

## МЕТАКОЛЛОИДНОЕ ЗОЛОТО

М.И. Новгородова

Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, [mi@fmm.ru](mailto:mi@fmm.ru)

Исследованы процессы агрегации и раскристаллизации природного коллоидного золота, образованного механическим путем при истирании золотин в современных россыпях и в процессе гидротермального золь-гель синтеза.

Показано, что инициальной формой коагулята, в первом случае, является рыхлый гетеродисперсный глобулярный осадок, преобразованный в дендритоподобные сростки и пленки с порами гексагональных очертаний. Во втором случае, — компактные сгустки и пленки, преобразованные в процессе синерезиса и коалесценции в плоские золотины мозаично-блокового строения. Установлен новый агрегативный тип кор-шелл структур золота с обогащением блоков золотом, а межблокового пространства серебром. Для наночастиц золота установлены эпитаксиальные соотношения между золотом и кварцем по закону  $(10\bar{1}1)_{\text{SiO}_2} \parallel (001)_{\text{Au}}$  и  $[12\bar{1}0]_{\text{SiO}_2} \parallel [100]_{\text{Au}}$ .

В статье 1 таблица, 7 рисунков, список литературы из 18 названий

Коллоидное золото, по общепринятому определению, — это металлическое золото, состоящее из гидрофобных, положительно заряженных частиц нанометровых размеров, находящихся в виде суспензии в жидкости; двухфазная система с жидкой дисперсионной средой и ультрамалыми частицами золота является золей золота, а выпадающий хлопьевидный осадок — гелем золота. Процесс коагуляции золя золота, начинающийся в жидкой фазе под действием электролитов, сопровождается быстрой раскристаллизацией осадка, его старением и синерезисом с обособлением дисперсных фаз в остаточной все еще гетерогенной дисперсионной жидкости с последующей коалесценцией твердых наночастиц. Метаколлоидным называется золото, образованное за счет раскристаллизации гелевого осадка.

Процесс образования коллоидного золота в природе следует указанной общеизвестной схеме, реализуемой, в основном, в двух различных геологических обстановках. Одна из них связана с образованием тонкого коллоидного слоя с тончайшей взвесью золота над поверхностью золотин, истирающейся под влиянием тонкого клатического материала в водном потоке в аллювии при нормальных температуре и давлении. Время механического воздействия на золото по геологическим меркам незначительно (месяцы и годы), хотя существенно превосходят длительность (часы и дни) экспериментов подобного рода. Другой, наиболее распространенный в природе способ, — гидротермальный золь-гель синтез коллоидного золота, осуществляемый в периоды спада давлений в гидротермальной системе вследствие резкого пересыщения растворов в локальных участках формирую-

щихся золото-кварцевых рудных тел, в основном, эпитеермальных месторождений. Выпадение коагулятов обусловлено реакциями восстановления высококонцентрированных растворенных солей золота с образованием неустойчивого золя золота. Процесс происходит при повышенных температурах (~200°C), давлениях до 0.5 ГПа, в многокомпонентных растворах слабой солёности щелочного типа (pH 8.5—9.0) с растворенными солями (преобладающие  $\text{HSiO}_3 \cdot \text{HCO}_3^-$ ) и газами  $\text{N}_2 > \text{CO}_2 > \text{H}_2\text{S}$  (Лазько и др., 1981). Быстро протекающие начальные стадии природного золь-гель синтеза сменяются длительным периодом агрегации и преобразования, исчисляющимся десятками миллионов лет. Признаки первоначальной гелевой природы вещества почти нацело стираются; следы их могут быть обнаружены путем исследования текстурно-структурных соотношений минеральных агрегатов, что послужило в середине прошлого столетия темой специальных исследований (Текстуры..., 1958).

Целью настоящего исследования явилось выяснение особенностей агрегации коллоидного золота в природных процессах. Объектами исследования послужили образцы самородного золота из кварцевых жил эпитеермальных месторождений Забайкалья (Балей-Тасеевское) и Колымы (Агатовское), а также россыпное золото из современных аллювиальных отложений бассейна реки Лены (Восточная Сибирь). Работы проводились с помощью микрорентгеноспектрального анализа и методов аналитической электронной микроскопии (сканирующей и просвечивающей) с применением прицельных реплик со свежих либо протравленных сколов образцов.

### Метакolloидное золото в речном аллювии

Каймы и наросты переотложенного золота на золотилах из россыпей известны давно под названием нового золота. Оно изучалось долгое время, начиная с ранних работ Ф. Фрейза (Freize, 1931), а позднее описывалось в работах П. Рамдора (Рамдор, 1962), Н.В. Петровской (Петровская, 1973) и многих других исследователей. Известно, что процессы коррозии и облагораживания поверхности золотин с образованием высокопробных оболочек предшествуют образованию нового золота, содержащего в отличие от высокопробных оболочек заметные количества примеси серебра. В современных россыпях при относительно кратковременном пребывании золотин в речном аллювии высокопробная оболочка часто отсутствует, и новое золото осаждается на коррозионную поверхность частиц первичного золота.

