



Деформационные и метасоматические преобразования детритового золота при россыпеобразовании

Хертек Ч. М.¹, Сазонов А. М.²

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской Академии наук, г. Кызыл, Россия

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. На севере Республики Тыва, в бассейне рек Амыл и Систиг-Хем известны наиболее богатые россыпи золота, периодически отрабатываемые с 1838 г. Наиболее распространено золото Ag-Au состава, в незначительных объёмах присутствуют медистая и ртутистая разновидности. Коренные проявления приурочены к кварцевым жилам и не имеют промышленного значения. Детритовому золоту в россыпных месторождениях района присущи типоморфные особенности золота россыпей – окатанность, неоднородность состава, наличие кайм-ободков и межзерновых прожилков высокопробного золота и структур деформации частиц. Нами рассмотрены механизмы преобразования детритового золота в россыпях района вследствие деформирующего взаимодействия переносимых частиц в седиментогенной среде на стадии мотогенеза, а также кристаллофизических эффектов на стадии сингенеза – раннего диагенеза при неоднородной метасоматической рекристаллизации эндогенного золота в условиях дифференциальной подвижности главных минералообразующих элементов золота – Au, Ag, Cu, Hg. В результате в частицах формируются полифазные по составу структуры – высокопробные ободки-каймы по периферии частиц, межзерновые прожилки золота высокой пробы, деформационные структуры и повышение пробыности в ядрах частиц.

Ключевые слова: золото, россыпь, высокопробные каймы, межзерновые прожилки, мотогенез, седиментогенез, сингенез, диагенез, гипергенный метасоматоз, кристаллофизические деформации.

Для цитирования: Хертек Ч. М., Сазонов А. М. Деформационные и метасоматические преобразования детритового золота при россыпеобразовании. Руды и металлы. 2023. № 4. С. 74–90. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10020.

Deformational and metasomatic transformations of detrital gold in the course of placer formation

Hertek Ch. M.¹, Sazonov A. M.²

¹ Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS, Kyzyl, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Annotation. The richest gold placers periodically mined since 1838 are known in the north of the Republic of Tyva, within the basin of the Amyl and Sistig-Khem rivers. Ag-Au gold is the most common, and cuprous and mercuric varieties are presented in small quantities. Lode gold occurrences are confined to quartz veins and have no economic value. Detrital gold in the placer deposits has the typical typomorphic features of placer gold: roundness, compositional heterogeneity, the presence of rims and intergranular veinlets of high-fineness gold, and particle deformation structures. We have considered the transformation mechanisms of detrital gold within the mentioned placers due to the deforming interaction of transported particles in the sedimentogenic environment at the stage of motogenesis, as well as crystallophysical effects at the stage of syngeneses – early diagenesis during heterogeneous metasomatic recrystallization of endogenous gold under conditions of differential mobility of the main mineral-forming elements of gold, Au, Ag, Cu, and Hg. As a result, compositionally polyphase structures formed in the particle, they are high-fineness rims along the periphery of the particles, intergranular veins of high-fineness gold, deformation structures, and increased fineness in the particle kernels.

Keywords: gold, placer, high-fineness rims, intergranular veinlets, motogenesis, sedimentogenesis, syngeneses, diagenesis, supergene metasomatism, crystallophysical deformations.

For citation: Hertek Ch. M., Sazonov A.M. Deformational and metasomatic transformations of detrital gold in the course of placer formation. Ores and metals. 2023. No. 4. pp. 74–90. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10020.



Введение. В статье рассмотрены текстурно-структурные и химические преобразования детритового золота в цепи условий выветривания, седиментогенеза и сингенеза – раннего диагенеза при формировании россыпей. Эндогенные руды начальной стадии образования россыпей в приповерхностной зоне подвергаются механическому разрушению и химическому выветриванию. Как правило, при геоморфологической перестройке рельефа рудного района (обычно неоднократной) частицы золота из кор выветривания переносятся ветром, текучими водами либо ледниками и попадают в разнообразные промежуточные коллекторы и, наконец, в современный аллювий [2, 16, 21]. Преобразования эндогенных руд заключаются в высвобождении частиц золота из эндогенных агрегатов ассоциирующих минералов, неоднородного материала кор выветривания, механических изменениях при активном перемещении частиц в водном или эоловом потоках, химическом воздействии агрессивных растворов, циркулирующих в областях седиментогенеза, и дискретном отложении в промежуточных коллекторах и аллювии.

Некоторые преобразования в частицах россыпного золота подобны наблюдаемым в минералах метаморфических и метасоматических пород процессам – катаклазу, пластическому течению, метасоматическому замещению, рекристаллизации, грануляции, дезинтеграции и растворению. В результате в детритовых частицах золота отражаются структурные и химические преобразования, приобретённые в корях выветривания и зоне седиментогенеза и отличающие их от эндогенных образований.

Объект исследования расположен на севере Республики Тыва, на границе с Красноярским краем (рис. 1). Золотоносные объекты бассейна р. Систиг-Хем находятся в Тыве, а р. Амыл – в Красноярском крае, традиционно они объединяются в Амыло-Систигхемский рудно-россыпной район. В золотоносных районах Тывы промышленная отработка в большей мере проводилась и проводится на россыпных месторождениях. Известные коренные объекты подвергались преимущественно опытной

эксплуатации и в незначительном объёме. В настоящее время эксплуатационные работы проводятся на скарновом золоторудном месторождении Тардан.

Золотоносность региона установлена в середине XIX столетия, в период становления золотодобычи в Сибири. Ведущее место в добыче золота принадлежало рудно-россыпным месторождениям Амыло-Систигхемского района. По сведениям С. Г. Прудникова [17], на долю Амыло-Систигхемского рудно-россыпного района приходится 57 % добытого на территории республики золота. Россыпи бассейна верхнего течения р. Амыл (р. Амыл и её притоки – реки Кукшин, Кундусуг, Изинзюль, Акулька, Пряха, Берёзовая, Кална), расположенные на западном склоне Куртушибинского хребта, административно относятся к Красноярскому краю. Золотоносный район бассейна р. Систиг-Хем (россыпи рек Билелиг, Алгияк, Чёрная и коренное месторождение Октябрьское) на восточном склоне Куртушубинского хребта территориально расположены в Республике Тыва.

В геологическом отношении Амыло-Систигхемский рудно-россыпной район находится в пределах сочленения салаирид Восточного Саяна с каледонидами Западно-Саянского офиолитового пояса. Территория района сложена вулканогенно-осадочными толщами венда, нижнего кембрия, красноцветными песчаниками, алевролитами, аргиллитами, конгломератами ордовика, красноцветными терригенными отложениями силура, аллювиально-делювиальными четвертичными образованиями. Осадочно-вулканогенные толщи вмещают интрузивные тела гипербазитового, базитового и гранитоидного комплексов.

Основные источники россыпного золота района – золоторудные проявления, приуроченные к кварцевым жилам, золото-сульфидно-кварцевым залежам, телам листовит-березитовых метасоматитов и зонам окварцевания. Промежуточными коллекторами современных россыпей являются ледниковые отложения и россыпи неогенового возраста [17]. Золото современных долинных россыпей района про-

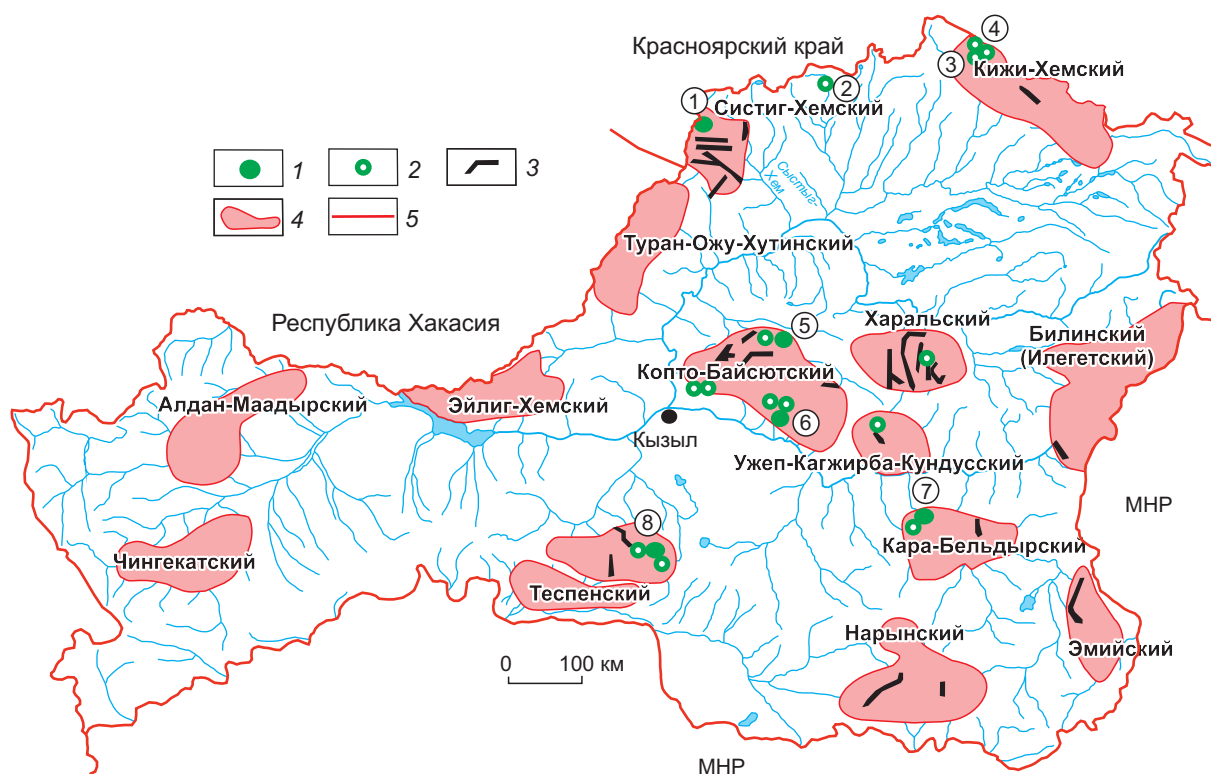


Рис. 1. Золотоносные районы Тывы:

