойские отложения; 2 – терригенный флиш (D–C); 3 – базальты, андезиты, дациты и кремнистые отложения (D<sub>2</sub>); 4 – базальты, андезиты, долериты (D<sub>1–2</sub>); 5 – разломы; 6 – рудный штокверк; 7–10 – Айрюкский интрузивный комплекс (D<sub>3</sub>–C<sub>1</sub>): 7 – габбро, диориты; 8 – гранодиориты и плагиограниты, неразделенные; 9 – биотитовые плагиогранит-порфиры; 10 – биотит-роговообманковые плагиогранит-порфиры.

Fig. 1. Position of the Yubileinoe deposit area on tectonic scheme of the South Urals (a), geological scheme (б) and cross-section along I–I line (в) after (Seltmann et al., 2014) and map of the deposit (г) after (Narvait et al., 1974).

1 – Meso-Cenozoic sediments; 2 – Devonian-Carboniferous terrigenous flysch; 3 – Middle Devonian basalt, andesite, dacite, siliceous rocks; 4 – Early-Middle Devonian basalt, andesite, dolerite; 5 – fault; 6 – ore stockwork; 7–10: Late Devonian-Early Carboniferous Ayryuk intrusive complex; 7 – gabbro, diorite; 8 – unspecified granodiorite and plagiogranite; 9 – biotite porphyry plagiogranite; 10 – biotite-hornblende porphyry plagiogranite.

тальная характеристика минеральных ассоциаций минералов Au и Ag на месторождении.

Месторождение Юбилейное (также известное как Шекарабулак-II) расположено в Западном Казахстане, в Мугалжарском районе Актюбинской области примерно в 40 км на восток от г. Эмба. Оно было открыто в 1961 г. и с начала 1970-х с перерывами разрабатывалось открытым способом с сопутствующей доразведкой (Беспяев и др., 1997). С 2015 г. месторождение подземным способом разрабатывает компания АО АлтынЭкс (AltynEx). По состоянию на 2015 г. балансовые запасы месторождения по категориям C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> составили 41109.5 тыс. т при сред-

нем содержании 2.07 г/т Au, 2.15 г/т Ag и 0.156 % Cu; запасы Au составляют 85.2 т (Годовой..., 2015).

### Краткая геологическая характеристика

Месторождение Юбилейное находится на восточном окончании Магнитогорской вулканогенной мегазоны Урала (рис. 1а). Территория месторождения сложена ранне-среднедевонскими базальтами, андезитами и долеритами и средне-позднедевонскими островодужными вулканитами (рис. 1б, в). Вулканиты образуют субмеридиональную синклираль, на западном крыле которой расположено месторождение (Абдулин и др., 1976). Вулканиты

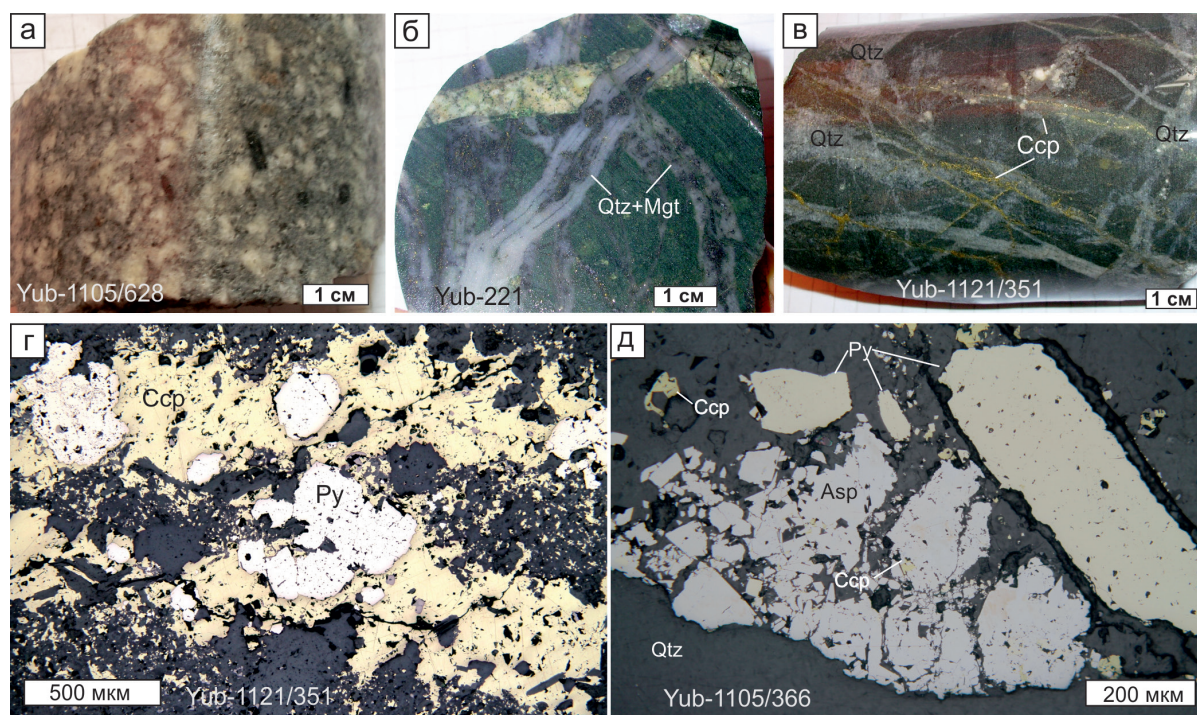


Рис. 2. Образцы пород и руд месторождения Юбилейное:

а – порфировидный, слабо измененный биотит-роговообманковый плагиогранодиорит; б – полосчатые кварц-магнетитовые прожилки в афировом базальте с микродажкой плагиогранита; в – сеть кварцевых прожилков и более поздних просечек халькопирита в афировом базальте; г – халькопирит с редкими включениями магнетита, цементирующий пирит; д – агрегат зерен арсенопирита, пирита и халькопирита жильном кварце.

