

УДК: 553.411.065.3(571.65)

СТРУКТУРА РАСПАДА ТВЕРДОГО РАСТВОРА Au–Ag В САМОРОДНОМ ЗОЛОТЕ ЭПИТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АГАТОВСКОЕ (Северо-Восток России)

Савва Н. Е.¹, Волков А. В.², Сидорова Н. В.²

¹ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

²ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, г. Москва
E-mail: savva@neisri.ru, tma2105@mail.ru

Вопрос рассмотрен на примере эпитеpmального месторождения Агатовское, расположенного в Тенькинском районе Магаданской области. Описаны морфология частиц самородного Au, сростания с другими минералами, вариации пробности и внутренняя структура, а также нетипичная для низкопробного золота пятнистая неоднородность, возникшая при термометаморфизме, связанном с пострудным внедрением интрузий и субвулканических тел в пределах месторождения. Обсуждаются особенности структур распада твердого раствора Au–Ag на месторождениях разной глубинности. Показано, что способ распада твердого раствора Au–Ag зависит от скорости остывания рудообразующей системы и может использоваться в качестве типоморфного признака как при поисковых работах, так и для генетических построений. Импульсом для распада твердого раствора Au–Ag в самородном золоте является его термометаморфизм и последующая скорость остывания рудообразующего флюида.

Ключевые слова: Северо-Восток России, эпитеpmальное месторождение Агатовское, типоморфизм самородного золота, структуры распада твердого раствора Au–Ag.

DOI: 10.34078/1814-0998-2025-3-23-35

ВВЕДЕНИЕ

Проблема существования структур распада твердого раствора Au–Ag обсуждалась рядом исследователей (Моисеенко, 1977; Петровская, Новгородова, 1980 и др.). Так, М. С. Сахарова и др. (1980) выделили две различные области по смесимости Au и Ag и указывали на прерывистость этого ряда. Позднее М. И. Новгородова (1983) показала, что возникновение фазовой неоднородности в самородном золоте включает в себя как синровостное соотношение Au и Ag в твердой фазе с признаками несмесимости, так и микрокристаллизационные превращения в результате твердофазной диффузии Ag, сегрегирующегося в собственную минеральную фазу. Эти выводы позволили выделить несколько групп: низкопробное золото 200–450 ‰ как «кюстелит», средней пробы 500–750 ‰ – «электрум», а выше 750 ‰ – собственно «самородное золото». К настоящему времени экспериментальными работа-

ми доказан непрерывный ряд структур распада твердого раствора Au–Ag (Воробьев, 1990; Амосов, Васин, 1995; Палажченко, Неронский, 2004). Градация различных групп золота по значениям пробности была упразднена; в настоящее время выделяется просто «самородное золото» с указанием пробности и золотосодержащее серебро, при этом различные виды структур распада твердого раствора Au–Ag напрямую зависят от условий образования самородного золота, в частности от температурного режима рудообразующих растворов.

При изучении рудных и россыпных месторождений получен значительный объем фактических материалов для различных регионов России и мира, позволяющий говорить об индикаторных свойствах самородного золота (Моисеенко, 1977; Савва, Прейс, 1980; Неронский, 1998; Knight et al., 1999; Савва и др., 2004; Никифорова, 2014; Савва, 2018 и др.). И хотя минералы в составе и свойствах содержат информацию о своей генетической природе, автор этого постулата А. Е. Ферсман (1953) подчеркивает, что с течени-

ем геологического времени может происходить стирание подобной информации. В этом отношении самородное золото можно отнести к одному из наиболее устойчивых минералов, длительное время сохраняющему генетическую информацию благодаря способности противостоять химическому выветриванию и отсутствию хрупких деформаций.

Методическим пособием при проведении минералогических исследований самородного золота на месторождении Агатовское послужили разработки Н. В. Петровской (1973), а также Л. А. Николаевой (1978) и Л. А. Николаевой с соавторами (2023). Самородные минеральные индивиды, образующиеся в природных – «загрязненных» средах (Воробьев, 1990), отражают в составе и свойствах золота не только особенности условий минералообразования, но и последующих преобразований, при различных воздействиях на них (термометаморфизм, выветривание и др.), что позволяет проводить анализ изменчивости типоморфных особенностей золота и получать генетическую интерпретацию условий формирования золоторудных месторождений, а также способствует металлогеническому районированию.

Нами за относительно длительный период работ в этом направлении (1980–2023) на ряде месторождений установлен не совсем обычный типоморфный признак – *золото с внутренней структурой пятнистой неоднородности*. Наблюдения показали, что подобный признак принадлежит золоту из объектов, сближенных с интрузивными телами гранитоидов либо локализованных непосредственно в них. Для рассмотрения проблемы выбрано самородное золото Предсездовской жилы месторождения Агатовское (Магаданская область).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования было отобрано самородное золото из рудных проб-протоочек жилы Предсездовская (см. рис. 1). Изучение морфологии проведено под бинокулярным микроскопом МБС-10 (фотографирование фотоокуляром). Были также изготовлены монтированные в кампаунд препараты и прозрачно-полированные шлифы из бонанцевого участка жилы. Изучение минеральных сростаний проведено под микроскопом AXIOPLAN 2 imaging. Массовые измерения пробности самородного золота выполнены оптическим и рентгено-спектральным микроанализом (CAMEBAX) в Северо-Восточном центре коллективного пользования СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитик Е. М. Горячева. Статистическая обработка измерений пробности прово-

дилась в программе GOLD. Изучение внутренней структуры самородного золота – травление поверхности золотин $\text{CrO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ (фотографирование фотоокуляром). Фотографирование структуры золота с большим разрешением выполнено в ЦКП «ИГЕМ-аналитика» (ИГЕМ РАН) на рентгеноспектральном микроанализаторе «JXA-8200» (JEOL Ltd., Япония), оснащенного пятью волновыми (WD) и одним энергодисперсионным (ED) спектрометрами (параметры съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ и сила тока 20 нА; аналитик – В. И. Таскаев).

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Агатовское находится в Тенькинском районе Магаданской области, 32 км на север от пос. Мадаун (72 км автодороги Палатка–Усть-Омчуг) и в 150 км к северо-востоку от Карамкенского ГОКа (106 км автодороги Магадан–Усть-Нера), на левобережье руч. Полуденный, правого притока р. Холоткан. Месторождение было открыто поисково-съемочной партией И. Н. Малиновского в 1961 г.

Месторождение, по данным С. А. Шубина и М. В. Шубиной (2007 г.), приурочено к крупной Носэгчанской вулканотектонической депрессии (ВТД), которая расположена в центральной части субмеридионального Малтано-Ольского вулканопрогиба Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП). В геологическом строении Носэгчанской ВТД преобладают раннемеловые андезиты и позднемеловые андезибазальты, которые прорваны телами субвулканических крупнопорфировых андезитов. Фундамент структуры сложен нижнеюрскими углеродистыми сланцами верхоянского комплекса.

В пределах ВТД, кроме Агатовского месторождения, выявлены еще несколько рудопроявлений, связанных преимущественно с жилами и зонами прожилкования различного состава, с полями аргиллизированных андезитов и андезибазальтов и зонами дробления.

На западе и востоке ВТД ограничена системами разломов раннемелового заложения, которые имеют характер сбросов. На юго-юго-востоке и северо-северо-западе границы ВТД менее отчетливы и трассируются системами позднемеловых разрывов, по которым вулканические породы испытывали относительные погружения.

МЕСТОРОЖДЕНИЕ АГАТОВСКОЕ

Месторождение приурочено к горстообразному вулканокупольному поднятию, осложняющему западную периферию Носэгчанской ВТД. На площади широко развиты экстрозив-

ные, жерловые и субвулканические образования момолтыкичского дацит-базальтового комплекса, позднеюрско-раннемелового возраста (δJ_3-K_1mm). Состав субвулканических тел отвечает преимущественно трахибазальтам (δJ_3-K_1mm). К-Ar возраст субвулканических трахибазальтов Агатовского месторождения – **136.3 млн л.** (Акинин, Котляр, 1997). Последние вмещают богатейшую Предсездовскую жилу Агатовского месторождения (рис. 1). В непосредственной близости от этой жилы установлен выход поздне-

меловых габбро-диоритов сеймканского габбро-гранодиорит-гранитового комплекса ($\Upsilon\delta K_2s$).

