



Научная статья

УДК 553.41(571.65):549.282+549.283

EDN: GGJTТK

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-350-364



Золотосодержащее серебро и самородное золото золото-серебряного месторождения Дукат

Н.С. Павлюк^a, А.С. Макшаков^b, Р.Г. Кравцова^c^{a-c}Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия^aИркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

Резюме. Целью данного исследования являлось изучение типохимизма золотосодержащих минералов ряда серебро – золото на золото-серебряном месторождении Дукат (Северо-Восток России). В работе были использованы методы оптической микроскопии и рентгеноспектрального микрозондового анализа. Минералы отбирались из самых распространенных на месторождении золото-серебряных руд, имеющих преимущественно серебряный состав. Установлено, что они представлены главным образом золотосодержащим самородным серебром и кустелитом. Значительно реже встречается электрум пониженной пробы. Пробность золотосодержащего серебра варьирует в диапазоне 10–99 ‰ (в среднем 51 ‰), кустелита – 101–245 ‰ (в среднем 149 ‰). Изученные выделения электрума имеют низкую пробы – от 274 до 438 ‰ (в среднем 357 ‰). В примесном составе выявлены следующие закономерности. Для золотосодержащего серебра характерно максимальное количество элементов-примесей: кроме золота это теллур, медь, сурьма, ртуть, свинец и железо; в единичных точках обнаружены селен, сера и висмут. Суммарное содержание всех примесей (без учета золота) также является максимальным – до 1,35 масс. %. В кустелите количество примесей несколько снижается: теллур, ртуть, сурьма, медь и свинец; в единичных точках отмечены висмут и селен. Сумма всех примесей составляет менее 1,23 масс. %. Минимальное количество примесных элементов содержит электрум: теллур, ртуть, медь и висмут; реже – мышьяк и селен. Сумма элементов-примесей не превышает 0,67 масс. %. Элементный состав примесей и уровень их концентраций в изученных нами интерметаллидах в целом отражают геохимические особенности золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, которые преобладают на верхне-среднерудных интервалах месторождения Дукат. В практическом отношении выявленные особенности типохимизма могут быть использованы в процессе поисковых работ для установления рудно-формационной принадлежности выявленной минерализации, а также служить дополнительным критерием при оценке уровня эрозионного среза рудных зон и прогнозировании оруденения на глубину.

Ключевые слова: серебро, золото, типохимизм, пробы, элементы-примеси, руды, месторождение Дукат

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 0284-2021-0002) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия).

Для цитирования: Павлюк Н.С., Макшаков А.С., Кравцова Р.Г. Золотосодержащее серебро и самородное золото золото-серебряного месторождения Дукат // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 350–364. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-350-364>. EDN: GGJTТK.

Original article

Gold-bearing silver and native gold of the Dukat gold-silver deposit

Natalia S. Pavlyuk^a, Artem S. Makshakov^b, Raisa G. Kravtsova^c^{a-c}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia^aIrkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study was to investigate the typochemistry of gold-bearing minerals of the silver-gold series at the Dukat gold-silver deposit (northeast Russia). The methods of optical microscopy and X-ray spectral microprobe analysis were used in the research. The minerals were selected from the most common gold-silver ores at the deposit, which have a predominantly silver composition. It was found out that they are represented mainly by gold-bearing native silver and kustelite. Electrum of low fineness is much less common. The fineness of gold-bearing silver varies in the range of 10–99 ‰ (on average 51 ‰), kustelite – in the range of 101–245 ‰ (on average 149 ‰). The studied electrum separations have low fineness – from 274 to 438 ‰ (on average 357 ‰). The following patterns were revealed in the impurity composition. Gold-bearing silver is characterized by the maximum amount of impurity elements: in addition to gold, these are tellurium, copper, antimony, mercury, lead and iron; selenium, sulfur and bismuth were found in some isolated spots. The

© Павлюк Н.С., Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., 2025



total content of all impurities (excluding gold) is also maximum – up to 1.35 wt. %. Kustelite has a slightly lower amount of impurities: tellurium, mercury, antimony, copper and lead; bismuth and selenium are noted in isolated spots. The sum of all impurities is less than 1.23 wt. %. Electrum contains the minimum amount of impurity elements: tellurium, mercury, copper and bismuth; less often it also contains arsenic and selenium. The sum of impurity elements does not exceed 0.67 wt. %. The elemental composition of the impurities and their concentration levels in the studied intermetallic compounds generally reflect the geochemical features of gold-silver ores, predominantly silver in composition, which predominate in the upper-medium ore intervals of the Dukat deposit. The identified typochemical features can be used in exploration to determine the ore-formational identity of the discovered mineralization, and also serve as an additional criterion for assessing the erosional truncation of ore zones and predicting mineralization in depth.

Keywords: silver, gold, typochemistry, fineness, impurity elements, ores, Dukat deposit

Funding: The work was carried out under the state assignment (project no. 0284-2021-0002) using the scientific equipment from the Center for Shared Use “Isotope-Geochemical Research” of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Pavlyuk N.S., Makshakov A.S., Kravtsova R.G. Gold-bearing silver and native gold of the Dukat gold-silver deposit. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):350-364. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-350-364>. EDN: GGJTTK.

Введение

Золото-серебряное месторождение Дукат по запасам серебра является одним из крупнейших в мире. В нем сосредоточено до 17 тыс. т этого металла и до 40 т золота [1, 2]. Месторождение находится на территории Омсукчанского рудного района Магаданской области (Северо-Восток России). В структурном отношении оно расположено во внешней золото-серебряной зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, в центральной части Балыгычан-Сугойского прогиба. Геологическое строение, минералогия и геохимия этого месторождения – сереброрудного гиганта – изучались многими исследователями [1, 3–18 и др.] и наиболее подробно рассмотрены в монографиях [19, 20].

Этот уникальный рудный объект имеет длительную и сложную историю развития. В его формировании выделяются два этапа: ранний вулканогенный (обусловленный становлением экстрозивно-купольного сооружения в раннем мелу) и поздний плутоногенный (связанный с внедрением плутона лейкогранитов в позднем мелу) [19]. Основная часть рудной минерализации образована на позднем этапе и сосредоточена в раннемеловых риолитах, риодацитах и их игнимбритах. Реювенированные под влиянием гранитоидной интрузии рудные тела [8] представлены главным образом жилами и жильными зонами. Они имеют полихронный и полистадийный характер развития. По доминирующему вещественному составу выделяются несколько их типов [20]. На верхне-среднерудных горизонтах месторождения широко развиты золото-серебряные руды преимущественно серебряного состава, представленные в основном кварц-родонитовыми, реже кварц-пиролюзит-родохрозитовыми жилами

и прожилками. Их характерная особенность – существенное преобладание содержаний серебра над золотом более чем в 500–1000 раз. На среднерудных горизонтах появляются реювенированные золото-серебряные руды в жилах кварц-полевошпат-родонитового состава. На нижнерудных горизонтах преобладают золото-серебро-полиметаллические жильные зоны кварц-родонит-сульфидного состава с хлоритом. Все типы продуктивной рудной минерализации в той или иной степени совмещены в пространстве и имеют смешанный (полиформационный) состав. Первичные догранитные нерееювенированные золото-серебряные руды, сформировавшиеся на раннем этапе и относящиеся к типичной эпитермальной вулканогенной золото-серебряной формации, сохранились лишь в виде реликтов на отдельных участках, в основном на флангах месторождения. Представлены они жилами кварц-адулярового состава с хлоритом.

К главным минералам золота на месторождении относятся золотосодержащее самородное серебро, кустелит и электрум. Крайне редко отмечается собственно самородное золото. Главными минералами серебра являются самородное серебро и акантит, реже встречаются пираргирит, штернбергит, прустит, полибазит, стефанит. Среди остальных рудных минералов распространены галенит, сфалерит, халькопирит, пирит, пирротин. Всего в рудах установлено более 150 минералов, включая гипергенные. В геохимическом составе золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава главным элементом является серебро; преобладают также сурьма, мышьяк, золото; встречаются свинец, медь, ртуть, теллур (иногда висмут). В золото-серебряных ру-



дах главные элементы – золото и серебро; распространены мышьяк, сурьма, ртуть; реже – свинец, медь, селен (иногда висмут). В составе золото-серебро-полиметаллических руд в основном преобладают серебро, свинец, цинк; распространены медь, мышьяк, сурьма, золото; реже – ртуть (иногда висмут). В сохранившихся реликтовых золото-серебряных рудах в основном присутствуют золото и серебро; распространены мышьяк, сурьма и ртуть.

Ранее при исследовании минералов ряда серебро – золото на этом месторождении основное внимание уделялось преимущественно изучению самородного серебра, а именно его типоморфным особенностям, включая размерность и морфологию его выделений, внутреннюю структуру, минеральные сростания [1, 17, 19]. В то же время данные по изучению золотосодержащих фаз указанного ряда (золотосодержащее самородное серебро, кюстелит, электрум, собственно самородное золото) практически отсутствуют. В первую очередь это касается типохимизма этих минералов несмотря на то, что изучение особенностей их основного и примесного состава имеет немаловажное значение как с теоретической, так и с практической точки зрения [21–48 и др.]. Первые результаты, полученные нами при изучении типохимизма золото-серебряных частиц в самых распространенных на Дукатском месторождении рудах преимущественно серебряного состава, подтверждают важность выбранного направления исследований.