1 – средние и мелкие месторождения; 2 – рудопоявления; 3 – золотоносные россыпи; 4 – золотоносные районы; 5 – граница Республики Тыва; месторождения и рудопоявления: 1 – Октябрьское, 2 – Кадыр-Ос, 3 – Верхнепихтовое, 4 – Пихтовое, 5 – Проездное, 6 – Тардан, 7 – Кара-Бельдыр, 8 – Уургайлыг

Fig. 1. Gold-bearing areas of Tyva:

1 – medium and small deposits; 2 – ore occurrences; 3 – gold placers; 4 – gold-bearing areas; 5 – border of the Republic of Tyva; 6 – gold ore deposit and occurrences: 1 – Oktyabrsky, 2 – Kadyr-Os, 3 – Verkhnepikhtovy, 4 – Pikhtovy, 5 – Proezdnoy, 6 – Tardan, 7 – Kara-Beldir, 8 – Uurgailyg

шло четыре стадии: 1) коры химического выветривания; 2) долинные элювиальные россыпи древней, неогеновой гидросети; 3) аллювиально-пролювиальные молассы периода тектонической стабилизации; 4) аллювий разновозрастных террас. Изменение золота произошло последовательно в системе эндогенные руды – кора выветривания – промежуточный коллектор – современный аллювий.

Методы исследования. Частицы золота для изучения отобраны Ч. М. Хертек промывкой аллювия старательским лотком в точках наблюдения регулярной сети исследования россыпей района. Лабораторное изучение состава и внутренних структур частиц, предварительно закапсулированных в эпоксидные

шашки, выполнены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega III SBH с интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа Oxford X-Act в лаборатории R&D центра НорНикель ИГДГиГ СФУ (операторы Б. М. Лобастов и С. А. Сильянов). Фотографии частиц золота получены в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE), значения яркости и контраста подбирались с условием наилучшей визуализации внутренних неоднородностей зёрен. Широкое использование электронной микроскопии в практике изучения строения и состава минералов, в том числе и россыпного золота, позволило уточнить особенности наблюдаемых структур и неоднородностей состава частиц, ранее характеризу-



Таблица. Пробы золота месторождений Амыло-Систигхемского района

Table. Gold fineness of deposits of the Amyl-Sistig-Khem region

№ п/п	Классы пробности	Названия классов по Н. В. Петровской	Коренные		Россыпные	
			<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
1	> 950	Исключительно высокопробное	0	0	107	33
2	949–900	Высокопробное	0	0	128	40
3	899–850	Средней пробы	47	33	52	16
4	849–800	Средней пробы	3	2	29	9
3 + 4	899–800	Средней пробы	50	35	81	25
5	799–750	Относительно низкопробное	3	2	6	2
6	749–700	Относительно низкопробное	4	3	0	0
5 + 6	799–700	Относительно низкопробное, в целом	7	5	6	2
7	699–600	Низкопробное	80	57	0	0
8	599–250	Электрум	4	3	0	0
Σ			141	100	322	100

Примечание. Коренное золото из кварцевых жил рудно-россыпного района месторождения Октябрьское и кварцевых свалов в долинах рек Билелиг и Чёрная; россыпное золото – рек Кундусуг, Изинзюль, Большой и Малый Алгияки, Большой и Малый Билелиги, Чёрная.

емых в классических трудах Н. В. Петровской [16], Н. А. Шило [21], М. И. Новгородовой [13], Л. А. Николаевой [12] и многих других геологов, использующих в своих исследованиях преимущественно оптическую микроскопию и структурное травление.

Результаты и обсуждение исследований.

Изучение частиц золота на электронном микроскопе позволило выявить и обсудить особенности строения и состава, отличающие его от коренного металла. Главные типоморфные особенности россыпного золота – наличие в нём последовательно нарастающих друг на друга каёмки по периферии частиц (высокопробные каймы замещения, примыкающие к ядру частиц → каймы и наросты нового (биогенного) золота → каймы техногенной амальгамы, развитые на частицах, в случае использования ртути при ранних отработках россыпи; межзерновые прожилки высокопробного золота в ядрах в случаях агрегатного строения детритовых частиц. Ядра частиц, представляющие собственно реликты эндогенного золота, первичной гранобластовой структуры или деформационной, образовавшейся при седиментогенезе и раннем диагенезе. Конкретные особенности строения и состава частиц золота рудно-россыпного района рассмотрены ниже.

Пробы коренного и россыпного золота. Исследования базируются на результатах 543 корректных анализов, в том числе из россыпей – 390, коренных руд – 153 (таблица). В таблице использованы анализы центральных участков зёрен, из расчётов исключены значения анализов золота высокопробных кайм и межзерновых прожилков.

Нами установлено резкое преобладание в кварцевых жилах Октябрьского месторождения и свалах кварца в долинах рек с россыпной золотоносностью золота средней (899–850 ‰) и низкой (699–600 ‰) проб, в то время как в россыпях преобладает (71 %) золото пробы 900 ‰ и выше. Примерно равно количество золота средней пробы (899–800 ‰) в россыпях (32 %) и кварцевых жилах (25,1 %) (см. таблицу; рис. 2).

Различие проб золота россыпей и коренных источников в регионах России отмечалось в классических работах по геологии россыпей [2, 13, 16, 21]. Это даёт геологам возможность предполагать невыявленные коренные источники россыпей в рудно-россыпных золотоносных районах. Сравнение типоморфных признаков коренного и россыпного золота Амыло-Систигхемского района иногда показывает их значительное различие [6, 17]. Это может

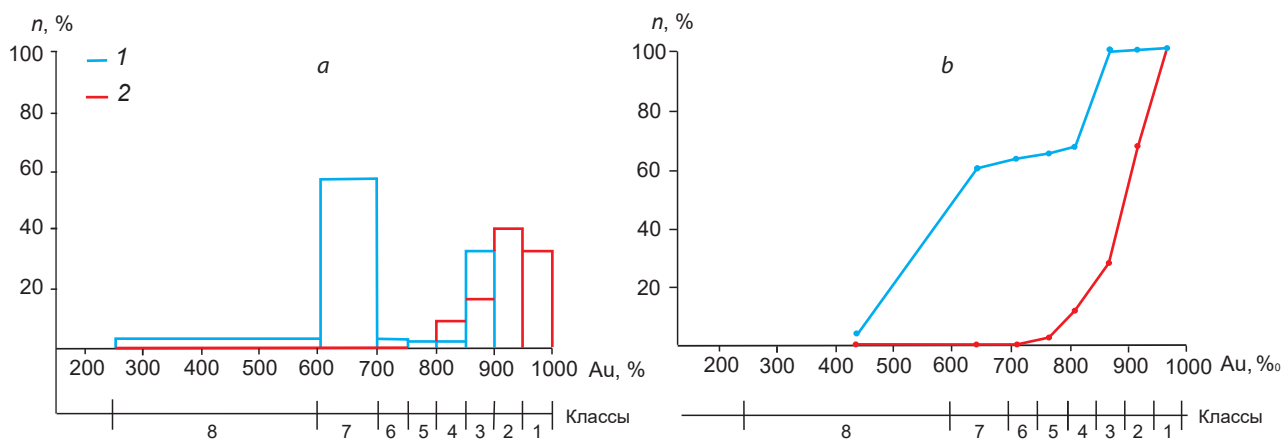


Рис. 2. Гистограмма (а) и кумулятивное распределение (б) проб частиц золота коренных (1) и россыпных (2) месторождений Амыло-Систигхемского района. Номера классов и статистические параметры соответствуют таблице

Fig. 2. Histogram (a) and cumulative distribution (b) of gold particle samples from primary and alluvial gold deposits of the Amyl-Sistig-Khem region. Class numbers and statistical parameters correspond to Table

служить основанием проектирования геологоразведочных работ невыявленных проявлений золота, что не всегда приводит к положительным результатам. Так, например, наличие интенсивно перекристаллизованного золота в россыпях по рекам Билелиг, Алгияк, Чёрной позволило Л. А. Николаевой и С. С. Кальниченко предположить, что их источник не связан с известными генетическими типами золоторудных проявлений в районе (ордовикские конгломераты и более древние россыпи). До сих пор не изучены участки метасоматически изменённых пород альпинотипных гипербазитов района, хотя повышенная кларковая золотоносность пород этих интрузий давно известна [1, 5, 8, 22]. О наличии рудопроявлений золота в гипербазитах свидетельствует присутствие в россыпях района, выявленного нами, медистого золота. В то же время И. Я. Некрасов [10], обобщив сведения по отличиям проб золота в россыпях и коренных источниках многих регионов, отмечает, что «выводы о возможности нахождения вблизи россыпей иных коренных, чем уже известные, ошибочны».

