
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

**«ГОРЧИЧНОЕ» ЗОЛОТО ЭПИТЕРМАЛЬНОГО
ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЭВЕВПЕНТА
(КАМЧАТКА)**

© 2024 г. Д. чл. П. С. Жегунов*, д. чл. Е. С. Житова, д. чл. А. В. Кутырев,
д. чл. П. Е. Швейгерт, д. чл. К. А. Грибушин, С. В. Москалева

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бул. Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия*

**e-mail: pavel.zhegunov@bk.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 09.10.2024 г.

В адуляр-кварцевых жилах эпитеpмального рудопроявления Эвевпента (Камчатка, Россия), содержащих золото-теллуридную минерализацию, встречено пористое золото, обладающее коричневато-золотистым цветом и низкой отражающей способностью (так называемое «горчичное» золото). Оно образует самостоятельные зерна и каймы, замещающие калаверит (AuTe_2). Было выявлено четыре разновидности «горчичного» золота: (1) «горчичное» золото без примесей, (2) участки и прожилки однородного самородного золота в «горчичном» золоте, (3) «горчичное» золото с реликтами сульфидов Ag (Au-Ag) и (4) «горчичное» золото в сростании с кислородсодержащими соединениями Fe, Mn. Предполагается, что «горчичное» золото рудопроявления Эвевпента образовалось в результате замещения калаверита (AuTe_2) в гипогенных условиях на поздней гидротермальной стадии. Сделан вывод о том, что «горчичное» золото и его химический состав, а также минералы-предшественники и минеральная ассоциация в совокупности являются поисковыми индикаторами золото-сурьмяных орогенных и золото-теллуридных эпитеpмальных месторождений.

Ключевые слова: «горчичное» золото, калаверит, типоморфизм, эпитеpмальное месторождение, Эвевпента, Северо-Камчатский рудный район, Камчатка

DOI: 10.31857/S0869605524050038, **EDN:** PCNALJ

ВВЕДЕНИЕ

«Горчичное» золото — собирательный термин, который объединяет под собой рыхлые, пористые, трещиноватые агрегаты самородного золота, обладающего низкой отражательной способностью и коричневым цветом (с различными оттенками) (Некрасов, 1991; Tolstykh et al., 2019). «Каркас» в таких агрегатах слагают отдельные округлые частички («глобулы») высокопробного (около 1000 ‰) самородного золота, которые неплотно прилегают друг к другу. Поровое пространство может быть пустым или заполненным различными кислородсодержащими соединениями Fe, Te, Sb, As, Pb, Cu и Hg. Набор элементов зависит от минеральной ассоциации на месторождении (Некрасов, 1991).

Образование агрегатов, схожих с «горчичным» золотом, было описано как результат технологических процессов извлечения золота из упорных золото-теллуридных руд.

В частности, были выполнены экспериментальные исследования по превращению теллуридов Au, Ag [калаверит (AuTe_2), креннерит (Au_3AgTe_8) и сильванит (AuAgTe_4)] в самородное золото под действием гидротермальных растворов с температурой менее 220 °C в широком интервале pH (Zhao et al., 2009; Zhao et al., 2010; Xu et al., 2013; Zhao, Pring, 2019). В результате реакции замещения креннерит и калаверит растворяются на границе раздела фаз при одновременном осаждении золота (псевдоморфное замещение), при этом теллур окисляется до Te^{4+} и уносится с Ag растворами из зоны реакции (Xu et al., 2009; Zhao et al., 2009; Zhao, Pring, 2019). Процесс замещения сильванита более сложный, происходит с образованием промежуточных фаз, а конечными продуктами реакции служат самородное золото или смесь петцита, гессита и калаверита (Zhao, Pring, 2019).

Предполагается, что сходные процессы псевдоморфного замещения теллуридов самородным «горчичным» золотом под действием гидротермальных растворов могли протекать в природе. Находки «горчичного» золота, замещающего калаверит, ауристобит и другие минералы, известны на орогенных золото-сурьмяных месторождениях Верхоянья, Россия (Гамянин и др., 1987) и месторождении Кривань, Словакия (Makovicky et al., 2007), а также на золото-теллуридном плутоногенном месторождении Донпин, Китай (Li, Makovsky, 2001). Среди объектов корякско-камчатского региона «горчичное» золото подробно описано на золото-теллуридных эпитеpmальных месторождениях Агинское, Срединный хребет, Камчатка (Okrugin et al., 2014) и Малетойваям, Ветвейский хребет, Корякское нагорье (Tolstikh et al., 2019). Интерес к данным исследованиям вызван установлением возможных механизмов формирования «горчичного» золота в природе и поведения химических элементов в зоне окисления эпитеpmальных месторождений. В статье впервые приводится подробное описание «горчичного» золота на эпитеpmальном золото-серебряном рудопроявлении Эвевпента Северо-Камчатского (Оссорского) рудного района, а также сообщается об уникальной ассоциации, дающей ключ к пониманию условий формирования «горчичного» золота.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЭВЕВПЕНТА

Эпитеpmальное золото-серебряное рудопроявление Эвевпента располагается в северной части Срединного хребта и приурочено к Центрально-Камчатскому вулканическому поясу (рис. 1). Рудопроявление локализовано в миоцен-плиоценовой эффузивно-пирокластической толще, которая сложена андезибазальтами, андезитами, дацитами и их туфами. Покровные образования прорываются субвулканическими телами: штоками, дайками андезитов, базальтов, дацитов. Рудные тела располагаются в субвулканических телах дацитов и представлены гидротермальными брекчиями, жилами и зонами прожилкования адуляр-кварцевого (адуляр — низкотемпературная разновидность ортоклаза) и карбонат-кварцевого состава. Околорудные изменения представлены адуляр-кварцевыми метасоматитами, которые на периферии сменяются аргиллизитами и площадной пропилитизацией.

Золото-теллуридная минерализация обнаружена в жилах с каркасно-пластинчатой и колломорфной текстурами. Количество рудных минералов не превышает 1–2 %, они рассеяны в жильной матрице, образуют гнезда черного цвета в кварце, насыщенные теллуридами, сульфидами и самородным золотом (рис. 2). У дневной поверхности жилы сильно трещиноваты и окислены (рассыпаются при отборе проб, напоминают

«кварцевую сыпучку»). Первые данные о минеральном составе руд были представлены нами ранее (Жегунов и др., 2024); минералы, описанные в данной работе, перечислены в табл. 1.

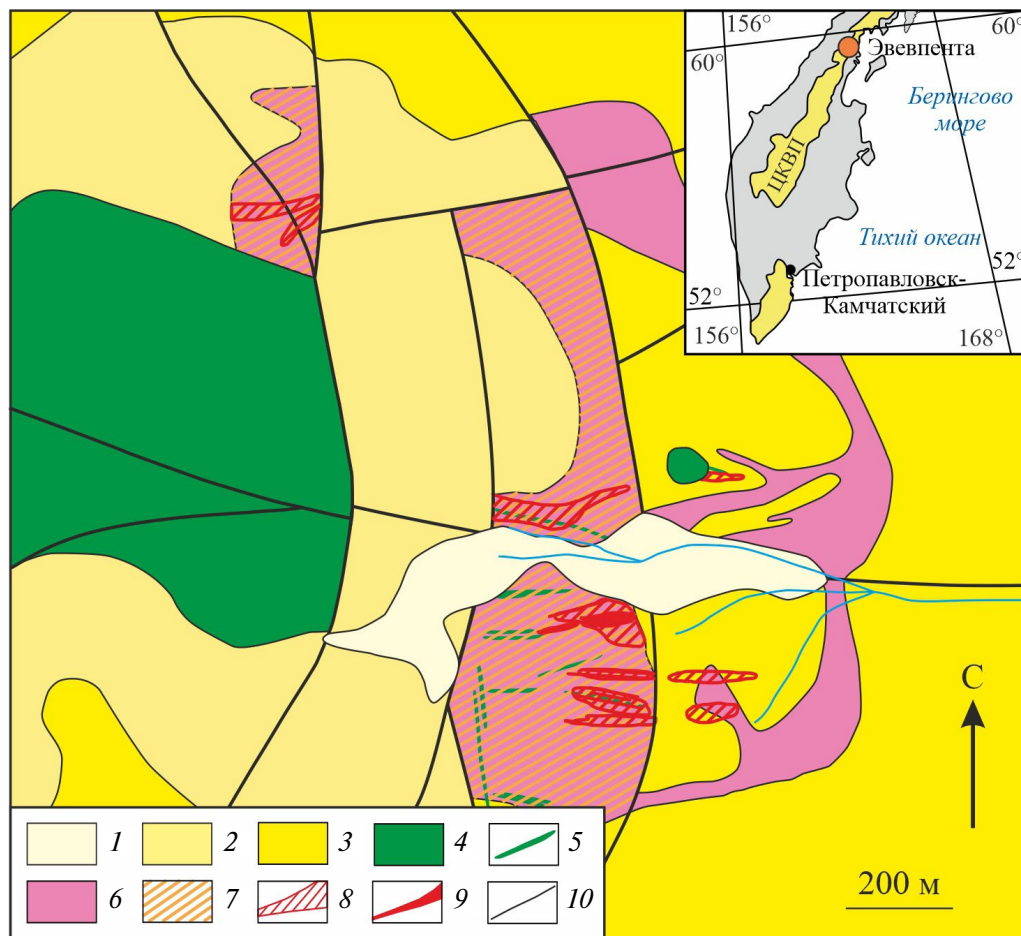


Рис. 1. Геологическая схема рудопроявления Эвевпента (составлена по неопубликованным материалам АО «Северо-Восточное ПГО»)

1 — пролювиальные четвертичные отложения; 2 — миоцен-плиоценовые андезибазальты, андезиты и их туфы; 3 — средне-позднемиоценовые андезибазальты, андезиты, дациандезиты, дациты и их туфы; 4 — субвулканические тела андезитов; 5 — дайки базальтов; 6 — субвулканические тела дацитов; 7 — зоны аргиллизации; 8 — зоны прожилкования; 9 — жилы; 10 — разрывные нарушения. На врезке: расположение рудопроявления Эвевпента в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса (ЦКВП).

Fig. 1. Conceptual geological map of the Evevpenta ore occurrence (the map is based on unpublished materials of the Joint-Stock Company “North-Eastern PGO”).

1 — proluvial Quaternary deposits; 2 — Miocene-Pliocene basaltic andesites, andesites and their tuffs; 3 — middle-late Miocene basaltic andesites, andesites, dacyandesites, dacites and their tuffs; 4 — subvolcanic andesite bodies; 5 — basalt dikes; 6 — subvolcanic dacite bodies; 7 — argillic altered zones; 8 — veining zones; 9 — adularia-quartz veins; 10 — faults. Inset: location of the Evevpenta ore occurrence within the Central Kamchatka Volcanic Belt (CKVB).

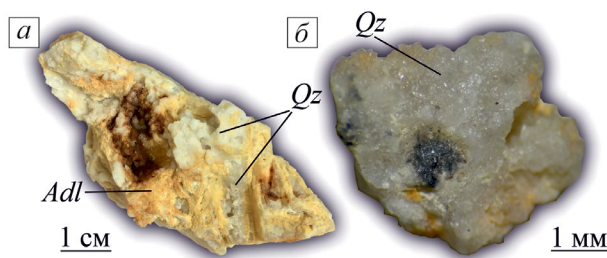


Рис. 2. Образцы рудных жил, содержащих теллуридную минерализацию и «горчичное» золото. *a* — образец жилы с каркасно-пластинчатой текстурой, сложен адуляром (*Adl*) и кварцем (*Qz*); *б* — гнезда черного цвета в кварце (*Qz*), насыщенные теллуридами, сульфидами и самородным золотом.

Fig. 2. Samples of mineralized veins containing telluride mineralization and mustard gold. *a* — sample of vein of plate texture, composed of adularia (*Adl*) and quartz (*Qz*); *б* — black spots on quartz matrix (*Qz*), saturated with tellurides, sulfides, and native gold.

Таблица 1. Минеральный состав руд рудопроявления Эвевпента по данным П. С. Жегунова с соавторами (2024)

Минерал	Формула
Жильные	
Кварц	SiO ₂
Ортоклаз (адуляр)	K(AlSi ₃ O ₈)
Иллит	K _{0,65} Al ₂ (Al _{0,65} Si _{3,35} O ₁₀)(OH) ₂
Рудные и акцессорные	
Самородное золото	(Au, Ag)
«Горчичное» золото	(Au, Ag)
Акантит	Ag ₂ S
Алтаит	PbTe
Барит	BaSO ₄
Галенит	PbS
Гессит	Ag ₂ Te
Калаверит*	Au ₂ Te
Креннерит	Au ₃ AgTe ₈
Петцит	Ag ₃ AuTe ₂
Пирит	FeS ₂
Сульфиды золота и серебра	(Au, Ag) _{2-x} S
Сфалерит	ZnS
Халькопирит	CuFeS ₂
Англезит	PbSO ₄
Вульфенит	Pb(MoO ₄)
Кислородсодержащие соединения Fe, Mn	
Теллурид/парателлурид	TeO ₂
Хлораргирит	AgCl
Ярозит	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆

Примечание. Прямой шрифт — гипогенные минералы, курсив — гипергенные минералы. * В исходной работе не указан, был обнаружен при подготовке этой работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы и протолочные пробы для исследования отобраны из поисковых канав. Образцы руд были разрезаны на секции толщиной 3—5 мм, из которых изготовлены аншлифы. Протолочные пробы (массой около 8 кг) в лабораторных условиях были измельчены до фракции от 0.5 до 1.0 мм. Затем проводилось гравитационное концентрирование, а после — концентрирование в тяжелой жидкости (бромформе). Далее зерна были вмонтированы в эпоксидную смолу и отполированы. Часть зерен были выложены на токопроводящую ленту для изучения их морфологии.

Предварительное изучение минерального состава, разметка образцов и фотографирование выполнены при помощи поляризационного микроскопа Nikon LV100N, оснащенного цифровой камерой.

Исследование морфологии и химического состава зерен «горчичного» золота и ассоциирующих минералов выполнено с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X—Max с рабочей площадью детектора 80 мм². Режим съемки: напряжение 20 кВ, ток зонда 0.75 нА, диаметр пучка 2 мкм, время накопления спектров 20 секунд. Обработка спектров проводилась при помощи программного обеспечения AZtec. В качестве эталонов использовались следующие стандарты: Au, Ag (Au, Ag), синтетические соединения FeS₂ (Fe, S) и CdTe (Te), санидин (O) и родонит (Mn). Определение элементов проводилось по аналитическим линиям: K α — O, S, Fe, Mn, L α — Te, Ag, M α — Au.

Порошковые рентгенограммы получены с помощью монокристалльного дифрактометра Rigaku Raxis Rapid II (геометрия Дебая — Шеррера, радиус 127.4 мм, излучение CoK α). Накопление данных происходило с вращающегося по оси φ образца в течение 600 с. Рентгенограммы были обработаны с использованием программы osc2xrd (Бритвин и др., 2017). Уточнение параметров элементарной ячейки золота проводилось в программном комплексе Toras (Bruker AXS, 2009) методом ЛеБель (модифицированная методика Ритвельда).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оптическая микроскопия. По цвету, отражательной способности и внутреннему строению зерен выделено два основных типа золота (рис. 3). Золото первого типа обладает высокой отражательной способностью, цветом от бело-желтого до золотисто-желтого, а также однородным внутренним строением (рис. 3, *а, б*). Размер зерен варьирует от 20 до 140 мкм. Золото второго типа обладает низкой отражательной способностью, цветом от коричневатого-желтого, бронзово-желтого до коричневого и красно-бурого (рис. 3, *в–е*). Зерна угловатые, ксеноморфные по отношению к жильным минералам (рис. 3, *з, е*). Размер зерен составляет от 3 до 200 мкм. Внутренняя текстура неоднородная пористая, трещиноватая (рис. 3, *в–е*). По своим оптическим характеристикам и особенностям внутреннего строения, золото второго типа напоминает «горчичное» золото, которое описано, например, на месторождениях Малетойваям (Tolstykh et al., 2019) и Донпин (Wang et al., 2020). Золото первого типа было отнесено к более раннему гипогенному.

Сканирующая электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ. В результате изучения на сканирующем электронном микроскопе обнаружено, что раннее гипогенное золото образует дендритовидные агрегаты сложной формы и однородного

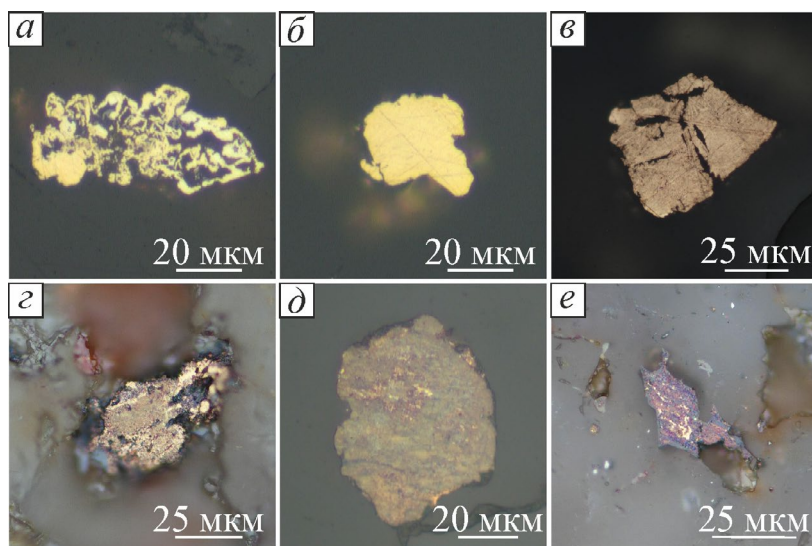


Рис. 3. Разновидности самородного золота.

a — ранее гипогенное золото дендритовидной формы; *б* — ранее гипогенное золото однородного внутреннего строения; *в* — трещиноватое зерно «горчичного» золота; *г* — зерно «горчичного» золота с участками, обедненными примесями (светлое); *д*, *е* — «горчичное» золото, насыщенное примесями (темное), с участками, обедненными примесями (светлое). Изображения в отраженном свете.

Fig. 3. Varieties of nugget gold.

a — dendritic form of early hypogenic gold; *б* — simple internal structure of early hypogenic gold; *в* — fractured grain of mustard gold; *г* — grain of mustard gold with areas depleted of impurities (light); *д*, *е* — mustard gold with high (dark) and low (light) concentration of impurities. Images in reflected light.

внутреннего строения (рис. 4, *a*, *б*) [далее раннее гипогенное золото нами не рассматривается, описание его особенностей выходит за рамки данной работы, подробнее о нем сообщалось ранее (Жегунов и др., 2024)]. «Горчичное» золото образует комковидные зерна с пористой, трещиноватой (рис. 4, *в*, *г*, *е*) и колломорфной (рис. 4, *д*) текстурой. При подготовке препаратов на токопроводящей ленте отмечено, что зерна хрупкие и рассыпаются при слабом воздействии на них (рис. 4, *в*). В некоторых зернах наблюдаются прожилки и участки высокопробного самородного золота однородного внутреннего строения (рис. 4, *д*, *е*). На рис. 5 приведен пример зерна калаверита (AuTe_2) с оторочкой пористого «горчичного» золота, содержащего Fe и Ag. С ними в ассоциации обнаружены англезит (PbSO_4) с реликтами алтаита (PbTe), а также теллурид/парателлурид (TeO_2).

По химическому составу «горчичное» золото (табл. 2) содержит до ~ 50 мас. % примесей, основной из которых является Ag (до 19.0 мас. %); установлены существенные количества O (до 21.7 мас. %), Fe (до 21.0 мас. %), отмечаются S (до 9.5 мас. %), Te (до 4.0 мас. %) и Mn (до 2.7 мас. %). Пробность «горчичного» золота изменяется от 906 до 1000 ‰. Химический состав «горчичного» золота неоднородный как в отдельных зернах, так и в пределах одного зерна (табл. 2, ан. 7, 8, 14, 15; рис 4, *д*, *е*). Оторочки «горчичного» золота практически не содержат примеси Te, обогащены Fe и Ag относительно калаверита (рис. 6). Наличие участков с повышенной концентрацией Ag в «горчичном золоте» (рис. 6, *г*) можно объяснить присутствием в нем включений серебросодержащих сульфидов.

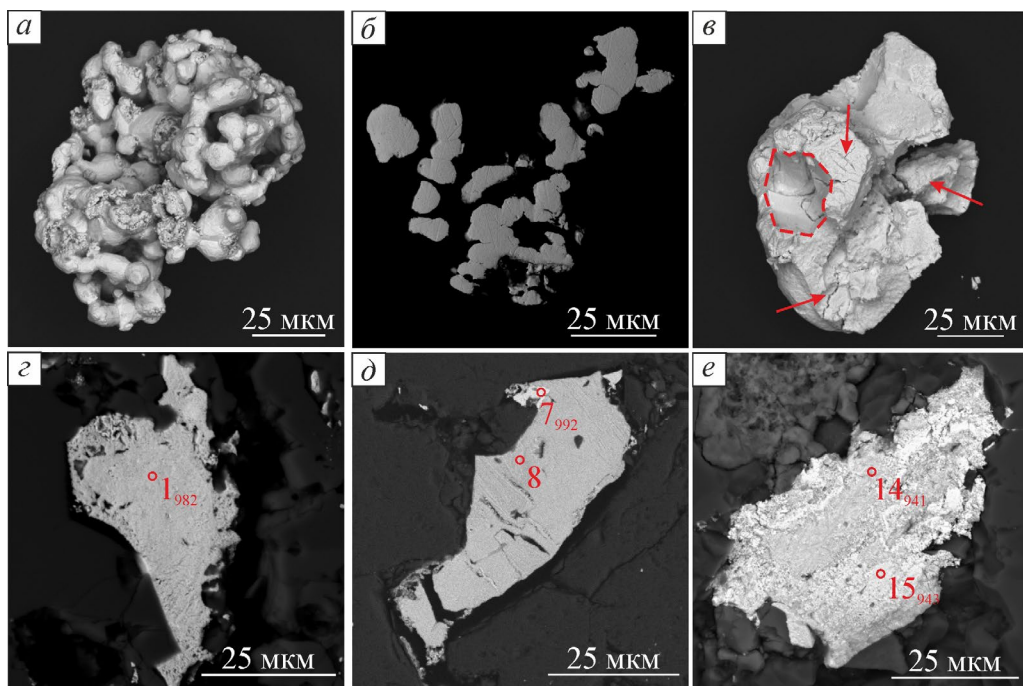


Рис. 4. Разновидности самородного золота.

a, б — гипогенное золото дендритовидной формы и однородного внутреннего строения; *в* — трещиноватое зерно «горчичного» золота, красный контур — след от иглы, стрелки указывают на трещины и обломок зерна, возникшие после воздействия; *г* — пористое зерно «горчичного» золота; *д* — «горчичное» золото колломорфной текстуры в сростании с сульфидами Ag и участками высокопробного золота однородного внутреннего строения (белое); *е* — «горчичное» золото с участками, насыщенными оксидами Fe (светло-серое). Изображения в отраженных электронах (SE) (*a, в*) и в обратно-рассеянных электронах (BSE) (*б, г–е*). Точки 1, 7, 8, 14, 15 соответствуют номерам анализов в табл. 2, индексы обозначают пробу золота.

Fig. 4. Varieties of nugget gold.

a, б — dendritic form with simple internal structure of hypogenic gold; *в* — fractured grain of mustard gold, the red contour is a needle trace, red arrows indicate fractures resulted from interaction; *г* — porous grain of mustard gold; *д* — collomorphic texture of mustard gold in aggregation with Ag sulfides and areas of high-grade gold with simple internal structure (white); *е* — mustard gold with areas saturated with Fe oxides (light gray). SE images (*a, в*) and BSE images (*б, г–е*). Points 1, 7, 8, 14, 15 correspond to the analysis numbers in Table 2, the indices show the gold probe.

Порошковая рентгеновская дифрактометрия. Рентгенодифракционное исследование «горчичного» золота позволило установить, что зерна сложены самородным золотом, а в качестве минеральной примеси обнаружен только кварц. Фазы, содержащие Fe, S, Mn и Te, не зарегистрированы. Это может быть вызвано как рентгеноаморфной природой данных соединений, так и их размером, недостаточным для получения рентгенодифракционных данных необходимой интенсивности. Принимая во внимание размер зерен минералов в порах «горчичного» золота, можно заключить, что второй критерий мог играть ключевую роль. Рентгенодифракционные характеристики исследованных зерен следующие: пространственная группа $Fm\bar{3}m$, $a = 4.08 \text{ \AA}$ и $V = 67.9 \text{ \AA}^3$ (рис. 7, *a*). На некоторых рентгенограммах помимо золота присутствуют очень слабые рефлексы, отнесенные к хлорагририту (AgCl) (рис. 7, *б*).

Таблица 2. Химический состав «горчичного» золота в массовых и атомных %
Table 2. Chemical composition of mustard gold in weight and atomic %

№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Мас. %															
O	—	—	—	—	—	—	—	3.03	2.26	2.45	10.40	19.64	3.18	9.02	5.06
S	—	—	—	—	—	—	—	5.48	5.34	3.44	9.20	—	—	—	—
Mn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.65	—	—
Fe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.24	20.90	0.81	10.71	5.98
Ag	1.82	3.38	9.31	—	2.04	—	0.83	14.43	12.70	7.69	18.98	3.49	2.43	4.51	4.92
Te	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.58	—	1.09	0.43
Au	97.43	95.72	89.48	101.28	99.13	99.24	99.89	75.07	79.24	86.93	57.77	53.20	91.52	71.36	80.72
Сумма	99.26	99.10	98.79	101.28	101.17	99.24	100.73	98.01	99.53	100.50	101.59	98.80	100.58	96.70	97.11
№ ан.	1	2	3	7	5	8	4	6	9	10	12	11	14	13	15
Ат. %															
O	—	—	—	—	—	—	—	21.67	17.06	19.81	43.33	64.04	26.56	48.25	35.84
S	—	—	—	—	—	—	—	19.52	20.11	13.87	19.13	—	—	—	—
Mn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.44	—	—
Fe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.26	19.53	1.93	16.42	12.15
Ag	3.30	6.06	15.97	—	3.62	—	1.50	15.28	14.22	9.22	11.73	1.69	3.01	3.58	5.17
Te	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.65	—	0.73	0.38
Au	96.70	93.94	84.03	100.00	96.38	100.00	98.50	43.54	48.61	57.10	19.55	14.09	62.06	31.02	46.46
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Тип золота	«Горчичное» золото без примесей										«Горчичное» золото с реликтами сульфидов Ag (Au-Ag)				
	Участки и прожилки однородного самородного золота в «горчичном» золоте										«Горчичное» золото в сростании с кислородсодержащими соединениями Fe, Mn				

Примечание. Содержания ниже предела обнаружения отмечены “—”.

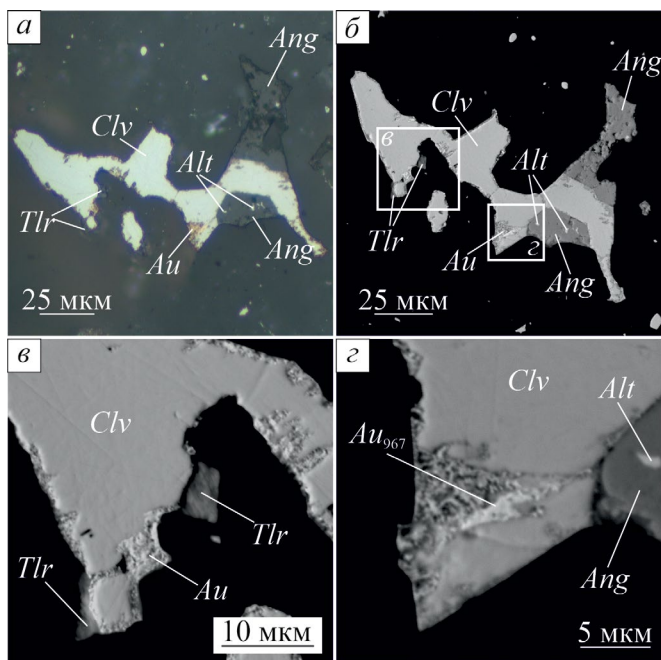


Рис. 5. Взаимоотношения калаверита (AuTe_2), «горчиного» золота и других минералов.

a — калаверит (*Clv*) с каймой «горчиного» золота (*Au*) в сростании с англезитом (*Ang*) и теллуридом (*Tlr*), реликты алтаита (*Alt*) в англезите, фото в отраженном свете; *b* — то же в обратно-рассеянных (BSE) электронах; *c* — каймы «горчиного» золота по калавериту и теллуриду на калаверите; *d* — «горчиное» золото вдоль трещины в калаверите. Изображение в отраженном свете (*a*) и в обратно-рассеянных электронах (BSE) (*b*–*d*).

Fig. 5. Relationships of calaverite (AuTe_2), mustard gold and other minerals.

a — calaverite (*Clv*) with a border of mustard gold (*Au*) in conjunction with anglesite (*Ang*) and tellurite (*Tlr*), relicts of altaite (*Alt*) in anglesite, photo in reflected light; *b* — the same in back-scattered (BSE) electrons; *c* — fringes of mustard gold along calaverite and tellurite on calaverite; *d* — mustard gold along a crack in calaverite. Image in reflected light (*a*) and BSE images (*b*–*d*).

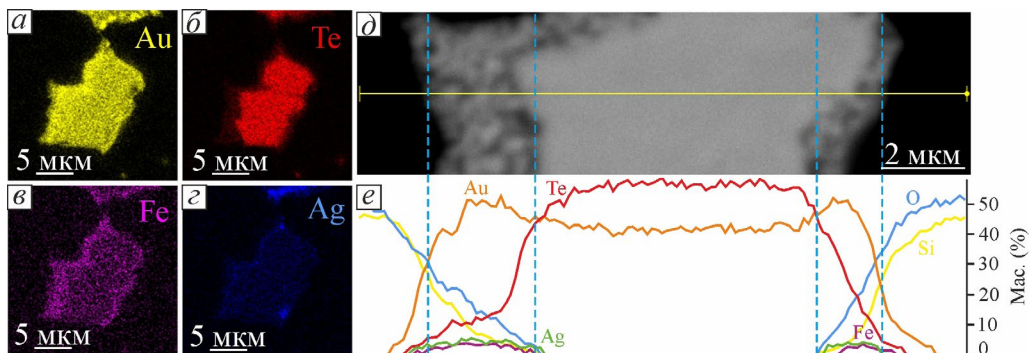


Рис. 6. Распределение элементов в зерне калаверита (AuTe_2) с оторочкой «горчиного» золота.

a–*d* — карты элементного состава; *e* — изображение каймы «горчиного» золота по калавериту в обратно-рассеянных электронах (BSE); *e* — распределение элементов по горизонтальной линии сканирования.

Fig. 6. Distribution of elements in a calaverite (AuTe_2) grain with a rim of mustard gold.

a–*d* — maps of elemental composition; *e* — image of the mustard gold rim around calaverite in back-scattered electrons (BSE); *e* — distribution of elements along the horizontal scan line.

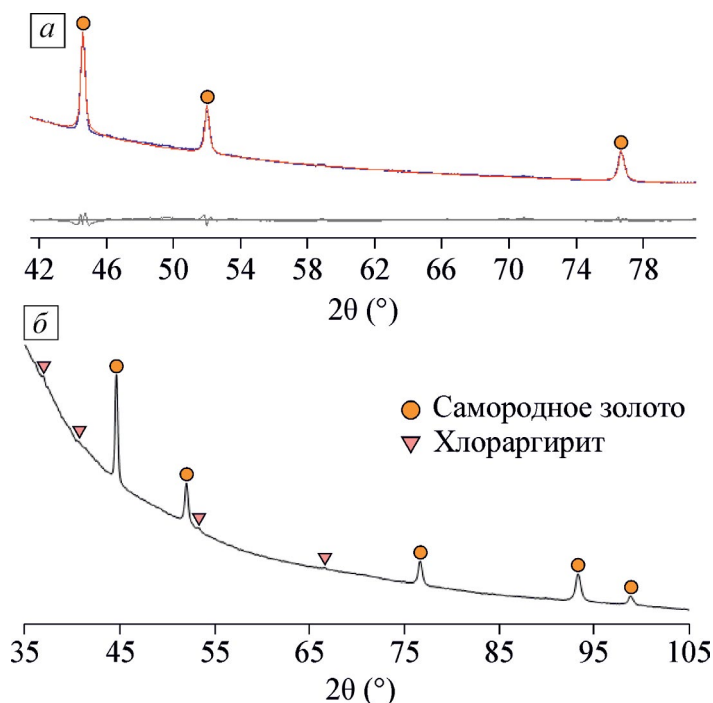


Рис. 7. Рентгенограммы «горчичного» золота (излучение $\text{CoK}\alpha$).

a — результаты уточнения параметра элементарной ячейки [расчетная (красная) и синяя (экспериментальная) кривые]; *b* — «горчичное» золото в ассоциации с хлораргиритом (AgCl).

Fig. 7. X-ray diffraction pattern of mustard gold ($\text{CoK}\alpha$ radiation).

a — results of unit cell parameters refinement (blue and red curves are experimental and calculated patterns accordingly); *b* — mustard gold in association with chlorargyrite (AgCl).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенности химического состава «горчичного» золота. На основании оптических характеристик, морфологических особенностей и химического состава можно выделить четыре разновидности «горчичного» золота (табл. 2, рис. 8): (1) «горчичное» золото без примесей, (2) участки и прожилки однородного самородного золота в «горчичном» золоте, (3) «горчичное» золото с реликтами сульфидов Ag (Au-Ag) и (4) «горчичное» золото в сростании с кислородсодержащими соединениями Fe , Mn . На диаграмме в координатах Ag-S (рис. 8, *a*) фигуративные точки составов «горчичного» золота выстраиваются в единый ряд, что позволяет говорить о корреляционной связи между содержанием S и Ag в анализах. Это было проинтерпретировано, как присутствие в сростании с «горчичным» золотом реликтовых серебросодержащих сульфидов [акантита (Ag_2S), ютенбогардита (Ag_3AuS_2), петровскаита (AgAuS)], вероятно, более устойчивых по сравнению с калаверитом. По данным порошковой рентгеновской дифрактометрии в сростании с «горчичным» золотом установлен хлораргирит (AgCl). Ранее «горчичное» золото в сростании с акантитом и хлораргиритом было обнаружено на месторождении Оленинское, Кольский полуостров (Kalinin et al., 2019). Присутствие Fe в составе «горчичного» золота связывают с выполнением пор гётитом (Kalinin et al., 2019; Tolstykh et al., 2019). Аналогично, присутствие Mn можно связать с наличием его кислородсодержащих соединений в порах. Важно отметить, что полученные параметры элементарной

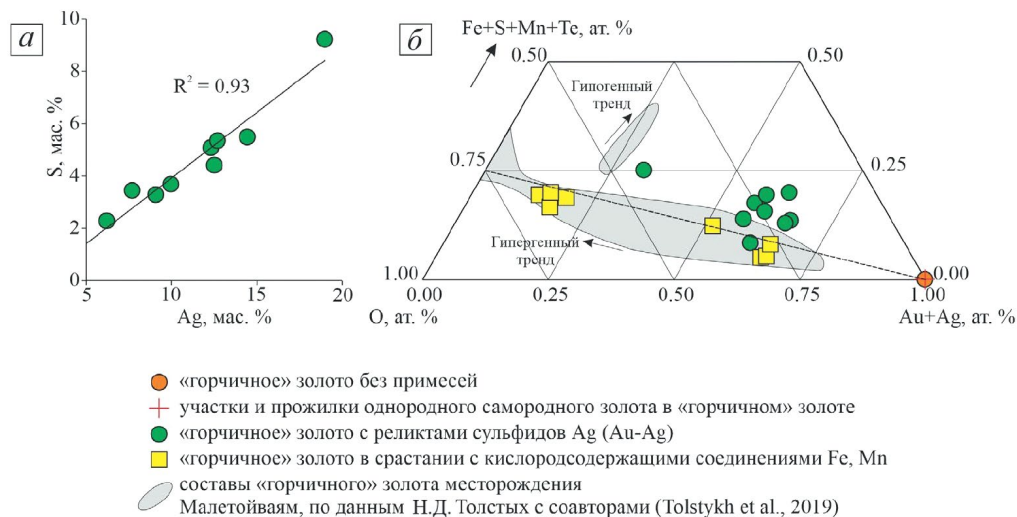


Рис. 8. Соотношения химических элементов в составе «горчичного» золота.

a — соотношение Ag и S; *b* — тройная диаграмма в координатах (Au+Ag)—O—(Fe+S+Mn+Te).

Fig. 8. Ratios of chemical elements in the composition of mustard gold.

a — ratio of Ag and S; *b* — triple diagram in coordinates (Au+Ag)—O—(Fe+S+Mn+Te).

ячейки самородного золота не позволяют предполагать вхождения значительного количества изоморфных примесей в его структуру [как, например, было показано ранее для палладий-ртутьсодержащего золота из россыпи р. Итчайваям, Снеговой хребет, Корякское нагорье (Palyanova et al., 2023)]. Поэтому, присутствие Fe, Mn, O в химическом составе «горчичного» золота главным образом связаны с минералами, заполняющими поры в нем.

Механизмы образования «горчичного» золота. Существует две модели формирования «горчичного» золота: гипогенная и гипергенная. Согласно гипогенной модели замещение первичного золота или ауристобита «горчичным» золотом происходит в окислительных условиях, при высокой активности Sb и низкой активности S, при умеренных температурах (до 200 °C), то есть при условиях, характерных для золото-сурьмяных месторождений (Гамянин и др., 1987; Dill et al., 1995; Bakos et al., 2002; Makovicky et al., 2007). Образование «горчичного» золота может происходить в течение нескольких часов, в результате разложения калаверита, креннерита и силванита под действием гидротермальных растворов с температурой до 220 °C в широком диапазоне водородного показателя и было продемонстрировано экспериментально (Zhao et al., 2009; Zhao et al., 2010; Xu et al., 2013; Zhao, Pring, 2019). Гипергенная модель становится актуальной в случае обнаружения «горчичного» золота в ассоциации с минералами зоны окисления (Петровская, 1973; Wilson, 1984; Kalinin et al., 2019). В гипергенной модели формирование «горчичного» золота происходит в поверхностных условиях при участии холодных метеорных вод и высокой активности кислорода. Предполагается, что для протекания этой реакции требуется гораздо более длительный промежуток времени, и, возможно, участие микроорганизмов (Missen et al., 2020).

В адуляр-кварцевых жилах из зоны окисления рудопоявления Эвепента было обнаружено «горчичное» золото, которое замещает калаверит. В ассоциации с «горчичным»

золотом обнаружены также англезит и теллурид/парателлурид, а поры в «горчичном» золоте выполнены кислородсодержащими соединениями Fe, Mn (рис. 8, б) и хлораргиритом. По аналогии с результатами экспериментов, можно предположить, что формирование «горчичного» золота происходило в гипогенных условиях под действием гидротермальных растворов (Zhao et al., 2009; Zhao et al., 2010; Xu et al., 2013; Zhao, Pring, 2019). Механизм формирования «горчичного» золота за счет калаверита на поздних гидротермальных стадиях ранее был предложен для другого месторождения корякско-камчатского региона — Малетойваям (Tolstykh et al., 2019). В данной работе показано, что «горчичное» золото, в котором поры выполнены кислородсодержащими соединениями Sb, As, Te, Se, S, Fe (железосодержащие теллулаты/антимонаты), образуется в результате гипогенной проработки калаверита гидротермальными растворами высокого окислительного потенциала, содержащими Fe, Sb, Te, As, Se и S (гипогенный тренд на рис. 8, б). В результате последующего более позднего окисления, вероятно в гипергенных условиях, кислородсодержащие соединения Sb, Te, Se, S, Fe, заполняющие поры, могли полностью окисляться до гётита и гидрогётита (гипергенный тренд на рис. 8, б). Весьма вероятно, что аналогичный процесс мог быть реализован и на других эпитеpmальных месторождениях севера Камчатки, в частности на рудопроявлении Эвевпента.

Минерагеническая интерпретация. Мы собрали имеющуюся информацию о «горчичном» золоте в доступных литературных источниках и систематизировали ее по ключевым параметрам (табл. 3). Обнаружено, что большинство находок «горчичного» золота связано с мезозой-кайнозойскими золото-теллуридными эпитеpmальными месторождениями вулканоплутонических поясов, либо с золото-сурьмяными орогенными месторождениями в складчатых областях палеозойского-мезозойского возраста. Коры выветривания, в свою очередь также развиваются главным образом по орогенным, плутоногенным и эпитеpmальным рудам. В россыпях «горчичное» золото встречается редко. В работе Н. Д. Толстых с соавторами (Tolstykh et al., 2019) на примере месторождения Малетойваям показано, что «горчичное» золото из-за своей хрупкости легко разрушается в поверхностных условиях и поэтому характеризуется слабым россыпеобразующим потенциалом.

Таблица 3. Типы месторождений с «горчичным» золотом

Table 3. Mustard gold deposit types

Минералогический тип	Геолого-генетический тип	Химический состав «горчичного» золота	Минералы-предшественники	Примеры месторождений и литературные источники
Золото-теллуридный тип	Эпитеpmальный восстановительно-щелочной (адуляр-серицитовый)	Au, Ag, O, Te, Fe, S, Pb, Cu	Калаверит (AuTe ₂)	Эвевпента, Агинское (Okrugin et al., 2014), все Россия
	Эпитеpmальный кислотно-сульфатный	Au, Ag, Te, O, Fe, Sb, Bi, As, S	Калаверит (AuTe ₂), сильванит (AgAuTe ₄), теллуrowисмутит (Bi ₂ Te ₃), Sb-содержащий теллуrowисмутит [(Bi, Sb) ₂ Te ₃]	Эми (Савва и др., 2013), Светлое (Yakich et al., 2021), Малетойваям (Tolstykh et al., 2019), Березняковское (Плотинская и др., 2009), все Россия

Таблица 3. Окончание

Минералого-геохимический тип	Геолого-генетический тип	Химический состав «горчичного» золота	Минералы-предшественники	Примеры месторождений и литературные источники
Золото-теллуридный тип	Плутоногенный (связанный с интрузиями)	Au, Ag, O, Cl, Fe	Мальдонит (Au_2Bi), ютенбогардит (Ag_3AuS_2), калаверит (AuTe_2), петцит (Ag_3AuTe_2)	Нижне-Мякитский рудно-россыпной узел, Россия (Литвиненко, Шилина, 2020), Донпин, Китай (Li, Makovsky, 2001; Wang et al., 2020), Сан-Луис-Альта, Перу (Alfonso et al., 2023)
Золото-сурьмяный тип	Эпитермальный	Au, Ag, Sb, O, Fe, Pb, Tl, Cl, Br, S, As, Cu	Дискразит (Ag_3Sb), кюстелит (Ag, Au)	Оленинское, Россия (Kalinin et al., 2019)
	Орогенный	Au, Ag, Sb, O, S, Hg, Bi, Cu, As, Fe	Высокопробное самородное золото (Au, Ag), ауристибит (AuSb_2)	Кривань и другие месторождения Татр, Словакия (Bakos et al., 2002; Makovsky et al., 2007), Малтан, Россия (Фридовский и др., 2014), Харма, Боливия (Dill et al., 1995), Сарылах, Сентачан и другие месторождения Верхоянья, Россия (Гамянин и др., 1987; Бортников и др., 2010)
	Коры выветривания	Au, Ag, Cu, Fe, Zn, Hg, Pb, Bi	Ауристибит (AuSb_2), калаверит (AuTe_2), сильванит (AgAuTe_4)	Таш-Тай, Россия (Зайков, 1997), Олимпиадинское, Россия (Silyanov et al., 2021), Васильевское, Казахстан (Kalinin et al., 1999), Калгурли, Австралия (Wilson, 1984), Ниламбур, Индия (Santosh, Omana, 1991), Ашанти, Гана (Bowell, 1992), Хохойское рудное поле, Россия (Anisimova et al., 2020)
	Россыпной	Au, Ag, O, Sb, Pb, Fe		Нижне-Мякитский рудно-россыпной узел, Россия (Литвиненко, Шилина, 2017), Сальватьерра-де-Тормес, Сантибаньес-эль-Альто, Касас-де-Дон-Педро-Таларрубиас, Испания (Barrios et al., 2021)

Анализ литературных данных показывает, что для разных минералого-геохимических и геолого-генетических типов месторождений характерны определенные химические составы «горчичного» золота (табл. 3). Следовательно, химический состав «горчичного» золота может быть рассмотрен как элемент его типоморфизма. Более того, само присутствие значительных скоплений «горчичного» золота в рудах указывает на эпитемальное, орогенное или плутоногенное оруденение, поскольку в данных типах месторождений минералы-прекурсоры (самородное золото, калаверит, ауристибит, ютенбогардит и др.) широко распространены. Таким образом, «горчичное» золото и его химический состав, а также минералы-предшественники и минеральная ассоциация в совокупности являются индикаторами геолого-генетического типа для золото-сурьмяных орогенных и золото-теллуридных эпитемальных (реже — плутоногенных) месторождений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На рудопроявлении Эвепента обнаружено четыре разновидности «горчичного» золота: (1) «горчичное» золото без примесей, (2) участки и прожилки однородного самородного золота в «горчичном» золоте, (3) «горчичное» золото с реликтами сульфидов Ag (Au-Ag) и (4) «горчичное» золото в сростании с кислородсодержащими соединениями Fe, Mn.

2. Примеси в химическом составе «горчичного» золота связаны с реликтовыми минералами, которые с ним сростаются, или минералами, выполняющими поры в нем: сульфидами Au-Ag [акантитом (Ag_2S), ютенбогардитом (Ag_3AuS_2), петровскаитом (AgAuS)], хлораргиритом (AgCl) и кислородсодержащими соединениями Fe, Mn.

3. Предположительно, «горчичное» золото рудопроявления Эвепента могло сформироваться в результате замещения калаверита (AuTe_2) в гипогенных условиях на поздней гидротермальной стадии.

4. «Горчичное» золото и его химический состав, а также минералы-предшественники и минеральная ассоциация в совокупности являются индикаторами геолого-генетического типа для золото-сурьмяных орогенных и золото-теллуридных эпитемальных (реже — плутоногенных) месторождений.

Благодарности. Авторы благодарят Д. С. Буханову за ценные замечания при подготовке текста рукописи, а также всех участников полевых работ 2020 г. Авторы статьи признательны рецензентам, замечания которых помогли существенно улучшить статью.

Источники финансирования. Работа выполнена по гос. заданию ИВиС ДВО РАН в рамках темы научно-исследовательских работ «Минералообразование в надсубдукционной зоне Северной Пацифики» (№ FWME-2024-0004 под руководством Житовой Е. С.). Прибор Nikon LV100N лаборатории петрологии и геохимии ИВиС ДВО РАН закуплен в рамках программы пополнения приборной базы «Наука». Исследование зерен золота с помощью рентгеновской дифракции выполнено в Ресурсном Центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» в рамках гос. задания СПбГУ AAAA-A19-119091190094.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бортников Н. С., Гамянин Г. Н., Викентьева О. В., Прокофьев В. Ю., Прокопьев А. В. Золото-сурьмяные месторождения Сарылах и Сентачан (Саха-Якутия): пример совмещения мезотермальных золото-кварцевых и эпитемальных антимонитовых руд // Геология рудн. месторожд. **2010**. Т. 52. № 5. С. 381—417.

Бритвин С. Н., Доливо-Добровольский Д. В., Кржижановская М. Г. Программный пакет для обработки рентгеновских порошковых данных, полученных с цилиндрического детектора дифрактометра Rigaku RAXIS Rapid II // ЗРМО. 2017. Т. 146. № 3. С. 104–107.

Гамянин Г. Н., Жданов Ю. Я., Некрасов И. Я., Лескова Н. В. «Горчичное» золото из золото-сурьмяных руд Восточной Якутии // Новые данные о минералах. 1987. № 34. С. 13–20.

Жегунов П. С., Кутырев А. В., Житова Е. С., Москалева С. В., Швейгерт П. Е. Первые данные о минералогии эпитегрмального серебряно-золоторудного проявления Эвепента, Камчатка, Россия // Вулканология и сейсмология. 2024. № 2. С. 59–76.

Зайков В. В. Минералы золота и серебра в зонах субмаринного и континентального гипергенеза медноколчеданных месторождений Южного Урала // Уральский минералогический сборник. 1997. № 7. С. 33–52.

Литвиненко И. С., Шилина Л. А. Гипергенные новообразования золота из россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного поля, Северо-Восток России // Руды и металлы. 2017. № 1. С. 75–90.

Литвиненко И. С., Шилина Л. А. Мальдонит, ютенбогаардит и разновидности самородного золота из рудных проявлений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) // ЗРМО. 2020. Т. 149. № 3. С. 18–37.

Некрасов И. Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.

Петровская Н. В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 1973. 330 с.

Плотинская О. Ю., Грознова Е. О., Коваленкер В. А., Новоселов К. А., Зелтманн Р. Минералогия и условия образования руд Березняковского рудного поля (Южный Урал, Россия) // Геология рудн. месторожд. 2009. Т. 51. № 5. С. 414–443.

Фридовский В. Ю., Гамянин Г. Н., Полуфунтикова Л. И. Золото-кварцевая и сурьмяная минерализация месторождения Малтан (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 4. С. 50–62.

Mustard Gold in the Evepenta Epithermal Gold-Silver Ore Occurrence (Kamchatka)

**P. S. Zhegunov*, E. S. Zhitova, A. V. Kutyrev, P. E. Schweigert, K. A. Gribushin, and
S. V. Moskaleva**

*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch RAS,
Petropavlovsk-Kamchatski, Russia*

**e-mail: pavel.zhegunov@bk.ru*

The paper describes the occurrence of so-called mustard gold, which forms independent grains and rims that replace calaverite (AuTe_2) in the adularia-quartz veins of the Evepenta epithermal ore occurrence in Kamchatka, Russia. Four types of mustard gold were identified: (1) pure mustard gold, (2) mustard gold containing areas and veinlets of homogeneous native gold, (3) mustard gold with remnants of Ag sulfides (Au-Ag), and (4) mustard gold intergrown with oxygen-containing compounds of Fe and Mn. It is hypothesized that the mustard gold at the Evepenta formed as a result of calaverite (AuTe_2) replacement during the late hydrothermal stage. We propose that the chemical composition of mustard gold serves as its distinguishing feature and can indicate the geological and genetic types of gold deposits.

Keywords: mustard gold, calaverite, typomorphism, epithermal deposit, Evepenta, North Kamchatka ore region, Kamchatka

REFERENCES

- Alfonso P., Ccolque E., Garcia–Valles M., Martínez A., Yubero M. T., Anticoi H., Sidki-Rius N. Mineralogy and mineral chemistry of the Au-Ag-Te-(Bi-Se) San Luis Alta deposit, Mid-South Peru. *Minerals*. **2023**. Vol. 13. N 4. Paper 568.
- Anisimova G. S., Kondratieva L. A., Kardashevskaya V. N. Characteristics of supergene gold of karst cavities of the Khokhoy Gold ore field (Aldan Shield, East Russia). *Minerals*. **2020**. Vol. 10. N 2. Paper 139.
- Bakos F., Chovan M., András P. Gold mineralization in the Tatric Tectonic Unit (Western Carpathians). *Geol. Carpath. Bratislava*. **2002**. Vol. 53. P. 89–91.
- Barrios S., Gómez Barreiro J., Lozano Fernández R. P., Merinero Palomares R., Suárez Barrios M., dos Santos Alves K., Morales Sánchez-Migallón J., Malecki J. Tracing gold nuggets back to the source: a micro-chemical analysis of tertiary gold placers in Central Spain. In: *EGU General Assembly*. **2021**. Paper 13358.
- Bortnikov N. S., Gamyagin G. N., Vikent'eva O. V., Prokof'ev V. Yu., Prokof'ev A. V. The Sarylakh and Sentachan gold-antimony deposits, Sakha-Yakutia: A case of combined mesothermal gold-quartz and epithermal stibnite ores. *Geol. Ore Deposits*. **2010**. Vol. 52. N 5. P. 339–372.
- Bowell R. J. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: Implications for the supergene behaviour of gold. *Miner. Mag.* **1992**. Vol. 56. N 385. P. 545–560.
- Britvin S. N., Dolivo-Dobrovolsky D. V., Krzhizhanovskaya M. G. Software for processing the X-ray powder diffraction data obtained from the curved image plate detector of Rigaku RAXIS Rapid II diffractometer. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2017**. Vol. 146. N 3. P. 104–107 (in Russian).
- Bruker AXS Topas, version 4.2; General Profile and Structure Analysis Software for Powder Diffraction Data. Bruker-AXS, Karlsruhe, Germany. **2009**.
- Dill H. G., Weiser T., Bernhardt I. R., Riera Kilibarda C. The composite gold-antimony vein deposit at Kharma (Bolivia). *Econ. Geol.* **1995**. Vol. 90. N 1. P. 51–66.
- Fridovsky V. Y., Polufuntikova L. I., Gamyagin G. N. Gold-quartz and antimony mineralization in the Maltan deposit in Northeast Russia. *Russian J. Pacific Geol.* **2014**. Vol. 8. N 4. P. 276–287.
- Gamyagin G. N., Zhdanov Y. Ya., Nekrasov I. Ya., Leskova N. V. “Mustard” gold from gold-antimony ores of Eastern Yakutia. *New Data on Minerals*. **1987**. N 34. P. 13–20 (in Russian).
- Gerasimov B., Beryozkin V., Kravchenko A. Typomorphic features of placer gold from the Billyakh tectonic melange zone of the Anabar Shield and its potential ore sources (Northeastern Siberian Platform). *Minerals*. **2020**. Vol. 10. N 3. Paper 281.
- Goryachev N., Fridovsky V. Overview of early cretaceous gold mineralization in the orogenic belt of the eastern margin of the Siberian craton: geological and genetic features. *Frontiers Earth Sci.* **2024**. Vol. 11. Paper 1252729.
- Kalinin A. A., Savchenko Y. E., Selivanova E. A. Mustard gold in the Oleninskoe gold deposit, Kolomozero-Voronya greenstone belt, Kola Peninsula, Russia. *Minerals*. **2019**. Vol. 9. N 12. Paper 786.
- Kalinin Yu. A., Roslyakov N. A., Nesterenko G. V., Roslyakova N. V., Osintsev S. R. The periphery of the West-Siberian plain as a new auriferous province associated with weathering crusts. *Russian Geol. Geophys.* **1999**. Vol. 40. N 6. P. 867–878.
- Li J. L., Makovicky E. New studies on mustard gold from the Dongping Mines, Hebei Province, China: the tellurian, plumbian, manganian and mixed varieties. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*. **2001**. Vol. 176. P. 269–297.
- Litvinenko I. S., Shilina L. A. Hypergene gold neomineralization in placer deposits of Nizhne-Myakitsky ore-placer field, North-East Russia. *J. Ores and Metals*. **2017**. N 1. 75–90 (in Russian).
- Litvinenko I. S., Shilina L. A. Maldonite, uytenbogaardtite and varieties of nugget gold from ore occurrences of the Nizhne-Myakitsky ore-placer field (North-East Russia). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2020**. Vol. 149. N 3. P. 18–37 (in Russian).
- Makovicky E., Chovan M., Bakos F. The stibian mustard gold from the Krivan Au deposit, Tatry Mts., Slovak Republic. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*. **2007**. Vol. 184. P. 207–215.
- Missen O. P., Ram R., Mills S. J., Etschmann B., Reith F., Shuster J., Smith D. J., Brugger J. Love is in the Earth: a review of tellurium (bio)geochemistry in surface environments. *Earth-Science Reviews*. **2020**. Vol. 204. Paper 103150.

Nekrasov I. Ya. Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits. Moscow: Nauka, **1991**. 302 p. (in Russian).

Okrugin V. M., Andreeva E., Etschmann B., Pring A., Li K., Zhao J., Griffiths G., Lumpkin G. R., Triani G., Brugger J. Microporous gold: Comparison of textures from nature and experiments. *Amer. Miner.* **2014**. Vol. 99. N 5—6. P 1171—1174.

Palyanova G., Kutyrev A., Beliaeva T., Shilovskikh V., Zhegunov P., Zhitova E., Seryotkin Y. Pd, Hg-Rich gold and compounds of the Au-Pd-Hg system at the Itchayvayam mafic-ultramafic complex (Kamchatka, Russia) and other localities. *Minerals*. **2023**. Vol. 13. N 4. Paper 549.

Petrovskaya N. V. Native gold (general characteristics, typomorphism, questions of genesis). Moscow: Nauka, **1973**. 330 p. (in Russian).

Plotinskaya O. Y., Groznova E. O., Kovalenker V. A., Novoselov K. A., Seltmann R. Mineralogy and formation conditions of ores in the Bereznjakovskoe ore field, the Southern Urals, Russia. *Geol. Ore Deposits*. **2009**. Vol. 51. N 5. P. 371—397.

Santosh M., Omana P. K. Very high purity gold from lateritic weathering profiles of Nilambur, southern India. *Geology*. **1991**. Vol. 19. P. 746—749.

Sejkor J., Dolníček Z., Zachariáš J., Ulmanová J., Šrein V., Škacha P. Mineralogical and fluid inclusion evidence for reworking of Au mineralization by Ag-Sb-base metal-rich fluids from the Bytíz deposit, Příbram uranium and base-metal ore district, Czech Republic. *Minerals*. **2022**. Vol. 12. N 12. Paper 1539.

Silyanov S. A., Sazonov A. M., Zvyagina Y. A., Savichev A. A., Lobastov B. M. Gold in the oxidized ores of the Olympiada deposit (Eastern Siberia, Russia). *Minerals*. **2021**. Vol. 11. N 2. Paper 190.

Tolstykh N. D., Palyanova G. A., Bobrova O. V., Sidorov E. G. Mustard gold of the Gaching ore deposit (Maletoyvayam ore field, Kamchatka, Russia). *Minerals*. **2019**. Vol. 9. N 8. Paper 489.

Wang D. Z., Liu J. J., Zhai D. G., de Fourestier J., Wang Y. H., Zhen S. M., Wang J. P., Liu Z. J., Zhang F. F. Textures and formation of microporous gold in the Dongping gold deposit, Hebei Province, China. *Ore Geol. Rev.* **2020**. Vol. 120. Paper 103437.

Wilson A. F. Origin of quartz-free gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils — a review and some new observations. *Australian J. Earth Sci.: Int. Geosci. J. Geol. Soc. Australia*. **1984**. Vol. 31. N 3. P. 303—316.

Xu W., Zhao J., Brugger J., Chen G., Pring A. Mechanism of mineral transformations in krennerite, Au_3AgTe_8 , under hydrothermal conditions. *Amer. Miner.* **2013**. Vol. 98. N 11—12. P. 2086—2095.

Yakich T. Yu., Ananyev Y. S., Ruban A. S., Gavrilov R. Yu., Lesnyak D. L., Levochkaia D. V., Savinova O. V., Rudmin M. A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration. *Ore Geol. Rev.* **2021**. Vol. 136. Paper 104257.

Zaikov V. V. Gold and silver minerals in the zones of submarine and continental hypergenesis of copper-coal deposits of the Southern Urals. *Ural Miner. Coll.* **1997**. N 7. P. 33—52 (in Russian).

Zhao J., Brugger J., Grundler P. V., Xia F., Chen G., Pring A. Mechanism and kinetics of a mineral transformation under hydrothermal conditions: Calaverite to metallic gold. *Amer. Miner.* **2009**. Vol. 94. N. 11—12. P. 1541—1555.

Zhao J., Pring A. Mineral transformations in gold—(silver) tellurides in the presence of fluids: Nature and experiment. *Minerals*. **2019**. Vol. 9. N 3. Paper 167.

Zhao J., Xia F., Pring A., Brugger J., Grundler P. V., Chen G. A novel pre-treatment of calaverite by hydrothermal mineral replacement reactions. *Minerals Engineering*. **2010**. Vol. 23. N 5. P. 451—453.

Zhegunov P. S., Kutyrev A. V., Zhitova E. S., Moskaleva S. V., Schweigert P. E. First data on the mineralogy of the Evepenta epithermal silver-gold ore occurrence, Kamchatka, Russia. *J. Volcanol. Seismol.* **2024**. Vol. 18. N 2. P. 149—164.