Материалы и методы исследования

Для изучения химического состава золото-серебряных частиц в рудах преимущественно серебряного состава нами по карьерам и штольням были отобраны большеобъемные минералого-геохимические пробы. Опробовались в основном кварц-родонитовые и кварц-пиролюзитовые жилы и зоны прожилкования с верхне-среднерудных горизонтов месторождения. Далее все пробы были проанализированы на широкий круг элементов, изучен их вещественный состав и на основании полученной информации подобраны пробы с целью дальнейшего изучения в них самородных серебра и золота. Из выбранных проб были выделены тяжелые фракции, содержащие се-

ребряные и золото-серебряные частицы, которые затем были вмонтированы в брикетные аншлифы-шайбы и изучены методами оптической микроскопии и рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА).

Поиск и предварительное изучение золото-серебряных минералов было начато нами с помощью приборов оптической микроскопии (бинокляр, рудные микроскопы Микромед Полар 3 и Nikon Eclipse LV100 POL), оснащенных цифровыми видеоокулярами, и продолжено методом РСМА на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd., Япония) по методикам [49, 50]. Проведение РСМА осуществлялось аналитиком Л.А. Павловой в Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, (г. Иркутск, Россия). Были использованы волновые и энергодисперсионные спектрометры при следующих условиях анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 20 нА, минимальный диаметр зонда – 1 мкм, экспозиция набора спектров 30–60 с. С целью исключения возможного захвата элементов из окружающих фаз при количественных определениях элементов-примесей анализировались зерна размером 3–5 мкм и более.

Характеризуя в дальнейшем золото-серебряные интерметаллиды, мы использовали определенную терминологию, которая принята нами с учетом работ других авторов, классифицирующих минералы ряда серебро – золото по их основному составу – пробности¹ [21, 22, 51–53]: самородное серебро (менее 10 ‰), золотосодержащее самородное серебро (10–100 ‰), кюстелит (100–250 ‰), электрум (250–700 ‰), самородное золото (более 700 ‰).

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные нами первые данные показали, что в золото-серебряных рудах преимущественно серебряного состава минералы ряда серебро – золото имеют в основном желтовато-серебристый цвет и неровную, бугорчатую, местами шероховатую поверхность. Они образуют выделения самой разнообразной формы: комковатые, округлые, изометричные, дендритовидные, уплощенные. Часто встречаются весьма сложные комбинации нескольких морфологических форм. Размеры зерен изменяются от тонкодисперсных (менее 10 мкм)

¹ Лодейщиков В.В., Васильева А.В. Методические рекомендации по типизации руд, технологическому опробованию и картированию коренных месторождений золота. Иркутск: Изд-во ОАО «Иргиредмет», 1997. 164 с.



до мелких (10–100 мкм). Более крупные частицы (более 100 мкм) встречается редко.

Изучение основного состава зерен с помощью метода РСМА показало, что они имеют низкую пробность и представлены рядом интерметаллидов: золотосодержащее самородное серебро – кюстелит – электрум пониженной пробности. Первые два преобладают. На их долю приходится до 93 % от всех золото-серебряных интерметаллидов (рис. 1). В большинстве случаев зерна имеют крайне неоднородный основной состав и часто состоят из всех членов указанного выше ряда (рис. 2). Зерна, состоящие преимущественно из одной фазы, редки и представлены кюстелитом (рис. 3). Наибольшее распространение имеет ассоциация самородное серебро (в т. ч. золотосодержащее) – кюстелит (рис. 4, 5). Крупные выделения имеют пятнистые, мозаично-блоковые и зональные структуры, обусловленные их различной пробностью в пределах одного зерна (см. рис. 2, 4, 5). Встречаются зерна, в которых наблюдаются комбинации одновременно нескольких структур. Для округлых и изометричных зерен часто характерно зональное строение. Их ядра являются более высокопробными и по составу соответ-

ствуют кюстелиту (см. рис. 5), реже – электрму пониженной пробности (см. рис. 2, а). Периферические зоны у таких зерен представлены самородным серебром (рис. 2, а, рис. 5), в том числе золотосодержащим (рис. 2, а). Электрум не образует самостоятельных зерен и входит в состав более низкопробных частиц, обрастая кюстелитом и самородным серебром (см. рис. 2).

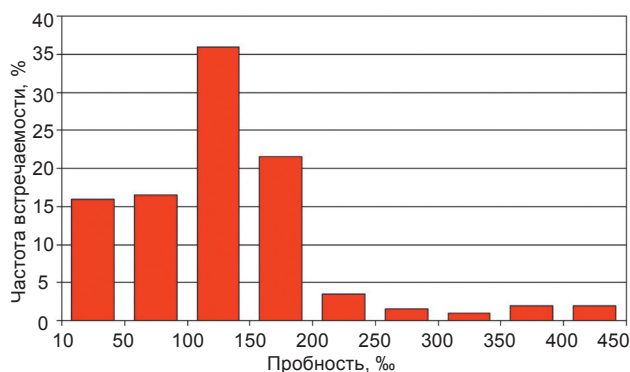


Рис. 1. Гистограмма пробности золото-серебряных частиц из руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дука́т (количество замеров – 200)
Fig. 1. Fineness histogram of gold-silver particles from ores of predominantly silver composition, Dukat deposit (number of measurements – 200)

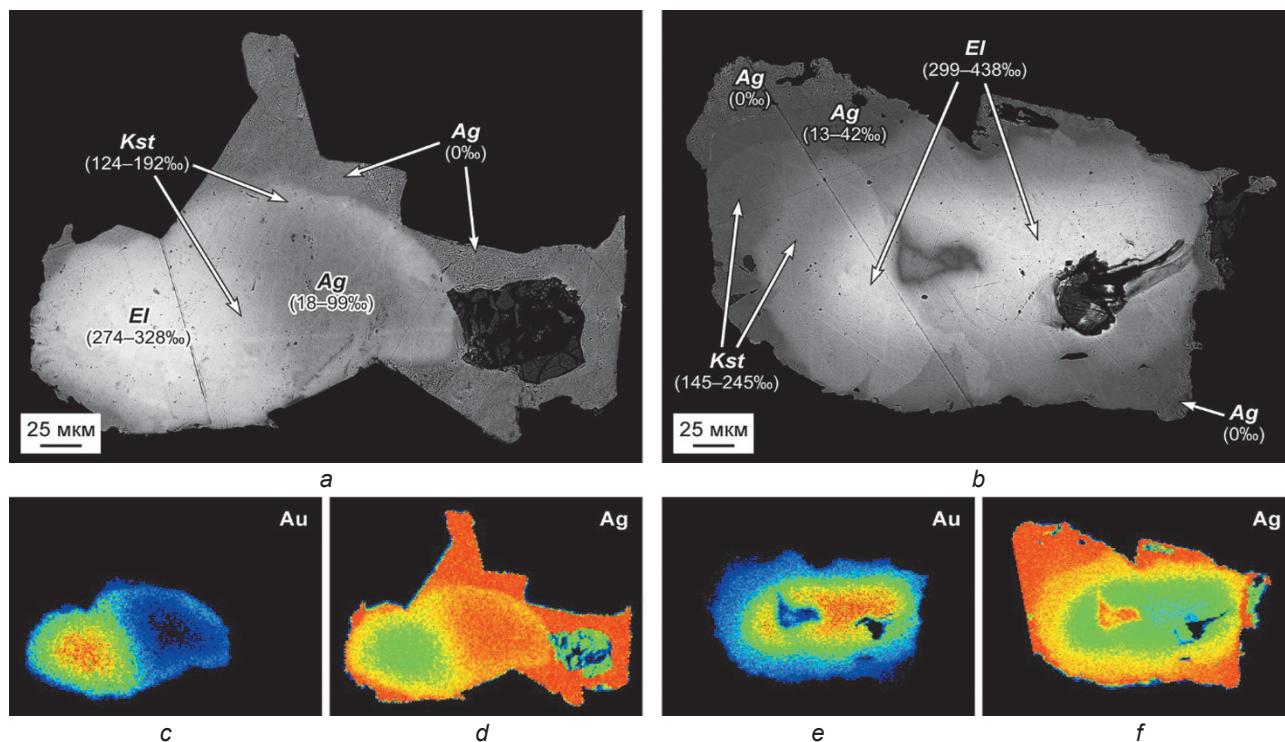


Рис. 2. Неоднородность основного состава золото-серебряных частиц:
изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б),

в рентгеновских лучах золота (с, е) и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

El – электрум пониженной пробности; Kst – кюстелит; Ag – самородное серебро (в скобках указана пробность)

Fig. 2. Heterogeneity of the basic composition of gold-silver particles:

images are given in backscattered electrons (d, f)

El – low-fineness electrum; Kst – kustelite; Ag – native silver (fineness is given in parentheses)