Отмечается переслаивание в разрезе вулканических покровов с осадочно-вулканогенными слоями, что создает неоднородности рудовмещающей среды, влияющие на характер локализации оруденения. Наиболее благоприятными являются пироксен-роговообманковые андезиты, андезибазальты, их туфы с прослоями вулканогенно-осадочных пород момолтыкичской свиты (J_3-K_1mm).

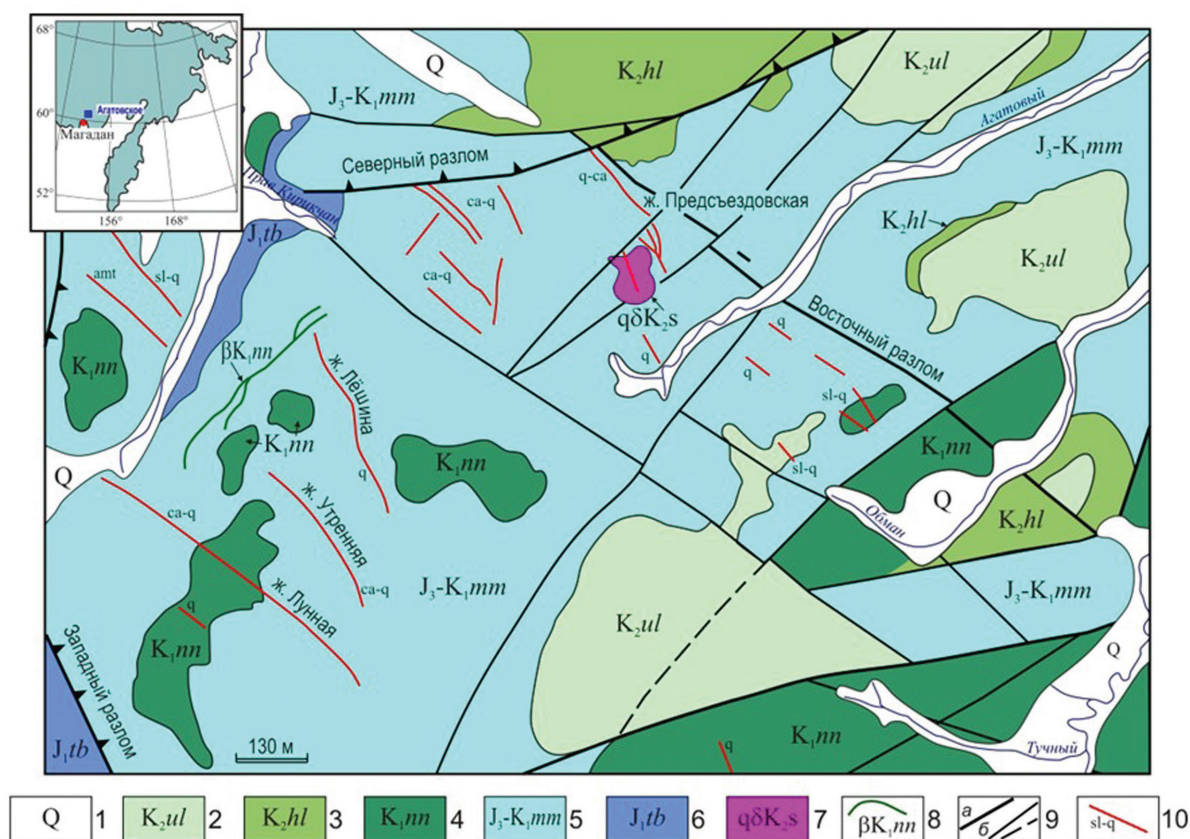


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Агатовское (по А. Э. Ливачу, С. А. Шубину, 2007, с упрощениями): 1 – четвертичные отложения; 2 – улынская свита (двупироксеновые андезиты, андезибазальты, базальты, трахибазальты); 3 – хольчанская свита (туфы, лавы риолитов, риодацитов, дацитов, лавы трахириодацитов, прослои вулканогенно-осадочных пород); 4 – нанкалинская толща (двупироксеновые, плагиоклазовые андезиты, андезибазальты и их туфы); 5 – момолтыкичская свита (андезиты, пироксен-роговообманковые, андезибазальты, базальты, их туфы, прослои вулканогенно-осадочных пород); 6 – таборнинская свита (алевритистые песчаники, линзовиднослоистые песчаники с прослоями мелкозернистых песчаников); 7 – штоки и массивы габбро-диоритов; 8 – дайки базальтов; 9 – разрывные нарушения (а – достоверные, б – достоверные, скрытые под вышележащими образованиями); 10 – гидротермальные жилы: кварцевые (q), сульфидно-кварцевые (sl-q), карбонат-кварцевые (ca-q), кварц-карбонатные (q-ca), аметистовидного кварца (amt).

Fig. 1. Geological structure of the Agatovskoye deposit (after A. E. Livach, S. A. Shubin, 2007, with simplifications): 1 – Quaternary sediments; 2 – Ulyn formation (double-pyroxene andesites, andesibasalts, basalts, trachybasalts); 3 – Kholchan formation (tuffs; lavas of rhyolites, rhyodacites, dacites; lavas of trachyriodacites; interlayers of volcanogenic sedimentary rocks); 4 – Nankala strata (double-pyroxene, plagioclase andesites, andesibasalts and their tuffs); 5 – Momoltykich formation (andesites, pyroxene-hornblende, andesibasalts, basalts, their tuffs, interlayers of volcanogenic sedimentary rocks); 6 – Taborny formation (silty sandstones, lenticular sandstones with interlayers of fine-grained sandstones); 7 – stocks and massifs of gabbro-diorites; 8 – dikes of basalts; 9 – discontinuous faults (a – reliable, b – reliable, hidden under overlying formations); 10 – hydrothermal lodes: quartz (q), sulfide quartz (sl-q), carbonate quartz (ca-q), quartz carbonate (q-ca), amethyst quartz.

Гидротермальные преобразования вмещающих пород подразделяются на региональную пропилитизацию, приконтактные роговики, вторичные кварциты и аргиллизацию (околотрещинную). Пропилитизация представлена преимущественно низкотемпературной фацией (с новообразованиями хлорита, альбита, карбоната, серицита и пирита), охватившей в той или иной степени все вулканы раннего мела и отчасти андезиты улынской свиты (K_2U).

За время изучения в пределах месторождения выявлено более 40 эпитеpmальных жил, а также ряд линейных и штокверкоподобных зон прожилкования. Наиболее крупные жилы – Предсездовская и Лунная, с промышленными содержаниями золота и серебра. Простираение большинства жил северо-северо-западное, реже субширотное. Располагаются они преимущественно в андезитах, пироксен-роговообманковых, андезибазальтах, базальтах и их туфах, момолтыкичской свиты с прослоями вулканогенно-осадочных пород, но изредка отмечаются и в позднемеловых вулканитах улынской свиты, субвулканических и гипабиссальных телах.

ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНЫХ ТЕЛ

Месторождение включает 5 продуктивных кварц-карбонат-адуляровых жил. Рудные тела тяготеют к крупноамплитудным сбросам; сложены сульфидно-карбонат-кварцевыми жилами протяженностью в сотни метров (до 2 км) и мощностью 1–2 м (в раздувах – до 6 м). Характерны рудные столбы, в которых содержания Au достигают 27 290 г/т. Запасы золота – 2.8 т, серебра – 13 т (Недра..., 1996). Отдельные богатые рудные тела отрабатываются начиная с 1960-х гг. по настоящее время. По авторской оценке, из жил месторождения добыто около 10 т золота и 50 т серебра, что значительно превышает первоначальные запасы. Наиболее крупные из них описаны ниже.

Предсездовская жила отличается от других жил месторождения Агатовское более высокой сульфидностью: количество галенита, сфалерита, халькопирита, пирита и марказита в бонанце достигает 15–20 % (рис. 2, в, г). Среднее содержание золота: на участке жилы, длиной 56 м – 1395 г/т, при средней мощности 0.14 м (Шпикерман и др., 2016). В жиле отмечаются две генерации золота (Сидоров и др., 2011). Ранняя, основная генерация мелко- и тонкозернистого золота ассоциируется с халцедоновидным тонкозернистым кварцем, отлагавшимся в основную кварц-сульфидную стадию (рис. 2, г). Поздняя генерация золота, образующая тонкие

пластинки-пленки по спайности кальцита, отлагалась в марказит-карбонатную стадию. Интересно отметить, что при изучении химического состава этих золотин на их поверхности были обнаружены сфалерит и другие минералы, принадлежащие ранней («продуктивной») минеральной ассоциации.