Экзогенная рекристаллизация, обогащение и увеличение однородности состава

ядер детритовых частиц золота. Преобразования золота исследованы В. Г. Моисеенко на примере метаморфизованных руд, подвергшихся воздействию высокотемпературных магматических масс, а также М. С. Сахаровой и В. Г. Моисеенко с помощью экспериментального моделирования при нагревании частиц в интервале 500–100 °С [12, 16]. При воздействии на золото более высоких температур частицы подвергаются дезинтеграции, а более низких – не меняются (видимых перемен в краткосрочном эксперименте не наблюдалось).

Нами отмечается преобладание в ядрах россыпных частиц золота более высокой пробы, чем в золоте коренных источников. Причём практически все исследователи россыпей золота считают, что ядра частиц являются реликтовым золотом коренных источников, но при этом в коренных рудах исследуемого района преобладает золото средней и низкой пробы (см. таблицу, рис. 1). Если для россыпного золота состава Au-Ag характерно увеличение пробы в сравнении с коренным, то для эндогенного золота следует отметить повышенную неоднородность частиц по сравнению с россыпным. Ядра частиц россыпного золота характеризуются более однородным составом

(86 % зёрен имеют разницу в концентрации Au < 2 % по площади зерна), чем гипогенные зёрна (68 % частиц с разбросом концентрации Au в соседних точках > 2 %). Причём разброс концентрации Au в 20 % отмечен в одной неокатанной частице россыпного золота, в остальных частицах с неоднородным составом он составляет 2–3 %, столько же – в неокатанных. Наибольшей степенью неоднородности состава характеризуются ядра частиц россыпного золота средней (800–899 ‰) пробы. Зафиксированная разница концентрации Au > 1,5 % в соседних участках частиц золота с пробностью более 900 ‰ отмечена в единичных случаях и является в большей мере случайностью, чем закономерностью. Рекристаллизация золота в ядрах россыпных частиц района отмечалась и характеризовалась ранее С. С. Кальниченко [6] и С. Г. Прудниковым [17]. Эти факты предполагают более глубокое перерождение золота в экзогенных условиях, чем это считалось раньше, т. е. золото в ядрах частиц россыпей, считавшееся реликтовым, гипогенным, в экзогенных условиях приобрело сотовую структуру, более однородный состав и более высокую пробу.

Межзерновые прожилки высокопробного золота помимо структурного признака россыпного золота подчёркивают гранобластовую структуру частиц благодаря развитию по границам зёрен (рис. 3).

Такие прожилки нами наблюдались в частицах золота из россыпей и золоте коренных выходов руд в сростании с гипергенными минералами (лимонитом, каолинитом и гидрослюдистыми глинистыми минералами), но больше они распространены в золотоносных пластах россыпей. Проба золота в них – 1000 ‰, но нередко снижается до интервала 970–998 ‰. В золоте прожилков не проявлена зернистость и деформации, в отличие от вмещающего их катаклазированного субстрата и механического двойникования «реликтового» золота. Эту же особенность внутреннего строения нитевидных прожилков А. А. Сапрыкин и С. В. Яблокова отмечали [19] в частицах золота древних россыпей Приамурья. Н. В. Петровская упоминала проявление тонких меж-

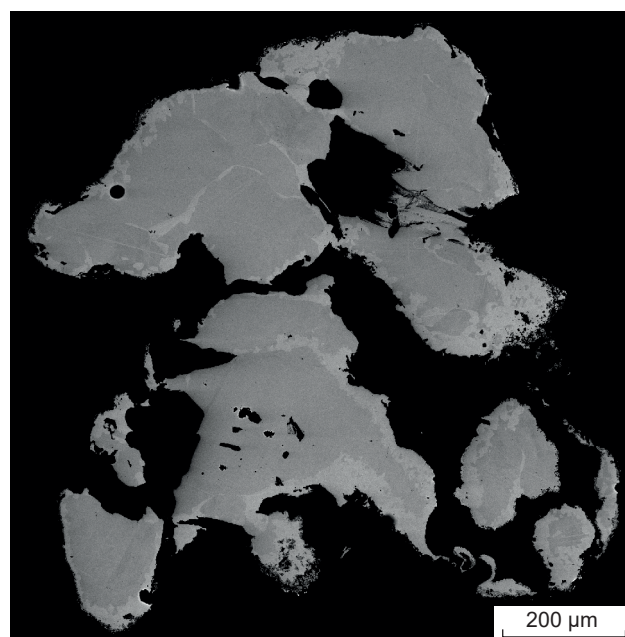


Рис. 3. Гранобластическая структура частицы золота с высокопробной каймой (1000 ‰) по периферии, т. н. 564-17, р. Малый Алгыяк:

светлое – высокопробная кайма и прожилки-выпоты по границам зёрен, серое – «реликтовое» золото

Fig. 3. Granoblastic structure of a gold particle with a high-finesness rim (1000 ‰) along the periphery. Photo, point 564-17, Malyi Algiyak river:

White: high-finesness rim and veinlets-effusions along the grain boundaries; gray: “relict” gold

зерновых прожилков в золоте зоны окисления, образование которых она связывала с рекристаллизацией и диффузионном выносом серебра. Л. А. Николаева свидетельствует, что образование прожилков и высокопробных кайм начинается в корах выветривания и продолжается в зонах окисления. Дж. Десборе высказал мнение [16], что образование прожилков связано с перемещением газов, высвободившихся из включений, и стимулируется окислительными процессами в гипергенных условиях. Но при этом отмечалось непонимание, какие же силы способствовали раскрытию межзерновых трещин.

По нашим наблюдениям и результатам исследований предшественников [12], образование прожилков связано с диффузионно-инfiltrационными межзерновыми явлениями

в детритовых частицах золота. Логическое предположение, вытекающее из описанных фактов, заключается в том, что «реликтовое» золото, в котором развиты недеформированные прожилки высокопробного золота, испытало пульсирующее изменение объёма зёрен с перестройкой кристаллической структуры, изменением состава, сопровождавшееся механическим двойникованием, катаклизмом и открыванием трещин по границам зёрен, заполнением их золотоносным флюидом и отложением золота прожилков.

Указанные факты наличия частиц с прожилковым золотом предполагают образование прожилков в связи с перекристаллизацией золота в ядрах частиц и изменением их состава.

Высокопробная кайма. Известно, что гипогенное золото на стадиях выветривания, седиментогенеза (переноса и отложения детритового материала) и формирования осадка золотоносного пласта подвергается преобразованию в виде появления в нём высокопробных кайм и плёнок, бугорчатых наростов с низким содержанием примесей или без них собственно экзогенного (нового, часто называемого биогенным) золота [4, 7, 12, 14–17, 19, 20].

Высокопробная кайма практически всегда отмечается в золоте россыпей района. Частицы характеризуются наличием сплошных и прерывистых кайм, занимающих первые проценты периметра и более. Эти каймы могут иметь плёночную толщину менее 2–3 мкм, достигают 20–30, редко – 200 мкм. Обычно первые фрагменты высокопробной каймы появляются на угловатых выступах частиц, которые были более доступны для контактового химического взаимодействия частиц с ранее существовавшей минеральной средой, а также для механического воздействия со стороны соседних зёрен переносимого кластогенного материала в среде седиментогенеза и полужидком осадке после отложения материала. Из всех изученных золотин кайма отсутствовала у 13 % (в неокатанных частицах золота Ag-Au состава и ртутистого золота). Это золото, вероятно, поступало в россыпи из близрасположенных выветривающихся коренных руд и находилось там короткое время. Около

55 % частиц не окатаны, но имеют высокопробные каймы, источниками которых, предположительно, были близлежащие коры выветривания, но частицы находились в сформировавшемся золотоносном пласте более длительное время, чем в первом случае. Наконец, 33 % частиц имеют кайму и окатаны. По нашему мнению, последняя группа частиц в рассматриваемом районе испытала несколько эпизодов переноса, отложения, механического, структурного и химического преобразования и поступала в современный аллювий из промежуточных коллекторов, в том числе из древних (неогеновых) россыпей.