Здесь и далее: Qtz – кварц, Mgt – магнетит, Ccp – халькопирит, Py – пирит, Asp – арсенопирит. Фото а, б, в – макрофотографии, фото г, д – микрофотографии в отраженном свете.

Fig. 2. Representative rock and ore types of the Yubileinoe deposit:

а – biotite-hornblende plagiogranite porphyry with a weak phyllic alteration; б – aphyric basalt with a small porphyry plagiogranite dike cut by numerous quartz-magnetite veinlets; в – aphyric basalt with a series of white quartz veinlets cut by a network of chalcopyrite stringers; г – chalcopyrite with rare magnetite inclusions overgrowing pyrite; д – arsenopyrite, pyrite, and chalcopyrite intergrowth in quartz.

Hereinafter, Qtz – quartz, Mgt – magnetite, Ccp – chalcopyrite, Py – pyrite, Asp – arsenopyrite. а, б, в – hand specimens, г, д – reflected light microphotographs.

прорваны интрузивами айрюкского комплекса, который включает три фазы: (1) габбро и габбро-диориты, (2) диориты и кварцевые диориты, (3) плагио-граниты и плагиогранит-порфиры. С внедрением последних большинство исследователей связывают золото-порфировое оруденение. Плагиогранит-порфиры образуют шток неправильной формы диаметром около 400 м (рис. 1в, г), прослеженный скважинами на глубину 600 м (Нарвайт и др., 1974). Ранняя фаза представлена биотитовыми плагиогранит-порфирами, а поздняя – биотит-роговообманковыми плагиогранит-порфирами (Абдулин и др., 1976). U/Pb возраст биотитовых плагиогранит-порфиров, определенный по циркону (SHRIMP-II), составляет  $374 \pm 3.3$  млн лет (Грабеев, 2014).

Оруденение развито, преимущественно, в экзо- и эндоконтактах штока плагиогранит-порфиров (рис. 1, 2а) и представлено штокверковыми кварц-сульфидными зонами, которые сопровождаются кварц-серицитовыми метасоматитами (филлизитами) (Shatov et al., 2014).

Наиболее ранняя рудная стадия – кварц-магнетитовая, представлена полосчатыми кварц-магнетитовыми прожилками с подчиненным гематитом (рис. 2б). На нее наложена халькопирит-пиритовая минерализация (рис. 2в–д) с подчиненным количеством борнита, молибденита, арсенопирита, сфалерита, галенита, самородным золотом, редкими шеелитом и сульфосолями, сульфотеллуридами Bi и более поздний антимонит (Абдулин и др., 1976; Плотинская и др., 2018).



### Аналитические методы

Химический состав минералов изучен на сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) Tescan Vega TS 5130 MM (CamScan) с энергодисперсионной (ЭДС) приставкой INCA Energy 350 и детектором INCA Penta FETx3 и Tescan Vega II XMU с ЭДС INCA Energy 450 и детектором INCA xSight (Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка, аналитик А.Н. Некрасов) по стандартным методикам. Время накопления спектра – 70 с, эталоны: PbTe – для Pb, FeS<sub>2</sub> – для S и химически чистые элементы – для Ag, Au, Bi, Se и Te.

### Минеральные ассоциации и состав самородного золота

Самородное золото установлено в трех образцах из экзоконтакта массива плагиогранит-порфиоров. Все образцы представляют собой афировые базальты с прожилками кварца и рудных минералов. Чаще всего самородное золото приурочено к сульфидам – пириту и халькопириту и несколько реже – к кварцу (рис. 3). Единственной примесью в самородном золоте является Ag; содержания Hg и Cu ниже предела обнаружения (1.6 и 0.3 мас. %, соответственно) (табл. 1). Все изученные выделения золота имеют однородный состав и вариации содержаний Ag в пределах одного зерна обычно не превышают 1 мас. %.

В образце с кварц-магнетитовой ассоциацией (Yub-221) самородное золото образует изометричные выделения размером до 30–40 мкм среди жильного кварца в сростании с эпидотом и калиевым полевым шпатом (рис. 3а) и содержит менее 3 мас. % Ag. В этом же образце на границе магнетита, гематита и борнита установлено самородное золото микронного размера в сростании с галеноклаусталитом (рис. 3б, в). Оно содержит 14.7 мас. % Ag и, по-видимому, относится к более поздней ассоциации.