Результаты термо- и криометрических исследований 59 индивидуальных флюидных включений в кальците Предсездовской жилы (Сидоров и др., 2011) показали, что в составе растворов двухфазовых флюидных включений преобладали хлориды Na, K и Mg. Об этом свидетельствуют хлоридные эвтектики растворов включений в температурном интервале от –35 до –39 °С. Полная гомогенизация флюидных включений происходит в узком температурном интервале от 206 до 231 °С, а концентрация солей составляет 3.7–6.0 мас. % – экв. NaCl. Плотность флюида изменяется от 0.88–0.89 г/см³. Полученные температуры гомогенизации должны соответствовать температурам отложения золота, поскольку давление во время формирования золоторудных жил месторождения было небольшим.

Сопоставляя текстуру жилы Предсездовской с другими многочисленными жилами месторождения, нетрудно убедиться, что характеризуемая бонанца расположена ниже основной зоны метакolloидных текстур. Высокие содержания в жиле галенита и сфалерита и отсутствие деформационных текстур (в том числе брекчиевых) позволило отнести эту жилу к «корневым» образованиям (Сидоров и др., 2011).

Жила Лунная, протяженностью 2 км по простиранию и 120 м по падению, на флангах представлена единым телом, а в центральной части разветвляется на серию апофиз, образующих жильную зону мощностью до 6.75 м. Простираение жилы северо-западное, падение на юго-запад под углами 75–80°. Другие жилы месторождения маломощные (0.02–0.3 м), имеют сходную морфологию. Содержание золота и серебра крайне неравномерное, в среднем: золото – 3.9–11.8 г/т, серебро – 38–200 г/т. Сульфидность руд в среднем 5–10 % (Шпикерман и др., 2016). Золото-серебряное отношение варьирует от 5 : 1 до 1 : 100, среднее – 1 : 2 – 1 : 5.

Текстуры жил каркасно-пластинчатые, брекчиевые, друзовые (рис. 2). Главные жильные минералы представлены кварцем и разнообразными карбонатами (кальцитом, доломитом, сидеритом, мангано-сидеритом, родохрозитом и кутнагоритом). Рудные минералы (по степени распространенности): галенит, сфалерит, халь-

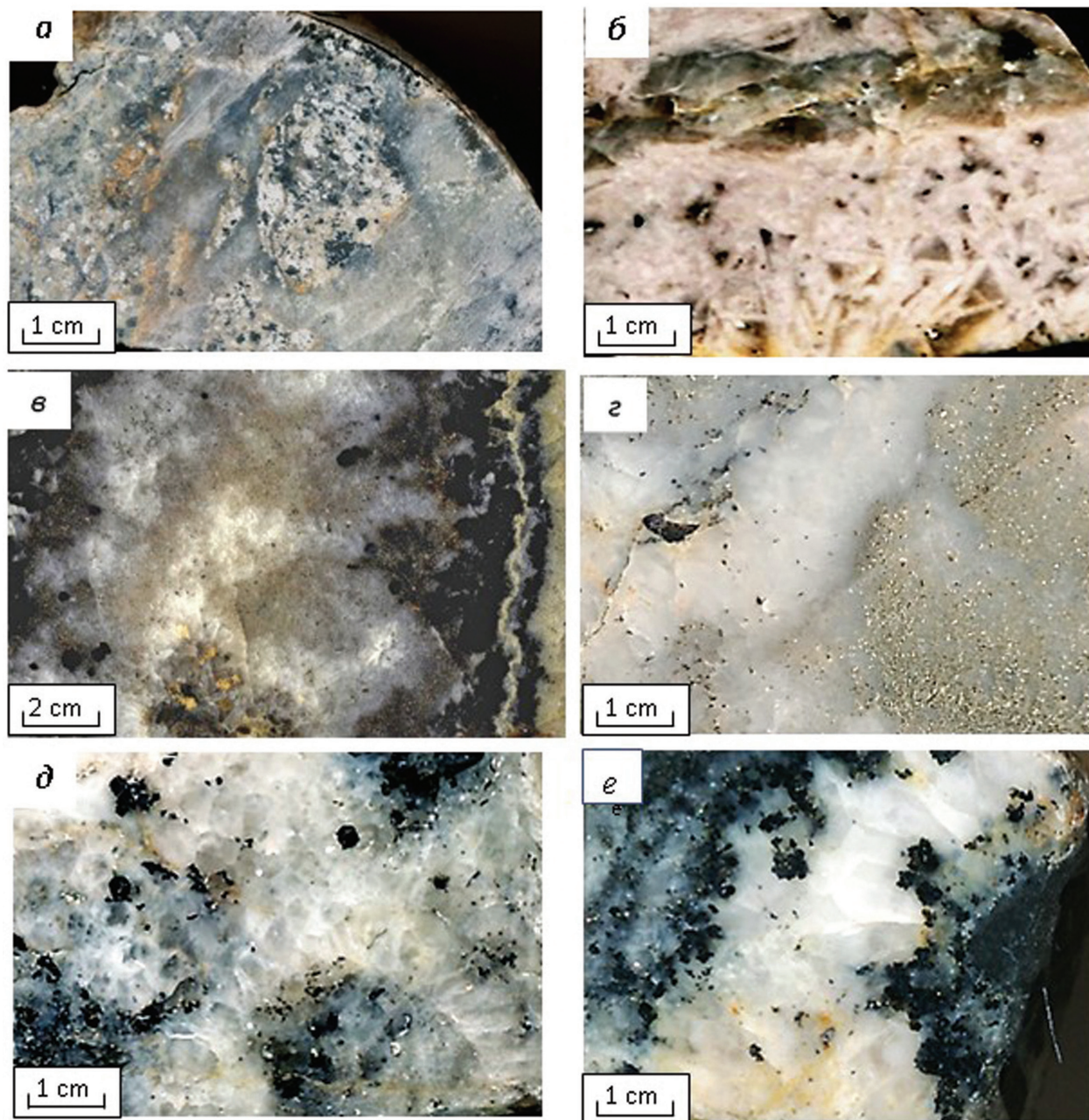


Рис. 2. Текстуры руд Агатовского месторождения: а – брекчиевая (в кварце раннего этапа обломки вмещающих андезитов); б – каркасно-пластинчатая; в – фрагмент среза бонанцевой части кварц-карбонатной Предсездовской жилы на полную мощность; г – густо вкрапленное самородное золото в центральной части жилы Предсездовской (самородное золото в кварц-карбонат-гидрослюдистом материале жилы); д–е – крустификационный кварц с крупными скоплениями сфалерита и галенита.

Fig. 2. Ore textures of the Agatovskoye deposit: а – breccia (fragments of the host andesites in the early-stage quartz); б – frame-and-plate; в – fragment of the full-depth section of the bonanza part of the quartz-carbonate Predsyezdovskaya lode; г – densely impregnated native gold in the central part of the Predsyezdovskaya lode (native gold in the quartz-carbonate-hydromica material of the lode); д–е – crustified quartz with large accumulations of sphalerite and galena.

копирит, марказит, пирит, арсенопирит, пирротин, тетраэдрит, теннантит, гессит, электрум, пираргирит, стефанит, акантит (Шишакова, Эпштейн, 1983; Стружков, Константинов, 2005). Главная продуктивная минеральная ассоциация для большинства жил – золото-сфалерит-галенит-кварцевая.