Принадлежность к определённой стадии россыпеобразования (кора выветривания, мотогенез, отложение осадка, ранний диагенез), механизм образования высокопробных кайм – до сих пор дискуссионные вопросы геологии и генезиса россыпей. Впервые такие каймки ободки в россыпном золоте были отмечены Р. Макконелом в 1907 г. [16]. В литературе эти высокопробные каймы называют электрохимическими, коррозионными, предполагая таким образом механизм их образования. Отмечалось, что каймы имеют различную толщину, от десятых долей до нескольких десятков микрон. Л. А. Николаева [12] свидетельствует, что экзогенная кайма разрастается до полного уничтожения гипогенного золота.

Л. А. Николаева отмечает [6], что в россыпях р. Систиг-Хем высокопробная кайма проявлена в золоте пробы 850–880 ‰ в виде прерывистой или сплошной, но небольшой мощности. Причём толщина каймы больше, если частица золота в плёнке гидроксидов железа. Исследовательница заметила, что толщина каймы и другие признаки изменения золота увеличиваются вниз по протяжению речных долин. Д. Керр с соавторами [27], изучавшие деформационные структуры аллювиального золота юга Новой Зеландии, свидетельствуют, что образование перекристаллизованного ободка происходит на месте залегания россыпи. В то же время З. С. Никифорова с соавторами [11] пишут, что высокопробная кайма по краям частиц образуется в коре выветривания, а в гидродинамической среде россыпи хими-

ческий состав золота и внутренняя структура частиц практически не меняются.

Частицы золота из коры выветривания Олимпиадинского месторождения [26] представлены реликтовыми частицами эндогенного золота с остросереберными формами и пористой поверхностью выщелачивания, а также многочисленными микронными шаровидными, иногда огранёнными, новообразованиями. Несмотря на целенаправленные поиски, мы не обнаружили частиц золота из коры выветривания Олимпиадинского месторождения, похожих на золото россыпей с каёмками высокопробного золота.

Следует отметить, что высокопробные каймы отсутствуют у частиц золота из эндогенных руд. Встречающиеся каёмки у собственно эндогенных частиц, как правило, более низкопробные, чем внутренние части. Одноактное отложение золота из гидротермальных растворов осуществляется обычно на фоне падающих температур, и для более низкотемпературных образований характерны более низкие пробы. Встречающиеся менее контрастные высокопробные каймы (обычно значительно ниже 1000 ‰) у частиц в гипогенных рудах свидетельствуют о завершении роста частиц эндогенного золота при температурах более высоких, чем необходимо для кристаллизации внутренних частей. Образование высокопробных кайм у золота россыпей зависит в большей мере от физико-химического состава среды, в которой образуется кайма, нежели от температуры процесса [12, 16].

По мнению Н. В. Петровской [15, 16], А. А. Сапрыкина, С. В. Яблоковой [19], Л. А. Николаевой [12], образованию высокопробных кайм способствовали физико-химические явления в приповерхностной области частиц, проявленные вследствие механогенеза, затронувшего частицы золота. Процесс образования каёмок длительный; как указывается в публикациях, чем толще кайма, тем дольше находилась частица в россыпи.

При описании частиц золота с высокопробной каймой чистого золота многие исследователи [16] отмечают, что граница каёмчатого золота с внутренней частью золотин резкая,

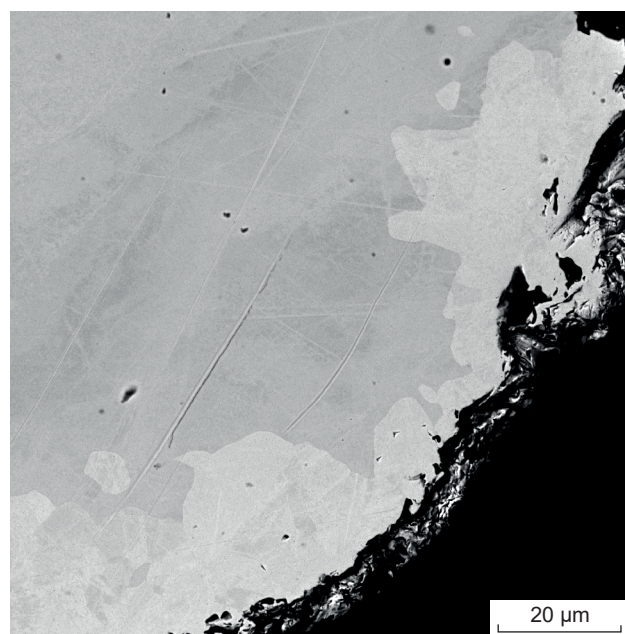


Рис. 4. Частица Ag-Au состава, т. н. 557-10, р. Большой Алгияк:

светлое – высокопробная кайма (990 ‰) полигонально-зернистого, гранобластового строения по периферии частицы, размеры зёрен в агрегате каймы 2–3 мкм; серое – реликтовое золото ядра частицы, проба 919–920 ‰, размер зёрен в агрегате ядра 25–35 мкм

Fig. 4. Gold particle of Ag-Au composition. Photo, point 557-10, Bolshoi Algiyak river:

White: high-finesness rim (990 ‰) with the polygonal-granular, granoblastic structure along the periphery of a particle; the grain sizes in the rim aggregate are 2–3 microns; gray: relict gold of the particle kernel, fineness 919–920 ‰; the grain size in the kernel aggregate is 25–35 microns

коррозионная, и золото каймы как бы вгрызается в ядро золотины; более осторожные исследователи говорят о фестончатой границе с округлёнными и зубчатыми выступами.

В наблюдаемых нами случаях внутренняя граница высокопробных каёмок всегда ломаная и прямолинейно-ступенчатая, отражающая микрозернистую структуру каймы (рис. 4).

Размеры зёрен в кайме и ядре частиц различны. Строение каёмок у частиц золота Ag-Au состава и ртутистого, с содержанием Hg менее 5 %, плотное и микрогранобластовое (размер зёрен от 2–5 до 10 мкм), в отличие от ядра частиц, где проявлены «реликтовые» гра-

нобластовые (с размером зёрен в десятки и первые сотни мкм) и деформационные структуры (обычно милонитовые, реже бетонные и катакластические). Таким образом, образование высокопробной каймы и гранобластовая грануляция ободковой зоны зерна осуществляются одновременно и являются следствием единого метасоматического процесса. Причём именовать кайму коррозионной, видимо, некорректно (?), так как мы имеем дело не с разрушением металла в ободке, а с его перекристаллизацией и очищением.

Высокопробная кайма у ртутистого золота образуется путём грануляции краевой зоны частицы Hg-Ag-Au состава и диффузионно-инфильтрационного замещения её Au и выносом Ag и Hg из этой области. Во внешней части каймы золото имеет пробу 1000 ‰, а в пограничной части каймы с ядром замещение зёрен Hg-Ag-Au состава золотом осуществляется по границам зёрен с сохранением во внутренних частях реликтового состава и формированием петельчатой структуры (рис. 5).

Строение кайм у частиц ртутистого золота с содержанием Hg 5,4 % и более (в нашем случае до 9,21 %) пористое (горчичное золото). Причём морфология большей части пор червеобразная (1 × 15 мкм), меньше развиты изометрические (от 1 × 1 до 5 × 5 мкм) и прямолинейно щелевидные ((1–2) × (20–30) мкм) (рис. 6).

Пористые каймы частиц золота Hg-Ag-Au состава обычно занимают около половины объёма частиц, в ядрах которых сохраняются амёбовидные участки реликтового ртутистого золота. В этом случае мы видим коррозию – разрушение целостности металла. В ядерных (реликтовых) участках первичного золота не наблюдались деформационные структуры. Преобразование первичного ртутистого золота моделируется в следующей последовательности: грануляция, распад твёрдого раствора первичного золота → индивидуализация червеобразных выделений серебряной амальгамы в матрице золота высокой пробы, не содержащей Hg, и с низким содержанием Ag (1–3 %) → физико-химическое выщелачивание фазы серебряной амальгамы с образованием на их месте

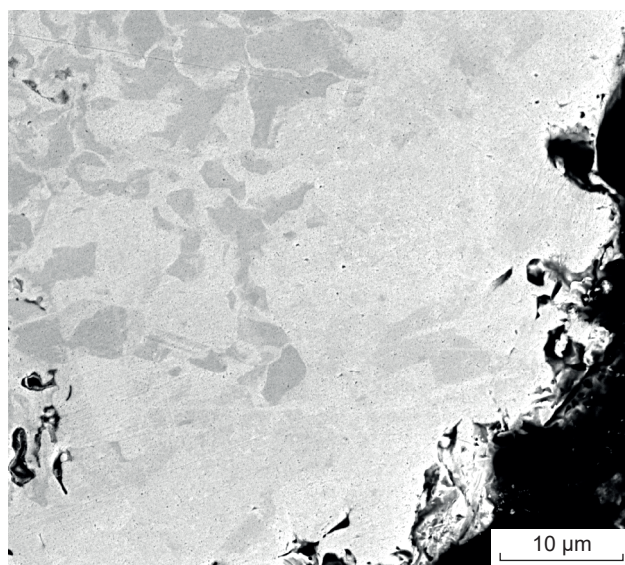


Рис. 5. Строение высокопробной каймы ртутистого золота, т. н. 563, р. Малый Алгыяк:

внешняя область каймы плотная, однородная гранобластовая (1000 ‰), область границы каймы с ядром частицы имеет петельчатое строение высокопробной каймы; белое – чистое золото по границам гранобластического агрегата, серые области зёрен – реликтовое золото Hg-Ag-Au состава

Fig. 5. The structure of a high-grade rim composed of mercury gold. Photo, point 563, Malyi Algiyak river:

The outer portion of the rim is dense, homogeneous granoblastic (1000 ‰); the border portion between the rim and the particle kernel has a reticulate structure of the high-finesness rim; white is pure gold along the borders of the granoblastic aggregate; gray areas of the grains are relic gold of Hg-Ag-Au composition

пор → отложение вокруг пор тончайших каёмок (менее 1 мкм) химически чистого золота.