На коррозионной поверхности исследуемой плоской частицы золота из россыпи р. Утахан (Ленский район, Восточная Сибирь) толщина пленки нового золота составляет 20–30 микрон. Прерывистая, не полностью покрывающая поверхность золотины пленка сложена рыхлым агрегатом гетеродисперсных глобулярных частиц, одиночных или сегрегированных. Одиночные глобулы идеально шаровидной формы имеют размеры в диаметре от 20 нм до 120 нм; они образуют также сдвоенные сростки с точечной поверхностью соприкосновения (рис. 1). Дальнейшее развитие процесса слияния (коалесценции) глобул приводит к образованию изогнутых проволоковидных сростков с боковыми ответвлениями под углами, близкими к 90° и 60°. На концах таких дендритоподобных сростков сохраняется глобулярная форма. Окончательным результатом агрегирования первично глобулярных форм золота является формирование пористой пленки с неровной поверхностью. Наиболее крупные поры, размером до 700 нм, имеют характерные гексагональные очертания, унаследованные от дендритоподобных сростков с боковыми ветвями, ориентированными под углами 60° и 90° к основной стволочной части.

В отличие от нанометровых одиночных глобул более крупные (сотни нанометров в диаметре) шаровидные окончания боковых ветвей дендритоидов в ряде случаев покрыты мелкими (10–20 нм) треугольными висячими либо изогнутыми под углом 120° тонкими пластинчатыми наростами. Часть таких шаровидных образований слабо по-

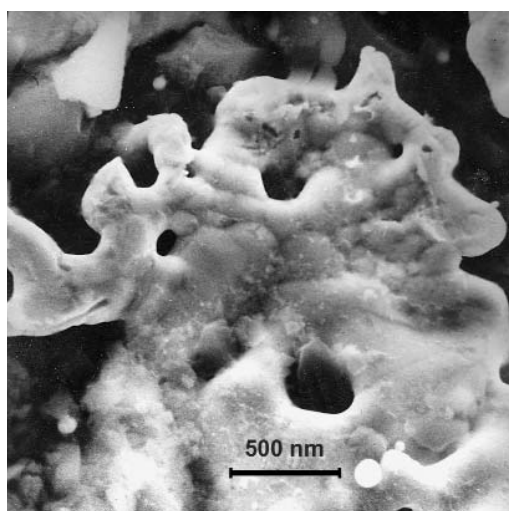
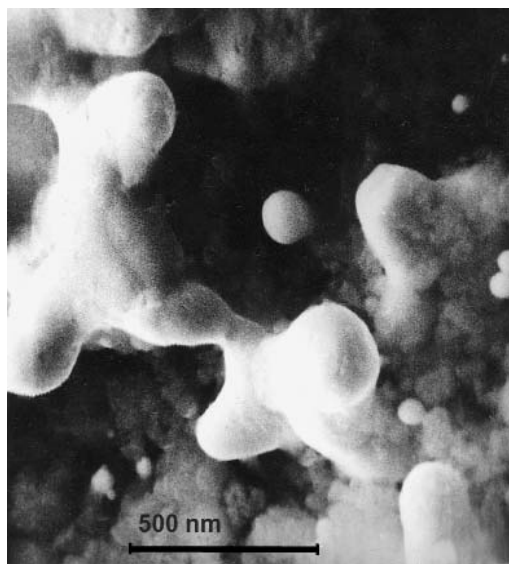
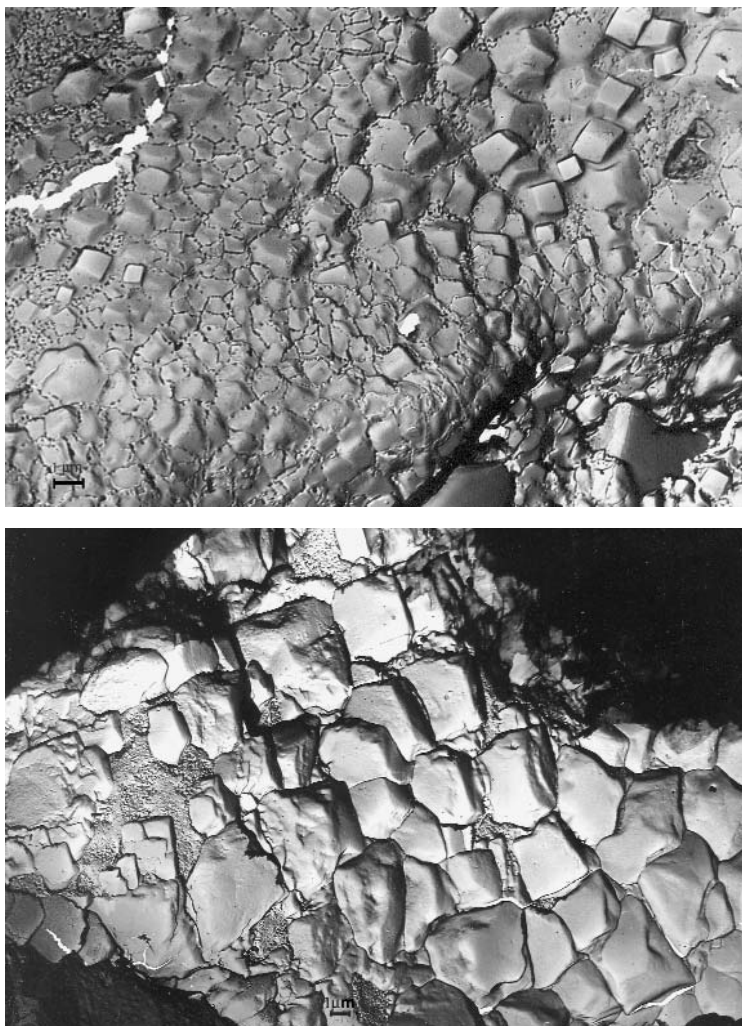