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА

Морфология самородного золота

Среди частиц самородного золота в различных количествах присутствуют следующие морфологические разновидности: лентовидное, ком-

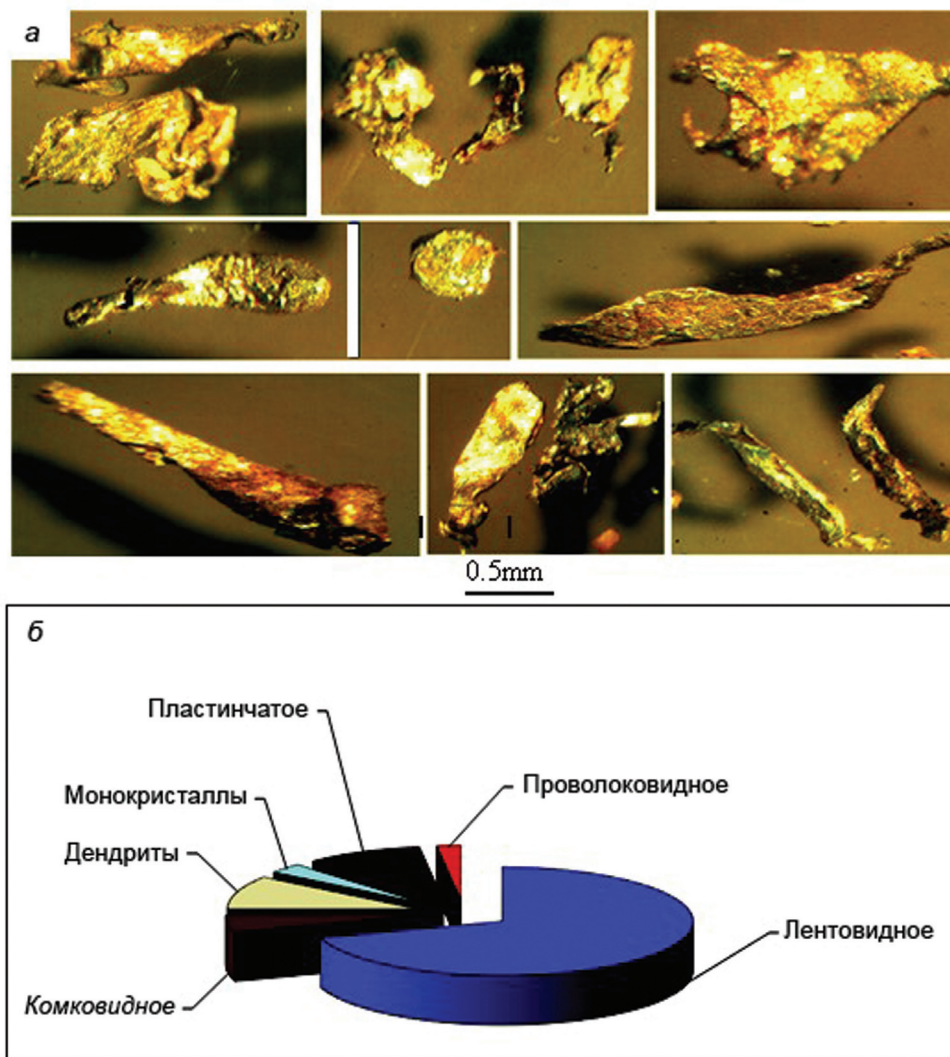


Рис. 3. Морфология самородного золота в рудах месторождения Агатовское: а – разнообразие форм выделения; б – диаграмма распространения золота различной морфологии.

Fig. 3. Morphology of native gold in the ores of the Agatovskoye deposit: а – variety of extraction forms; б – diagram of morphologically various gold abundance.

ковидное, монокристалльное, дендритовидное, проволоковидное (рис. 3, а, б), из них 70 % представлено лентовидным золотом (рис. 3, а). Это золото выделено растворением HF из кварц-карбонатной матрицы.

Минеральные сростания

Самородное золото в рудах сростается преимущественно с кварцем и карбонатом. Крупные сульфидные выделения (галенит и сфалерит) обычно приурочены к зальбандам жил. В незначительных количествах в самородном золоте присутствуют мелкие включения галенита, сфалерита, акантита и пирита. Также присутствуют сростания с блеклой рудой (рис. 5, з). По отношению к арсенопириту отмечается его более позднее отложение (рис. 5, а–в). Кварц-карбонат-

арсенопиритовые прожилки пересекаются самородным золотом. Морфология частиц Au ксеноморфная (рис. 4, д).

Вариации пробыности самородного золота

Выполненные 39 замеров пробыности золота. Гистограмма пробыности самородного золота (рис. 4, е) из жилы Предсездовской месторождения Агатовское имеет полимодальный характер и отражает как его неоднородность, так и полистадийность процесса минералообразования. Также получены следующие статистические показатели:

среднее арифметическое 549.410 ‰;
стандартное отклонение 92.457;
дисперсия – 8548.301 (min: 361 ‰; max: 749 ‰);

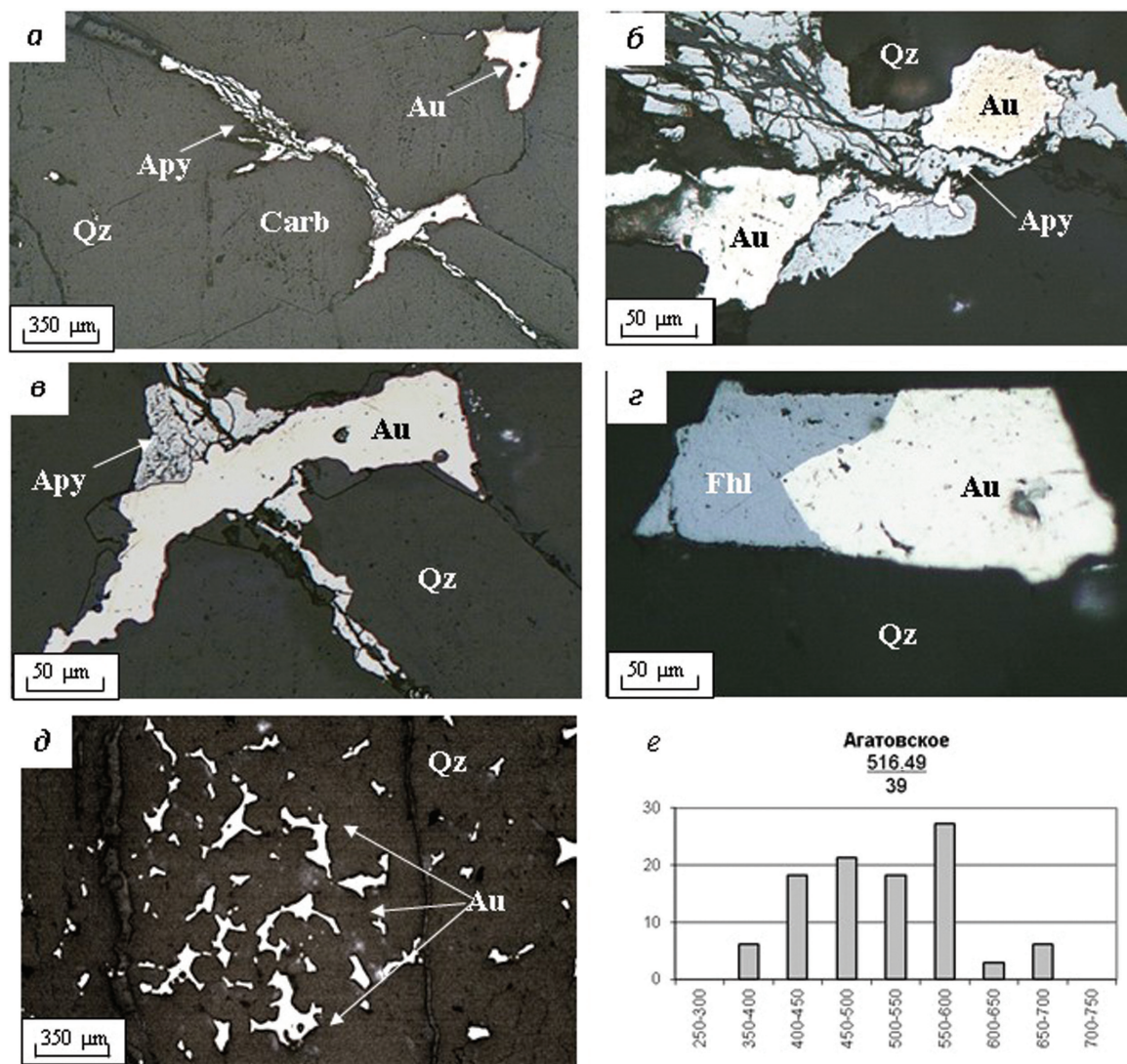


Рис. 4. Минеральные сростания самородного золота: а-в – самородное золото пересекает прожилки арсенопирита; г – сростание самородного золота с блеклой рудой; д – формы многочисленных выделений самородного золота в кварц-карбонатном матриксе, плоскость шлифа (Qz – кварц, Carb – карбонат, Au – золото, Apy – арсенопирит, Fhl – блеклая руда); е – гистограмма пробыности самородного золота Агатовского месторождения: по оси абсцисс – интервалы пробыности, ‰; по оси ординат – частота встречаемости, ‰; в числителе – пробыность, ‰; в знаменателе – количество определений.