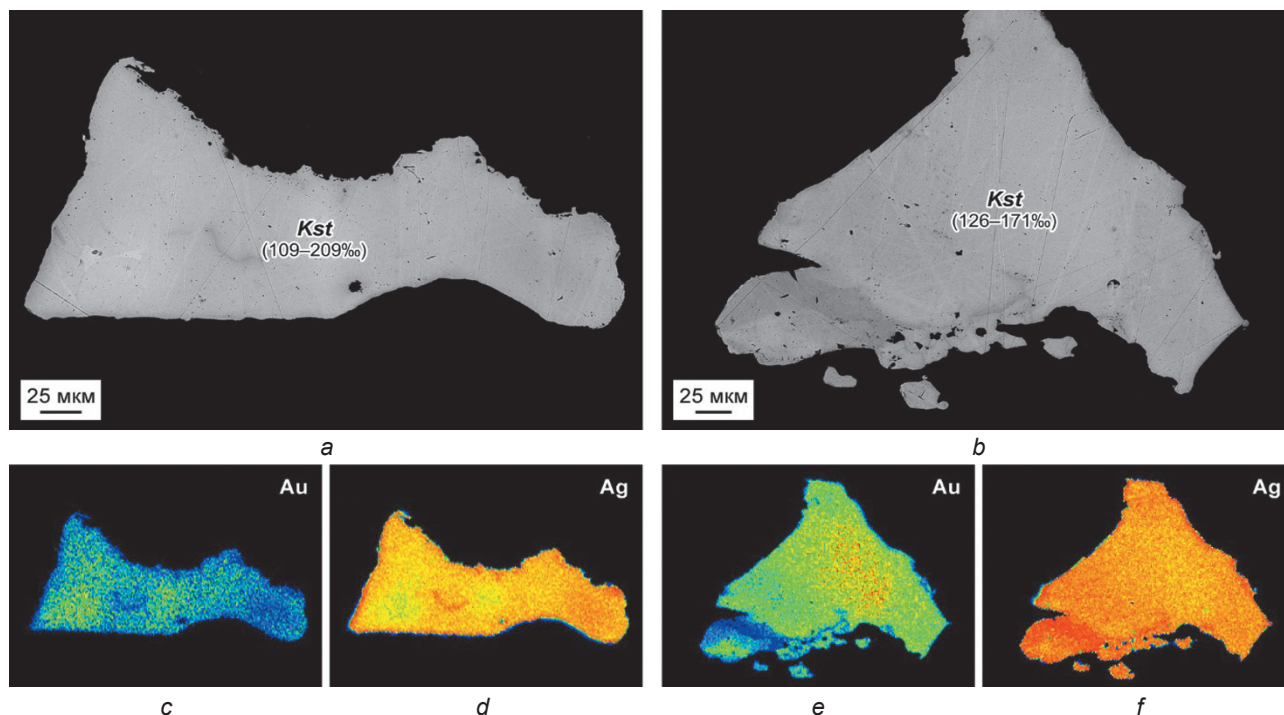


Рис. 3. Зерна кюстелита:

изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б), в рентгеновских лучах золота (с, е) и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

Kst – кюстелит (в скобках указана пробыность)

Fig. 3. Kustelite grains:

images are given in backscattered electrons (a, b), in gold X-ray images (c, e) and in silver X-ray images (d, f)

Kst – kustelite (fineness is given in parentheses)

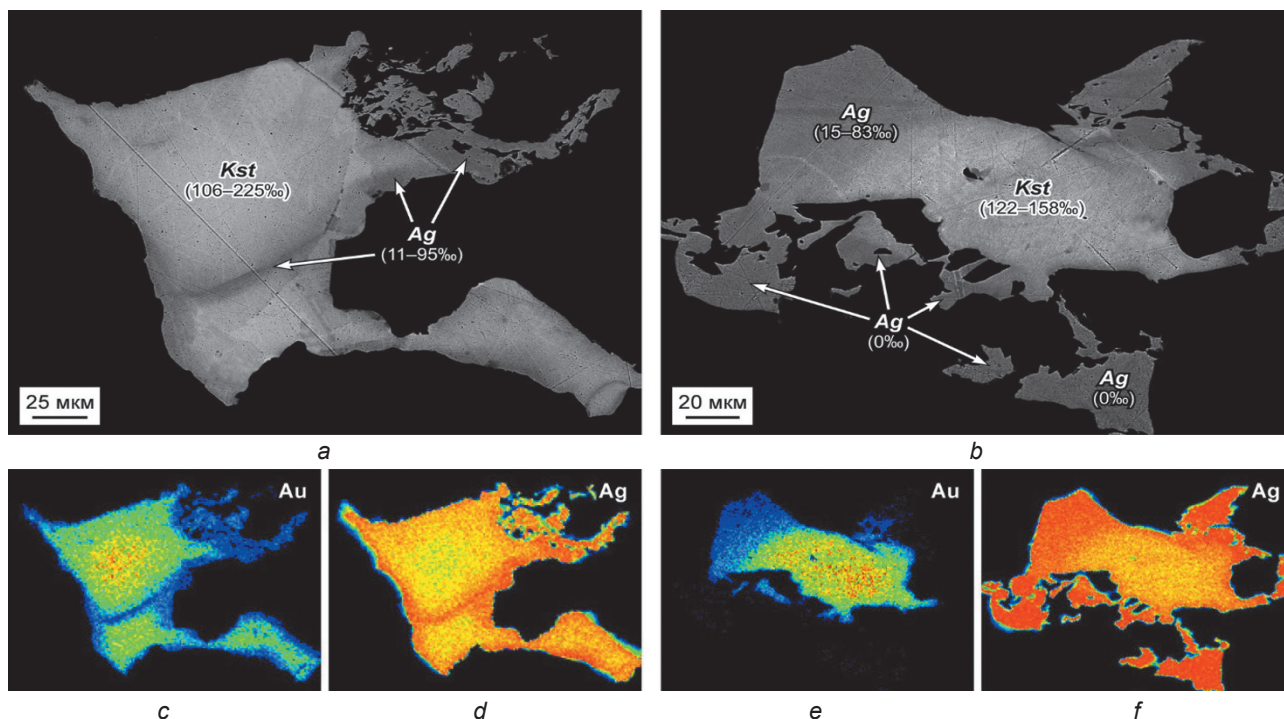


Рис. 4. Зерна состава кюстелит – самородное серебро:

изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б), в рентгеновских лучах золота (с, е) и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

Kst – кюстелит; Ag – самородное серебро (в скобках указана пробыность)

Fig. 4. Grains consisting of kustelite and native silver:

images are given in backscattered electrons (a, b), in gold X-ray images (c, e) and in silver X-ray images (d, f)

Kst – kustelite; Ag – native silver (fineness is given in parentheses)

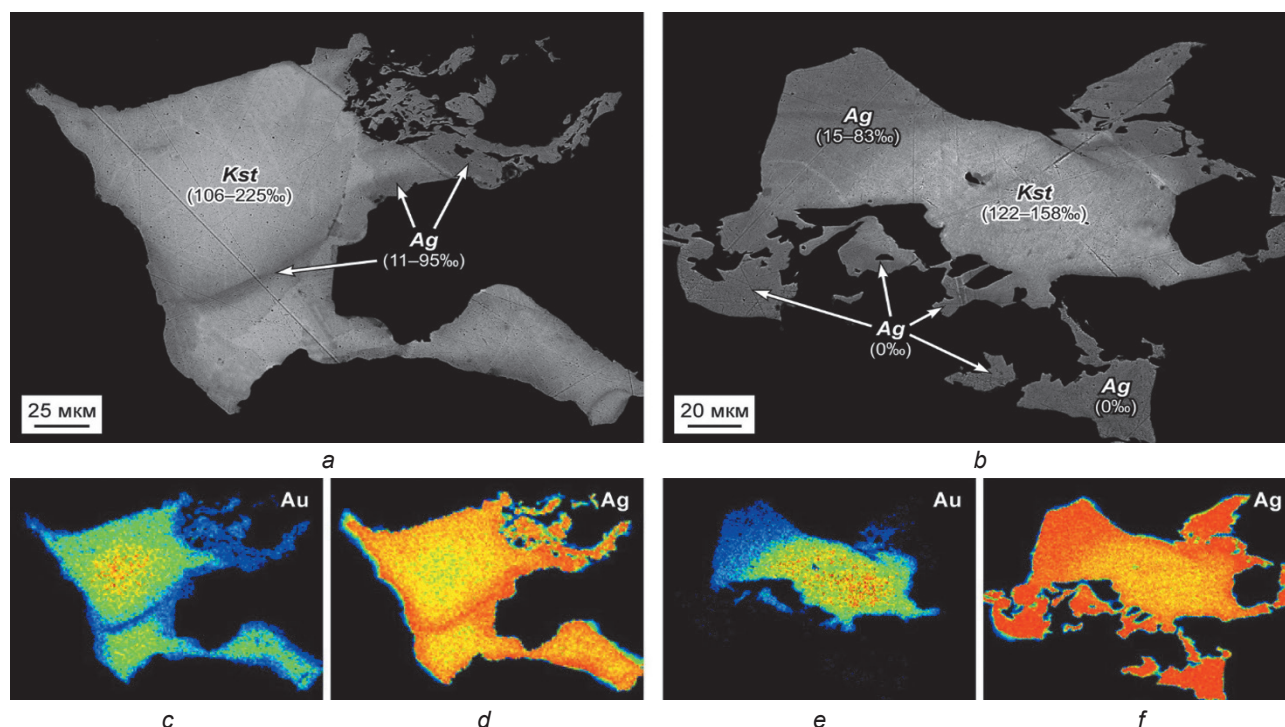


Рис. 5. Зональные зерна, состоящие из кустелита и самородного серебра:
изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б), в рентгеновских лучах золота (с, е)
и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

Kst – кустелит; Ag – самородное серебро (в скобках указана пробыность)

Fig. 5. Zoned grains consisting of kustelite and native silver:
images are given in backscattered electrons (a, b), in gold X-ray images (c, e) and in silver X-ray images (d, f)
Kst – kustelite; Ag – native silver (fineness is given in parentheses)

Пробыность золотосодержащего серебра варьируют в диапазоне 10–99 ‰ (в среднем 51 ‰). В качестве постоянной примеси оно содержит теллур (0,11–0,31 масс. %, в среднем 0,19 масс. %). Очень часто отмечаются (в масс. %) медь (0,11–0,96, в среднем 0,28), сурьма (0,10–0,61, в среднем 0,24) и ртуть (0,10–0,54, в среднем 0,22); реже – свинец (0,14–0,26, в среднем 0,20) и железо (0,14–0,35, в среднем 0,22). В единичных точках установлены (в масс. %) селен (0,12; 0,24), сера (0,39) и висмут (0,13). Сумма всех примесей (без учета золота) достигает 1,35 масс. % (табл. 1).

Пробыность кустелита колеблется в интервале от 101 до 245 ‰ (в среднем 149 ‰). Также как в золотосодержащем самородном серебре, в кустелите постоянно отмечается примесь теллура (0,10–0,26 масс. %, в среднем 0,17 масс. %). В то же время возрастает частота встречаемости ртути и ее максимальных содержаний. Она отмечена в каждом изученном нами выделении кустелита, где ее содержания колеблются в интервале 0,10–0,97 масс. % (в среднем 0,35 масс. %). Из других примесей часто встречаются (в масс. %) сурьма (0,10–0,39, в сред-

нем 0,20) и медь (0,10–0,35, в среднем 0,16); крайне редко – свинец (0,13–0,27, в среднем 0,18), в единичных точках – висмут (0,29) и селен (0,20). Сумма всех примесей не превышает 1,23 масс. % (табл. 2).

Изученные выделения электрума имеют низкую пробыность – от 274 до 438 ‰ (в среднем 357 ‰). В отличие от золотосодержащего серебра и кустелита его примесный состав более беден. В качестве примеси присутствуют (в масс. %) теллур (0,12–0,20, в среднем 0,15), ртуть (0,17–0,37, в среднем 0,25), медь (0,12–0,20, в среднем 0,16) и висмут (0,33–0,41, в среднем 0,36). Реже встречаются (в масс. %) мышьяк (0,18–0,20, в среднем 0,19) и селен (0,15–0,17, в среднем 0,16). Сумма всех примесей редко достигает до 0,67 масс. % (табл. 3).

Таким образом, на месторождении Дукат в рудах преимущественно серебряного состава главными золото-серебряными минералами являются золотосодержащее самородное серебро и кустелит. Электрум пониженной пробыности встречается реже. Для золотосодержащего серебра характерно максимальное количество примесей (среднее в масс. %):



Таблица 1. Состав золотосодержащего серебра из золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дукат
Table 1. Composition of gold-bearing silver from gold-silver ores of predominantly silver composition, Dukat deposit

n	N	Проб., ‰	Содержание, масс. %												
			Au	Ag	Te	Cu	Hg	Sb	Pb	Fe	Se	S	Bi	Σ	Σ _{прим}
1	1	95	9,48	90,69	—	0,11	0,16	0,42	—	—	—	—	—	100,86	0,69
2		45	4,45	95,44	0,19	—	—	0,10	—	—	—	—	—	100,18	0,29
3		90	9,04	91,28	0,11	—	0,10	0,19	—	—	—	—	—	100,72	0,40
4		57	5,71	95,28	—	0,13	0,29	0,11	—	—	—	—	—	101,52	0,53
5	2	99	9,95	90,65	0,19	—	0,17	0,13	—	—	—	—	—	101,09	0,49
6		90	8,92	90,01	0,25	—	—	—	0,14	—	—	—	0,13	99,45	0,52
7		53	5,29	95,01	—	—	0,29	0,28	0,16	—	0,12	—	—	101,15	0,85
8		18	1,84	97,98	—	—	0,54	0,61	—	—	—	—	—	100,97	1,15
9	3	13	1,31	98,07	—	—	—	0,15	0,24	—	—	—	—	99,77	0,39
10		23	2,27	97,50	0,17	—	—	0,15	—	—	—	—	—	100,09	0,32
11		42	4,19	95,07	0,31	—	—	—	—	—	—	—	—	99,57	0,31
12	4	70	6,97	91,95	0,14	—	—	—	—	—	—	—	—	99,06	0,14
13		95	9,50	90,27	0,24	—	0,14	—	—	—	—	—	—	100,15	0,38
14		11	1,07	98,34	0,20	0,14	0,20	—	—	—	—	—	—	99,95	0,54
15		52	5,18	94,10	0,25	—	—	—	0,26	0,21	0,24	0,39	—	100,63	1,35
16	5	29	2,85	96,51	0,22	0,24	—	—	—	0,14	—	—	—	99,96	0,60
17		56	5,65	94,52	0,18	0,15	—	—	—	0,35	—	—	—	100,85	0,68
18		83	8,28	91,60	—	—	0,27	0,14	—	—	—	—	—	100,29	0,41
19		56	5,63	94,32	0,20	0,16	0,25	—	—	—	—	—	—	100,56	0,61
20	6	10	1,03	98,03	0,25	0,82	—	—	—	—	—	—	—	100,13	1,07
21		52	5,14	93,32	0,23	0,57	0,26	—	—	—	—	—	—	99,52	1,06
22		34	3,31	95,36	—	0,96	—	—	—	—	—	—	—	99,63	0,96

Примечание. Цинк, мышьяк, олово и прочерки в таблице – ниже предела обнаружения (менее 0,1 масс. %). Здесь и в табл. 2, 3: *n* – точки определения состава; *N* – номера зерен; проб. – пробность; Σ_{прим} – сумма примесей. Результаты получены посредством микроанализатора Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd., Япония) аналитиком Л.А. Павловой в Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия). Измерения интенсивностей выполнены с помощью волновых спектрометров; расчеты концентраций проведены на базе программного обеспечения прибора.

кроме золота это теллур (0,19), медь (0,28), сурьма (0,24), ртуть (0,22), свинец (0,20) и железо (0,22). В единичных точках обнаружены селен, сера и висмут. Суммарное содержание всех примесей (без учета золота) также является максимальным – до 1,35 масс. %. В кюстелите количество примесей несколько снижается (среднее в масс. %): теллур (0,17), ртуть (0,35), сурьма (0,20), медь (0,16) и свинец (0,18). В единичных точках отмечены висмут и селен. Сумма всех примесей составляет менее 1,23 масс. %. Минимальное количество примесных элементов содержит электрум (среднее в масс. %): теллур (0,15), ртуть (0,25), медь (0,16) и висмут (0,36), реже встречаются мышьяк (0,19) и селен (0,16). Сумма всех примесей не превышает 0,67 масс. %.

Выявленное нами относительно большое количество элементов-примесей в твердых растворах ряда серебро – золото в целом ти-

пично для золото-серебряных месторождений. Присутствие разнообразных примесей в них отмечено нами ранее на многих золото-серебряных рудных объектах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. В полиформационных золото-серебро-полиметаллических рудах месторождения Роговик из примесей в золоте отмечаются ртуть, железо, селен, медь и цинк [54]. На типичных вулканогенных месторождениях Дальнее и Кварцевая Сопка самородное золото часто содержит примеси висмута, сурьмы, меди, ртути, мышьяка, серы, теллура. Установлены также железо, свинец, цинк, селен [34, 42, 55, 56]. Следует отметить, что на этих рудных объектах ближе к поверхности (как и в нашем случае) золотины являются низкопробными и представлены электрумом пониженной пробности и кюстелитом, в которых отчетливо проявлена примесь теллура. С увеличением глубины наряду с возрастани-



Таблица 2. Состав кустелита из золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дукат
Table 2. Composition of kustelite from gold-silver ores of predominantly silver composition, Dukat deposit

n	N	Проб., ‰	Содержание, масс. %										Σ	Σ _{прим}
			Au	Ag	Te	Hg	Sb	Cu	Pb	Se	Bi			
1	1	132	13,15	86,70	0,19	0,22	0,23	—	—	—	—	100,49	0,64	
2		107	10,58	88,57	0,13	—	0,15	0,10	—	—	—	99,53	0,38	
3		101	10,19	90,88	—	0,36	0,26	0,13	—	—	—	101,82	0,75	
4	2	124	12,35	87,58	—	0,16	—	—	0,15	—	—	100,24	0,31	
5		192	19,06	80,02	0,26	—	0,11	—	—	—	—	99,45	0,37	
6		189	18,75	80,27	—	—	—	0,12	0,18	—	—	99,32	0,30	
7		186	18,65	81,50	—	0,21	—	0,14	—	—	0,29	100,79	0,64	
8	3	127	12,55	85,93	0,20	0,35	—	—	—	—	—	99,03	0,55	
9		128	12,75	86,55	0,16	—	0,39	—	—	—	—	99,85	0,55	
10		161	15,82	82,72	—	0,55	0,35	—	—	—	—	99,44	0,90	
11		135	13,54	87,00	0,20	0,27	—	—	—	—	—	101,01	0,47	
12	4	245	24,48	75,31	0,12	0,21	—	—	—	—	—	100,12	0,33	
13		226	22,61	77,49	0,17	—	—	—	—	—	—	100,27	0,17	
14		181	17,90	81,14	0,23	0,16	—	—	—	—	—	99,43	0,39	
15	5	224	22,34	77,39	0,26	0,97	—	—	—	—	—	100,96	1,23	
16		153	15,12	83,49	0,19	—	—	—	0,27	—	—	99,07	0,46	
17		145	14,47	85,41	—	0,20	—	—	—	0,20	—	100,28	0,40	
18		125	12,46	86,98	0,17	0,28	—	0,18	—	—	—	100,07	0,63	
19	6	129	12,66	85,78	0,13	—	—	0,35	—	—	—	98,92	0,48	
20		111	11,03	88,40	0,16	0,31	—	0,17	—	—	—	100,07	0,64	
21		128	12,81	86,90	0,20	0,25	—	0,22	—	—	—	100,38	0,67	

Примечание. Железо, цинк, мышьяк, сера, олово и прочерки в таблице – ниже предела обнаружения (менее 0,1 масс. %).

Таблица 3. Состав электрума из золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дукат
Table 3. Composition of electrum from gold-silver ores of predominantly silver composition, Dukat deposit

n	N	Проб., ‰	Содержание, масс. %									
			Au	Ag	Te	Hg	Cu	Bi	As	Se	Σ	Σ _{прим}
1	1	282	27,91	70,92	0,20	–	–	0,33	–	–	99,36	0,53
2		328	32,67	66,92	0,14	0,19	–	0,34	–	–	100,26	0,67
3		317	31,61	68,13	0,12	–	–	0,41	–	–	100,27	0,53
4		274	27,69	73,37	0,15	–	–	–	0,18	0,15	101,54	0,48
5	2	366	36,89	63,89	0,14	–	0,12	–	–	–	101,04	0,26
6		410	41,30	59,33	–	0,37	0,14	–	–	–	101,14	0,51
7		381	38,11	61,81	0,14	–	–	–	0,20	–	100,26	0,34
8		438	43,81	56,26	–	0,26	0,20	–	–	–	100,53	0,46
9		358	36,28	65,17	–	0,17	–	–	–	0,17	101,79	0,34

Примечание. Железо, свинец, цинк, сурьма, сера, олово и прочерки в таблице – ниже предела обнаружения (менее 0,1 масс. %).

ем пробности золота содержание теллура в нем заметно снижается и он полностью исчезает на глубине. По данным предыдущих исследований такие особенности основного и примесного состава золотин хорошо согласуются с позицией золота, серебра и сопутствующих элементов-индикаторов оруденения в общем

ряду минералого-геохимической зональности и тесно связаны с условиями формирования золото-серебряных руд, относящихся к убогосульфидной эпитеpmальной формации [20, 57, 58].

Обращает на себя внимание низкая пробность большинства изученных нами выделе-



ний ряда серебро – золото, которая в целом не характерна для типичных вулканогенных золото-серебряных месторождений. Несмотря на то, что для таких объектов типично золото с высокой дисперсией основного состава (от кюстелита до собственно самородного золота), тем не менее преобладает в основном электрум [34, 42, 54–56]. Преобладание на месторождении Дукат золотосодержащего самородного серебра и кюстелита в рудах серебряного состава обусловлено длительной и сложной историей развития рудной минерализации. Как упоминалось ранее, в его формировании выделяется два этапа – вулканогенный и плутоногенный. Внедрение гранитоидов на позднем этапе привело к существенному привносу серебра, дифференциации и перераспределению вещества, в результате чего основная часть серебряной минерализации отлагалась на верхних горизонтах. Это отчетливо видно по преобладанию на верхних горизонтах преимущественно серебряных эндогенных аномальных геохимических полей [11, 20]. Как следствие, месторождение Дукат по генезису можно отнести к вулканоплутоногенным.

Заключение

Изучение типохимизма золотосодержащих золото-серебряных интерметаллидов из руд преимущественно серебряного состава на месторождении Дукат показало, что они представлены в основном золотосодержащим серебром (пробность 10–99 %) и кюстелитом (пробность 101–245 %), значительно реже – электрумом пониженной пробности (274–438 %). Наиболее разнообразный примесный состав характерен для самородного серебра: теллур, медь, сурьма, ртуть, свинец, железо, селен, сера и висмут. В нем же отмечается максимальная сумма содержаний этих элементов, которая достигает 1,35 масс. %. В кюстелите количество примесей и их суммарное содержание (до 1,23 масс. %) не-

сколько снижается: теллур, ртуть, сурьма, медь, свинец, висмут и селен. Наиболее бедный примесный состав отмечен в электруме: теллур, ртуть, медь, висмут, мышьяк и селен. Сумма этих примесей минимальна и не превышает 0,67 масс. %.

Важно подчеркнуть, что проведенные исследования по изучению особенностей типохимизма имеют немаловажное значение как с теоретической, так и с практической точки зрения. Любой минерал, в том числе самородное золото, в своем составе и свойствах несет крайне важную информацию о своей генетической природе и, как следствие, является одним из индикаторов условий образования месторождения. В отличие от других минералов самородное золото является наиболее устойчивым к воздействиям внешней среды. Оно способно длительное время противостоять химическому выветриванию и хрупким деформациям и в результате сохранять эту информацию. В нашем случае относительно низкая пробность изученных интерметаллидов ряда серебро – золото, элементный состав примесей в них, имеющий большое разнообразие, и уровень их концентраций в целом отражают геохимические особенности руд преимущественно серебряного состава, которые преобладают на верхних и верхне-среднерудных интервалах месторождения. Кроме того, на основании полученных данных можно утверждать, что уникальное по своим масштабам золото-серебряное месторождение Дукат (в отличие от типичных небольших по запасам серебра и золота вулканогенных месторождений) по своему генезису является вулканоплутоногенным. В практическом отношении особенности типохимизма самородного золота могут быть использованы в процессе поисковых работ для установления рудно-формационной принадлежности выявленной минерализации, ее масштабов, а также служить дополнительным критерием при оценке уровня эрозионного среза рудных зон и прогнозирования оруденения на глубину.

Список источников

1. Константинов М.М., Костин А.В., Сидоров А.А. Геология месторождений серебра. Якутск: Сахаполиграфиздат, 2003. 282 с.
2. Стружков С.Ф., Константинов М.М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Научный мир, 2005. 320 с.
3. Наталенко В.Е., Калинин А.И., Раевская И.С., Толстихин Ю.В., Халхалов Ю.А., Бельков Е.В. Геологическое строение Дукатского месторождения // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1980. Вып. 25. С. 61–73.
4. Сахарова М.С., Брызгалов И.А. Минералогия серебра кварц-адуляр-родонитовых гидротермальных жил // Геология рудных месторождений. 1981. Т. 23. № 6. С. 36–48.