Рис. 1. Глобулярные наросты на поверхности россыпного золота: а – дендритовидные сростки разноразмерных глобул; б – пленка сросшихся глобул. РЭМ, длина масштабных линеек 100 и 500 нм

лигонизирована. Несмотря на отсутствие четкой кристаллографической огранки, как мелкие, так и более крупные сегрегированные глобулы дают хорошо разрешенные кольцевые картины микродифракции, характерные для гцк – структуры поликристаллического золота.

### Метакolloидное золото в эпитеpмальных месторождениях

Метакolloидное золото распространено в золото – кварцевых и золото-сульфид-



**Рис. 2.** Пористые трещины синерезиса и блоки кубической формы в золоте на кварце из Агатовского месторождения (Кольма). ПЭМ, травл., реплика, длина масштабной линейки 1 микрон

но-кварцевых рудах эпитермальных золото-серебряных месторождений в составе кварцевых жил с полосчатой и фестончато-полосчатой колломорфной текстурой. Скопления золота располагаются согласно с тонкофестончатými изогнутыми слоями халцедоновидного кварца либо насыщают своими тонкими включениями тонкозернистые кварцевые агрегаты, окрашивая их в буроватые и желтоватые цвета. Отмечались также (Петровская, 1973) округлые овоидные скопления золота, а в тонких полосках отслаивания — рыхлые агрегаты нитевидного и лентовидного золота. В месторождениях подобного типа, известных во всем мире, золото содержит переменное количество примеси Ag вплоть до высоких концентраций (обычно 30–40% Ag), отличается морфологическим разнообразием, встречаясь в виде кристаллов

и их сростков, дендритов, скелетных образований и ксеноморфных пластинок. Все выделения золота характеризуются мозаично-блоковым строением, отсутствующим в зернах золота из месторождений иных генетических типов.

Мозаичность высокосеребристого золота была открыта во второй половине прошлого столетия, и тонкие детали внутреннего строения золотин детально рассмотрены ранее (Петровская, Фролова, 1969; Петровская, 1973; Петровская и др., 1977). Генезис мозаично-блоковых структур трактовался с общих позиций; допускалась их полигенная природа с накоплением примесей в фронтальной части послойно растущих граней и (или) с посткристаллизационными преобразованиями твердого золото-серебряного раствора, слагающего золотины (Петровская, 1973).

Новый взгляд на происхождение мозаично-блоковых структур золота или шире, на происхождение характерных структур агрегатов метакolloидного золота, излагаемый в настоящей работе, основан на анализе особенностей ростовых явлений в процессе природного золь-гель синтеза, имевшего место при формировании эпitherмальных золото-серебряных месторождений.

Ведущую роль в образовании сложных структур метакolloидного золота играют многоступенчатые процессы старения коагулята, выпадающего из раствора на минеральную матрицу в виде плоских островковых пленок либо в виде округлых или удлинённых сгустков.

Начальной стадией старения (Ostwald ripening mechanism) плоских растекшихся пленок является образование трещин синерезиса, разбивающих гелевый осадок на блоки, окаймленные тонкопористым остаточным веществом. Степень пористости в каймах достигает 50%; форма пор округлая, размеры пор 30–100 нм. Толщина кайм от 100 нм до 2–3 микрон. Блоки, размером около 1 микрона, с намечающимся в центре бургом преобразуются в кристаллические многогранники, ориентированные тройной осью перпендикулярно плоскости (110) на поверхности матрицы. Форма кристаллов преимущественно кубическая, иногда осложненная гранями октаэдра и додекаэдра (рис. 2). Процесс собирательной кристаллизации (коалесценции) не всегда доходит до образования хорошо оформленных кристаллических многогранников, оставляя выделившиеся блоки в виде стяжений округлой или неправильной формы, лишь слабо полигонизированных. Наряду с кубической отмечалась и октаэдрическая форма блоков.

При осаждении и последующей раскристаллизации золотых пленок на поверхности граней ромбоэдра кварца наблюдается закономерное расположение кубических блоков золота по закону  $(001)_{Au} \parallel (10\bar{1}1)_{SiO_2}$ . Графическое сопоставление двух разнородных соприкасающихся плоскостей (рис. 3) показывает параллельную ориентировку рядов  $[\bar{1}00]$  и  $[010]$  атомов золота и кремнекислородных тетраэдров в рядах по  $[\bar{1}2\bar{1}0]$  и  $[10\bar{1}2]$ . Сечения в тех же плоскостях структур золота и кварца совпадают по площади с точностью до  $\pm 1,5\%$  при наложении 25 элементарных ячеек золота на 12 элементарных ячеек кварца. Учитывая псевдокубичность кристаллов кварца ромбоэдрического габитуса —  $\text{pr}(10\bar{1}1):(\bar{1}101) = 85^\circ 46'$ , можно говорить об эпитаксии золота и кварца, почти точно соб-