У медистого золота плотная высокопробная кайма (5–200 мкм), в ней отмечаются пятна участков с группами щелевидных пор, наследующих форму пластинок собственно медистого золота ((1–2) × (10–40) мкм) (рис. 7).

Каймы медистого золота частично щелевидно-пористые, наследующие пластинчатую структуру распада твёрдого раствора. Матрица частиц замещена крупнозернистым агрегатом золота с пробой 1000 ‰, а пластинки Cu-Au состава выщелочены.

Таким образом, по нашим наблюдениям, в ободке по периферии частиц золота осу-

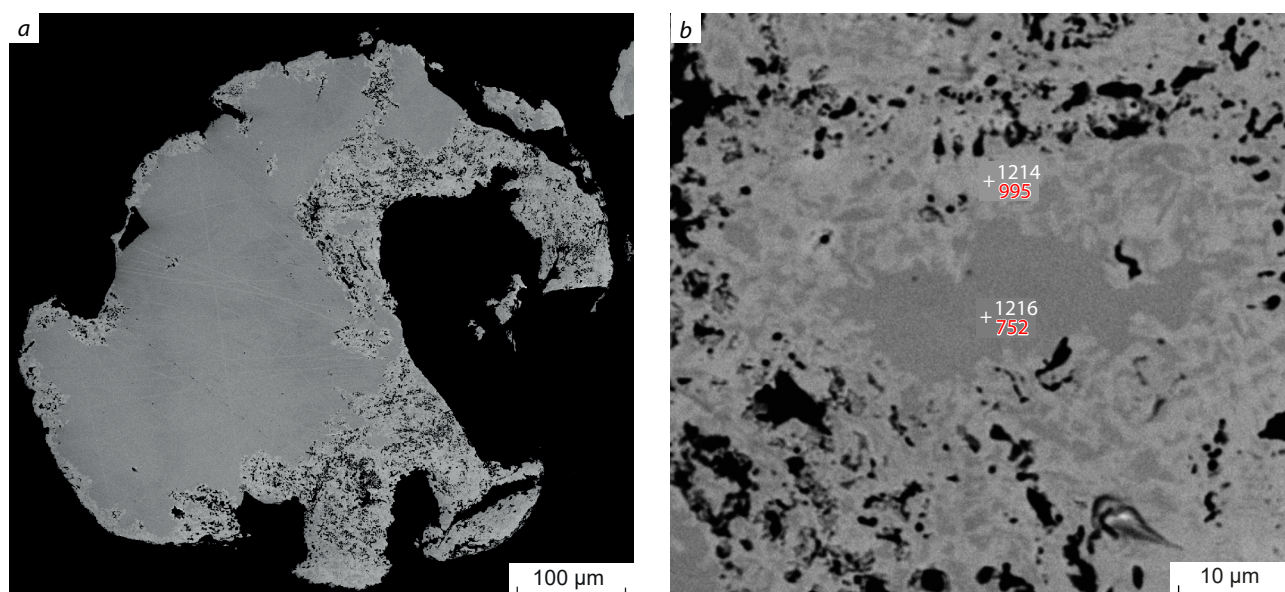


Рис. 6. Пористая (мирмекитового вида) высокопробная кайма ртутистого золота, р. Малый Алгыяк, т. н. 566-21: *a* – общий вид частицы, *b* – увеличенный фрагмент каймы; чёрное – поры червеобразной морфологии, заполненные смесью каолинита, гидроксидов железа и глинистых гидрослюдистых минералов; серый и светло-серый цвета золота отражают разную пробность; цифры красного цвета – проба в ‰

Fig. 6. Porous (myrmekite-like) high-fineness rim of mercury gold. Photo, point 566-21, Malyi Algiyak river:

a – General view of the particle, *b* – enlarged fragment of the rim; black: pores of vermicular morphology, filled with a mixture of kaolinite, iron hydroxides, and clayey hydromica minerals; gray and light gray colors of the gold reflect different fineness values; red numbers indicate fineness in ‰

ществляется микрозернистый гранобластез и практически одновременный с ним диффузионный метасоматоз (твёрдофазное замещение золотосеребряных частиц чистым золотом и выносом серебра из области каймы). Причём грануляция является кристаллобластовой и не связана с деформационными преобразованиями поверхностной зоны частиц. Следует отметить, что внутренняя граница кайм у частиц золота (даже у эллипсоидных и сферических) субпараллельна внешнему контуру частиц, что указывает на её образование или завершение образования после окатывания.

Образование и строение высокопробных кайм у медистого и ртутистого золота имеют свои особенности. В отличие от З. С. Никифоровой с соавторами, считающих, что высокопробная кайма образуется в корках выветривания (т. е. на самой ранней стадии осадочного процесса), мы предполагаем её образование на стадии сингенеза – раннего диагенеза полу-

жидкого осадка формирующегося золотоносного пласта после переноса и отложения осадочного материала.

Деформационные структуры. Во время пребывания частиц золота в экзогенных условиях, особенно в подвижной среде рек, седиментогенная среда естественным образом оказывает на них динамическое воздействие и приводит к образованию остаточных хрупких и пластических преобразований (рис. 8).

Золото – ковкий минерал, и в дополнение к внешнему истиранию при переносе подвергается внутренней вязкой деформации и уплотнению. Наиболее отчётливо наблюдаются изгибы частиц, их завальцевание, окатывание, следы царапания и клепания. Менее доступны наблюдению дислокационные преобразования внутри частиц. Для их непосредственного изучения используются микрохимическое структурное травление, оптическая и электронная микроскопия.

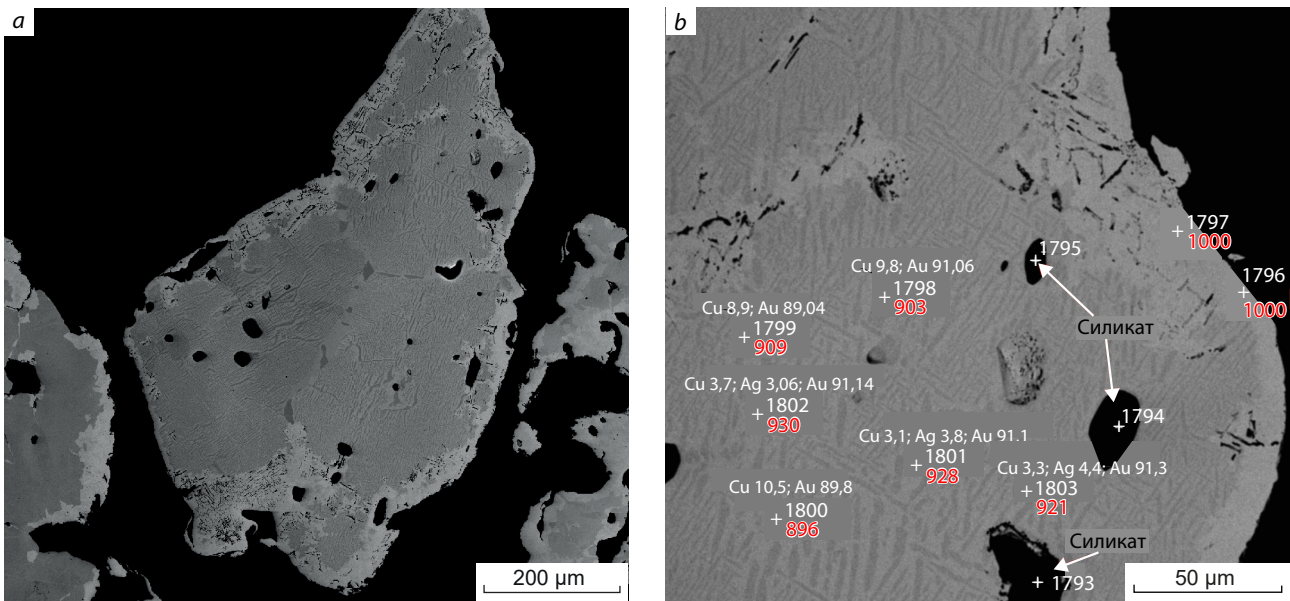


Рис. 7. Медистое золото, т. н. 634-1, р. Кундусуг:

a – общий вид частицы; *b* – увеличенный фрагмент частицы; светлая кайма – высокопробное золото; чёрное – щелевидные поры в высокопробной кайме; пластинчатая неоднородность ядра частицы – структура распада твёрдого раствора; белые крестики – точки анализа; красные цифры – проба в ‰; надписи белого цвета – содержание минералообразующих элементов в ‰