Самородное золото из пирит-халькопиритовой ассоциации образует микронные прожилки или включения в пирите, часто совместно с халькопиритом или маложелезистым (2.77 мас. % Fe) сфалеритом (рис. 3г–ж). Содержания Ag в самородном золоте варьируют от 25.5 до 26.7 мас. %. В халькопирите самородное золото образует овальные, амёбовидные более крупные выделения размером до первых десятков микрометров (рис. 3е), содержащие 20–21 мас. % Ag.

Минералы Bi установлены в тех же образцах, что и самородное золото. Они представлены мелкими (не более 100 мкм) ксеноморфными, часто удлинёнными выделениями, которые нарастают на халькопирит или выполняют просечки в нем (рис. 3ж–к). Это позволяет говорить, что минералы Bi и самородное золото близки по времени образования и могут быть выделены в отдельную ассоциацию. В одном случае встречен раклиджит PbBi<sub>2</sub>(Te<sub>3.8</sub>Se<sub>0.2</sub>)<sub>4</sub> (табл. 2), который образует прожилки в самородном золоте (рис. 3з). Последнее содержит 14 мас. % Ag, что близко к содержаниям Ag в самородном золоте, ассоциирующем с галеноклаусталитом. Наиболее широко распространены минералы серии тетрадимит-кавацулит, состав которых варьирует от Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>(S<sub>0.7</sub>Se<sub>0.3</sub>)<sub>1</sub> до Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>(S<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>)<sub>1</sub> (табл. 2). Кроме того, отмечено микронное выделение теллурида Ag в сростании с тетрадимитом (рис. 3к).

### Условия минералообразования

Для выявления условий образования ассоциаций благородных металлов был изучен химический состав хлорита в образце Yub-1121/351, содержащем самородное золото в ассоциации с теллуридами Bi. Установлено, что агрегаты хлорита имеют зональное строение, обусловленное наличием нескольких генераций (рис. 4а, б).

Хлорит-1 выполняет краевые зоны агрегатов и образует радиально-лучистые агрегаты округлой формы диаметром около 50 мкм часто в сростании с титанитом. Хлорит-1 характеризуется высокой магнезиальностью: X(Mg) 0.63–0.75 (среднее 0.70 по пяти анализам) (рис. 4в, табл. 3). Содержание Si варьирует незначительно и составляет 5.71–5.85 ф.к. В центральных частях агрегатов (хлорит-1а) X(Mg) составляет 0.75–0.68, а в краевой части (хлорит-1б) – 0.63–0.53. Хлорит-2 выполняет каверны и прожилки, обрастает и цементирует хлорит-1. Он характеризуется более низкой магнезиальностью (X(Mg) 0.51–0.57) и более широкими вариациями содержаний Si (5.66–5.93 ф.к.) (табл. 3). Хлорит-3 совместно с халькопиритом и другими рудными минералами образует нитевидные просечки в хлоритах более ранних генераций. Он имеет еще более низкую магнезиальность, чем хлорит-2 (X(Mg) = 0.45) и Si = 5.9 ф.к. (табл. 3). По классификации (Bailey, 1988) все изученные хлориты принадлежат ряду клинохлор-дафнит с небольшой долей амезитового минала. Хлорит-1 и -2 относятся к клинохлору, а хлорит-3 – к промежуточным членам ряда клинохлор-дафнит.