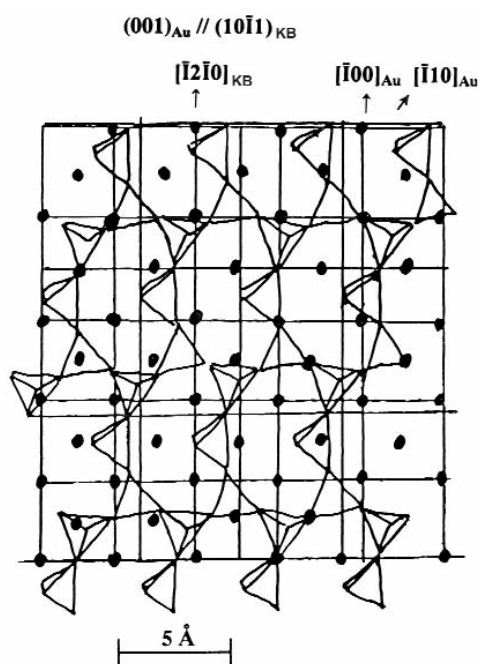


Рис. 3. Графическое совмещение плоскостей (001) золота и (101) кварца

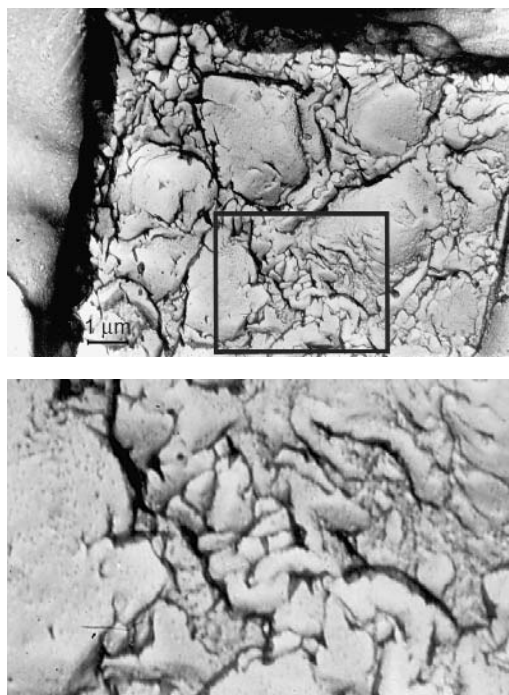


Рис. 4. Искаженные «вязаные» формы наночастиц золота в межблочном пространстве. ПЭМ, травл., реплика. Длина масштабной линейки 1 микрон (a) и 100 нм (b). Балей-Тасеевское месторождение (Забайкалье)

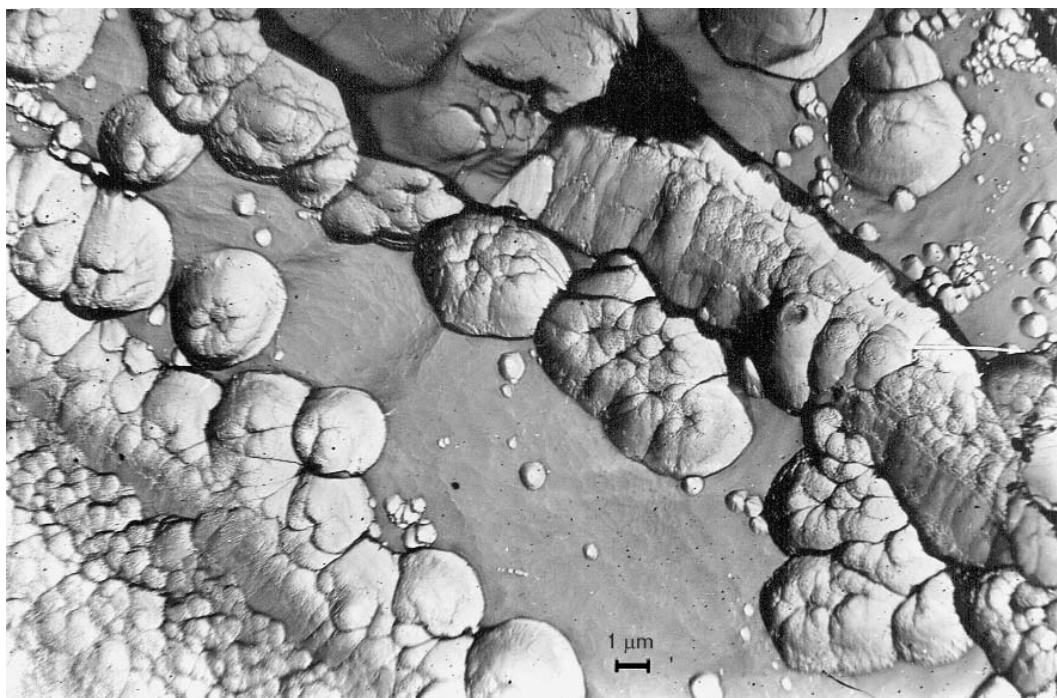


Рис. 5. Округлые и столбчатые агрегаты наночастиц золота на кварце. ПЭМ, травл., реплика. Длина масштабной линейки 1 микрон. Агатовское месторождение (Кольма)