Fig. 4. Mineral accretions of native gold: а-в – native gold crossing veins of arsenopyrite; г – accretion with pale ore; д – shapes of numerous native gold separations in a quartz-carbonate matrix, polished section plane; (Qz – quartz, Carb – carbonate, Au – gold, Apy – arsenopyrite, Fhl – pale ore); е – histogram of native gold purity of at the Agatovskoye deposit: the horizontal axis shows the fineness intervals, ‰; vertical, the occurrence frequency, ‰; the numerator, the fineness, ‰; the denominator, the number of definitions.

коэффициент вариации – 0.168;
момент 3-го порядка (M3) – 129 141.586;
коэффициент асимметрии – 0.163;
момент 4-го порядка (M4) – 168 680 222.580;
коэффициент эксцесса – -0.692.

Состав самородного золота

Лазерным рентгеноспектральным анализом в составе золота помимо Ag установлены в сотых и тысячных долях % Fe, Cu, Mn, Pb, Hg (Шило и др., 1992). Эти элементы, по данным указанных исследователей, образуют группы – Au-Hg,

Mn-Fe, Cu-Fe, присущие различным минеральным ассоциациям. При этом привнос Cu и Fe они связывают с пострудным внедрением субвулкана габбро-гранодиоритов сеймканского комплекса (YδK₂S).

Внутренняя структура самородного золота

Выявлены преимущественно структуры с хорошо выраженной зональностью, типичные для низкопробного золота. Реже встречаются структуры грануляции и структуры пятнистой неоднородности (рис. 5).

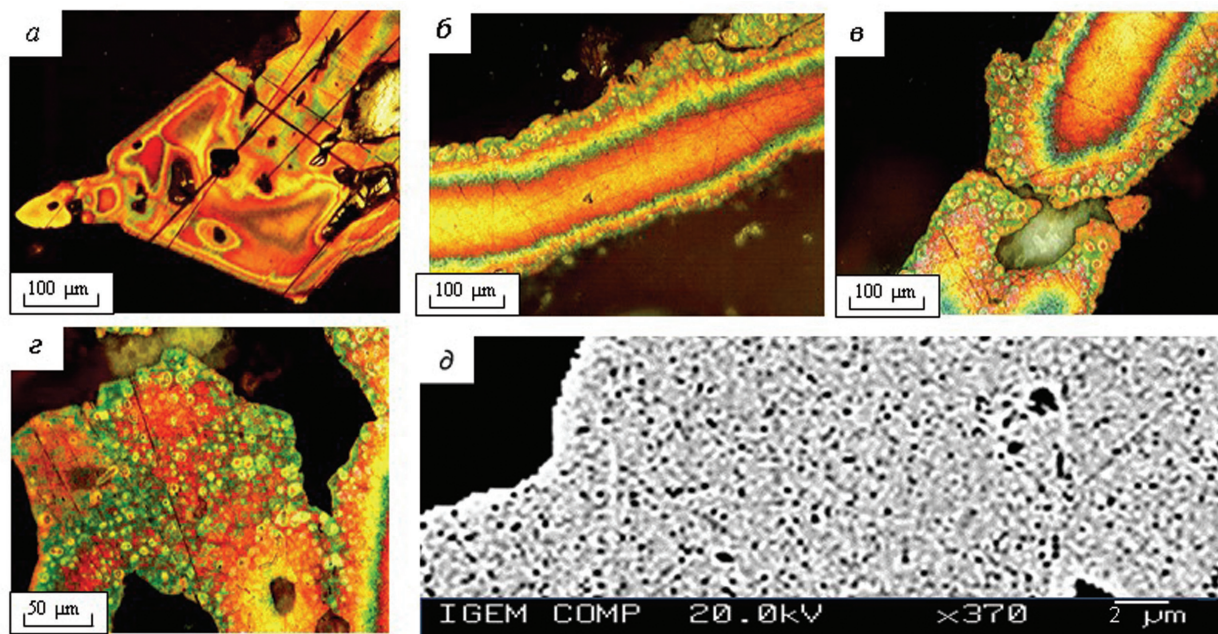


Рис. 5. Внутренние структуры самородного золота месторождения Агатовское: а – ясно-зональные; б – сочетание зональной и пятнистой неоднородности; в – сочетание грануляции (раздвижение межзерновых границ) и пятнистой неоднородности; г – пятнистая неоднородность, д – структура распада Au–Ag с точками зарождения фаз самородного золота (в отраженных электронах).

Fig. 5. Internal structures of the Agatovskoye deposit native gold: а – clear-zoned; б – combination of zonal and spotted heterogeneity; в – combination of granulation (spreading of grain boundaries) and spotted heterogeneity; г – spotted heterogeneity; д – structure of Au–Ag decomposition with the nucleation points of native gold phases (in reflected electrons).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Структура пятнистой неоднородности, выявленная при изучении самородного золота жилы Предсездовская, рассматривается как типоморфный признак самородного золота, испытавшего прогрев в связи с пострудной интрузией, и по сути является следствием термометаморфизма. Она рассматривается нами как структура распада твердого раствора Au–Ag в результате интрузии пострудных позднемеловых габбро-диоритов сеймканского габбро-гранодиорит-гранитового комплекса ($\Upsilon\delta K_2S$), рис. 1.

Подобная структурная неоднородность выявлена нами в самородном золоте из руд ряда других месторождений и рудопроявлений Северо-Востока России: Джульетта, Улахан (Ямский), Школьное (рис. 6, в, г, д), а также в Амурской области на Агние-Афанасьевском месторождении, где рудное поле расположено в надинтрузивной зоне скрытого рудогенерирующего массива (Савва и др., 2004; Юшманов, 2018).

Начиная с 1983 г. А. Патнис и Дж. Мак-Коннелл отмечали, что морфологию структур распада можно использовать для качественного воссоздания термической истории минералов. Это подчеркивал и Ю. К. Воробьев (1990), говоря о том, что форма срастания фаз при распаде

твердого раствора зависит от скорости охлаждения твердого раствора.

Месторождение Агатовское (жила Предсездовская), взятое в качестве примера, – эпitherмальное (близповерхностное) с характерными для этого типа резкоградиентными условиями формирования. Температуры гомогенизации для его ранней кварц-доломитовой фазы 370–320 °C, а поздней – кварц-халцедоновой 150–50 °C (Шило и др., 1992), при этом золото отлагалось одновременно с основной массой сульфидов и сульфосолей и имеет неравномерно пятнистое строение.

Ранее генетическая природа этой необычной структуры рассмотрена в работах В. Г. Моисеенко (1977); в качестве примера структуры распада твердого раствора Au–Ag приведена в работе Л. А. Николаевой с соавторами (2023. С. 26. Рис. 21). Р. А. Амосов и С. Л. Васин (1995) провели длительное травление (24 часа) концентрированной HNO_3 самородного золота Агатовского месторождения со средней пробностью 560 ‰, что привело к полному растворению низкопробной части и образованию «золотого сита» (рис. 6, а). Авторы пришли к выводу, что это структура распада природного твердого раствора Au–Ag.