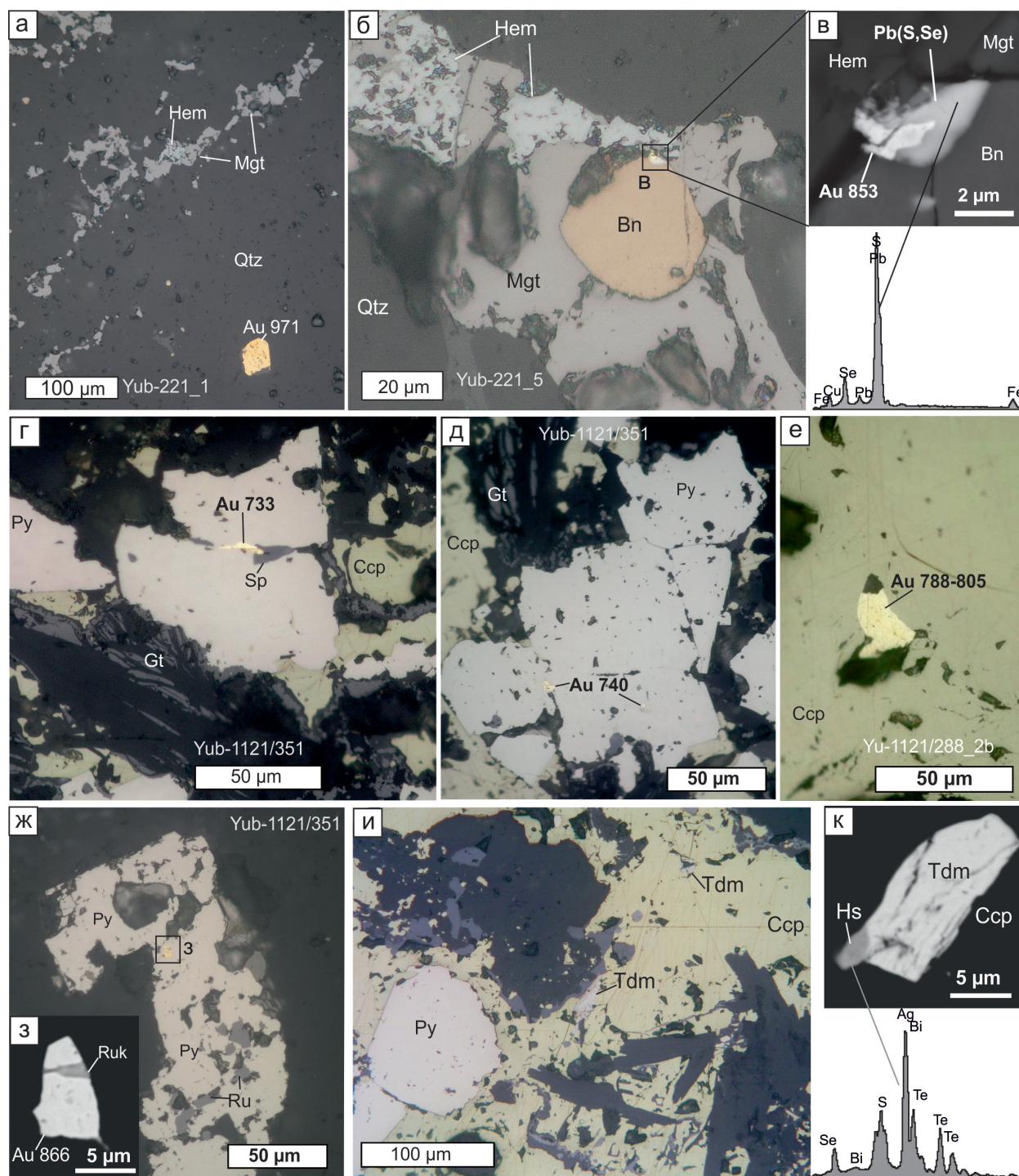


Рис. 3. Ассоциации самородного золота месторождения Юбилейное:

а – самородное золото в кварце; б, в – самородное золото и галеноклаусталит на границе борнита, магнетита и гематита и ЭД спектр галеноклаусталита; г – прожилок самородного золота и сфалерита в пирите, по которому развивается гетит; д – включения самородного золота в пирите; е – амёбовидное самородное золото в халькопирите; ж – золото в пирите с многочисленными включениями рутила; з – увеличенный фрагмент рисунка (ж): прожилок раклиджита в золоте; и – тетрадимит, нарастающий на халькопирит; к – срастание теллурида Ag с тетрадимитом среди халькопирита и ЭД спектр теллурида серебра.

Au – самородное золото, Hem – гематит, Bn – борнит, Pb(S, Se) – галеноклаусталит, Sp – сфалерит, Gt – гетит, Ru – рутил, Ruk – раклиджит, Tdm – тетрадимит, Hs – теллурид Ag. Фото в, з, к – изображения в обратно-рассеянных электронах, остальные фото – микрофотографии в отраженном свете.

Fig. 3. Assemblages of native gold from the Yubileinoe deposit:

а – native gold in quartz; б, в – native gold and galenaclausthalite at the boundary of bornite, magnetite, and hematite and ED spectrum of galenaclausthalite; г – veinlet of native gold and sphalerite in partly oxidized pyrite; д – inclusion of native gold in pyrite; е – amoeboid native gold in chalcopyrite; ж – native gold and numerous rutile within pyrite; з – enlarged fragment (ж): veinlet of rucklidgeite in native gold; и – tetradymite overgrowing chalcopyrite; к – Ag telluride intergrown with tetradymite in chalcopyrite and ED spectrum of Ag telluride.

Au – native gold, Hem – hematite, Bn – bornite, Pb(S, Se) – galenaclausthalite, Sp – sphalerite, Gt – goethite, Ru – rutile, Ruk – rucklidgeite, Tdm – tetradymite, Hs – Ag telluride. в, з, к – BSE images, other – reflected light photomicrographs.

Таблица 1

## Представительные анализы самородного золота месторождения Юбилейное (мас. %)

Table 1

## Representative analyses of native gold from the Yubileinoe deposit (wt. %)

№ п/п	№ образца	Ассоциация	Ag	Au	Сумма	Формула	Пробность, ‰
1	Yub-221	В кварце, рядом с магнетитом и гематитом	2.92	98.11	101.03	$Au_{0.95}Ag_{0.50}$	971
2			2.86	97.75	100.61	$Au_{0.95}Ag_{0.50}$	972
3		В борните с галеноклаусталитом	14.66	85.34	100.00*	$Au_{0.76}Ag_{0.24}$	853
4	Yub-1121/351	В пирите с раклиджитом	14.01	85.99	100.00*	$Au_{0.77}Ag_{0.23}$	860
5		В пирите	25.49	74.50	99.99	$Au_{0.62}Ag_{0.38}$	745
6			25.65	72.70	98.35	$Au_{0.61}Ag_{0.39}$	739
7		Со сфалеритом в пирите	26.70	73.21	99.91	$Au_{0.60}Ag_{0.40}$	733
8	Yub-1121/288	В халькопирите	19.65	81.09	100.74	$Au_{0.69}Ag_{0.31}$	805
9			21.42	79.54	100.96	$Au_{0.67}Ag_{0.33}$	788

Примечание. \* – анализы нормированы к 100 % из-за малого размера зерна.

Note. \* – the analyses are normalized to 100 % due to small grain size.