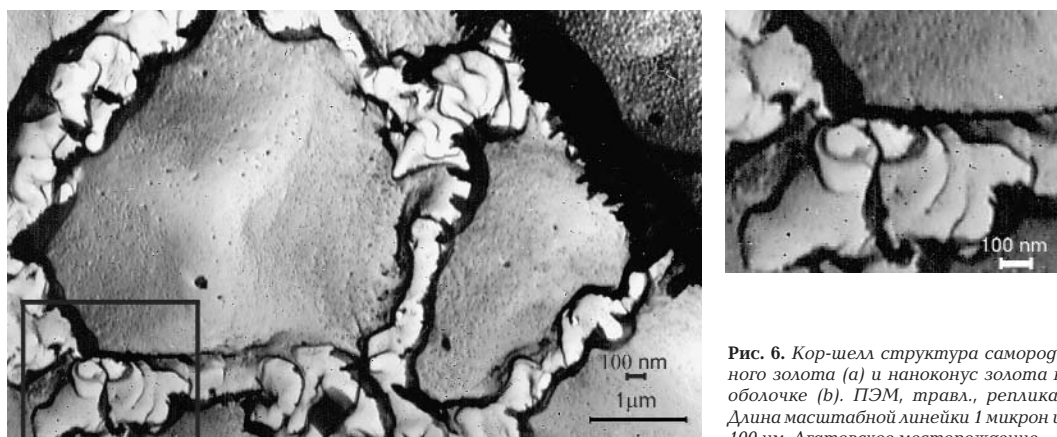


Рис. 6. Кор-шелл структура самородного золота (а) и наноконус золота в оболочке (б). ПЭМ, травл., реплика. Длина масштабной линейки 1 микрон и 100 нм. Агатовское месторождение

людаемой при размерах нарастающих на плоскость ромбоэдров кварца частиц золота не более 2 нм. При увеличении размеров частиц параллельность плоскостей двух минералов нарушается, возникающие напряжения приводят к возникновению линейных дислокаций, а последние — к закручиванию плоскостей (001) золота, что отмечалось ранее (Новгородова, 2004).

Собирательная кристаллизация, сопровождающая процессы синерезиса, имела место и при преобразовании межблочного

остаточного вещества. Тонкопористая целлюлярная структура кайм сменяется дендритовидными или «вязаными» формами изогнутых укрупненных (до 100–150 нм) частиц золота (рис. 4).

Сложные наноструктуры метакolloидного золота, упомянутые в предшествующей работе (Новгородова, 2004), также обязаны своим возникновением явлениям старения геля, выпадающего в виде сгустков на поверхность зерен кварца. Типичные структуры почковидных скоплений золота с одним или более отве-

Таблица 1. Вариации состава (мас.%) золота мозаично-блокового строения

№ обр., месторож- дение	Фаза	Au	Ag	Сумма	Стехиометрия	
					Эмпирическая	Теоретическая
КС 1390	6-1	83.94	13.60	97.53	Au <sub>3,08</sub> Ag <sub>0,92</sub>	Au <sub>3</sub> Ag
Балей-	6-2 блок	99.69	1.10	100.79	Au <sub>3,92</sub> Ag <sub>0,08</sub>	Au
Тасеев-	6-3	85.17	13.28	98.45	Au <sub>3,11</sub> Ag <sub>0,89</sub>	Au <sub>3</sub> Ag
ское	6-4	73.38	25.33	98.66	Au <sub>4,90</sub> Ag <sub>3,10</sub>	Au <sub>5</sub> Ag <sub>3</sub>
	6-5	81.34	17.02	98.36	Au <sub>3,17</sub> Ag <sub>0,83</sub>	Au <sub>3</sub> Ag
	8 блок	89.14	9.00	98.14	Au <sub>3,37</sub> Ag <sub>0,62</sub>	Au
КС 845	10	87.83	10.99	98.82	Au <sub>3,25</sub> Ag <sub>0,75</sub>	Au <sub>3</sub> Ag
Балей-	11	74.84	24.37	99.21	Au <sub>5,00</sub> Ag <sub>3,00</sub>	Au <sub>5</sub> Ag <sub>3</sub>
Тасеев-	12 блок	92.15	5.33	97.48	Au <sub>3,62</sub> Ag <sub>0,38</sub>	Au
	13	80.86	17.95	98.81	Au <sub>2,85</sub> Ag <sub>1,15</sub>	Au <sub>3</sub> Ag
	14	71.15	27.57	98.72	Au <sub>4,68</sub> Ag <sub>3,32</sub>	Au <sub>5</sub> Ag <sub>3</sub>
А-1234	А-1 блок	63.14	36.42	99.56	Au <sub>1,95</sub> Ag <sub>2,05</sub>	AuAg
Агагов-	А-1'	54.70	44.25	98.95	Au <sub>3,22</sub> Ag <sub>4,78</sub>	Au <sub>3</sub> Ag <sub>5</sub>
	А-2 блок	64.12	35.21	99.33	Au <sub>1,99</sub> Ag <sub>2,00</sub>	AuAg
	А-3 блок	64.10	35.71	99.81	Au <sub>1,98</sub> Ag <sub>2,02</sub>	AuAg
	А-3'	53.15	46.80	99.95	Au <sub>3,06</sub> Ag <sub>4,93</sub>	Au <sub>3</sub> Ag <sub>5</sub>
	А-4 блок	63.23	36.18	99.41	Au <sub>1,96</sub> Ag <sub>2,04</sub>	AuAg