5. Сидоров А.А., Константинов М.М., Еремин Р.А., Савва Н.Е., Копытин В.И., Сафронов Д.Н. [и др.]. Серебро (геология, минералогия, генезис, закономерности размещения месторождений). М.: Наука, 1989. 240 с.
6. Сидоров А.А., Филимонова А.Г., Волков А.В., Трубкин Н.В., Чугаев А.В. Эволюционно-историческая модель Дукатского серебряного гиганта // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 5. С. 523–528. EDN: OYIRUL.
7. Шило Н.А., Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Ряховская С.К., Брызгалов И.А. Минералогия и генетические особенности золото-серебряного оруденения северо-западной части Тихоокеанского обрамления. М.: Наука, 1992. 257 с.
8. Берман Ю.С., Прокофьев В.Ю., Козеренко С.В., Елисеева Н.А., Колпакова Н.Н. Реювенация золото-серебряного оруденения вулканогенного месторождения Дукат (по результатам исследований флюидных включений) // Геохимия. 1993. № 4. С. 539–548.
9. Константинов М.М., Калинин А.И., Наталенко В.Е., Стружков С.Ф., Двуреченская С.С. Золото-серебряное месторождение Дукат (Россия) // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37. № 4. С. 317–334.
10. Konstantinov M.M., Strujkov S.F. Application of indicator halous (signs of ore remobilization) in exploration for blind gold and silver deposits // Journal of Geochemical Exploration. 1995. Vol. 54. Iss. 1. P. 1–17. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(95\)00003-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(95)00003-8).
11. Кравцова Р.Г., Захаров М.Н. Геохимические поля концентрирования Дукатской золото-серебронной рудно-магматической системы (Северо-Восток России) // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 5. С. 28–38. EDN: EZBJJD.
12. Двуреченская С.С. Гипергенные минералы серебряных месторождений. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2001. 258 с.
13. Захаров М.Н., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Геохимические особенности пород вулканоплутонических ассоциаций Дукатского золото-серебряного месторождения // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 10. С. 928–939. EDN: BVWNIC.
14. Розинов М.И., Колесников Д.И., Шергина Ю.П. Возраст оруденения на серебряном месторождении Дукат по данным Rb-Sr-метода // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 6. С. 524–539. EDN: OPWRDD.
15. Петров О.В., Михайлов Б.К., Шевченко С.С., Розинов М.И., Колесников Д.И., Лохов К.И. [и др.]. Изотопно-геохимические исследования уникального золото-серебряного месторождения Дукат как ключ к пониманию процессов вулканогенного рудообразования // Региональная геология и металлогения. 2006. № 27. С. 60–76. EDN: LLZJEJ.
16. Борисова Д.А. Характерные особенности минерального состава руд золото-серебряного месторождения Дукат // Новое в познании процессов рудообразования: материалы Восьмой Российской молодежной научно-практической школы (г. Москва, 26–30 ноября 2018 г.). М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 2018. С. 65–68. EDN: YQKWSL.
17. Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. М.: Триумф, 2018. 544 с. <https://doi.org/10.32986/978-5-89392-823-5-1-544>.
18. Филимонова Л.Г., Трубкин Н.В. Дисперсное золото, ассоциирующие минералы рассеянной минерализации лейкогранитов Дукатского рудного поля – индикаторы условий генерации магматогенных золотоносных флюидов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 9. С. 1275–1293. <https://doi.org/10.15372/GiG2020174>. EDN: KEWYAF.
19. Константинов М.М., Наталенко В.Е., Калинин А.И., Стружков С.Ф. Золото-серебряное месторождение Дукат. М.: Недра, 1998. 203 с.
20. Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудообразующих систем Северного Приохотья. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. 292 с. EDN: QKJONH.
21. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 1973. 348 с.
22. Петровская Н.В. Золотые самородки. М.: Наука. 1993. 190 с.
23. Савва Н.Е., Прейс В.К. Атлас самородного золота Северо-Востока СССР. М.: Наука, 1990. 292 с.
24. Morrison G.W., Rose W.J., Jaireth S. Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits // Ore Geology Reviews. 1991. Vol. 6. Iss. 4. P. 333–364. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90009-V](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90009-V).
25. Knight J.B., Mortensen J.K., Morison S.R. Lode and placer gold composition in the Klondike district, Yukon Territory, Canada; implications for the nature and genesis of Klondike placer and lode gold deposits // Economic Geology. 1999. Vol. 94. Iss. 5. P. 649–664. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.5.649>.
26. Самусиков В.П. Элементы-примеси в самородном золоте – критерии определения формационной принадлежности и уровня эрозийного среза золоторудных месторождений // Доклады Академии наук. 2003. Т. 391. № 1. С. 99–103. EDN: OQJQUB.
27. Анисимова Г.С., Серкебаева Е.С., Кондратьева Л.А. Самородное золото месторождения Бадран // Отечественная геология. 2006. № 5. С. 38–47. EDN: GZUUFM.
28. Chapman R.J., Leake R.C., Bond D.P.G., Stedra V., Fairgrieve B. Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance // Economic Geology. 2009. Vol. 104. Iss. 4. P. 563–585. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.563>.
29. Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Piazzolo S., Morgan D.J., et al. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies // Mineralium Deposita. 2021. Vol. 56. P. 1563–1588. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01036-x>.
30. Chapman R.J., Mortensen J.K., Murphy R. Compositional signatures of gold from different deposit types in British Columbia, Canada // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 8. P. 1072. <https://doi.org/10.3390/min13081072>.



31. Стефанова В., Волков А.В., Серафимовский Т., Сидоров А.А. Самородное золото рудного поля Боровик (Республика Македония) // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2. С. 148–153. <https://doi.org/10.7868/S0016777015020069>. EDN: TPWJXL.
32. Vishiti A., Suh C.E., Lehmann B., Egbe J.A., Shemang E.M. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon // Journal of African Earth Sciences. 2015. Vol. 111. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.010>.
33. Гаськов И.В. Главные элементы-примеси самородного золота и связь их с условиями его образования на примере месторождений складчатых поясов Азии // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 9. С. 1359–1376. <https://doi.org/10.15372/GiG20170908>. EDN: ZHDOUF.
34. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Lipko S.V., Arsent'ev K.Yu. Contrasting surficial composition of native gold from two different types of gold ore deposits // Minerals. 2017. Vol. 7. Iss. 8. P. 142. <https://doi.org/10.3390/min7080142>.
35. Анкушева Н.Н., Кужугет Р.В. Состав золота и условия образования золото-сульфидно-кварцевого рудопроявления Южный Ак-Даг (Западная Тува) // Литосфера. 2020. Т. 20. № 5. С. 706–716. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-706-716>. EDN: XZMMRE.
36. Киселева Г.Д., Языкова Ю.И., Коваленкер В.А., Трубкин Н.В., Борисовский С.Е. Типоморфизм самородного золота как индикатор различных типов оруденения крупного скарново-порфирового Au-Fe-Cu месторождения Быстринское, Восточное Забайкалье // Руды и металлы. 2020. № 1. С. 51–68. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10005>. EDN: UMLMIT.
37. Аристов В.В., Григорьева А.В., Савчук Ю.С., Сидорова Н.В., Сидоров В.А. Формы нахождения золота и некоторые типоморфные характеристики самородного золота орогенного месторождения Павлик (Магаданская область) // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 1. С. 3–39. <https://doi.org/10.31857/S0016777021010020>. EDN: SCPLMH.
38. Чухарева Н.С., Белогуб Е.В., Рыжкова Ю.А., Блинов И.А., Рассомахин М.А., Новоселов К.А. Особенности морфологии и химического состава самородного золота месторождения Муртыкты (Южный Урал) // Минералогия. 2021. Т. 7. № 1. С. 54–65. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-1-4>. EDN: JORRUT.
39. Liu H., Beaudoin G. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 132. P. 104066. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104066>.
40. Tolstikh N., Bukhanova D., Shapovalova M., Borovikov A., Podlipsky M. The Gold mineralization of the Baranyevskoe Au-Ag epithermal deposit in Central Kamchatka // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 11. P. 1225. <https://doi.org/10.3390/min11111225>.
41. Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Пучков В.Н., Петров С.В. Особенности химического состава минералов золота из габбровых массивов платиноносного пояса Урала, Россия // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 245–252. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601612>. EDN: VVFVAE.
42. Savva N.E., Kravtsova R.G., Anisimova G.S., Palyanova G.A. Typomorphism of native gold (geological-industrial types of gold deposits in the North-East of Russia) // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 5. P. 561. <https://doi.org/10.3390/min12050561>.
43. Alfonso P., Ccolque E., Garcia-Valles M., Martínez A., Yubero M.T., Anticoi H., et al. Mineralogy and mineral chemistry of the Au-Ag-Te-(Bi-Se) San Luis Alta deposit, Mid-South Peru // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 568. <https://doi.org/10.3390/min13040568>.
44. Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N. Ore mineralogy and typomorphism of native gold of the Spokoininsky cluster of the Aldan–Stanovoy gold province // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 543. <https://doi.org/10.3390/min13040543>.
45. Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Калинин Ю.А., Шабекина А.Ш., Лосев В.И., Балана М.М. Благороднометалльная минерализация и условия образования Au-Ag эпитеpmальных жил на Au-Mo-Cu-порфировом месторождении Кызык-Чадр (Восточная Тува) // Литосфера. 2024. Т. 24. № 6. С. 1029–1045. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-1029-1045>. EDN: OVUPRS.
46. Степанов В.А. Самородки золота на месторождениях золото-кварцевой формации как индикатор зональности рудной колонны // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2025. № 1. С. 32–43. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2025-1-32-43>. EDN: DZQTTY.
47. Чумаков А.В., Аликин О.В., Рудашевский В.Н., Удинцова С.А., Панова Е.Г., Лейбграм П.Н. Типоморфизм золота в метасоматитах золотосульфидного месторождения (Средний Урал) // Вестник геонаук. 2025. № 1. С. 4–13. <https://doi.org/10.19110/geov.2025.1.1>. EDN: PYGLTZ.
48. Melo-Gómez J., Hastie E., Gibson H.L., Tait K.T., Petrus J.A. Minor and trace element chemistry of gold: controls and implications for gold deposits within the Superior province, Canada // Economic Geology. 2025. Vol. 120. Iss. 2. P. 307–333. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5148>.
49. Павлова Л.А., Парадина Л.Ф. Рентгеноспектральный микроанализ и его применение в минералогии. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО АН СССР, 1990. 185 с.
50. Павлова Л.А. Электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ и его применение. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 304 с.
51. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания / пер. с нем. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 1132 с.
52. Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element) // Canadian Geological Survey Bulletin. 1979. Iss. 280. 584 p.