Fig. 7. Copper gold. Photo, point 634-1, Kundusug river:

a – General view of the particle; *b* – enlarged fragment of the particle. Gold areas with different composition are distinguished by color: the light rim is high-fineness gold; black are slit-shaped pores in the high-fineness rim; the lamellar heterogeneity of the particle kernel is a structure of solid solution decomposition. White crosses are analysis points; red numbers indicate fineness in ‰; white inscriptions indicate content of the mineral-forming elements in ‰

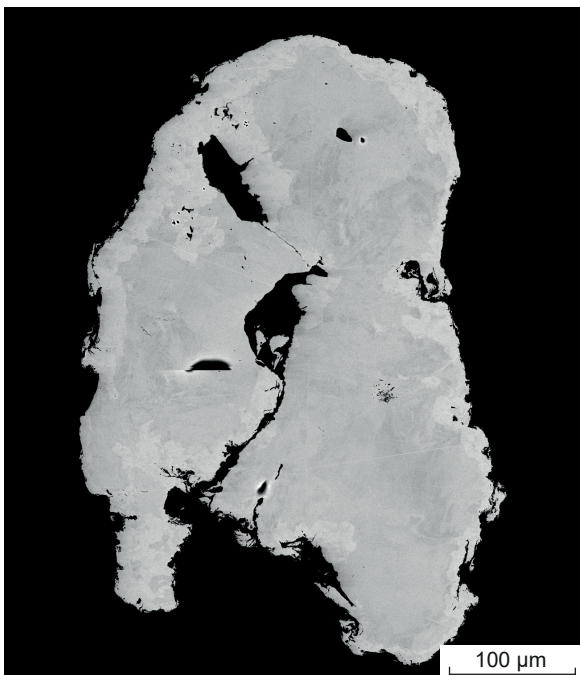


Рис. 8. Дугообразно изогнутая пластинка золота, т. н. 415, р. Изинзюль:

ядерная область частицы деформационной структуры, подчеркнута сочетанием неравномернозернистой, оскольчатой морфологией фаз разной интенсивности серого и светло-серого цветов; по краям частицы и вокруг пустот – светлая кайма высокопробного золота; граница между центральной частью и высокопробной каймой частицы – зубчато-полигональная изменчивой толщины, судя по отсутствию деформационных механогенных изменений в кайме, она образовалась позже дугообразного изгибания частицы

Fig. 8. Arcuate gold lamella. Photo, point 415, Izinzyul river:

The kernel portion of the particle has a deformational structure emphasized by unevenly granular, chipping morphology of the phases with different intensities of gray and light gray colors. There are light rims of high-fineness gold along the edges of the particles and around the voids. The border between the central part and the high-fineness rim of the particle has polygonal indented shape and variable thickness. Judging by the absence of mechano-genic deformational changes in the rim, the latter formed later than the arcuate bending of the particle

В монозёрнах и гранобластических агрегатах золота района в разной степени распространены микросдвиги, механические двойники (рис. 9), структуры распада твёрдых растворов и, наконец, катакластическая грануляция с образованием катакластической, бетонной и милонитовой микроструктур, подобных наблюдаемым в продуктах дислокационного метаморфизма силикатных пород [3, 18, 25].

Катакластическая структура характеризует дробление и грануляцию по границам первичных зёрен с образованием тонко- и неравномернозернистого агрегата зёрен оскольчатой морфологии (см. рис. 8). Бетонная структура является частным случаем катакластической. Ей присуще разрастание тонкозернистого агрегата от границ зёрен и наличие реликтов крупных минеральных зёрен, погружённых в тонкозернистый агрегат. Милонитовое строение – тонкозернистая грануляция с проявлением механического перемещения оскольчатогранулированного материала по субпараллельным, часто *S*-образным поверхностям (рис. 10).

В противоположность мнению о формировании деформационных структур в динамометаморфических породах путём дробления-истирания минерального вещества, некоторые исследователи объясняют их образование результатом пластического течения и оскольчатой грануляции в твёрдом состоянии, наблюдаемых в металлах при их обработке давлением. Л. А. Николаева отмечает в ядрах частиц золота района перекристаллизацию, а не деформационные структуры, причём она связывает её с динамическими воздействиями обломочного материала на частицы металла при транспортировке. Д. Керр с соавторами [23, 27] привели описания эффектных милонитовых структур в золоте аллювиальных россыпей южной части Новой Зеландии, которые были наложены деформацией переноса обломочных частиц золота. Авторы этого исследования отмечают, что вязкие структуры деформации в золоте напоминают результаты холодной прокатки при обработке гранецентрированных кубических металлов, таких как золото. Вязкие структуры деформации в металлах образуются посредством механизмов скольжения, но ме-



Рис. 9. Двойниковое строение частицы, т. н. 1001-13, р. Малый Алгияк:

серое – тонкие двойниковые пластинки

Fig. 9. Twin structure of a gold particle. Photo, point 1001-13, Malyi Algiyak river:

Gray: thin twin gold lamellae

ханизмы внутренней деформации в природном золоте изучены слабо. Подобные деформации обнаружены нами в частицах золота рассматриваемых россыпей гранулометрической фракции < 0,15 мм. В этом случае изменениям подвержены ядро и высокопробный ободок. Деформированные фрагменты ободка и ядра частиц преобразованы в брекчию.

Деформационные структуры немеханогенной природы в частицах золота фракции > 0,25 мм Амыло-Систигхемского рудно-россыпного района проявлены в тех частицах, в которых развиты ненарушенные высокопробные ободковые каймы. На наш взгляд, эти особенности строения частиц (наличие высокопробной каймы и деформационные структуры в ядре) генетически взаимосвязаны. Об-

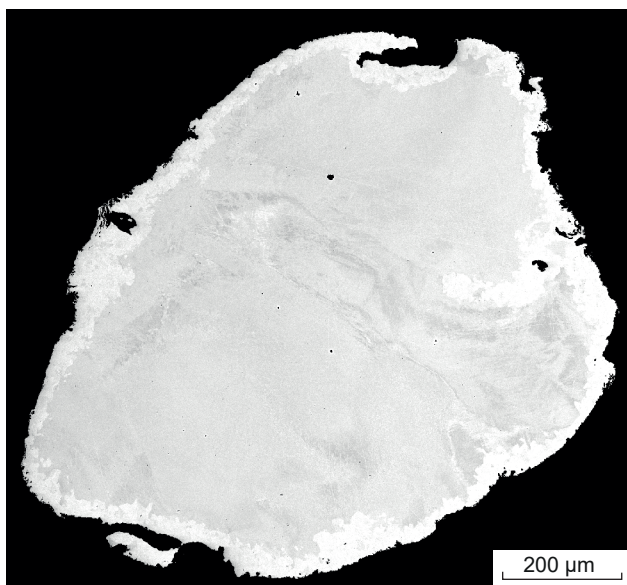


Рис. 10. Частица с высокопробной каймой по периферии (белое), т. н. 1351-3, р. Чёрная:

белое – высокопробная кайма по периферии; внутренняя часть зерна неоднородного, деформационного строения, выражающегося в сочетании серого и светло-серого цветов фазовых фрагментов оскольчатой морфологии; по диагонали частицы S-образная зонка милонитизации ленточно-катакластического строения; проба золота в кайме – 1000 ‰, ядерной части – 924 ‰ (на более тёмных участках) и 929 ‰ (на более светлых)

Fig. 10. A gold particle with a high-fineness rim along the periphery. Photo, point 1351-3, Chernaya river:

White: the high-fineness rim on the particle periphery; the inner portion of the grain has a heterogeneous, deformational structure expressed in a combination of gray and light gray colors of the phase fragments of chipped morphology; there is an S-shaped mylonitization zone of a ribbon-cataclastic structure diagonally across the particle. Gold fineness in the rim is 1000 ‰; that in the kernel portion is 924 ‰ in the darker areas and 929 ‰ in the lighter areas

разование высокопробной каймы и увеличение пробности в ядре создаёт в частице разнонаправленное кристаллизационное давление со стороны каймы и ядра, так как объём кристаллической структуры в ободковой кайме чистого золота и в золоте ядра с примесью Ag, Cu и других элементов различен (рис. 11).

Возможно, перемешивание и соударение частиц в движущемся водном потоке стимулировали формирование в частицах областей

кристаллизационного напряжения, способствующих впоследствии возникновению деформационных структур. В связи с этим представляет интерес работа А. М. Кузьмина [9], в которой он объясняет образование волнистого погасания и закрытых криптотрещин в фенокристаллах кварца риолитов при последовательном изменении объёма кристаллической решётки и возрастании внутреннего кристаллического давления в минерале фазовым переходом кристобалит → тридимит → кварц при остывании лавы и образовании риолита. Обычно волнистое погасание кварца связывают с остаточными механогенными явлениями. Подобные кристаллофизические изменения в золоте при экзогенном изменении его состава, по нашему мнению, способствует образованию межзерновых прожилков и деформационных структур.