ростом и радиально расходящимися трещинами в центре образуются, как было давно установлено (Чухров, 1955), в результате отделения дисперсионной фазы. Преобразование высоковязкого остатка приводит к формированию зональных агрегатов с радиально расположенными блоками в центре и столбчатыми агрегатами по периферии. Разнообразие возникающих структур во многом зависит от соотношения дисперсионной среды и дисперсной фазы в коагуляте золота, т.е. от степени его пересыщения. В высоковязкой центральной части сгустка, выделившиеся по границам радиальных трещин синерезиса блоки не имеют кристаллографических очертаний; признаки ротационного вращения таких блоков, рассмотренные ранее (Новгородова, 2004), свидетельствуют о том, что в процессе коалесценции когерентность границ соседних блоков еще не была достигнута. В менее вязком остаточном веществе кайм и межблокового пространства тонкие дендриты и сростки более крупных искаженных кристаллов окаймляют блоки либо образуют столбчатые агрегаты на кварцевой матрице (рис. 5). Известно, что образование нанокolonн может быть следствием роста на наклонной плоскости подложки (Karabasak *et al.*, 2003).

### Кор-шелл структуры метакolloидного золота

Кор-шелл структурами называются зональные структуры наночастиц с ядром (core)

и оболочкой (shell), отличающимися по составу. Подобные структуры известны для многих пар металлов и соединений, синтезированных для разнообразных целей нанотехнологий. Кор-шелл структуры золота с оболочкой из серебра синтезированы в виде наночастиц, размером около 20 нм и более; отмечается, что при уменьшении размера наночастиц кор-шелл структуры не могут быть образованы. Причины несмесимости золота и серебра при формировании кор-шелл структур в области размеров наночастиц ~20 нм остаются невыясненными (Shibata *et al.*, 2002).

Возникающие при раскристаллизации природных гелей поликристаллические постройки имеют зональное строение с поли- или моноблочным ядром и каймой, сложенной агрегатом более мелких кристаллографически искаженных частиц. Искаженность форм особенно заметна в случае, когда блоки сближены, а каймы узкие (150–200 нм). В условиях стесненного пространства формируются такие необычные формы как нанотрубки и наноконусы, ранее неизвестные как для природного, так и для синтезированного золота. Диаметр золотого наноконуса в основании ~100 нм, в верхней части – 200 нм (рис. 6). По аналогии с синтезированными наночастицами, можно предположить, что процесс закручивания плоскостей определяется дислокационным механизмом; для нанотрубок – дислокациями с угловой и винтовой компонента-

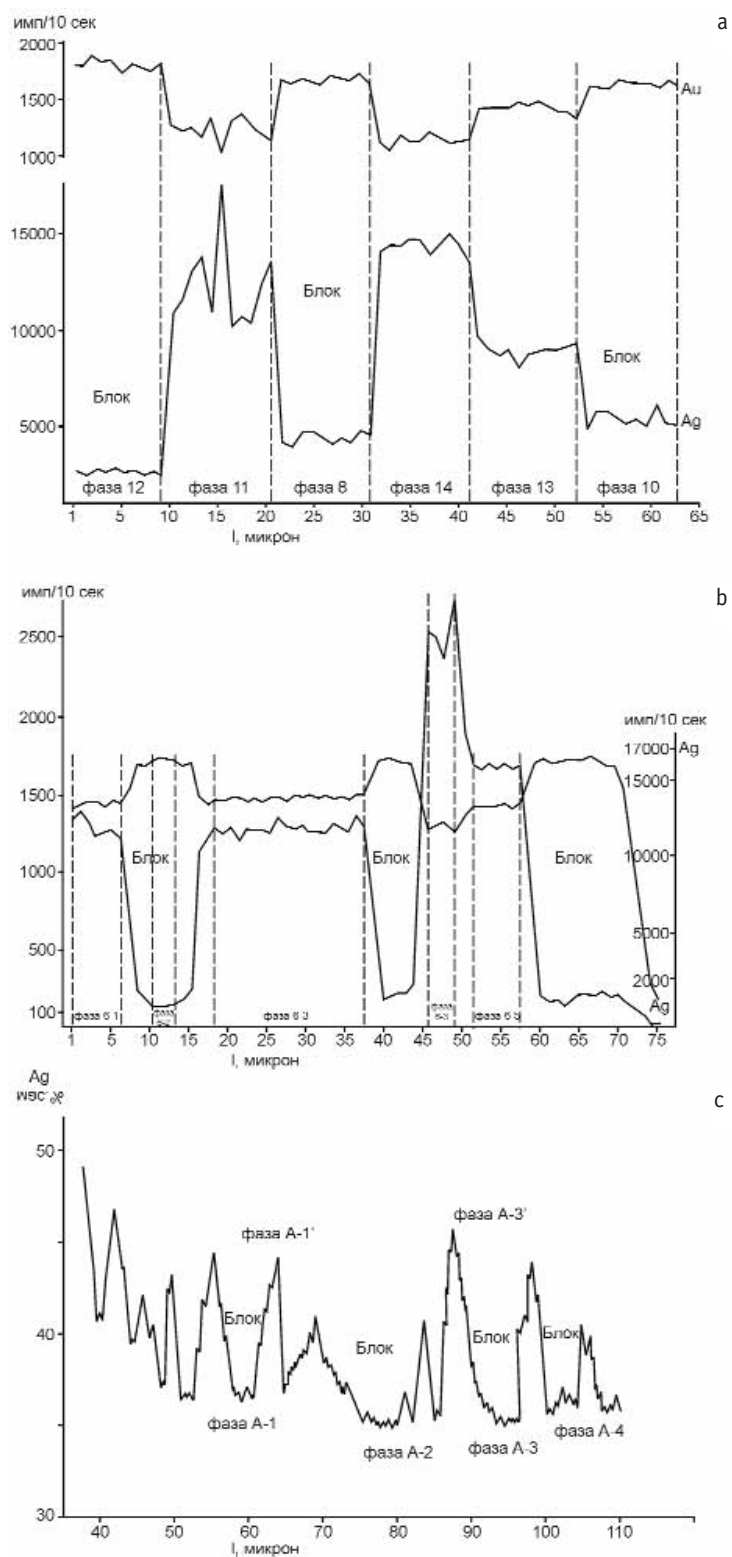


Рис. 7. Вариации состава по профилю через золотины мозаично-блокового строения: а, б – Балей-Тасеевское месторождение; в – Агатовское месторождение. Номера фаз соответствуют таблице

ми, для наноконусов — дисклиналями (Pokrovivny and Pokrovivny, 2003).

Отличаясь размерами на два-три порядка большими, чем синтезированные наночастицы с кор-шелл структурой, природные поликристаллические постройки обнаруживают с ними морфологическое сходство. Различия в составе ядра и оболочки зональных поликристаллических построек с необходимой точностью с помощью микронзондового анализа установить не удается из-за невысокой локальности метода. Оценка состава в первом приближении была выполнена методом микронзондового сканирования по профилю с шагом в 1 микрон. Анализировались относительно крупные блоки и их скопления, а также межблочное пространство, размером в несколько микрон. Полученные данные (табл., рис. 7) с убедительностью отображают тенденцию к обогащению серебром межблочного пространства и кайм вокруг ядер с повышенным содержанием золота. Рассчитанные составы при этом приближаются к стехиометрическим. В относительно высокопробном (средняя проба 750—850) пластинчатом золоте из Тасеевского участка Балейского месторождения скопления блоков почти чистого золота окаймляются пористым или дендритовидным межблочным веществом с составами, близкими к  $Au_3Ag$  и  $Au_5Ag_3$ . В низкопробном золоте из Агатовского месторождения блоки имеют состав  $AuAg$ , а каймы вокруг них —  $Au_3Ag_5$ . Поскольку микронзондовые анализы, результаты которых помещены в таблице, рассчитываются с усреднением по нескольким, не менее 10, замерам, требуются более прецизионные исследования состава с локальностью  $\approx 100$  нм, а изложенные выше данные следует считать предварительными.

## Обсуждение результатов

Явные различия в морфологии метаколлоидного золота, отложенного на поверхности россыпного золота в речном аллювии и распространенного в золото-кварцевых жилах эпитеpmальных месторождений, обусловлены различиями в кинетике седиментации и последующей агрегации коллоидных наночастиц, связанной в свою очередь с очевидными различиями в физико-химических параметрах минералообразующей среды. Медленное осаждение коллоидных частиц нового золота, образованного механическим путем при истирании золотин в водном потоке, приводит к образованию рыхлых разветвленных форм (Brechignac *et al.*, 2001), а их гетеродис-

персность замедляет коалесценцию (Hoogenboom *et al.*, 2002) и препятствует образованию больших когерентных доменов. Поликристаллические картины микродифракции электронов, полученные от такого золота, подтверждают это заключение. Проволоковидные формы, как показано в работе Ли Хай (Hui *et al.*, 2003), обычно состоят из некогерентных доменов полиэдрической формы (искаженные икосаэдрические полиэдры Франк-Каспера и полые полиэдры Бернала), однако проверить это на природных образцах не представляется возможным.

Компактные сгустки и пленки золота, выпадающие из пересыщенных гидротермальных растворов, имеют длительную историю старения, агрегации и перекристаллизации, конечным итогом которой является формирование мозаично-блоковых структур золота с неоднородным распределением примеси серебра. Обсуждения требуют следующие экспериментально установленные факты.

1. В процессе синерезиса и коалесценции на ранних стадиях старения коагулята, осажденного на кварцевую матрицу, нередко формируются блоки золота кубической формы, тогда как при текстурировании осадка следовало ожидать преимущественной ориентации частиц по наиболее плотноупакованной плоскости октаэдра (111). Причиной этого являются, как показано выше, эпитаксиальные соотношения между атомным строением грани (001) золота и псевдокубическим строением грани ромбоэдра кварца, при этом  $(10\bar{1}1)$  кварца  $\parallel$  (001) золота и  $[12\bar{1}0]$  кварца  $\parallel$  [100] золота. Ориентирующее влияние квадратной подложки на рост кубов гранецентрированных металлов установлено также экспериментально; показано при этом, что первые 50 атомных слоев в кубах обнаруживают идеальную бездефектную структуру (Zhang *et al.*, 2002). Отметим также, что контакт между Au (металлом) и  $SiO_2$  (изолятором) обеспечивает туннельный эффект при прохождении тока через припой состава Au— $SiO_2$ —Si, к сожалению, состояние пограничного слоя остается неизвестным (Pal *et al.*, 2004). Тем не менее, вероятность возникновения туннельного эффекта в золото-кварцевых сростках не безынтересно для разработки электроимпульсных методов обогащения руд.

2. Процесс коалесценции с обособлением блоков и межблокового пространства сопровождается явно выраженной неоднородностью в распределении золота и серебра. Блоки во всех проанализированных образцах обнаруживают повышенное содержание Au. Поскольку диффузия частиц в вязком веще-



стве гелей затруднена или даже практически невозможна (Чухров, 1955), приходится признать, что к подобному эффекту приводит перегруппировка изначально неоднородных по составу наночастиц с поступательным или вращательным движением по тонким трещинам типа мембранных, возникающих при синерезисе. В таком случае мембранная проницаемость для наночастиц с высокими содержаниями Au должна быть выше, чем для высокосеребристых наночастиц. Образованные таким образом агрегативные кор-шелл структуры отличаются от синтезированных не только размерами, но и способом образования. В синтезе кор-шелл наноструктур применяется способ последовательного осаждения солей Ag на уже сформированные золотые наночастицы, тогда как в природном веществе преобладают процессы самоорганизации коллоидного коагулята.

3. Принято считать, что коалесценция наночастиц в коллоидном коагуляте осуществляется под действием слабых дальнедействующих сил типа Ван-дер-Ваальсовых. Однако в последнее время для объяснения сложных движений наночастиц, объединяющихся в кристаллические постройки, привлекается формализм термической и статистической модели Казимира, используемой в квантовой электродинамике (Gopinathan *et al.*, 2002).

## Литература

- Лазько Е.М., Ляхов Ю.М., Пизнюр А.В. Физико-химические основы прогнозирования постагмагического оруденения. М.: Недра, **1981**. 255 с.
- Новгородова М.И. Нанокристаллы самородного золота и их сростания // Новые данные о минералах. **2004**. Вып. 39. С. 83–92.
- Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, **1973**. 347 с.
- Петровская Н.В., Новгородова М.И., Фролова К.Е., Цепин А.И. Природа неоднородности и фазовый состав эндогенных выделений самородного золота // Неоднородность минералов и тонкие минеральные смеси. М.: Наука, **1977**. С. 16–27.
- Петровская Н.В., Фролова К.Е. Опыт сравнительного исследования морфологии тонкодисперсного золота и микрорельефа поверхности золотых выделений // Типоморфизм минералов. М.: Наука, **1969**. С. 28–35.
- Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во иностр. лит-ры, **1962**. С. 11–32.
- Текстуры и структуры руд. М.: Гос. научно-техн. изд-во лит-ры по геол. и охране недр, **1958**. 435 с.
- Чухров Ф.В. Коллоиды в земной коре. М.: Изд-во АН СССР, **1955**. 671 с.
- Brechignac C., Cahuzac Ph., Carlier F., Colliex C., De Frutos M. *et al.* Control of island morphology by dynamic coalescence of soft-landed clustess // Eur. Phys. J.D. **2001**. V. 16. P. 265–269.
- Freise F.W. The transportation of gold by organic underground solutions // Econ. Geol. **1931**. V. 26. N 4.
- Gopinathan A., Zhon T., Coopersmith S. N. *et al.* Weak longe-ranged Casimir attraction in colloidal crystals // Europhys. Lett. **2002**. V. 57(3). P. 451–457.
- Hoogenboom J.P., Derks D., Vergeer P., Van Blaaderen. Stacking faults in colloidal crystals grown by sedimentation // J. Chem. Phys. **2002**. V. 117(24). P. 11320–11328.
- Hui Li, Wang G.H., Wang B.L. Local clusters and defects in one-dimensional gold wires // J. Chem. Phys. **2003**. V. 119(18). P. 9771–9776.
- Karabacak T., Wang G.C., Lut M. Quasi-periodic nanostructures grown by oblique angle deposition // J. Appl. Phys. **2003**. V. 94(12). P. 7723–7728.
- Pal S., Sanyal M.K., Hazra S., Kundu S., Schreiber F., Pflaum J., Barrena E., Dosch H. Morphology and transport properties of nanostructural gold on silicon // J. Appl. Phys. **2004**. V. 95. N 3. P. 1430–1435.
- Pokropivny A.V., Pokropivny V.V. Dislocation mechanism of nanotube formation // Techn. Phys. Lett. **2003**. V. 29(6). P. 494–495.
- Shibata T., Bunker B.A., Zhang Zh., Meisel D., Vardeman Ch.F.II, Geselter J.D. Size-dependent spontaneous alloying of Au-Ag nanoparticles // J. Am. Chem. Soc. **2002**. V. 124. N 40. P. 20–31.
- Zhang J., Alsayed A., Lin K.H., Sanyal S., Zhang *et al.* Template-directed convective assembly of three-dimensional face-centered-cubic colloidal crystals // Appl. Phys. Lett. **2002**. V. 81(17). P. 3176–3178.