Как показано выше, на месторождении Агатовское такой распад произошел в результате

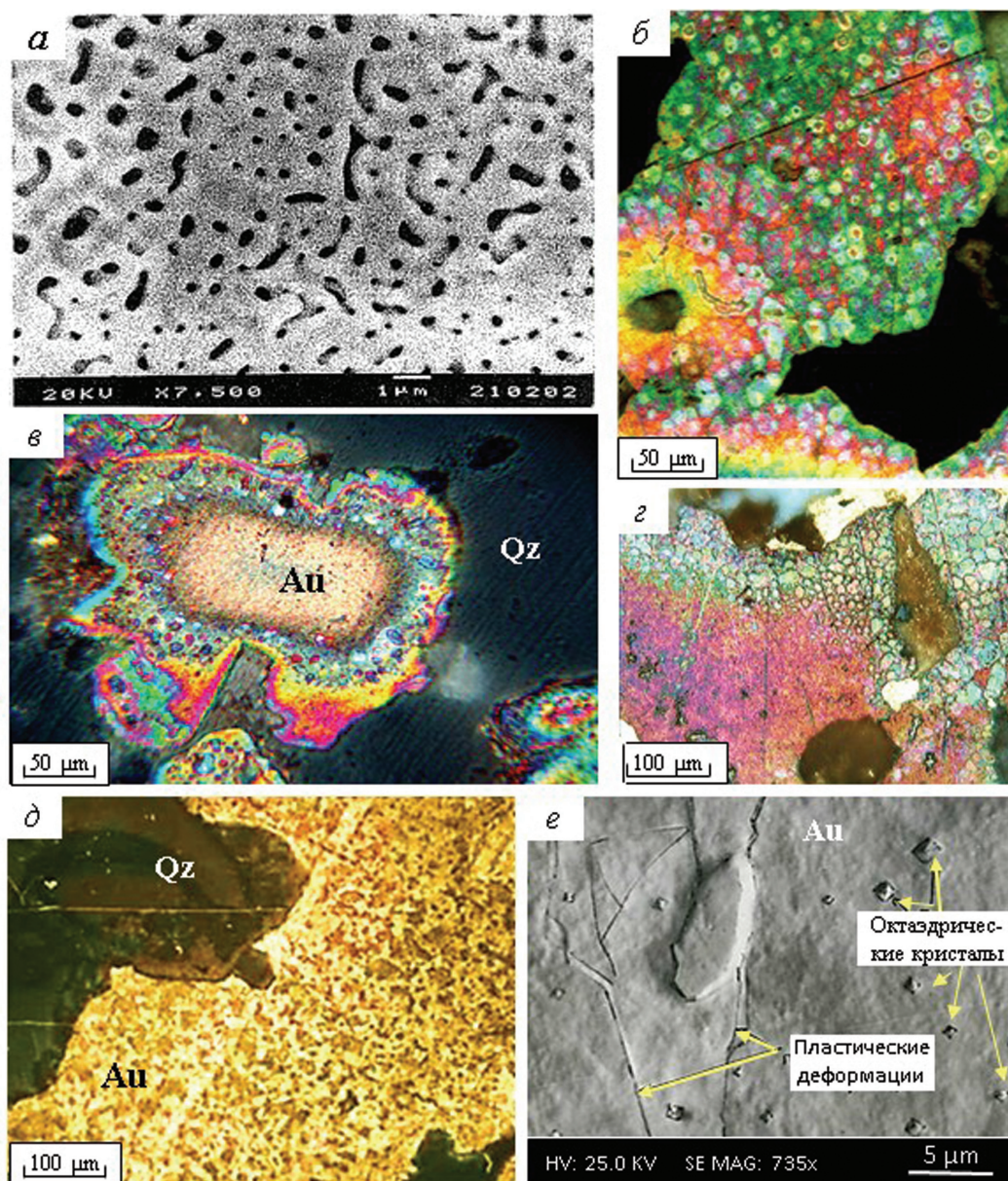


Рис. 6. Структура распада твердого раствора в низкопробном самородном золоте; а-б – Агатовское: а – «Золотое сито» (по Р. А. Амосову, 1995), выявленное глубоким травлением HNO_3 ; снимок в отраженных электронах; б – травление $\text{HCl} + \text{CrO}_3$, оптический микроскоп; в – месторождение Улахан (Ямская площадь) (оптический микроскоп); г – месторождение Джульетта (оптический микроскоп); д – месторождение Школьное: д – (оптический микроскоп); е – в отраженных электронах хорошо видна новообразованная фаза мелких октаэдрических кристаллов (650 ‰) в золотой матрице (809 ‰).

Fig. 6. Structure of the solid solution decomposition in base native gold; а-б – Agatovskoye: а – “Golden Sieve” (after R. A. Amosov, 1995), revealed by deep HNO_3 etching; image in reflected electrons; б – $\text{HCl} + \text{CrO}_3$ etching, optical microscope; в – Ulakhan deposit (optical microscope); г – Julietta deposit (optical microscope); д – Shkolnoye deposit: д – (optical microscope); е – newly formed phase of small octahedral crystals (650 ‰) in a gold matrix (809 ‰) clearly visible in the reflected electrons.

воздействия высокой температуры на самородное золото и сопровождался гетерогенным зарождением новой фазы при относительно низкой температуре распада. Такой механизм, в отличие от гомогенного, характеризуется неравномерным распределением центров зарождения новой фазы (рис. 6, д), и главное, что в этих условиях первоначальная форма зародышей имеет сферическую

форму. В отличие от самородного золота средне-глубинных месторождений, где при сравнительно медленном остывании зародыши приобретают кристаллические грани (рис. 6, д, е). На рис. 6 (д, е) показан пример продолжительного остывания системы на средне-глубинном месторождении Школьное, в результате чего при распаде Au-Ag твердого раствора повышается морфо-

логическое совершенство кристаллов, растущих в твердой фазе матрикса, и возникают мелкие октаэдр.

По мнению ряда исследователей, подобный распад Au–Ag твердого раствора связан с диффузионным перераспределением компонентов, при котором реализуется механизм спиноидального распада, тесно связанного с температурой, а нередко и присутствием микропримесей (Патнис, Мак-Коннелл, 1983; Giletti, 1985; Амосов, Васин, 1995; Палажченко, Неронский, 2004). В основе структур распада лежит диффузионная подвижность компонентов в Au–Ag природном твердом растворе. В данном случае Ag отличается более высокой подвижностью при твердофазной диффузии, что подтверждается систематическим образованием низкопробной каймы на рудном самородном золоте, испытавшем термометаморфизм, а также отгонкой низкопробного золота в межзерновые пространства. Яркий пример выноса Ag при твердофазной диффузии демонстрирует испытывавшее прогрев, самородное золото месторождения Купол (рис. 7), Западная Чукотка (Савва, 2018).

Ю. К. Воробьев (1990) считает, что твердофазная диффузия связана с выравниванием локальных химических потенциалов компонентов и сопровождается разнообразными эффектами, описанными Я. Е. Гегузиным (1979), которые могут использоваться минералогами как индикаторные признаки.

Следует также подчеркнуть, что тепловое воздействие на частицы золота в рудах Агатовского месторождения происходило с разной интенсивностью, т. к. источники прогрева удалены на различные расстояния от золотоносной жилы по всему простиранию. В одних частицах золота нет признаков термометаморфизма (рис. 5, а), в других он привел к образованию структур грануляции, а иногда и к распаду твердого раствора Au–Ag по всей массе золотины (рис. 5, з, д) либо к распаду только во внешней оболочке зонально-неоднородной частицы (рис. 5, б, в). Существенное влияние на структурную стабилизацию золото-серебряных твердых растворов оказывает фактор времени, заключающийся в длительности геологических процессов (Палажченко, Неронский, 2004).