Таблица 2

## Представительные анализы минералов Bi и Pb месторождения Юбилейное (мас. %)

Table 2

## Representative analyses of Bi and Pb minerals from the Yubileinoe deposit (wt. %)

№ п/п	Bi	Pb	Te	S	Se	Сумма	Формула
1	38.49	16.39	43.67	–	1.58	100.13	$(Pb_{0.89}Bi_{2.06})(Te_{2.95}Se_{0.20})_{\Sigma 4.05}$
2	58.91	–	34.55	2.95	3.37	99.77	$Bi_{2.05}Te_{1.97}(S_{0.67}Se_{0.31})_{\Sigma 0.98}$
3	57.99	–	33.95	2.77	4.85	99.56	$Bi_{2.01}Te_{1.92}(S_{0.63}Se_{0.44})_{\Sigma 1.07}$
4	59.12	–	33.62	2.79	4.56	100.09	$Bi_{2.05}Te_{1.91}(S_{0.63}Se_{0.42})_{\Sigma 1.05}$
5	57.98	–	33.42	2.41	5.55	99.36	$Bi_{2.03}Te_{1.91}(S_{0.55}Se_{0.51})_{\Sigma 1.06}$
6	58.44	–	33.79	2.44	5.55	100.21	$Bi_{2.02}Te_{1.92}(S_{0.55}Se_{0.51})_{\Sigma 1.06}$
7	58.72	–	33.43	2.36	5.41	99.92	$Bi_{2.05}Te_{1.91}(S_{0.54}Se_{0.50})_{\Sigma 1.04}$
8	59.29	–	34.47	2.45	5.55	101.75	$Bi_{2.03}Te_{1.93}(S_{0.55}Se_{0.50})_{\Sigma 1.05}$
9	59.07	–	33.19	2.45	5.07	99.78	$Bi_{2.07}Te_{1.90}(S_{0.56}Se_{0.47})_{\Sigma 1.03}$
10	58.93	–	34.36	2.51	5.48	101.27	$Bi_{2.02}Te_{1.93}(S_{0.56}Se_{0.50})_{\Sigma 1.06}$

Примечание. Прочерк – элемент не обнаружен; анализ 1 – раклиджит, обр. Yub-221; анализы 2–10 – тетрадимит, обр. Yub-1121/351.

Note. Dash – not found; analysis 1 – rucklidgeite, sample Yub-221; analyses 2–10 – tetradymite, sample Yub-1121/351.

## Обсуждение результатов

Можно предположить, что высокомагнезиальный хлорит-1 по времени образования синхронен с отложением магнетита и гематита, которые аккумуля-

лировали большую часть Fe в системе. Завершение формирования магнетит-гематитовой ассоциации привело к образованию менее магнезиального и более железистого хлорита-2. Температуры образования хлорита-1 и -2, рассчитанные по геотер-



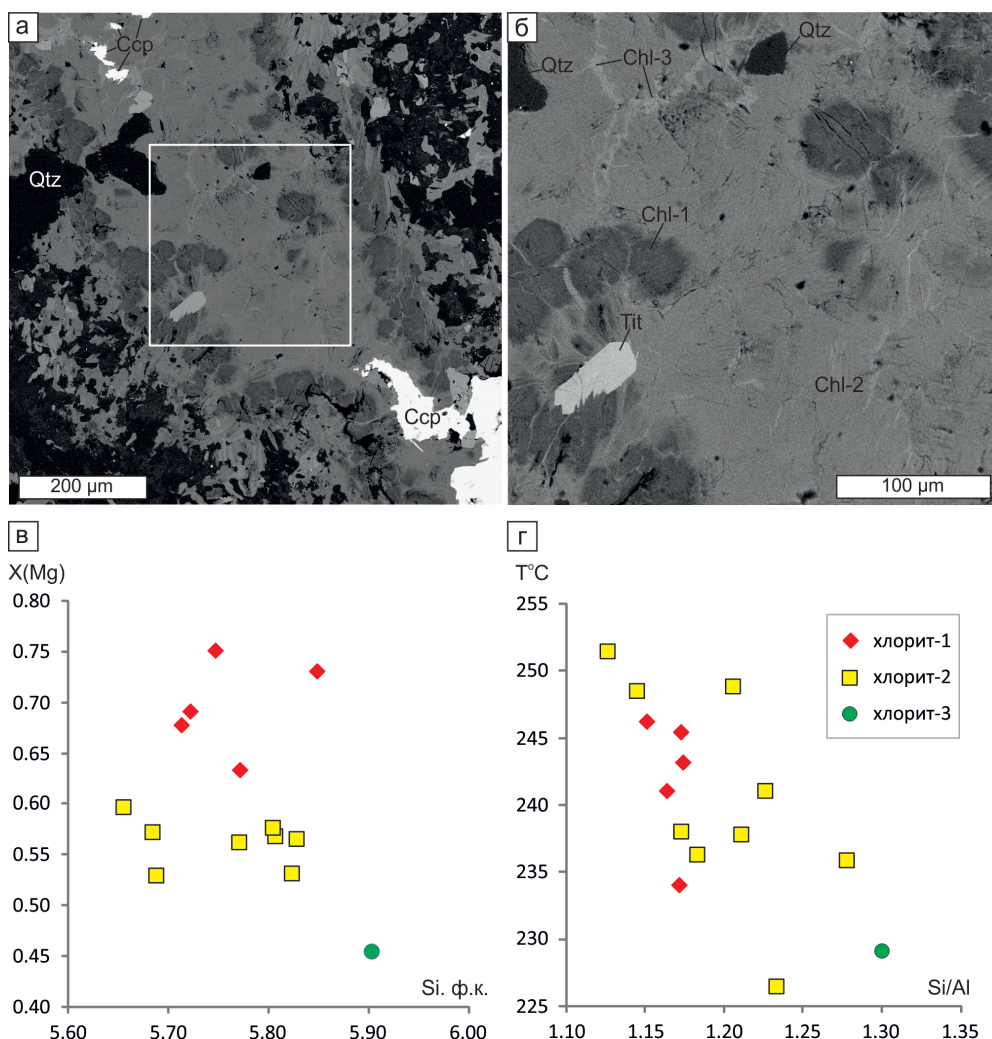


Рис. 4. Зональное строение агрегатов хлорита в обратно-рассеянных электронах (а, б), эволюция их состава (в) и вариации температуры образования хлорита месторождения Юбилейное (г).

Fig. 4. Zoned chlorite (BSE images, а, б), compositional variations (в) and formation temperature of chlorite of the Yubileinoe deposit (г).

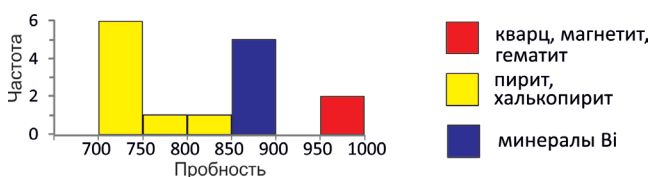


Рис. 5. Гистограмма пробности самородного золота месторождения Юбилейное.

Fig. 5. Histogram of native gold fineness of the Yubileinoe deposit.

мометру (Котельников и др., 2012), составили 234–246 °С (среднее 242 °С) и 226–251 °С (среднее 241 °С) (табл. 3), т. е. достаточно близки. Это позволяет говорить о том, что эволюция состава хлорита-1 и -2 была обусловлена, в первую очередь, химизмом флюида. Хлорит-3, близкий по времени

образования поздним рудным ассоциациям, кристаллизовался при температуре 229 °С (табл. 3).

Вариации значений пробности самородного золота, полученные в ходе настоящего исследования (733–971‰, рис. 5), несколько шире, чем опубликованные ранее величины от 879 до 967‰ (Беспаев и др., 1997). Данные по составу самородного золота на других золото-порфировых месторождениях в литературе довольно ограничены. Например, на месторождении Белы Врх (Словакия) большая часть самородного золота связана с поздними образованиями (промежуточными аргиллизитами) и пробность золота обычно выше 900‰, причем она возрастает от ранних ассоциаций к поздним (Kodera et al., 2018). На месторождении Петропавловское (Полярный Урал) самородное золото свя-



Таблица 3

Химический состав (мас. %), формульные коэффициенты и температуры образования хлорита месторождения Юбилейное

Table 3

Chemical composition (wt. %), formula units and formation temperatures of chlorite of the Yubileinoe deposit

	Хлорит-1а				Хлорит-1б					Хлорит-2					Хлорит-3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO <sub>2</sub>	30.52	29.67	29.78	29.15	29.92	29.93	29.13	29.34	29.12	28.2	27.43	29.89	28.45	28.81	27.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.06	21.47	21.57	21.49	20.97	21.76	21.95	21.23	20.89	19.52	18.22	20.57	21.09	20.28	18.24
FeO	13.97	17.18	14.02	17.84	24.37	20.17	22.16	22.90	24.98	23.74	23.13	26.91	25.48	24.31	29.0
MnO	0.81	0.82	0.99	0.50	0.65	0.94	1.00	0.78	0.96	0.64	0.39	0.51	0.83	0.60	0.53
MgO	25.07	22.62	22.89	21.65	18.48	20.48	19.25	18.10	16.52	17.57	17.18	15.94	16.62	18.7	13.81
Сумма	92.42	91.76	89.24	90.62	94.39	93.28	93.48	92.36	92.46	89.67	86.35	93.82	92.47	92.7	89.52
Формульные коэффициенты (на 20 катионов)															
Si	5.75	5.72	5.85	5.71	5.81	5.77	5.66	5.80	5.82	5.77	5.83	5.93	5.69	5.68	5.90
Al	4.90	4.88	4.99	4.96	4.80	4.94	5.02	4.95	4.92	4.71	4.56	4.81	4.97	4.71	4.54
Fe <sup>2+</sup>	2.20	2.77	2.30	2.92	3.95	3.25	3.59	3.78	4.17	4.06	4.10	4.46	4.25	4.00	5.12
Mn	0.13	0.13	0.16	0.08	0.11	0.15	0.16	0.13	0.16	0.11	0.07	0.09	0.14	0.10	0.09
Mg	7.03	6.50	6.70	6.32	5.34	5.88	5.57	5.33	4.92	5.36	5.44	4.71	4.95	5.50	4.35
X(Fe)	0.25	0.31	0.27	0.32	0.43	0.37	0.40	0.42	0.47	0.44	0.43	0.49	0.47	0.43	0.55
X(Mg)	0.75	0.69	0.73	0.68	0.57	0.63	0.60	0.58	0.53	0.56	0.57	0.51	0.53	0.57	0.45
Al(IV)	2.25	2.28	2.15	2.29	2.19	2.23	2.34	2.20	2.18	2.23	2.17	2.07	2.31	2.32	2.10
Al(VI)	2.64	2.60	2.84	2.68	2.60	2.72	2.68	2.75	2.75	2.48	2.39	2.74	2.66	2.40	2.44
Si/Al	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.1	1.2	1.3
T, °C	243	245	234	246	238	241	251	238	236	241	236	226	249	249	229

Примечание. Температуры образования рассчитаны по методу (Котельников и др., 2012).

Note. Formation temperatures are calculated after (Kotelnikov et al., 2012).

## Выводы

зано с золото-теллуридной ассоциацией и по отношению к пириту и халькопириту является более поздним (Викентьев и др., 2017). Золото высокопробное, обычно более 800‰, ассоциирует с теллуридами Au, Ag, Bi и Pb и отлагалось при температурах 295–130 °C. Такие же высокая пробность и невысокие температуры образования характерны для самородного золота месторождения золото-порфирикового месторождения Рябиновое (Коваленкер и др., 1996). Таким образом, высокая пробность является типичной для золото-порфириковых месторождений, более того, самородное золото, как правило, входит в состав поздних, относительно низкотемпературных минеральных ассоциаций, где часто ассоциирует с теллуридами. Это позволяет считать температуры, полученные нами по хлориту вполне реальными.

Основной минеральной формой Au и Ag в рудах золото-порфирикового месторождения Юбилейного (Казахстан) является самородное золото, пробность которого варьирует от 733 до 971‰. Серебро в единичных случаях присутствует также в форме теллуридов. Наиболее высокопробное самородное золото (970‰) встречено в ассоциации с магнетитом, а более низкопробное (733–860‰) – с пиритом, халькопиритом и минералами Bi. Минералы Au и Ag отлагались при температурах 250–230 °C. В целом, минеральные формы и ассоциации благородных металлов месторождения являются типичными для золото-порфириковых месторождений.

Автор благодарит А.И. Грабежеву за предоставленную коллекцию образцов и А.Н. Некрасова за ЭДС анализы. Автор также выражает признательность анонимному рецензенту за конструктивные замечания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

## Литература

- Абдулин А.А., Байдильдин Э.А., Касымов М.А., Матвиенко В.Н., Тапалов Е.Д., Тельгузиев А.Т. (1976) Металлогения Мугоджар. Алма-Ата, Наука КазССР, 280 с.
- Андреев А.В., Гирфанов М.М., Куликов Д.А., Мигачёв И.Ф., Минина О.В., Авилова О.В., Красносельских А.А., Старостин И.А., Черемисин А.А. (2018) Рудные районы с медно-порфировым оруденением – перспективная минерально-сырьевая база меди Южного Урала. *Отечественная геология*, (4), 3–17.
- Беспяев Х.А., Глоба В.А., Абишев В.М., Гуляева Н.Я. (1997) Месторождения золота Казахстана. Справочник. Алматы, Информационно-аналитический центр геологии, экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 232 с.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н., Тюкова Е.Э., Соболев И.Д., Абрамова В.Д., Выхристенко Р.И., Хубанов В.Б., Трофимов А.П., Грознова Е.О., Двуреченская С.С., Кряжев С.Г. (2017) Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования. *Геология рудных месторождений*, 59(6), 501–541.
- Годовой отчет за 2015 г. (2015) АО AltynEx Company, 43 с. [https://kase.kz/files/emitters/ATEC/atecp\\_2015\\_rus.pdf](https://kase.kz/files/emitters/ATEC/atecp_2015_rus.pdf). Последнее обращение 01/05/2020.
- Грабезhev А.И. (2014) Юбилейное Cu–Au порфировое месторождение (Южный Урал, Россия): SHRIMP-II U–Pb возраст циркона и изотопно-геохимические особенности рудоносных гранитоидов. *Доклады Академии наук*, 454(3), 315–318.
- Грабезhev А.И., Белгородский Е.А. (1992) Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 199 с.
- Коваленкер В.А., Мызников И.К., Кочетков А.Я., Наумов В.Б. (1996) Платиноносное золото-сульфидное оруденение Рябинового щелочного массива (Центральный Алдан, Россия). *Геология рудных месторождений*, 38(4), 345–356.
- Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А., Шекина Т.И., Калинин Г.М. (2012) Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов. *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ\_ASEMPG.
- Нарвайт Г.Э., Руденко Б.М., Мирошниченко Л.А., Жуков Н.М. (1974) Медное оруденение Мугоджар. Алма-Ата, Наука КазССР, 174 с.
- Плотинская О.Ю., Бакшеев И.А., Минервина Е.А. (2018) Распределение РЗЭ в шеелите золото-порфирового месторождения Юбилейное (Ю. Урал) по данным LA-ICPMS. *Геология рудных месторождений*, 60(4), 401–410.
- Bailey S.W. (1988) Chlorites: structures and crystal chemistry. *Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas)*. *Reviews in Mineralogy*, 19. Washington, D.C., Mineralogical Society of America, 347–403.
- Koděra P., Kozák J., Brčková J., Chovan M., Lexa J., Jánošík M., Bíroň A., Uhlík P., Bakos F. (2018) Distribution and composition of gold in porphyry gold systems: example from the Biely Vrch deposit, Slovakia. *Mineralium Deposita*, 53, 1193–1212.
- Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: geological framework and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 85, 153–173.
- Seltmann R., Porter T.M., Pirajno F. (2014) Geodynamics and metallogeny of the Central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: a review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79, 810–841.
- Shatov V.V., Moon C. J., Seltmann R. (2014) Discrimination between volcanic associated massive sulphide and porphyry mineralisation using a combination of quantitative petrographic and rock geochemical data: A case study from the Yubileinoe Cu–Au deposit, western Kazakhstan. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 26–36.
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3–41.

## References

- Abdulin A.A., Baidildin E.A., Kasymov M.A., Matvienko V.N., Tapalov E.D., Tel'guziev A.T. (1976) [Metallogeny of Mugodzhary]. Alma-Ata, Nauka KazSSR, 280 p. (in Russian).
- Andreev A.V., Girfanov M.M., Kulikov D.A., Migachev I.F., Minina O.V., Avilova O.V., Krasnoselskih A.A., Starostin I.A., Cheremisin A.A. (2018) [Ore districts with porphyry copper mineralization – promising mineral base of the South Urals]. *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, (4), 3–17 (in Russian).
- [Annual report for 2015] (2015) AO AltynEx Company 43 p. [https://kase.kz/files/emitters/ATEC/atecp\\_2015\\_rus.pdf](https://kase.kz/files/emitters/ATEC/atecp_2015_rus.pdf). Last accessed 01/05/2020. (in Russian).
- Bailey S.W. (1988) Chlorites: structures and crystal chemistry. *Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas)*. *Reviews in Mineralogy*, 19. Washington, D.C., Mineralogical Society of America, 347–403.
- Bespaev H.A., Globa V.A., Abishev V.M., Gulyaeva N.Ya. (1997) [Gold fields of Kazakhstan. Reference book]. Almaty, Informatcionno-analiticheskiy tsentr geologii, ekologii i prirodnih resursov Respubliki Kazakhstan. 144 p. (in Russian).
- Grabezhev A.I. (2014) The Yubileinoe porphyry Cu–Au deposit (South Urals, Russia): SHRIMP-II U–Pb zircon age and geochemical features of ore-bearing granitoids. *Doklady Earth Sciences*, 454, 72–75.
- Grabezhev A.I., Belgorodskii E.A. (1992) [Ore-bearing granitoids and metasomatites of copper porphyry deposits]. Yekaterinburg, Nauka, 199 p. (in Russian).

- Koděra P., Kozák J., Brčková J., Chovan M., Lexa J., Jánošík M., Biroň A., Uhlík P., Bakos F. (2018) Distribution and composition of gold in porphyry gold systems: example from the Biely Vrch deposit, Slovakia. *Mineralium Deposita*, **53**, 1193–1212.
- Kotelnikov A.R., Suk N.I., Kotelnikova Z.A., Tschekina T.I., Kalinin G.M. (2012) Mineral geothermometers for low temperature paragenesis. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN [Bulletin of Earth Sciences Branch of RAS]*, (4), NZ9001, doi:10.2205/2012NZ\_ASEMPG.
- Kovalenker V.A., Myznikov I.K., Kochetkov A.Y., Naumov V.B. (1996) [PGE-bearing gold-sulfide mineralization in the Ryabinovyi alkaline massif, Central Aldan, Russia]. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **38**, 307–317. (in Russian)
- Narvait G.E., Rudenko B.M., Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M. (1974) [Copper mineralization of Mugodzhary]. Alma-Ata, Nauka 174 p. (in Russian).
- Plotinskaya O.Yu., Baksheev I.A., Minervina E.A. (2018) REE distribution in scheelite from the Yubileinoe porphyry gold deposit, South Urals: evidence from LA-ICP-MS data. *Geology of Ore Deposits*, **60**(4), 355–364.
- Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltnmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: geological framework and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, **85**, 153–173.
- Seltnmann R., Porter T.M., Pirajno F. (2014) Geodynamics and metallogeny of the Central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: a review. *Journal of Asian Earth Sciences*, **79**, 810–841.
- Shatov V.V., Moon C. J., Seltnmann R. (2014) Discrimination between volcanic associated massive sulphide and porphyry mineralisation using a combination of quantitative petrographic and rock geochemical data: A case study from the Yubileinoe Cu–Au deposit, western Kazakhstan. *Journal of Geochemical Exploration*, **147**, 26–36.
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry copper systems. *Economic Geology*, **105**, 3–41.
- Vikent'ev I.V., Mansurov R.Kh., Ivanova Yu.N., Tyukova E.E., Sobolev I.D., Abramova V.D., Vykhristenko R.I., Trofimov A.P., Khubanov V.B., Groznova E.O., Dvurechenskaya S.S., Kryazhev S.G. (2017) Porphyry-style Petropavlovskoe gold deposit, the Polar Urals: geological position, mineralogy, and formation conditions. *Geology of Ore Deposits*, **59**, 482–520.

Статья поступила в редакцию 13 мая 2020 г.