Закключение.

1. Золото россыпей и коренных источников Амыло-Систигхемского района Республики Тыва существенно текстурно-структурно и химически отличается. Частицы золота изменялись в ходе своеобразных деформационно-метасоматических процессов в системе коренные руды → коры выветривания → транспортировка материала → отложение, сингенез → ранний диагенез в промежуточных коллекторах и современном аллювии.

2. Гипергенный метасоматоз в золотоносном осадке россыпи золота привёл к неоднородному гранобластезу по размеру зёрен в ядрах и периферии частиц с образованием ободков-кайм. Диффузионный метасоматоз в ядерных участках детритового золота и инфльтрационный – в ободковых с дифференциальной подвижностью главных компонентов системы (Au – инертное; Ag, Cu, Hg – подвижные) привёл к рекристаллизации и образованию более высокопробной Au-Ag фазы в ядрах частиц (при частичном выносе подвижных компонентов) и практически чистой золотой фазы в ободках с формированием тонкогранобластовых высокопробных кайм.

3. Неоднородные по составу кристаллизующиеся фазы золота в ободках и ядрах, характеризующиеся различными объёмами кристаллической ячейки, создали в ядрах ча-

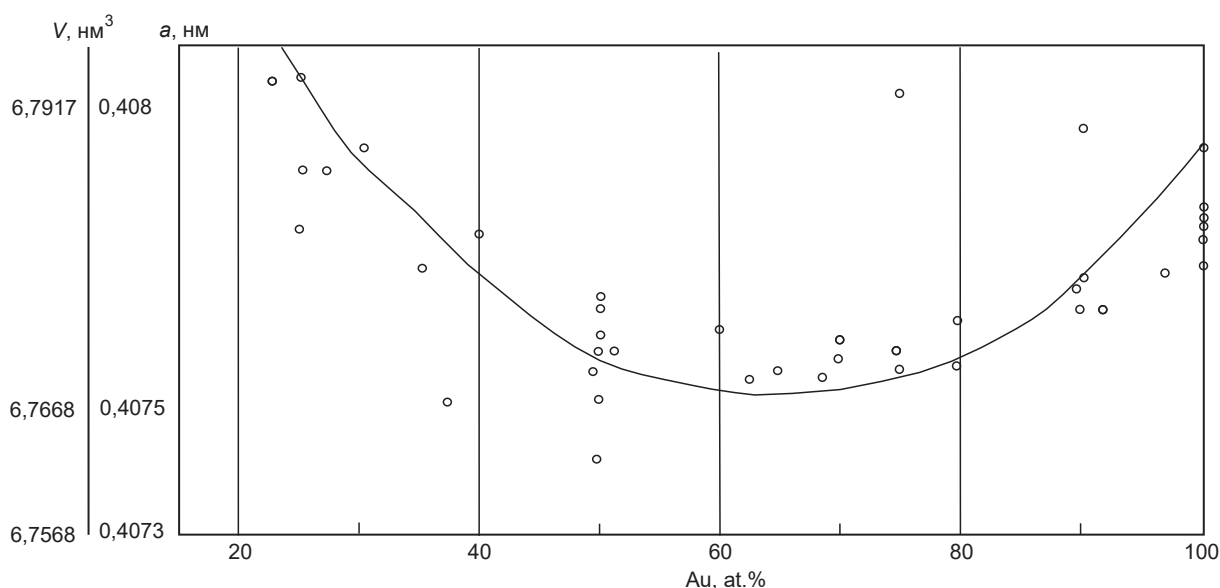


Рис. 11. Кристаллические параметры самородного золота в зависимости от концентрации примеси Ag, по [24]: V – объём кристаллической решетки; a – размер ребра элементарной ячейки

Fig. 11. Crystallographic parameters of native gold depending on the Ag impurity concentration, after H. Okamoto and T. B. Massalski (1983):

V – the crystal lattice volume, a – the unit cell dimension

стиц кристаллофизическое напряжение и, как следствие, в этих ядрах проявились катаклаз и милонитизация.

4. Межзерновые инфильтрационные прожилки образовались в результате раскрытия граничных контактов зёрен при проявлении градиента кристаллофизического давления в зернистых агрегатах ядерных участков и ободках при локальном метасоматозе в частицах золота.

5. Охарактеризованные механизмы изменения состава и строения частиц россыпного

золота на примере Амыло-Систигхемского рудно-россыпного района Республики Тыва, вероятно, имеют универсальный характер при формировании россыпей.

Авторы признательны коллегам-геологам: С. Г. Прудникову за помощь в формировании представлений о геологии района и создании коллекции частиц золота; С. А. Сильянову, Б. М. Лобастову и Н. В. Нелюбину за помощь в изготовлении препаратов и исследовании состава и строения частиц самородного золота на электронном микроскопе.

Список литературы

1. Аношин Г. Н. Золото в магматических горных породах (по данным нейтронно-активационного анализа). – Новосибирск : Наука, СО РАН, 1977. – 208 с.
2. Билибин Ю. А. Основы геологии россыпей. – М. : АН СССР, 1956. – 505 с.
3. Вильямс Х., Тернер Ф. Дж., Гилберт Ч. М. Петрография в 2 т. – М. : Мир, 1986. – Т. 2. – 320 с.
4. Глушкова Е. Г., Никифорова З. С. Различие типоморфных признаков россыпного золота юго-востока Сибирской платформы в зависимости от продолжительности его пребывания в экзогенных условиях // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований : материалы Всероссийской

- конференции, посвящённой 100-летию Н. В. Петровской (1910–1991). – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – Т. I. – С. 141–143.
5. Ильенко С. С. Генетические связи оруденения с интрузиями // Геология золоторудных месторождений Сибири. – Новосибирск : Наука, СО РАН, 1970. – С. 3–30.
 6. Кальниченко С. С. Эндогенное золотое оруденение и россыпеобразующие рудные формации Восточной Тувы : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук. – М., 1972. – 23 с.
 7. Колпаков В. В., Нестеренко Г. В., Жмодик С. М., Осинцев С. Р. Новое золото в аллювиальных россыпях // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований : материалы Всероссийской конференции, посвящённой 100-летию Н. В. Петровской (1910–1991). – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – Т. I. – С. 261–263.
 8. Коробейников А. Ф. Условия концентрации золота в палеозойских орогенах. – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1987. – 176 с.
 9. Кузьмин А. М. Природа волнистого погасания кварца // Новые данные по геологии и географии Кузбасса и Алтая : материалы научно-технической конференции. – Новокузнецк, 1969. – С. 192–195.
 10. Некрасов И. Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. – М. : Наука, 1991. – 312 с.
 11. Никифорова З. С., Калинин Ю. А., Макаров В. А. Эволюция самородного золота в экзогенных условиях // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61, № 11. – С. 1514–1534.
 12. Николаева Л. А. О чём рассказывают золотинки. – М. : Недра, 1990. – 111 с.
 13. Новгородова М. И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. – М. : Наука, 1983. – 287 с.
 14. Петровская Н. В. Морфология и структура «нового» золота // Доклады Академии наук СССР. – 1941. – Т. 32, № 6. – С. 424–426.
 15. Петровская Н. В. О продуктивных минеральных ассоциациях в золоторудных месторождениях // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1955. – Ч. 84, вып. 3. – С. 290–307.
 16. Петровская Н. В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). – Новосибирск : Наука, СО РАН, 1973. – 347 с.
 17. Прудников С. Г. Закономерности размещения россыпей золота в морфоструктурах Тувы и Западного Саяна : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Прудников Сергей Григорьевич. – Новосибирск, 2003. – 181 с.
 18. Родыгин А. И. Динамометаморфические породы: справочное пособие. – Томск : Изд-во Томского университета, 2001. – 355 с.
 19. Сапрыкин А. А., Яблокова С. В. Особенности внутренней структуры золота из древних россыпей Приамурья // Вопросы геологии месторождений золота : материалы II Конференции по изучению месторождений золота Сибири. – Томск : Изд-во Томского университета, 1970. – С. 390–397.
 20. Соломенцева Л. А., Литвиненко И. С. Генетические типы самородного золота в россыпях Мякит-Хурчанского узла (северо-восток России) // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований : материалы Всероссийской конференции, посвящённой 100-летию Н. В. Петровской (1910–1991). – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – Т. II. – С. 218–220.
 21. Шило Н. А. Основы учения о россыпях. – М. : Наука, 1981. – 384 с.
 22. Щербаков Ю. Г. Геохимия золоторудных месторождений в Кузнецком Алатау и Горном Алтае. – Новосибирск : Наука, СО РАН, 1974. – 274 с.
 23. Kerr G., Falconer D., Reith F., Craw D. Transport-related mylonitic ductile deformation and shape change of alluvial gold, southern New Zealand // Sedimentary Geology. – 2017. – № 361. – P. 52–63.
 24. Okamoto H., Massalski T. B. The Ag-Au (Silver-Gold) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1983. – V. 4, № 1. – P. 30–38.
 25. Philpotts A. R., Ague J. J. Principles of igneous and metamorphic petrology. – Second Edition. – New York. Cambridge university press. – 2009. – 685 p.
 26. 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. – № 11 (2). – DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020190>.
 27. Stewart J., Kerr G., Prior D., Halfpenny A., Pearce M., Hough R., Craw D. Low temperature recrystallisation of alluvial gold in paleoplacer deposits // Ore Geology Reviews. – 2017. – № 88. – P. 43–56.