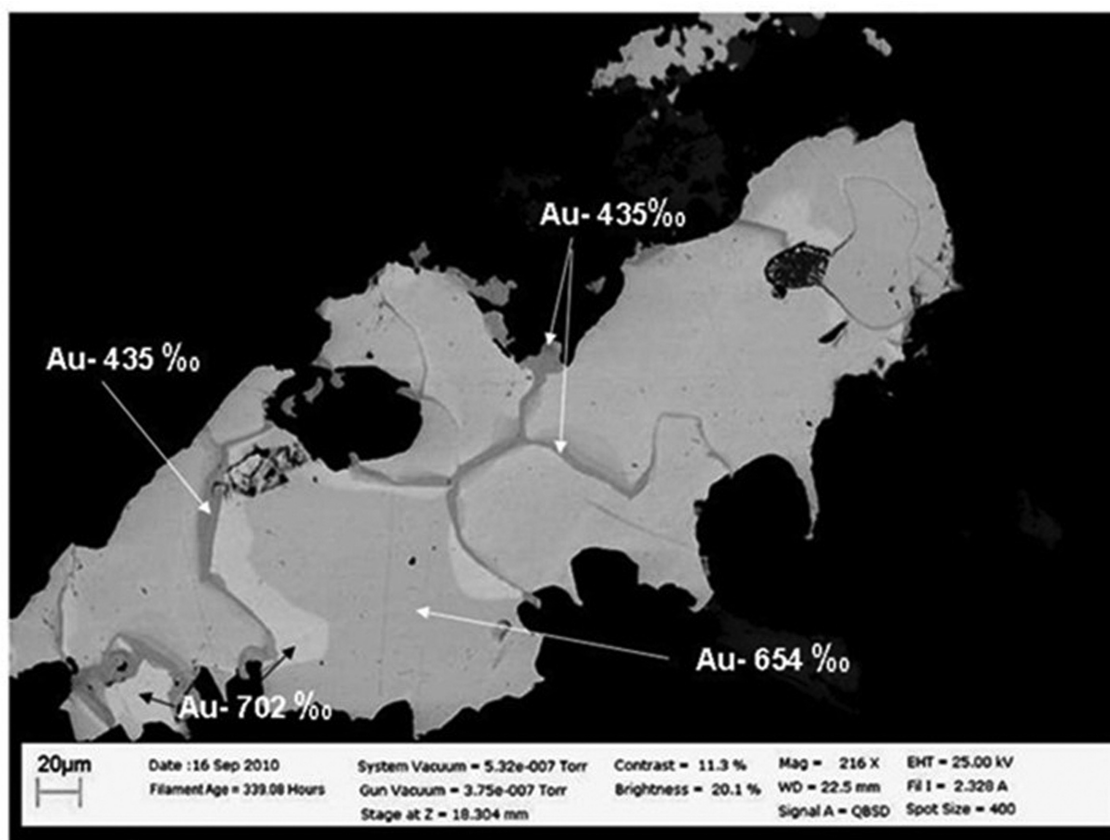


Рис. 7. Пример твердофазной диффузии серебра и отгонки низкопробных фаз самородного золота в межзерновое пространство при термометаморфизме (самородное золото месторождения Купол, Центральная Чукотка).

Fig. 7. Example of solid-phase diffusion of silver and distillation of low-grade native gold phases into the intergranular space under thermal metamorphism (native gold from the Kupol deposit, Central Chukotka).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно констатировать, что импульсом для распада Au-Ag твердого раствора в самородном золоте является термометаморфизм и последующая скорость остывания рудообразующей системы. Для эпитеpмального месторождения Агатовское распад Au-Ag твердого раствора сопровождался гетерогенным зарождением новой фазы при относительно низкой температуре самого распада в резко-градиентных условиях, с последующим возникновением структуры пятнистой неоднородности.

В средне-глубинных условиях распад Au-Ag твердого раствора при прогреве самородного золота приводит к возникновению зарождающихся кристаллических граней. Подобные структуры, связанные с распадом Au-Ag твердого раствора, можно рассматривать в качестве типоморфного поискового признака рудных столбов (бананц) в эпитеpмальных жилах.

Для практики поисковых работ и генетических построений выявленная структура распада Au-Ag твердого раствора может иметь большое значение и даже позволит прогнозировать положение рудного тела относительно выхода интрузивных пород либо скрытого на глубине интрузива.

Работа выполнена при финансовой поддержке тем Госзадания СВКНИИ ДВО РАН и ИГЕМ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Акинин В. В., Котляр И. Н. «Геохрон» – компьютерная база данных изотопного датирования горных пород, минералов и руд Северо-Востока России. Магадан, 1997.

Амосов Р. А., Васин С. Л. Онтогенез самородного золота России. Москва: ЦНИГРИ, 1995. 151 с.

Амузинский В. А. Металлогенетические эпохи и золотоносность рудных комплексов Верхоянской складчатой системы. Якутск: Изд-во Якутского университета, 2005. 248 с.

Воробьев Ю. К. Закономерности роста и эволюции кристаллов минералов. Москва: Наука, 1990. 184 с.

Гегузин Я. Е. Диффузионная зона. Москва: Наука, 1979. 344 с.

Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Москва: Наука, 1975. 337 с.

Моисеенко В. Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. Москва: Наука, 1977. 304 с.

Моисенко В. Г. Метаморфизм золота месторождений Приамурья. Хабаровск: Кн. изд-во, 1965. 125 с.

Недра Магаданской области, 1995 / Ред. М. З. Зинатулин, В. И. Гончаров, В. А. Банин. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1996. 100 с.

Неронский Г. И. Типоморфизм золота месторождений Приамурья. Благовещенск: Амурский научный центр ДВО РАН, 1998. 320 с.

Николаева Л. А. Генетические особенности самородного золота как поисково-оценочные критерии руд и россыпей. Москва: Недра, 1978. 100 с.

Николаева Л. А., Гаврилов А. М., Некрасова А. Н., Яблокова С. В., Шатилова Л. В., Позднякова Н. Н. Изучение самородного золота при геологоразведочных работах. Методические рекомендации. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Отв. ред. А. И. Черных. Москва: ЦНИГРИ, 2023. 74 с.

Новгородова М. И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. Москва: Наука, 1983. 287 с.

Палажченко В. И., Неронский Г. И. Особенности кристаллической структуры природных золото-серебряных твердых растворов // Исследовано в России. 2004. № 7. URL: <https://repository.geologyscience.ru/handle/123456789/13668?show=full&ysclid=md2ptih52w159008075> (дата обращения 29.06.2025).

Патнис А., Мак-Коннелл Дж. Основные черты поведения минералов. Москва: Мир, 1983. 344 с.

Петровская Н. В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). Москва: Наука, 1973. 347 с.

Петровская Н. В., Новгородова М. И. Распад и упорядочение природных золото-серебряных твердых растворов в минералах // Упорядочение и распад твердых растворов в минералах. Москва: Наука, 1980. С. 177–184.

Савва Н. Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. Москва: Триумф, 2018. 544 с.

Савва Н. Е., Прейс В. К. Атлас самородного золота Северо-Востока СССР. Москва: Наука, 1990. 292 с.

Савва Н. Е., Шилиева Н. А., Алевская Н. Л. Топоминология конституционных особенностей самородного золота Нижне-Амурского рудно-россыпного района / Под ред. акад. Н. А. Шило. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. 172 с.

Сахарова М. С., Батракова Ю. А., Ряховская С. К. Зависимость химического состава минералов ряда золото-серебро от физико-химических условий их образования // Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов. Москва: Наука, 1980. С. 213–221.

Сидоров А. А., Прокофьев В. Ю., Волков А. В., Краснов А. Н., Трубкин Н. В. Электрум месторождения Агатовское (Северо-Восток России) и условия его образования // Доклады Академии наук. 2011. Т. 440. № 6. С. 795–799.

Спиридонов Э. М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов. Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвящённой 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 2010. С. 143–171.

Стружков С. Ф., Константинов М. М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Москва: Научный мир, 2005. 320 с.

Ферсман А. Е. Избранные труды. Т. 2. Москва: Академиздат, 1953. 606 с.

Шило Н. А., Сахарова М. С., Кривицкая Н. Н., Ряховская С. К. Минералогия и генетические особенности золото-серебряного оруденения Северо-Западной части Тихоокеанского обрамления. Москва: Наука, 1992. 256 с.

Шишакова Л. Н., Эпштейн Ю. А. Минеральные ассоциации одного из золото-серебряных месторождений Северного Приохотья и особенности их размещения в рудном поле // Минеральные типы рудных месторождений в вулканогенных поясах и зонах активизации Северо-Востока Азии. Владивосток, 1983. С. 51–59.

Шпикерман В. И., Полуботко И. В., Васькин А. Ф., Петухов В. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-55 – Сусуман. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 520 с.

Поступила в редакцию 30.06.2025.

Поступила после доработки 08.07.2025.

Юшманов Ю. П. Геолого-структурные особенности Агние-Афанасьевского месторождения в Нижнем Приамурье // Региональные проблемы. 2018. Т. 21. № 3. С. 15–21 DOI: 10.31433/1605-220X-2018-21-3-15-21.

Giletti B. J. The nature of oxygen transport within minerals in the presence of the hydrothermal water and the role of diffusion // Chemical Geology. 1985. Vol. 53. No. 3/4. P. 197–206.

Knight J. B., Mortensen J. K., Morison S. R. Lode and placer gold composition in the Klondike District, Yukon Territory, Canada; implications for the nature and genesis of Klondike placer and lode gold deposits // Economic Geology. 1999. No. 94. P. 649–664. DOI: 10.2113/gsecongeo.94.5.649.

STRUCTURES OF THE AU–AG SOLID SOLUTION DECOMPOSITION IN NATIVE GOLD EXEMPLIFIED BY THE AGATOVSKOYE DEPOSIT (Russia's North-East)

N. E. Savva¹, A. V. Volkov², N. V. Sidorova²

¹North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow

The issue is considered on the example of the near-surface volcanogenic Agatovskoye deposit, located in the Tenkinsky District of Magadan Oblast. The morphology of native Au particles, their intergrowth with other minerals, assaying variations, and internal structure are described, as well as the spotted heterogeneity not typical for low-assay gold and caused by thermometamorphism associated with post-magmatic intrusions and subvolcanoes in the deposit area. The features of the Au–Ag solid solution decomposition structures in deposits of different depths are discussed. It is shown that the method of the Au–Ag solid solution decomposition depends on the cooling rate of the ore-forming system and can be used as a typomorphic feature, both in prospecting and for genetic constructions. The impulse for the Au–Ag solid solution decomposition in native gold is its thermal metamorphism and the subsequent cooling rate of the ore-forming fluid.

Keywords: Agatovskoye deposit, typomorphism of native gold, structures of Au–Ag solid solution decomposition.

REFERENCES

Akinin, V. V., Kotlyar, I. N., 1997. “Geochron”, Computer Database for Isotope Dating of Rocks, Minerals, and Ores in Russia's North-East. Magadan [In Russian].

Amosov, R. A., Vasin, S. L., 1995. Ontogenesis of Native Gold in Russia. Moscow, TsNIGRI [In Russian].

Amuzinsky, V. A., 2005. Metallogenic Epochs and Gold Content of Ore Complexes within the Verkhoyansk Folded System. Yakutsk, North-Eastern Federal University in Yakutsk [In Russian].

Fersman, A. E., 1953. Selected Works. Vol. 2. Moscow, Akademizdat [In Russian].

Geguzin, Ya. E., 1979. Diffusion Zone. Moscow, Nauka [In Russian].

Giletti, B. J., 1985. The Nature of Oxygen Transport within Minerals in the Presence of the Hydrothermal Water and the Role of Diffusion, *Chemical Geology*. 53 (3/4), 197–206.

Grigoryev, D. P., Zhabin A. G., 1975. Ontogeny of Minerals. Moscow, Nauka [In Russian].

Knight, J. B., Mortensen, J. K., Morison, S. R., 1999. Lode and Placer Gold Composition in the Klondike District, Yukon Territory, Canada; Implications for the Nature and Genesis of Klondike Placer and Lode Gold Deposits, *Economic Geology*. 94, 649–664. DOI: 10.2113/gsecongeo.94.5.649.

Moiseyenko, V. G., 1977. Geochemistry and Mineralogy of Gold in the Far East Ore Districts. Moscow, Nauka [In Russian].

Moiseyenko, V. G., 1965. Gold Deposits Metamorphism in Amur Oblast. Khabarovsk [In Russian].

Neronsky, G. I., 1998. Gold Deposits Typomorphism in Amur Oblast. Blagoveshchensk, Amur Scientific Center FEB RAS [In Russian].

- Nikolayeva, L. A., 1978. Genetic Features of Native Gold as Search and Evaluation Criteria for Ores and Placers. Moscow, Nedra [In Russian].
- Nikolayeva, L. A., Gavrilov, A. M., Nekrasova, A. N., Yablokova, S. V., Shatilova, L. V., Pozdnyakova, N. N., 2023. Native Gold Studies in Geological Prospecting. Methodological Recommendations. 2nd ed., rev. and exp. Ed. A. I. Chernykh. Moscow, TsNIGRI [In Russian].
- Novgorodova, M. I., 1983. Native Metals in Hydrothermal Ores. Moscow, Nauka [In Russian].
- Palazhchenko, V. I., Neronsky, G. I., 2004. Crystal Structure Features of Natural Gold and Silver Solid Solutions, *Investigated in Russia*. 7. URL: <https://repository.geologyscience.ru/handle/123456789/13668?show=full&ysclid=md2ptihs2w159008075> (accessed 29.06.2025) [In Russian].
- Patnis, A., McConnell, J., 1983. Basic Features of Mineral Behavior. Moscow, Mir [In Russian].
- Petrovskaya, N. V., 1973. Native Gold: General Characteristics, Typomorphism, Genesis Issues. Moscow, Nauka [In Russian].
- Petrovskaya, N. V., Novgorodova, M. I., 1980. Decomposition and Ordering of Natural Gold-Silver Solid Solutions in Minerals, *Ordering and Decomposition of Solid Solutions in Minerals*. Moscow, Nauka, 177–184 [In Russian].
- Sakharova, M. S., Batrakova, Yu. A., Ryakhovskaya, S. K., 1980. Dependence of Gold-Silver Series Minerals Chemical Composition on the Physical and Chemical Conditions of Their Formation, *Scientific Foundations and Practical Use of Mineral Typomorphism*. Moscow, Nauka, 213–221 [In Russian].
- Savva, N. E., 2018. Silver Mineralogy in Russia's North-East. Moscow, Triumph [In Russian].
- Savva, N. E., Preis, V. K., 1990. Atlas of Native Gold in the USSR's North-East. Moscow, Nauka [In Russian].
- Savva, N. E., Shilyayeva, N. A., Alevskaya, N. L., 2004. Topographic Mineralogy of Constitutional Peculiarities of Native in Gold in the Lower-Amur Placer Region. Ed. Acad. N. A. Shilo. Magadan, NEISRI FEB RAS [In Russian].
- Shilo, N. A., Sakharova, M. S., Krivitskaya, N. N., Ryakhovskaya, S. K., 1992. Mineralogy and Genetic Features of Gold-Silver Mineralization in the North-Western Part of the Pacific Rim. Moscow, Nauka [In Russian].
- Shishakova, L. N., Epshtein, Yu. A., 1983. Mineral Associations of One of the Gold-Silver Deposits in Northern Priokhotye and Features of Their Placement in the Ore Field, *Mineral Types of Ore Deposits in Volcanic Belts and Zones of Activation in the North-East of Asia*. Vladivostok, 51–59 [In Russian].
- Shpikerman, V. I., Polubotko, I. V., Vaskin, A. F., Petukhov, V. V., 2016. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (3rd Generation). Verkhoyansk-Kolyma Series. Sheet R-55 – Susuman. Explanatory Note. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory [In Russian].
- Sidorov, A. A., Prokofyev, V. Yu., Volkov, A. V., Krasnov, A. N., Trubkin, N. V., 2011. Electrum of the Agatovskoye Deposit (Russia's North-East) and the Conditions of Its Formation, *Proceedings of the Academy of Sciences*. 440 (6), 795–799 [In Russian].
- Spiridonov, E. M., 2010. Review of Gold Mineralogy in the Leading Types of Au Mineralization, *Gold of the Kola Peninsula and Adjacent Regions. Proceedings of the All-Russia Scientific Conference (with International Participation) Dedicated to the 80th Anniversary of the Kola Science Centre RAS*. Apatity, 143–171 [In Russian].
- Struzhkov, S. F., Konstantinov, M. M., 2005. Metallogeny of Gold and Silver in the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt. Moscow, Nauchny Mir [In Russian].
- Subsurface Resources of Magadan Oblast, 1995. 1996. Eds. M. Z. Zinnatulin, V. I. Goncharov, V. A. Bannin. Magadan, NEISRI FEB RAS [In Russian].
- Vorobyov, Yu. K., 1990. Mineral Crystal Regularities of Growth and Evolution. Moscow, Nauka [In Russian].
- Yushmanov, Yu. P., 2018. Geological Structural Features of the Agnie-Afanasyevsky Deposit in the Lower Priamurye, *Regional Problems*. 21 (3), 15–21. DOI: 10.31433/1605-220X-2018-21-3-15-21 [In Russian].