

## МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

ПЕРВАЯ НАХОДКА МИНЕРАЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В РУДАХ  
МАЛМЫЖСКОГО ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ,  
ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ, РОССИЯ© 2020 г. Д. С. Буханова<sup>1</sup>, \*, д. чл. А. В. Кутырев<sup>1</sup>,  
д. чл. Е. Г. Сидоров<sup>1</sup>, д. чл. В. М. Чубаров<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия\*e-mail: [dasha-snejinka@yandex.ru](mailto:dasha-snejinka@yandex.ru)

Поступила в редакцию 21.01.2020 г.

После доработки 17.02.2020 г.

Принята к публикации 20.02.2020 г.

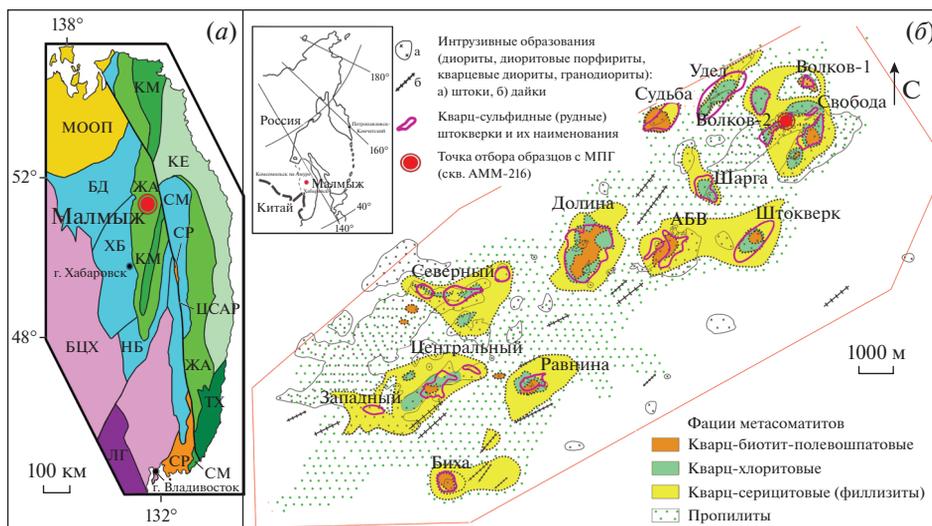
В статье приведены первые данные о минеральных формах палладия в рудах Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения. Малмыжское месторождение находится на Дальнем Востоке России в 220 км северо-восточней г. Хабаровск. В геологическом строении площади Малмыжского месторождения принимают участие осадочные терригенные отложения раннемелового возраста, прорванные альб-сеноманскими интрузиями диорит-гранодиоритового состава. При детальном исследовании руд в халькопиритовых прожилках на участке Свобода Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения обнаружены минералы платиновой группы – сопчеит, меренскит, котульскит, налдретит и арсенопалладинит. На основании взаимоотношения с другими минералами сделан вывод об их более позднем формировании относительно халькопиритовых руд.

*Ключевые слова:* Малмыжское золото-медно-порфировое месторождение, минералы платиновой группы, сопчеит, меренскит, котульскит, налдретит, арсенопалладинит

DOI: 10.31857/S0869605520020021

Золото-медно ± молибден-порфировые месторождения являются одним из перспективных источников для получения элементов платиновой группы (ЭПГ), среди которых преобладает палладий (Tarkian, Stribrny, 1999; Economou-Eliopoulos, 2010, Economou-Eliopoulos et al., 2017; McFall et al., 2018). Ассоциация теллуридов палладия, как основных минералов платиновой группы (МПП), с медными минералами в  $\text{Cu} \pm \text{Mo} \pm \text{Au} \pm \text{Pd} \pm \text{Pt}$  порфировых месторождениях считается маркером для присутствия палладия и платины в качестве второстепенных полезных компонентов руд (Economou-Eliopoulos, 2010).

Благороднометальное оруденение (Au, Ag, ЭПГ) типично для месторождений порфирового типа (Sillitoe, 2010). Согласно модели порфировой системы Р. Силлитоу, благороднометальная минерализация локализуется как непосредственно в основном рудном штокверке, так и за его пределами. Во втором случае она находится, в основном, в составе алуни-каолинитового (high sulfidation) и промежуточного (intermediate sulfidation) типов эпитермальной минерализации. Тем не менее, сведения о минеральных формах нахождения ЭПГ в рудах порфировых месторождений немногочисленны, а новые находки МПП в них представляют интерес для познания процессов образования самих порфировых систем.



**Рис. 1.** *a* – Тектоническая схема Сихотэ-Алиня с местом расположения Малмыжского месторождения (по Khanchuk, 2016; Ханчук, 2019); *б* – схема геологического строения Малмыжского месторождения с рудными участками и местом отбора образцов, содержащих МПГ (по Е.К. Игнатьеву и др., 2015, с дополнениями). Условные обозначения: готерив-раннеальбская аккреционная призма (КМ – Киселевско-Маноминский) и островная дуга (КЕ – Кемский); раннемеловой турбидитовый бассейн (ЖА – Журавлёвско-Амурский); раннемеловая аккреционная призма (ТХ – Таухинский); юрская аккреционная призма (БД – Баджалский, НБ – Наданьхада-Бикинский, СМ – Самаркинский и ХБ – Хабаровский); коллаж террейнов неокомского орогенного пояса (МООП – Монголо-Охотский); триасовый орогенный пояс (ЛГ – Лаоелин-Гродековский); тектонические пластины палеозойского орогенного пояса на юрской аккреционной призме (СР – Сергеевский); раннепалеозойский орогенный пояс (БЦХ – Баджало-Цзямуси-Ханкайский); ЦСАР – Центральный Сихотэ-Алиньский разлом.

**Fig. 1.** *a* – Tectonic scheme of the Sikhote-Alin region with Malmyzh deposit location (modified after Khanchuk 2016, 2019); *b* – geological scheme of the Malmyzh deposit with ore districts and point of PGM samples (modified after E.K. Ignatiev et al., 2015). Legend: early Cretaceous accretionary prism (КМ – Kiselevka–Manoma) and island arc (КЕ – Kema); Early Cretaceous turbidite basin (ЖА – Zhuravlevka–Amur); early Cretaceous (Neocomian) accretionary prism (ТХ – Taukha); Jurassic accretionary prism (БД – Badzhal, НБ – Nadanhada–Bikin, СМ – Samarka и ХБ – Khabarovsk); Neocomian orogenic belt (МООП – Mongolo-Okhotsk); Triassic orogenic belt (ЛГ – Laoelin-Grodekov); fragments of the early Paleozoic continental margin overlying Jurassic accretionary prism (СР – Sergeevka); Early Paleozoic orogenic belt (БЦХ – Bureya–Jiamusi–Khanka); ЦСАР – Central Sikhote-Alin Fault.

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Малмыжское золото-медно-порфировое месторождение расположено на правобережье р. Амур, в северо-восточной части Средне-Амурской депрессии на останцовых горных грядках – Малмыжских высотах в 80 км юго-западнее г. Комсомольск-на-Амуре (рис. 1).

В геологическом строении Малмыжского месторождения принимают участие осадочные терригенные отложения раннемелового возраста (Кузьменко, 1989; Васькин и др., 2009), прорванные интрузиями диорит-гранодиоритового состава альб-сеноманского возраста (Буханова, 2018; Ханчук и др., 2019а, б). Рудовмещающие породы перекрыты четвертичными рыхлыми образованиями аллювиального, озерно-аллювиального и пролювиального генезисов. Терригенные образования, слагающие площадь Малмыжских высот, отнесены к горнопротокской свите (Васькин и др., 2009).

Интрузивные образования диорит-гранодиоритового состава занимают около 20–25% площади Малмыжского месторождения и относятся к Мяочанскому интрузивному комплексу (Васькин и др., 2009). Размещение их четко контролируется Малмыжской зоной разломов северо-восточного простирания.

Вокруг интрузивных пород развиты ореолы контактовых и гидротермальных метасоматитов. Наиболее распространены калиевые, кварц-хлорит-серицитовые, кварц-серицитовые и пропилитовые метасоматиты. Рудная минерализация носит прожилково-вкрапленный и вкрапленный характер, реже гнездово-вкрапленный, и образует наложенные на метасоматиты минерализованные штокверки.

Среди рудных минералов доминируют сульфиды (пирит и халькопирит, реже борнит), представленные тонко-дисперсными вкрапленниками, крупнозернистыми выделениями, гнездовыми обособлениями, прожилками и значительными скоплениями в редких жилах. Второстепенные компоненты руд – сульфиды и сульфосоли свинца, цинка, серебра и висмута, а также теллуриды и сульфоселениды висмута и серебра и др.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование руд было проведено в ИВиС ДВО РАН с применением оптической аппаратуры и сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega-3 с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max 80 mm<sup>2</sup>. В качестве эталонов использованы образцы особо чистых металлов платиновой группы, полученные в Московском институте металлов и сплавов, проверенные на соответствие и однородность состава. Используются следующие эталоны: чистые элементы для Pt, Os, Ir, Ru, Rh, Pd, Au, Ag, Se, Sb; HgTe для Te; FeS<sub>2</sub> для S и Fe; InAs для As. Определение элементов проводилось по следующим аналитическим линиям: K<sub>α</sub> для S и Fe, L<sub>α</sub> для Sb, Pd, Rh, Ru, Ag, Se, Te; M<sub>α</sub> для Os, Ir, Pt, Au.

Результаты анализа химического состава минералов, размер индивидов которых не превышает 3 мкм, нормированы до 100 мас. % и отмечены в таблице звездочкой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Впервые присутствие соединений теллура с палладием в рудах Малмыжского месторождения отмечалось В.В. Ивановым с соавторами (Иванов и др., 2013). В ходе проведенных авторами детальных исследований минерального состава руд, в халькопиритовых прожилках были установлены минералы палладия: сопчеит, котульскит, меренскит, арсенопалладинит и надретит (табл. 1). Халькопиритовые прожилки с МПГ отобраны на участке Свобода из керна скважины, пересекающей зону кварц-сульфидного штокверка в гидротермальной брекчии с интенсивными кварц-серицит-хлоритовыми метасоматическими изменениями (глубина 297 м; содержания золота – 4.89 г/т, меди – 3.11 мас. %).

**Сопчеит** – наиболее распространенный минерал палладия в рудах Малмыжского месторождения. Он встречается в виде включений, приуроченных к кавернам и порам в халькопирите, что свидетельствует о его более позднем образовании по отношению к основным пирит-халькопиритовым рудам. Размеры включений сопчеита достигают 35 мкм (рис. 2, а, б). Химические анализы сопчеита и рассчитанные формулы представлены в табл. 1 (ан. 1–5), формула по 32 анализам –  $\text{Ag}_{3.90-4.03}\text{Pd}_{2.98-3.01}\text{Te}_{4.05-4.13}$ . Сопчеит, как правило, не содержит примесей, однако в единичных случаях установлена примесь селена до 20 мас. %, вероятно, связанная с мелкими (<1 мкм) включениями науманнита.

**Арсенопалладинит** – арсенид палладия с формулой  $\text{Pd}_{8.06}(\text{As}_{1.90-2.04}\text{Sb}_{0.90-1.04})_{2.94}$  по результатам 5 микрозондовых анализов. Встречается лишь в виде единичных зерен,

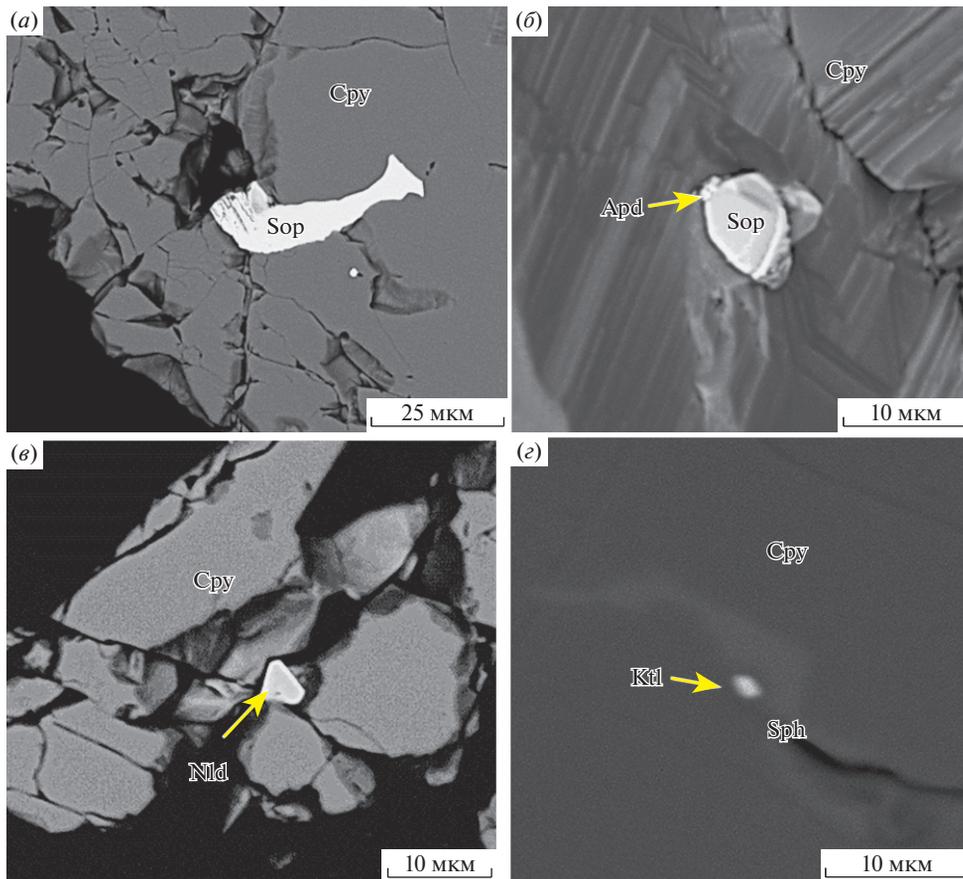
**Таблица 1.** Химический состав минералов платиновой группы Малмыжского месторождения  
**Table 1.** Chemical composition of platinum group minerals from the Malmyzh deposit

№	Содержания в мас. %							Формула	Примечание
	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Сумма		
1	—	25.38	33.40	—	41.66	—	100.44	Ag <sub>3.89</sub> Pd <sub>3.00</sub> Te <sub>4.11</sub>	Зерно в халькопирите (размер 6 мкм)
2	—	24.97	33.36	—	41.40	—	99.73	Ag <sub>3.92</sub> Pd <sub>2.97</sub> Te <sub>4.11</sub>	
3	—	25.54	33.19	—	41.40	—	100.13	Ag <sub>3.88</sub> Pd <sub>3.03</sub> Te <sub>4.09</sub>	
4	—	24.93	33.49	—	41.29	—	99.71	Ag <sub>3.93</sub> Pd <sub>2.97</sub> Te <sub>4.10</sub>	Зерно в халькопирите (размер 12 мкм)
5	—	24.68	33.76	—	41.75	—	100.19	Ag <sub>3.95</sub> Pd <sub>2.93</sub> Te <sub>4.13</sub>	
6*	—	66.18	—	33.82	—	—	100.00	Pd <sub>2.07</sub> Sb <sub>0.93</sub>	Зерно в халькопирите (размер 2 мкм)
7	—	66.45	—	32.16	—	—	98.61	Pd <sub>2.11</sub> Sb <sub>0.89</sub>	
8	0.76	65.95	—	32.63	—	—	99.34	Pd <sub>2.07</sub> Sb <sub>0.90</sub> As <sub>0.03</sub>	Зерно в халькопирите (размер 10 мкм)
9	0.89	67.57	—	30.30	—	—	98.76	Pd <sub>2.13</sub> Sb <sub>0.83</sub> As <sub>0.04</sub>	
10	1.14	66.47	—	31.63	—	—	99.24	Pd <sub>2.08</sub> Sb <sub>0.87</sub> As <sub>0.05</sub>	Зерно в халькопирите (размер 5 мкм)
11	0.40	65.19	2.03	31.39	—	—	99.01	Pd <sub>2.05</sub> Ag <sub>0.06</sub> Sb <sub>0.86</sub> As <sub>0.02</sub>	
12	0.33	64.42	2.12	32.20	—	—	99.07	Pd <sub>2.03</sub> Ag <sub>0.07</sub> Sb <sub>0.89</sub> As <sub>0.01</sub>	Зерно в халькопирите (размер 8 мкм)
13*	12.24	76.83	—	10.93	—	—	100.00	Pd <sub>8.14</sub> (As <sub>1.84</sub> Sb <sub>1.01</sub> ) <sub>2.85</sub>	
14*	12.82	75.98	—	11.20	—	—	100.00	Pd <sub>8.04</sub> (As <sub>1.93</sub> Sb <sub>1.04</sub> ) <sub>2.97</sub>	Два зерна в халькопирите, на контакте с сопчеитом (2 мкм)
15*	—	44.49	—	—	55.51	—	100.00	Pd <sub>0.98</sub> Te <sub>1.02</sub>	Зерно в халькопирите (2 мкм)
16*	—	42.62	1.14	—	56.24	—	100.00	Pd <sub>0.93</sub> Ag <sub>0.02</sub> Te <sub>1.03</sub>	
17*	—	42.24	2.07	—	55.68	—	100.00	Pd <sub>0.93</sub> Ag <sub>0.02</sub> Te <sub>1.03</sub>	Зерно в халькопирите (размер 2 мкм)
18*	—	40.26	4.00	—	55.74	—	100.00	Pd <sub>0.93</sub> Ag <sub>0.02</sub> Te <sub>1.03</sub>	
19*	—	28.83	—	—	71.17	—	100.00	Pd <sub>0.98</sub> Te <sub>2.02</sub>	Зерно в пирите (размер 1.5 мкм)
20*	—	28.00	0.33	—	71.67	—	100.00	Pd <sub>0.95</sub> Ag <sub>0.01</sub> Te <sub>2.04</sub>	
21*	—	27.87	0.87	—	70.83	0.44	100.00	Pd <sub>0.95</sub> Pt <sub>0.01</sub> Ag <sub>0.03</sub> Te <sub>2.01</sub>	Зерно в синхизите-(Ce) (размер 5 мкм)
22*	—	27.68	1.17	—	70.48	0.66	100.00	Pd <sub>0.94</sub> Pt <sub>0.01</sub> Ag <sub>0.04</sub> Te <sub>2.00</sub>	
23*	—	27.44	1.21	—	70.82	0.53	100.00	Pd <sub>0.94</sub> Pt <sub>0.01</sub> Ag <sub>0.04</sub> Te <sub>2.01</sub>	

Примечание. Сопчеит (ан. 1–5), налдретит (ан. 6–12), арсенопалладинит (ан. 13–14), котульскит (ан. 15–18), меренскит (ан. 19–23). \*Результаты анализа химического состава минералов, с размером включений до 5 мкм, нормированы на 100 мас. %.

размером не превышающих 2 мкм, в ассоциации с сопчеитом (рис. 2, б). Результат химического анализа арсенопалладинита представлен в табл. 1 (ан. 13–14).

В единичных образцах Малмыжского месторождения установлено присутствие редкого минерала – **налдретита (Pd<sub>2</sub>Sb)**, который обнаружен только в прожилках халькопиритового состава, содержащих теллуриды палладия и арсенопалладинит, где он образует включения в халькопирите размером до 10 мкм (рис. 2, в). Химические анализы налдретита, а также рассчитанные формулы представлены в табл. 1 (ан. 6–12). Иногда в налдретите отмечается присутствие примеси мышьяка до 1.7 мас. % и серебра до 2.3 мас. %. Примесь серебра в налдретите, вероятно, связана с включениями сопчеита размером менее 1 мкм.



**Рис. 2.** Формы нахождения и ассоциации МПГ в рудах Малмыжского месторождения: (а) крупное включение сопчеита (Sop) в халькопирите (Cpy); (б) включение сопчеита в ассоциации с арсенопалладином (Apd) в халькопирите; (в) включение налдретита (Nld) в халькопирите; (г) котульскит (Ktl) в ассоциации со сфалеритом (Sph) в халькопирите.

**Fig. 2.** Platinum group minerals in ores of the Malmyzh deposit: *a* – large inclusion of sopcheite (Sop) in chalcopyrite (Cpy); *б* – inclusion of sopcheite in association with arsenopalladinite (Apd) in chalcopyrite; *в* – inclusion of naldrettite (Nld) in chalcopyrite; *г* – kotulskite (Ktl) in association with sphalerite (Sph) in chalcopyrite.

**Меренскит** и **котульскит** – наиболее распространенные МПГ в рудах порфировых месторождений мира (табл. 2), однако, в рудах Малмыжского месторождения они встречаются реже, чем сопчеит.

**Котульскит (PdTe)** преимущественно наблюдаются в виде включений в халькопирите размером не более 3 мкм. Часто встречается в ассоциации со сфалеритом (рис. 2, г). Химические анализы и рассчитанные формулы котульскита представлены в табл. 1 (ан. 15–18). Для котульскита Малмыжского месторождения характерно присутствие примеси серебра в количестве до 4.0 мас. %.

**Меренскит (PdTe<sub>2</sub>)** отмечается в виде включений в халькопирите, но наблюдается реже, чем котульскит, а размеры включений обычно не превышают 2 мкм. Единичное зерно меренскита размером 5 мкм установлено в синхизите-Се, который в ассоциации с рутилом образует обособление в кварце, заполняющем пространство между

**Таблица 2.** Обзор минералов платиновой группы в Cu ± Au ± Mo порфировых месторождениях мира

**Table 2.** Review of platinum group minerals in Cu ± Au ± Mo porphyry deposits over the world

Минерал	Место находки
Меренскит PdTe <sub>2</sub>	Малмыжское (Россия); Кирганик (Россия) <sup>а</sup> , Ак-Сугское (Россия) <sup>б</sup> , Михеевское (Россия) <sup>в</sup> , Коппер-Маунтин (Канада) <sup>г</sup> , Фрайди-Крик (Канада) <sup>г,д</sup> , Лоррэйн (Канада) <sup>г</sup> , Маунт Миллиган (Канада) <sup>г,е,ж,з,и</sup> , Афтон (Канада) <sup>ж,з</sup> , Елаците (Болгария) <sup>й,к,л,м</sup> , Майданпек (Сербия) <sup>о</sup> , Скорис (Греция) <sup>п,р,с</sup> , Санто-Томас II (Филиппины) <sup>т,о</sup> , Бига (Филиппины) <sup>о</sup> , Мамут (Малайзия) <sup>о</sup> , Рио Бланка (Чили) <sup>у</sup> , Бошекуль (Казахстан) <sup>ф</sup>
Сопчеит Ag <sub>4</sub> Pd <sub>3</sub> Te <sub>4</sub>	Малмыжское (Россия); Михеевское (Россия) <sup>в</sup> , Скорис (Греция) <sup>п,р,с</sup>
Мергиит-II Pd <sub>8</sub> (Sb,As) <sub>3</sub>	Коппер-Маунтин (Канада) <sup>г</sup> , Мейпл Лифс (Канада) <sup>г</sup> , Афтон (Канада) <sup>ж,з</sup>
Темагамит Pd <sub>3</sub> HgTe <sub>3</sub>	Фрайди-Крик (Канада) <sup>г,д</sup> , Кирганик (Россия) <sup>а</sup> , Маунт Миллиган (Канада) <sup>ж,з</sup> , Афтон (Канада) <sup>ж,з</sup>
Котульскит PdTe	Малмыжское (Россия); Кирганик (Россия) <sup>а</sup> , Фрайди-Крик (Канада) <sup>г,д</sup> , Санто-Томас II (Филиппины) <sup>т,о</sup> , Скорис (Греция) <sup>п,р,с</sup> , Бошекуль (Казахстан) <sup>х</sup> , Маунт Миллиган (Канада) <sup>ж,з</sup> , Афтон (Канада) <sup>ж,з</sup>
Налдретит Pd <sub>2</sub> Sb	Малмыжское (Россия); Маунт Миллиган (Канада) <sup>е,ж,з,и</sup> , Афтон (Канада) <sup>з</sup>
Стибиопалладинит Pd <sub>5</sub> Sb <sub>2</sub>	Маунт Миллиган (Канада) <sup>ж,з</sup> , Афтон (Канада) <sup>ж,з</sup>
Мончеит (Pt,Pd)(Bi,Te) <sub>2</sub>	Елаците (Болгария) <sup>й,к,л,м</sup> , Скорис (Греция) <sup>п,р,с</sup> , Санто-Томас II (Филиппины) <sup>т,о</sup>
Кейтконнит Pd <sub>20</sub> Te <sub>7</sub>	Кирганик (Россия) <sup>а</sup>
Палладоарсенит Pd <sub>2</sub> As	Елаците (Болгария) <sup>й,к,л,м</sup>
Арсенопалладинит Pd <sub>8</sub> As <sub>3</sub>	Малмыжское (Россия), Ак-Сугское (Россия) <sup>ч</sup>
Майченерит PdBiTe	Рябиновое (Россия) <sup>п</sup> , Елаците (Болгария) <sup>й,к,л,м</sup>
Соболевскит PdBi	Скорис (Греция) <sup>п,р,с</sup>
Сперрилит PtAs <sub>2</sub>	Мамут (Малайзия) <sup>о</sup> , Маунт Миллиган (Канада) <sup>ж,з</sup> , Афтон (Канада) <sup>ж,з</sup>
Эрликманит OsS <sub>2</sub>	Рябиновое (Россия) <sup>п</sup>

Использованные литературные источники: <sup>а</sup>Сидоров и др., 2017; <sup>б</sup>Berzina et al., 2007; <sup>в</sup>Plotinskaya et al., 2018; <sup>г</sup>Nixoh et al., 2004; <sup>д</sup>Fischl, 2015; <sup>е</sup>LeFort et al., 2011; <sup>ж</sup>Hanley, MacKenzie, 2009; <sup>з</sup>Garagan, 2014; <sup>и</sup>Thompson et al., 2001; <sup>й</sup>Augé et al., 2005; <sup>к</sup>Bogdanov et al., 2005; <sup>л</sup>Kehayov et al., 2003; <sup>м</sup>Tarkian et al., 2003; <sup>о</sup>Tarkian, Stribny, 1999; <sup>п</sup>Economou-Eliopoulos, Eliopoulos, 2000; <sup>р</sup>Eliopoulos, Eliopoulos, Economou-Eliopoulos, 1991; <sup>с</sup>McFall et al., 2018; <sup>т</sup>Tarkian, Koormann, 1995; <sup>у</sup>Crespo et al., 2018; <sup>ф</sup>Филимонова, 1984; <sup>х</sup>Филимонова, Терехович 1971; <sup>и</sup>Коваленкер и др., 1996; <sup>ч</sup>Кужугет и др., 2015.

кристаллами халькопирита в прожилке. Химические анализы меренскита и формульные коэффициенты представлены в табл. 1 (ан. 19–23). Для меренскита, так же как и для котульскита, характерна примесь серебра в количестве до 1.2 мас. %, но в отличие от котульскита, в составе меренскита отмечается присутствие платины в количестве до 0.7 мас. %.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В последние годы повышенные содержания и минералы ЭПГ были установлены в рудах порфировых месторождений различных регионов мира (табл. 2). В России минералы платиновой группы обнаружены в рудах ряда порфировых месторождений: Малмыжского, Ак-Сугского, Кирганик, Михеевского, Рябинового. Тем не менее, потенциал порфировых месторождений как перспективных для добычи металлов платиновой группы на сегодняшний день не выяснен и требует дальнейшего изучения.

Окислительная природа исходных магм (с большим количеством магнетита) и эволюционирующая система минерализованного флюида в порфириновых месторождениях считаются критическими условиями для транспортировки и осаждения достаточного количества золота и ЭПГ (Economou-Eliopoulos et al., 2017). Экспериментальными исследованиями установлено, что значительные количества палладия и платины (порядка граммов на тонну) могут переноситься в виде хлоридных комплексов гидротермальными флюидами в кислых средах ( $\text{pH} < 2-4$ ) при температурах 300–500 °С (Gammons et al., 1992; Wood, 2002; Hanley, 2005; Xiong, Wood, 2000). По результатам моделирования для тройной системы Pd–Ag–Te установлено, что сопчеит стабилен до 383 °С и образует комплексы с котульскитом и гесситом при 350 °С (McFall et al., 2018; Yuzmazalova et al., 2015). Сопчеит – самый распространенный МПГ в рудах Малмыжского месторождения и, вероятно, температура около 380 °С соответствует верхнему пределу формирования МПГ на Малмыжском месторождении.

Взаимоотношения между основными рудными минералами меди, МПГ и теллуридами Au–Ag в рудах указывают на то, что благородные металлы тесно связаны с прожилковым халькопиритом, но их отложение происходило на завершающих этапах формирования рудных прожилков. Так, например, ассоциация со сфалеритом в более раннем халькопирите характерна для многих “поздних” и типичных для эпitherмальных условий минералов, отлагающихся в порфириновых рудах на заключительных этапах их формирования. В исследуемых халькопиритовых прожилках котульскит часто наблюдается в ассоциации с таким “поздним” сфалеритом. Находка меренскита в синхизите–Се – минерале, встречающемся на Малмыжском месторождении в полнопроявленных кварц–серицитовых метасоматитах (Буханова, Чубаров, 2018), свидетельствует о более позднем его формировании по отношению к халькопиритовым рудам.

Некоторые исследователи отмечают, что образование МПГ характерно для самых ранних этапов формирования рудной минерализации порфириновых месторождений (Auge et al., 2005; Economou-Eliopoulos, 2010; Tarkian et al., 2003). Для ряда месторождений, таких как Маунт Миллиган, установлено позднее происхождение МПГ по отношению к основным медным рудам. В этом случае формирование МПГ относят к поздней стадии субэпitherмального этапа (Charman et al., 2017). На Малмыжском месторождении наиболее богатые ЭПГ участки установлены в краевых частях гидротермальных брекчий, а взаимоотношения МПГ с другими минералами свидетельствуют об их относительно более позднем образовании.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00520.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буханова Д.С. Первые данные о возрасте Малмыжского золото–меднопорфирирового месторождения, Хабаровский край // Мат. конф. “Новое в познании процессов рудообразования”, ИГЕМ РАН, Москва, **2018**. С. 81–82.

Буханова Д.С., Чубаров В.М. Редкоземельные минералы в рудах Малмыжского золото–медно–порфирирового месторождения (Хабаровский край) // ЗРМО. **2019**. Т. 148. № 1. С. 54–64.

Васькин А.Ф., Дымович В.А., Атращенко А.Ф., Григорьев В.Б., Зелегун В.Н., Опалихина Е.С., Шаров Л.А., Леонтьева Л.Ю. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-53 – Хабаровск. Объяснительная записка. СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, **2009**. 376 с.

Иванов В.В., Кононов В.В., Игнатьев Е.К. Минералого–геохимические особенности рудной минерализации в метасоматитах золотомедного рудного поля Малмыж (Нижнее Приамурье) // Мат. Всероссийской конф.: VIII Косыгинские чтения “Тектоника, глубинное строение и мигрирование Востока Азии”. Хабаровск, **2013**. С. 258–261.

Коваленкер В.А., Мызников И.К., Кочетков А.Я., Наумов В.Б. Платиноносное золото–сульфидное оруденение Рябинового щелочного массива (Центральный Алдан, Россия) // Геол. рудн. месторожд. **1996**. Т. 38. № 4. С. 345–356.

Кузьменко С.П. Государственная геологическая карта СССР. 1 : 200 000. Серия Хингано-Бу-реинская и Сихотэ-Алинская. Листы М-53-XXII (Харпи), М-53-XXIII (Болонь), М-53-XXIV (р. Маномы): Объясн. зап. М.: Союзгеолфонд, 1989. 122 с.

Кужугет Р.В., Хертек А.К., Лебедев В.И., Забелин В.И. Особенности состава самородного золота в рудных ассоциациях Ак-Сугского золотомедно-молибден-порфирирового месторождения, Восточная Тува // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2015. №. 2. С. 63–74.

Сидоров Е.Г., Игнатьев Е.К., Чубаров В.М. Первая находка минералов платиновой группы в рудах медно-порфирирового месторождения Кирганик (Камчатка) // Докл. РАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 435–438.

Филимонова Л.Е. Первая находка меренскита в рудах медно-порфирировых месторождений // ДАН СССР. 1984. Т. 279. С. 200.

Филимонова Л.Е., Терехович С.Л. Платина и палладий в породах и минеральных ассоциациях месторождения Бошекуль // Изв. ин-та геол. наук АН КазССР. 1971. № 31. С. 152–157.

Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология. 2019а. Т. 38. № 3. С. 4–29.

Ханчук А.И., Иванов В.В., Игнатьев Е.К., Коваленко С.В., Семенова Д.В. Альб-сеноманский гранитоидный магматизм и медный рудогенез Сихотэ-Алиния // Докл. РАН. 2019б. Т. 488. № 3. С. 298–302.

## THE FIRST FINDING OF PLATINUM GROUP MINERALS IN THE MALMYZH GOLD-COPPER PORPHYRY DEPOSIT, KHABAROVSKY REGION, RUSSIA

D. S. Bukhanova<sup>a,\*</sup>, A. V. Kutyrev<sup>a</sup>, E. G. Sidorov<sup>a</sup>, and V. M. Chubarov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

*\*e-mail: dasha-snejinka@yandex.ru*

The article displays the new data about palladium-bearing mineral phases in ores of the Malmyzh gold-copper porphyry deposit. This deposit is located in the Far East of Russia, about 220 km northeast from Khabarovsk. Malmyzh porphyry ore clusters occur as stocks of Albian-Senomanian age diorites and granodiorites intruding the hornfels-altered Early Cretaceous siltstone-sandstone sequences. The detailed study of chalcopyrite veinlets at the Svoboda area of the deposit revealed the platinum group mineralization represented by sopcheite, merenskyite, kotulskite, naldrettite, arsenopalladinite. Relationships of this PGM with other ore minerals indicate their formation after the relatively earlier chalcopyrite mineralization.

**Keywords:** Malmyzh gold-copper porphyry deposit, platinum-group minerals, sopcheite, merenskyite, kotulskite, naldrettite, arsenopalladinite

## REFERENCES

Augé T., Petrunov R., Bailly L. On the origin of the PGE mineralization in the Elatsite porphyry Cu–Au deposit, Bulgaria: comparison with the Baula–Nuasahi complex, India, and other alkaline PGE-rich porphyries. *Canad. Miner.* 2005. Vol. 43. N 4. P. 1355–1372.

Bukhanova D.S. First data on the age of the Malmyzh copper-gold porphyry deposit, Khabarovsk Region. In: *New Data in the Understanding of the Mineral Formation Processes, 8<sup>th</sup> Youth Scientific-Practical School*. Moscow: IGEM RAS, 2018. P. 81–82 (in Russian).

Bukhanova D.S., Chubarov V.M. Rare earth minerals in ores of the Malmyzhskoe gold-copper-porphyry deposit (Khabarovskiy krai). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. 2019. Vol. 148. N 1. P. 54–64 (in Russian).

Berzina A.N., Sotnikov V.I., Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D.G. First finding of merenskyite (Pd, Pt)Te<sub>2</sub> in porphyry Cu–Mo ores in Russia. *Russian Geol. Geophys.* 2007. Vol. 48. N 8. P. 656–658.

Bogdanov K., Filipov A., Kehayov R. Au–Ag–Te–Se minerals in the Elatsite porphyry-copper deposit, Bulgaria. *Geochem. Mineral. Petrol.* 2005. Vol. 43. P. 13–19.

Chapman R., Mileham, T. Allan, M., Mortensen J. A distinctive Pd–Hg signature in detrital gold derived from alkalic Cu–Au porphyry systems. *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 83. P. 84–102.

Crespo J., Reich M., Barra F., Verdugo J., Martínez C. Critical Metal particles in copper sulfides from the supergiant Río Blanco porphyry Cu–Mo deposit, Chile. *Minerals*. 2018. Vol. 8. N 11. P. 519.

*Economou-Eliopoulos M.* Platinum-group elements (PGE) in various geotectonic settings: opportunities and risks. *Hell. J. Geosc.* **2010**. Vol. 45. P. 65–82.

*Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D.G.* Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance. *Ore Geol. Rev.* **2000**. Vol. 16. N 1–2. P. 59–70.

*Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D.G., Tsoupas G.* On the diversity of the PGE content in chromitites hosted in ophiolites and in porphyry-Cu systems: Controlling factors. *Ore Geology Reviews*. **2017**. Vol. 88. P. 156–173.

*Eliopoulos D.G., Economou-Eliopoulos M.* Platinum-group element and gold contents in the Skouries porphyry copper deposit, Chalkidiki Peninsula, northern Greece. *Econ. Geol.* **1991**. Vol. 86. P. 740–749.

*Filimonova L.E., Terekhov S.L.* Platinum and palladium in rocks and mineral associations of the Boschekul deposit. *Izvestiya Kazakh SSR Acad. Sci.* **1971**. N 31. P. 152–157 (in Russian).

*Filimonova L.E.* The first find of merenskite in ores of copper-porphyry deposits. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1984**. Vol. 279. P. 200 (in Russian).

*Fischl P.S.* Friday Creek, Minfile 092HSE033. BC Ministry of Mines and Natural Gas and Responsibility for Housing. **2015**.

*Gammons C.H., Bloom M.S., Yu Y.* Experimental investigation of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: I. Solubility of platinum and palladium sulfide minerals in NaCl / H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions at 300 °C. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1992**. Vol. 56. N 11. P. 3881–3894.

*Garagan M.J.* Textural and spatial relationship between platinum group elements and alteration assemblages in the Afton porphyry system, Kamloops, British Columbia. BSc Thesis St Mary's university, Halifax, Nova Scotia, **2014**.

*Hanley J.J.* The aqueous geochemistry of the platinum-group elements (PGE) in surficial, low-T hydrothermal and high-T magmatic-hydrothermal environments. *Exploration for Platinum-group element deposits*. **2005**. Vol. 35. P. 35–56.

*Hanley J.J., MacKenzie M.* Incorporation of platinum-group elements and cobalt into subsidiary pyrite in alkalic Cu-Au porphyry deposits: significant implications for precious metal distribution in felsic magmatic-hydrothermal systems. *AGU Spring Meeting Abstracts*. **2009**.

*Ivanov V.V., Kononov V.V., Ignatyev E.K.* Mineralogical-geochemical features of an ore mineralization in the metasomatic rock of the Malmyzh gold-copper ore field (Lower Priamurye). In: *Tectonics, deep structure and metallogeny of East Asia: Proc. All-Russian VIII Kosygin conf.* Khabarovsk, **2013**. P. 258–261 (in Russian).

*Kehayov R., Bogdanov K., Fanger L., Von Quadt A., Pettke T., Heinrich C.A.* The fluid chemical evolution of the Elatiste porphyry Cu-Au-PGE deposit, Bulgaria. In: *Mineral exploration and sustainable development*. Rotterdam: Millpress, **2003**. P. 1173–1176.

*Khanchuk A.I., Grebennikov A.V., Ivanov V.V.* Albian–Cenomanian orogenic belt and igneous province of Pacific Asia. *Russian J. Pacific Geology*. **2019**. Vol. 38. N 3. P. 4–29 (in Russian).

*Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Ignatiev E.K., Kovalenko S.V., Semenova D.V.* Albian-Cenomanian granitoid magmatism and copper ore genesis of the Sikhote-Alin (Far East, Russia). *Doklady Earth Sci.* **2019**. Vol. 488. N 1. P. 1055–1058.

*Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N.* The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data. *J. Asian Earth Sci.* **2016**. Vol. 120. P. 117–138.

*Kovalenker V.A., Myznikov I.K., Kochetkov A.Y., Naumov V.B.* PGE-bearing gold-sulfide mineralization in the Ryabinovyi alkaline massif, Central Aldan, Russia. *Geol. Ore Dep.* Vol. 38. N 4. P. 307–317.

*Kuzhuget R.V., Khertek A.K., Lebedev V.I., Zabelin V.I.* Composition of native gold in ore associations of the Ak-Sugskoye gold-copper-molybdenum porphyry deposit, Eastern Tuva. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2015. N 2. P. 63–74 (in Russian).

*Kuzmenko S.P.* Explanatory notes to the State geological map of the USSR. Series Khingano-Bureinsky and Sikhote-Alinsky. Sheets M-53-XXII (Harpi), M-53-XXIII (Bolon), M-53-XXIV (Manoma). 1 : 200 000 scale. Soyuzgeolfond, Moscow. **1989**. 122 p. (in Russian).

*Lefort D., Hanley J., Guillong M.* Subepithermal Au-Pd mineralization associated with an alkalic porphyry Cu-Au deposit, Mount Milligan, Quesnel Terrane, British Columbia, Canada. *Econ. Geol.* **2011**. Vol. 106. N 5. P. 781–808.

*McFall K.A., Naden J., Roberts S., Baker T., Spratt J., McDonald I.* Platinum-group minerals in the Skouries Cu–Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit. *Ore Geol. Rev.* **2018**. Vol. 99. P. 344–364.

*Nixon G., Cabri L., Laflamme G., Sylvester P., Tubrett M.* Platinum group elements in alkali Cu–Au porphyries. British Columbia Geological Survey, Geofile, **2004**.

*Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Selmann R., Spratt J.* Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geol. Rev.* **2018**. Vol. 94. P. 239–260.

*Sidorov E.G., Ignatyev E.K., Chubarov V.M.* First find of platinum group metals in the ore of Kirganik copper–porphyry deposit (Kamchatka). *Doklady Earth Sci.* **2017**. Vol. 475. N 2. P. 883–886.

*Sillitoe R.H.* Porphyry copper systems. *Econ. Geol.* **2010**. Vol. 105. P. 3–41.

Tarkian M., Hünken U., Tokmakchieva M., Bogdanov K. Precious-metal distribution and fluid-inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria. *Mineralium Deposita*. **2003**. Vol. 38. N 3. P. 261–281.

Tarkian M., Koopmann G. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines. *Mineralium Deposita*. **1995**. Vol. 30. N 1. P. 39–47.

Tarkian M., Stribny B. Platinum-group elements in porphyry copper deposits: a reconnaissance study. *Miner. Petrol.* **1999**. Vol. 65. P. 161–183.

Thompson J.F.H., Lang J.R., Stanley C.R. Platinum group elements in alkaline porphyry deposits, British Columbia. In: *Exploration and Mining in British Columbia, Mines Branch, Part B*. **2001**. P. 57–64.

Vaskin A.F., Dymovich V.A., Atrashenko A.F., Grigoriev V.B., Zelepugin V.N., Opalikhina E.S., Sharov L.A., Leontieva L.Y. Explanatory notes to the geological map of Russia, M-53 map sheet, 1 : 1000000 scale, 3rd generation. St-Petersburg: VSEGEI, **2009**. 376 p. (in Russian).

Vymazalova A., Laufek F., Kristavchuk A.V., Chareev D.A., Drabek M. The system Ag–Pd–Te: phase relations and mineral assemblages. *Miner. Mag.* **2015**. Vol. 79. N 7. P. 1813–1832.

Wood S.A. The aqueous geochemistry of the platinum-group elements with applications to ore deposits. In: *The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements*. **2002**. Vol. 54. P. 211–249.

Xiong Y., Wood S.A. Experimental quantification of hydrothermal solubility of platinum-group elements with special reference to porphyry copper environments. *Miner. Petrol.* **2000**. Vol. 68. N 1–3. P. 1–28.