53. Зеленов В.И. Методика исследования золото- и серебросодержащих руд. М.: Недра, 1989. 302 с.
54. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г. Самородное золото месторождения Роговик (Северо-Восток России) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Междунар. симпозиум им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посв. 130-летию со дня рождения проф. М.И. Кучина (г. Томск, 3–7 апреля 2017 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2017. Т. I. С. 166–168. EDN: ZNVJQP.
55. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Самородное золото эпите rmального месторождения Дальнее (Северное Приохотье) // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции (г. Новосибирск, 19–23 ноября 2018 г.). Новосибирск: Изд-во ИПЦ НГУ, 2018. С. 329–331. EDN: ZADFHN.
56. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Самородное золото эпите rmального месторождения Кварцевая Сопка (Северное Приохотье) // Вопросы естествознания. 2018. № 2. С. 76–83. EDN: XZLDON.
57. Кравцова Р.Г. Минералого-геохимическая зональность и особенности формирования золото-серебряных месторождений Северо-Востока России // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 6. С. 763–777. EDN: NZLWEI.
58. Кравцова Р.Г., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Прокофьев В.Ю. Условия формирования золото-серебряных месторождений Северного Приохотья, Россия // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 5. С. 452–473. EDN: OTUUSX.

References

1. Konstantinov M.M., Kostin A.V., Sidorov A.A. *The geology of silver ore deposits*. Yakutsk: Sakhapolygraphizdat; 2003, 282 p. (In Russ.).
2. Struzhkov S.F., Konstantinov M.M. *The metallogeny of gold and silver in the Okhotsk–Chuckchee volcanogenic belt*. Moscow: Nauchnyi mir; 2005, 320 p. (In Russ.).
3. Natalenko V.E., Kalinin A.I., Raevskaya I.S., Tolstikhin Yu.V., Khalkhalov Yu.A., Bel'kov E.V. Geological setting of Dukat deposit. In: *Materialy po geologii i poleznym iskopaemyym Severo-Vostoka SSSR = Materials on geology and mineral resources of North–East USSR*. Magadan: Magadanskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1980, vol. 25, p. 61–73. (In Russ.).
4. Sakharova M.S., Bryzgalov I.A. Mineralogy of silver in quartz-adularia-rhodonite volcanogenic hydrothermal veins. *Geology of Ore Deposits*. 1981;23(6):36–48. (In Russ.).
5. Sidorov A.A., Konstantinov M.M., Eremin R.A., Savva N.E., Kopytin V.I., Safronov D.N., et al. *Silver: geology, mineralogy, genesis, and deposit localization patterns*. Moscow: Nauka; 1989, 240 p. (In Russ.).
6. Sidorov A.A., Filimonova A.G., Volkov A.V., Trubkin N.V., Chugaev A.V. Evolutionary historical model of the Dukat silver giant. *Doklady Akademii nauk*. 2012;444(5):523–528. (In Russ.). EDN: OYIRUL.
7. Shilo N.A., Sakharova M.S., Krivitskaya N.N., Riakhovskaya S.K., Bryzgalov I.A. *Mineralogy and genetic features of gold-silver mineralization in the northwestern part of the Pacific Ocean framing*. Moscow: Nauka; 1992, 252 p. (In Russ.).
8. Berman Yu.S., Prokofiev V.Yu., Kozerenko S.V., Eliseeva N.A., Kolpakova N.N. Rejuvenation of gold-silver mineralization of the Dukat volcanogenic deposit (based on the results of fluid inclusion studies). *Geochemistry International*. 1993;4:539–548. (In Russ.).
9. Konstantinov M.M., Natalenko V.E., Kalinin A.I., Strujkov S.F., Dvurechenskaya S.S. Dukat gold-silver deposit (Russia). *Geology of Ore Deposits*. 1995;37(4):317–334. (In Russ.).
10. Konstantinov M.M., Strujkov S.F. Application of indicator halous (signs of ore remobilization) in exploration for blind gold and silver deposits. *Journal of Geochemical Exploration*. 1995;54(1):1–17. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(95\)00003-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(95)00003-8).
11. Kravtsova R.G., Zakharov M.N. Geochemical fields of concentration of the Dukat gold-silver-bearing ore-magmatic system (Northeast Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 1996;37(5):28–38. (In Russ.). EDN: EZBJJD.
12. Dvurechenskaya S.S. *Hypogene minerals from silver deposits*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 2001, 258 p. (In Russ.).
13. Zakharov M.N., Kravtsova R.G., Pavlova L.A. Geochemical features of rocks of volcanoplutonic associations of the Dukat gold-silver deposit. *Russian Geology and Geophysics*. 2002;43(10):928–939. (In Russ.). EDN: BVWNIC.
14. Rozinov M.I., Kolesnikov D.I., Shergina Yu.P. Timing of ore mineralization in the Dukat silver deposit by data of the Rb-Sr method. *Geology of Ore Deposits*. 2004;46(6):524–539. (In Russ.). EDN: OPWRDD.
15. Petrov O.V., Mikhailov B.K., Shevchenko S.S., Rozinov M.I., Kolesnikov D.I., Lokhov K.I., et al. Isotope and geochemical studies of the unique Dukat gold-silver deposit as a key to understanding the processes of volcanogenic ore formation. *Regional Geology and Metallogeny*. 2006;27:60–76 (In Russ.). EDN: LLZJEJ.
16. Borisova D.A. Characteristic features of the mineral composition of ores of the Dukat gold-silver deposit. In: *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: materialy VIII Rossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi shkoly = New advances in understanding ore formation processes: Proceedings of the 8th Russian youth scientific and practical school*. 26–30 November 2018, Moscow. Moscow: Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences; 2018, p. 65–68. (In Russ.). EDN: YQKWSL.
17. Savva N.E. *Silver mineralogy in northeastern Russia*. Moscow: Triumph; 2018, 544 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.32986/978-5-89392-823-5-1-544>.
18. Filimonova L.G., Trubkin N.V. Dispersed gold and associated disseminated mineralization of leucogranites of the Dukat ore field as indicators of the generation conditions of magmatogene gold-bearing fluids. *Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(9):1275–1293. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2020174>. EDN: KEWYAF.



19. Konstantinov M.M., Natalenko V.E., Kalinin A.I., Struzhkov S.F. *Dukat gold–silver deposit*. Moscow: Nedra; 1998, 203 p. (In Russ.).
20. Kravtsova R.G. *Geochemistry and formation conditions of gold–silver ore-forming systems in the Northern Pre-Okhotsk region*. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo"; 2010, 292 p. (In Russ.). EDN: QKJONH.
21. Petrovskaya N.V. *Native gold (general characteristics, typomorphism, problems, and genesis issues)*. Moscow: Nauka; 1973, 348 p. (In Russ.).
22. Petrovskaya N.V. *Gold nuggets*. Moscow: Nauka; 1993, 190 p. (In Russ.).
23. Savva N.E., Preis V.K. *Atlas of native gold of the North-East of the USSR*. Moscow: Nauka; 1990, 292 p. (In Russ.).
24. Morrison G.W., Rose W.J., Jaireth S. Geological and geochemical controls on the silver content (finesness) of gold in gold-silver deposits. *Ore Geology Reviews*. 1991;6(4):333-364. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90009-V](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90009-V).
25. Knight J.B., Mortensen J.K., Morison S.R. Lode and placer gold composition in the Klondike district, Yukon Territory, Canada; implications for the nature and genesis of Klondike placer and lode gold deposits. *Economic Geology*. 1999;94(5):649-664. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.5.649>.
26. Samusikov V.P. Trace elements in native gold as criteria for the identification of the formation type and erosion level of gold ore deposits. *Doklady Akademii nauk*. 2003;391(1):99-103. (In Russ.). EDN: OQJ0UB.
27. Anisimova G.S., Serkebayeva E.S., Kondratieva L.A. Native gold of the Badran deposit. *Otechestvennaya Geologiya*. 2006;5:38-47. (In Russ.). EDN: GZUUFM.
28. Chapman R.J., Leake R.C., Bond D.P.G., Stedra V., Fairgrieve B. Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance. *Economic Geology*. 2009;104(4):563-585. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.563>.
29. Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Piazzolo S., Morgan D.J., et al. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies. *Mineralium Deposita*. 2021;56:1563-1588. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01036-x>.
30. Chapman R., Mortensen J.K., Murphy R. Compositional signatures of gold from different deposit types in British Columbia, Canada. *Minerals*. 2023;13(8):1072. <https://doi.org/10.3390/min13081072>.
31. Stefanova V., Serafimovski T., Volkov A.V., Sidorov A.A. Native gold of the Borovik ore field, Republic of Macedonia (FYROM). *Geology of Ore Deposits*. 2015;57(2):148-153. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0016777015020069>. EDN: TPWJXL.
32. Vishiti A., Suh C.E., Lehmann B., Egbe J.A., Shemang E.M. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 2015;111:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.010>.
33. Gas'kov I.V. Major impurity elements in native gold and their association with gold mineralization settings in deposits of Asian folded belts. *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(9):1359-1376. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GIG20170908>. EDN: ZHDOUF.
34. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Lipko S.V., Arsent'ev K.Yu. Contrasting surficial composition of native gold from two different types of gold ore deposits. *Minerals*. 2017;7(8):142. <https://doi.org/10.3390/min7080142>.
35. Ankusheva N.N., Kuzhuget R.V. Gold composition and conditions of Southern Ak-Dag gold-sulfide-quartz ore occurrence formation (Western Tuva). *Lithosphere (Russia)*. 2020;20(5):706-716. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-706-716>. EDN: XZMMRE.
36. Kiseleva G.D., Yazykova Yu.I., Kovalenker V.A., Trubkin N.V., Borisovsky S.E. Native gold typomorphism as indicator of various types of mineralization of large scarn-porphry Au-Fe-Cu deposit Bystrinskoe, Eastern Transbaikalia. *Ores and metals*. 2020;1:51-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10005>. EDN: UMLMIT.
37. Aristov V.V., Grigorieva A.V., Savchuk Y.S., Sidorova N.V., Sidorov V.A. Forms of gold and some typomorphic characteristics of native gold of the Pavlik orogenic deposit (Magadan oblast). *Geology of Ore Deposits*. 2021;63(1):3-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016777021010020>. EDN: SCPLMH.
38. Chukhareva N.S., Belogub E.V., Ryzhkova Yu.A., Blinov I.A., Rassomakhin M.A., Novoselov K.A. Features of morphology and chemical composition of native gold from the Murtykty deposit, South Urals. *Mineralogy*. 2021;7(1):54-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-1-4>. EDN: JORRUT.
39. Liu H., Beaudoin G. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits. *Ore Geology Reviews*. 2021;132:104066. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104066>.
40. Tolstykh N., Bukhanova D., Shapovalova M., Borovikov A., Podlipsky M. The gold mineralization of the Baranyevskoe Au-Ag epithermal deposit in Central Kamchatka. *Minerals*. 2021;11(11):1225. <https://doi.org/10.3390/min11111225>.
41. Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Puchkov V.N., Petrov S.V. Features of chemical composition of gold minerals from gabbro massives of the Urals platinum-bearing belt, Russia. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022;507(2):245-252. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739722601612>. EDN: VVFVAE.
42. Savva N.E., Kravtsova R.G., Anisimova G.S., Palyanova G.A. Typomorphism of native gold (geological-industrial types of gold deposits in the North-East of Russia). *Minerals*. 2022;12(5):561. <https://doi.org/10.3390/min12050561>.
43. Alfonso P., Ccolque E., Garcia-Valles M., Martínez A., Yubero M.T., Anticoi H., et al. Mineralogy and mineral chemistry of the Au-Ag-Te-(Bi-Se) San Luis Alta deposit, Mid-South Peru. *Minerals*. 2023;13(4):568. <https://doi.org/10.3390/min13040568>.



44. Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N. Ore mineralogy and typomorphism of native gold of the Spokoininsky cluster of the Aldan–Stanovoy gold province. *Minerals*. 2023;13(4):543. <https://doi.org/10.3390/min13040543>.
45. Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Kalinin Yu.A., Shavekina A.Sh., Losev V.I., Balanay M.M. Noble-metal mineralization and conditions of formation of Au-Ag epithermal veins from Kyzik-Chadr Au-Mo-Cu porphyry deposit, Eastern Tuva. *Lithosphere (Russia)*. 2024;24(6):1029-1045. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-1029-1045>. EDN: OVUPRS.
46. Stepanov V.A. Gold nuggets in the gold-quartz formation deposits as an indicator for the ore column zonality. *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2025;1:32-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2025-1-32-43>. EDN: DZQTTY.
47. Chumakov A.V., Alikin O.V., Rudashevsky V.N., Udintsova S.A., Panova E.G., Leibham P.N. Gold typomorphism in metasomatites of gold-sulfide deposit (Middle Urals, Trans-Ural megazone). *Vestnik of Geosciences*. 2025;1:4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/geov.2025.1.1>. EDN: PYGLTZ.
48. Melo-Gómez J., Hastie E., Gibson H.L., Tait K.T., Petrus J.A.. Minor and trace element chemistry of gold: controls and implications for gold deposits within the Superior province, Canada. *Economic Geology*. 2025;120(2):307-333. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5148>.
49. Pavlova L.A., Paradina L.F. *X-ray spectral microanalysis and its application in mineralogy*. Yakutsk: Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990, 185 p. (In Russ.).
50. Pavlova L.A. *Electron probe X-ray microanalysis and its application*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing; 2014, 304 p. (In Russ.).
51. Ramdohr P. The ore minerals and their intergrowths. Berlin: Akademie-Verlag; 1960, 1089 p. (Russ. ed.: *Rudnye mineraly i ikh srastaniya*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury; 1962, 1132 p.).
52. Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element). *Canadian Geological Survey Bulletin*. 1979;280:584.
53. Zelenov V.I. *Methodology for studying gold- and silver-bearing ores*. Moscow: Nedra; 1989, 302 p. (In Russ.).
54. Makshakov A.S., Kravtsova R.G. Native gold from the Rogovik deposit (North-East of Russia). In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXI Mezhdunar. sipozium im. akad. M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posv. 130-letiyu so dnya rozhdeniya prof. M.I. Kuchina = Problems of geology and subsoil development: Proceedings of the 21st Academician M.A. Usov International symposium of students and young scientists dedicated to the 130th birth anniversary of Professor M.I. Kuchin*. 3–7 April 2017, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2017, vol. I, p. 166-168. (In Russ.). EDN: ZNVJQP.
55. Makshakov A.S., Kravtsova R.G., Pavlova L.A. Native gold from the Dal'nee epithermal deposit (Northern Okhotsk Region). In: *IX Sibirskaya konferentsiya molodykh uchenykh po naukam o Zemle: materialy konferentsii = 9th Siberian conference of young scientists on Earth sciences: conference proceedings*. 19–23 November 2018, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2018, p. 329-331. (In Russ.). EDN: ZADFHN.
56. Makshakov A.S., Kravtsova R.G., Pavlova L.A. Native gold from the Kvartsevaya Sopka epithermal deposit (Northern Okhotsk Region). *Voprosy estestvoznaniya*. 2018;2:76-83. (In Russ.). EDN: XZLDOH.
57. Kravtsova R.G. Mineralogo-geochemical zonation and peculiarities of formation of gold-silver deposits in north-eastern Russia. *Geology and Geophysics*. 1998;39(6):763-777. (In Russ.). EDN: NZLWEI.
58. Kravtsova R.G., Borovikov A.A., Borisenko A.S., Prokof'ev V.Yu. Formation conditions of gold-silver deposits in the Northern Okhotsk region, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2003;45(5):452-473. (In Russ.). EDN: OTUUSX.

Информация об авторах / Information about the authors



Павлюк Наталия Сергеевна,

младший научный сотрудник лаборатории обогащения руд,
Иркутский научно-исследовательский институт благородных
и редких металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия,
аспирант,

Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Россия,

✉ pavnatse@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2095-5539>

Natalia S. Pavlyuk,

Junior Researcher of the Ore Benefication Laboratory,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
Irkutsk, Russia,
Postgraduate Student,

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,

✉ pavnatse@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2095-5539>

**Макшаков Артем Сергеевич,**

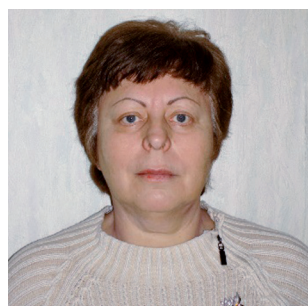
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории моделирования
геохимических процессов,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Россия,
artem_m@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6970-7501>

Artem S. Makshakov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemical Process Modeling,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
artem_m@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6970-7501>

**Кравцова Раиса Григорьевна,**

доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования
геохимических процессов,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Россия,
krg@igc.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5153-6871>

Raisa G. Kravtsova,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher of the Laboratory of Geochemical Process Modeling,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
krg@igc.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5153-6871>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Н.С. Павлюк – разработка методологии, проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

А.С. Макшаков – разработка концепции, курирование данных, проведение исследования, предоставление ресурсов, научное руководство, визуализация, редактирование рукописи.

Р.Г. Кравцова – разработка концепции, курирование данных, предоставление ресурсов, редактирование рукописи.

Natalia S. Pavlyuk – methodology, investigation, formal analysis, validation, visualization, writing – original draft.

Artem S. Makshakov – conceptualization, data curation, investigation, resources, supervision, visualization, writing – editing.

Raisa G. Kravtsova – conceptualization, data curation, resources, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.08.2025; одобрена после рецензирования 26.08.2025; принята к публикации 11.09.2025.

The article was submitted 14.08.2025; approved after reviewing 26.08.2025; accepted for publication 11.09.2025.