References

- Anoshin G. N. Zoloto v magmaticeskikh gornyh porodah (po dannym nejtronno-aktivacionnogo analiza) [Gold in igneous rocks (according to neutron activation analysis)], Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, 208 p.
- Bilibin Ju. A. Osnovy geologii rossypej [Fundamentals of placer geology], Moscow, AN USSR Publ., 1956, 505 p.
- Vil'jams H., Ternер F. Dzh., Gilbert Ch. M. Petrography in 2 vol., Moscow, Mir Publ., 1986, V. 2, 320 p.
- Glushkova E. G., Nikiforova Z. S. Razlichie tipomorfnyh priznakov rossypnogo zolota jugo-vostoka Sibirskoj platformy v zavisimosti ot prodolzhitel'nosti ego prebyvaniya v jekzogennyh uslovijah [The difference in typomorphic features of placer gold of the south-east of the Siberian platform depending on the duration of its stay in exogenous conditions], *Samorodnoe zoloto: tipomorfizm mineral'nyh asociacij, uslovija obrazovaniya mestorozhdenij, zadachi prikladnyh issledovanij: materialy Vserossijskoj konferencii, posvyaschjionnoj 100-letiju N. V. Petrovskoj (1910–1991)* [Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions of deposit formation, tasks of applied research: materials of the All-Russian conference dedicated to the 100th anniversary of N. V. Petrovskaya (1910–1991)], Moscow, IGEM RAN Publ., 2010, V. I, pp. 141–143.
- Il'enok S. S. Geneticheskie svyazi orudnenenija s intruzijami [Genetic connections of mineralization with intrusions], *Geologija zolotorudnyh mestorozhdenij Sibiri* [Geology of gold deposits in Siberia], Novosibirsk, Nauka SB RAS Publ., 1970, pp. 3–30.
- Kal'nichenko S. S. Jendogennoe zolotoe orudnenenie i rossypeobrazujuschie rudnye formacii Vostochnoj Tuvy [Endogenous gold mineralization and placer-forming ore formations of Eastern Tuva: Extended abstract of candidate's thesis], Moscow, 1972, 23 p.
- Kolpakov V. V., Nesterenko G. V., Zhmodik S. M., Osincev S. R. Novoe zoloto v alljuvial'nyh rossypjah [New gold in alluvial placers], *Samorodnoe zoloto: tipomorfizm mineral'nyh asociacij, uslovija obrazovaniya mestorozhdenij, zadachi prikladnyh issledovanij: materialy Vserossijskoj konferencii, posvyaschjionnoj 100-letiju N. V. Petrovskoj (1910–1991)* [Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions of deposit formation, tasks of applied research: materials of the All-Russian conference dedicated to the 100th anniversary of N. V. Petrovskaya (1910–1991)], Moscow, IGEM RAN Publ., 2010, V. I, pp. 261–263.
- Korobejnikov A. F. Uslovija koncentracii zolota v paleozojskikh orogenah [Conditions of gold concentration in Paleozoic orogens], Novosibirsk, IGG SB RAS Publ. 1987, 176 p.
- Kuz'min A. M. Priroda volnistogo pogasaniya kvarca [The nature of wavy quartz extinction], *Novye dannye po geologii i geografii Kuzbassa i Altaja: materialy nauchno-tehnicheskoy konferencii* [New data on geology and geography of Kuzbass and Altai: materials of the scientific and technical conference], Novokuzneck, 1969, pp. 192–195.
- Nekrasov I. Ja. Geohimija, mineralogija i genezis zolotorudnyh mestorozhdenij [Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits], Moscow, Nauka Publ., 1991, 312 p.
- Nikiforova Z. S., Kalinin Ju. A., Makarov V. A. Jevoljucija samorodnogo zolota v jekzogennyh uslovijah [Evolution of native gold under exogenous conditions], *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2020, V. 61, No 11, pp. 1514–1534. (In Russ.).
- Nikolaeva L. A. O chjom rasskazyvajut zolotinki [What do the gold coins tell about], Moscow, Nedra Publ., 1990, 111 p.
- Novgorodova M. I. Samorodnye metally v gidrotermal'nyh rudah [Native metals in hydrothermal ores], Moscow, Nauka Publ., 1983, 287 p.
- Petrovskaja N. V. Morfologija i struktura "novogo" zolota [Morphology and structure of the "new" gold], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1941, V. 32, No 6, pp. 424–426. (In Russ.).
- Petrovskaja N. V. O produktivnyh mineral'nyh asociacijah v zolotorudnyh mestorozhdenijah [On productive mineral associations in gold deposits], *Zapiski Vsesojuznogo mineralogicheskogo obschestva* [Notes of the All-Union Mineralogical Society], 1955, V. 84, No 3, pp. 290–307. (In Russ.).
- Petrovskaja N. V. Samorodnoe zoloto (obschaja harakteristika, tipomorfizm, voprosy genezisa) [Native gold (general characteristics, typomorphism, questions of genesis)], Novosibirsk, Nauka SB RAS Publ., 1973, 347 p.
- Prudnikov S. G. Zakonomernosti razmeschenija rossypej zolota v morfostrukturah Tuvy i Zapadnogo Sajana [Patterns of placement of gold placers in the morphostructures of Tuva and Western Sayan: Extended abstract of candidate's thesis], Novosibirsk, 2003, 181 p.

18. Rodygin A. I. Dinamometamorficheskie porody (spravochnoe posobie [Dynamometamorphic rocks (reference guide)], Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta Publ., 2001, 355 p.
19. Saprykin A. A., Jabloкова S. V. Osobennosti vnutrennej struktury zolota iz drevnih rossypjeh Priamur'ja [Features of the internal structure of gold from ancient placers of the Amur region], *Voprosy geologii mestorozhdenij zolota: materialy II konferencii po izucheniju mestorozhdenij zolota Sibiri* [Problems of the geology of gold deposits: materials of the II conference on the study of gold deposits in Siberia], Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta Publ., 1970, pp. 390–397.
20. Solomenceva L. A., Litvinenko I. S. Geneticheskie tipy samorodnogo zolota v rossypjah Mjakit-Hurchanskogo uzla (severo-vostok Rossii) [Genetic types of native gold in placers of the Myakit-Khurchan node (north-east of Russia)], *Samorodnoe zoloto: tipomorfizm mineral'nyh asociacij, uslovija obrazovaniya mestorozhdenij, zadachi prikladnyh issledovanij: materialy Vserossijskoj konferencii, posvschjonnoj 100-letiju N. V. Petrovskoj (1910–1991)* [Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions of deposit formation, tasks of applied research: materials of the All-Russian conference dedicated to the 100th anniversary of N. V. Petrovskaya (1910–1991)], Moscow, IGEM RAN Publ., 2010, V. II, pp. 218–220.
21. Shilo N. A. Osnovy uchenija o rossypjah [Fundamentals of the doctrine of placers], Moscow, Nauka Publ., 1981, 384 p.
22. Scherbakov Ju. G. Geohimija zolotorudnyh mestorozhdenij v Kuzneckom Alatau i Gornom Altae [Geochemistry of gold deposits in Kuznetsk Alatau and Gorny Altai], Novosibirsk, Nauka SB RAS Publ., 1974, 274 p.
23. Kerr G., Falconer D., Reith F., Craw D. Transport-related mylonitic ductile deformation and shape change of alluvial gold, southern New Zealand, *Sedimentary Geology*, 2017, No 361, pp. 52–63.
24. Okamoto H., Massalski T. B. The Ag-Au (Silver-Gold) System, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1983, V. 4, No 1, pp. 30–38.
25. Philpotts A. R., Ague J. J. Principles of igneous and metamorphic petrology. Second Edition, New York, Cambridge university press, 2009, 685 p.
26. 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, No 11 (2), DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020190>.
27. Stewart J., Kerr G., Prior D., Halfpenny A., Pearce M., Hough R., Craw D. Low temperature recrystallisation of alluvial gold in paleoplacer deposits, *Ore Geology Reviews*, 2017, No 88, pp. 43–56.

Хертек Чайна Март-ооловна (chayana83@mail.ru)

младший научный сотрудник¹

Сазонов Анатолий Максимович

доктор геолого-минералогических наук, профессор²

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской Академии наук, г. Кызыл, Россия

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия