

## ЭВОЛЮЦИЯ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА В ЭКЗОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

З.С. Никифорова<sup>1</sup>, Ю.А. Калинин<sup>2,3</sup>, В.А. Макаров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>4</sup> Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79, Россия

Многолетнее изучение типоморфизма самородного золота в экзогенных условиях позволило установить его эволюцию во времени и пространстве. В зависимости от термодинамических параметров среды и длительности пребывания самородного золота в приповерхностных условиях происходит преобразование его морфологии, внутренней структуры и химического состава. Наряду с известными фактами изменения золота в экзогенной среде, в статье рассматриваются некоторые впервые выявленные аспекты эволюции самородного золота в корях выветривания, гидродинамической, эоловой и техногенных средах. Кроме этого, рассмотрено преобразование золота при влиянии на него литостатического давления в древних золотоносных конгломератах, а также изменение его в метаморфогенных толщах в зависимости от *P-T* условий среды.

В основу статьи положены результаты полевых, экспериментальных работ и аналитических исследований по минералогии самородного золота. Объектами изучения являлись россыпи золота востока Сибирской платформы, Тувы, Монголии, золотоносные конгломераты Тиманского кряжа, техногенные россыпи золота Енисейского кряжа, каолинитовые и латеритные коры выветривания Салаира, Казахстана, Республики Гвинея, а также коллекции россыпного золота Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН, ЦНИГРИ, МГА, ЗАО «ВНЕШМЕТ».

В ходе экспериментальных исследований впервые изучено механическое преобразование форм золота при воздействии на них песчано-воздушного потока в эоловых условиях, а также литостатического давления вышележащих толщ на золотоносные отложения (древние золотоносные конгломераты). Кроме этого, использован широкий комплекс известных минералого-геохимических методов изучения типоморфных особенностей самородного золота.

Эволюция золота в экзогенных условиях зависит от влияния среды его нахождения. В коре выветривания установлено новообразование наночастиц и микрочастиц за счет разложения сульфидов, теллуридов и других неустойчивых соединений, содержащих золото. На поверхности первичного эндогенного золота на микро- и наноуровнях наблюдается осаждение новообразованного золота в виде мельчайших кристаллов, дендритов и шариков. В коре выветривания происходит формирование губчатого и почковидного золота, в первичном эндогенном золоте отмечается повышение пробности, уменьшение элементов-примесей и образование в краевых частях золотин высокопробной пористой оболочки. В гидродинамической среде россыпное золото, независимо от формы (гемидиоморфные, идиоморфные, интерстициальные и др.), уплотняется и подвергается простой деформации, химический состав и внутренние структуры золота в данной среде практически не изменяются. Химический состав и внутреннее строение россыпного золота зависят от этапа рудообразования и от формационного типа золоторудного источника. При продолжительном пребывании и при неоднократном переотложении из древних отложений (докембрийских) в более молодые (четвертичные) установлено изменение химического состава и внутренней структуры золота.

На основании полученных результатов, экспериментальных и минералогических исследований доказано, что при воздействии эоловых процессов на самородное золото происходит преобразование не только формы, но и изменение химического состава и микротвердости. В эоловой среде россыпное золото различной конфигурации стремится приобрести шаровидную форму с характерной пленочно-волоконистой поверхностью, при этом наблюдается изменение не только формы золота, но и его облагораживание — повышение пробности, уменьшение элементов-примесей и, как следствие, понижение микротвердости.

В древних конгломератах (древних ископаемых россыпях) при влиянии на россыпное золото литостатического давления вышележащих отложений формируется псевдорудное золото, а при проявлении постоянных температур и давлении в метаморфогенных толщах отмечается облагораживание золота.

Таким образом, выявленные индикаторные признаки россыпного золота для различных экзогенных обстановок позволяют реконструировать геолого-геоморфологическую обстановку россыпеобразования — определить генетический тип россыпей (коры выветривания, аллювиальные, эоловые и др.), а также установить источники питания (промежуточные коллекторы или коренные), что дает возможность более корректно подобрать методику поиска россыпных и рудных месторождений золота.

*Эволюция золота, экзогенные процессы, типоморфизм, минералого-геохимические особенности, самородное россыпное золото — гипергенное, эоловое, псевдорудное, метаморфогенное*

## EVOLUTION OF NATIVE GOLD UNDER EXOGENOUS CONDITIONS

Z.S. Nikiforova, Yu.A. Kalinin, and V.A. Makarov

A long-term study of the typomorphism of native gold under exogenous conditions gave an insight into its evolution in time and space. The morphology, internal structure, and chemical composition of native gold change depending on the duration of its occurrence under near-surface conditions and on the thermodynamic parameters of the environment. Along with the known facts of gold transformation in the exogenous environment, we consider some of the first identified aspects of the evolution of native gold in weathering crusts and the hydrodynamic, eolian, and anthropogenic environments. Additional attention is given to the transformation of gold in ancient gold-bearing conglomerates under lithostatic pressure and in metamorphic strata depending on the  $P$ - $T$  environmental conditions. The paper is based on the results of field work, experiments, and analytical studies of the mineralogy of native gold. The objects of study were gold placers of the eastern Siberian Platform, Tuva, and Mongolia, gold-bearing conglomerates of the Timan Ridge, anthropogenic gold placers of the Yenisei Ridge, kaolinite and laterite weathering crusts of Salair, Kazakhstan, and the Republic of Guinea, and the collections of placer gold from the A.E. Fersman Museum (Moscow), the Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (Moscow), the Moscow Mining Academy, and ZAO VNESHMET (Moscow). In the course of experimental studies, we investigated for the first time the mechanical transformation of gold particles under the impact of sand-air flow in the eolian conditions and under the lithostatic pressure of the overlying strata on ancient gold-bearing conglomerates. We also used a number of mineralogical and geochemical methods to study the typomorphic features of native gold. The evolution of gold under exogenous conditions depends on the ambient environment. Examination of weathering crust has revealed gold nano- and microparticles resulted from the decomposition of sulfides, tellurides, and other unstable gold-containing compounds. Newly formed gold nano- and microparticles in the form of finest crystals, dendrites, and globules are deposited on the surface of primary endogenous gold. The gold formed in weathering crust is spongy and nodular; the fineness of primary endogenous gold increases, the content of impurity elements in it decreases, and a high-fineness porous shell forms at the edges of the gold particles. In the hydrodynamic environment, placer gold, independently of its form (hemihedral, euhedral, interstitial, etc.), flattens and undergoes a simple deformation, but its chemical composition and internal structure change little; they depend on the stage of ore formation and on the mineragenic type of the gold ore source. We have established that the chemical composition and internal structure of gold change during its long occurrence in the environment and under its repeated redeposition from ancient (Precambrian) to younger (Quaternary) deposits. Based on the obtained results of experimental and mineralogical studies, we have proved that eolian processes change not only the shape of native gold but also its chemical composition and microhardness. In the eolian environment, placer gold of different shapes tends to become a globule with a film-fibrous surface. The change in the shape of gold is accompanied by an increase in its fineness, a decrease in the content of impurity elements, and, as a result, decrease in the gold microhardness. In ancient conglomerates (ancient fossil placers), placer gold subjected to the lithostatic pressure of overlying deposits transforms into pseudo-ore gold. In metamorphic strata with constant temperatures and pressures, gold becomes refined. The identified indicators of placer gold of different exogenous environments make it possible to reconstruct the geologic and geomorphologic conditions of gold placer formation, namely, to determine the genetic type of placers (related to weathering crusts, alluvial, eolian, etc.) and to define the source areas (intermediate or primary sources). This helps to find a more correct technique for the search for gold placer and ore deposits.

*Gold evolution, exogenous processes, typomorphism, mineralogical and geochemical features, native (hypergene, eolian, pseudo-ore, and metamorphogenic) placer gold*

### ВВЕДЕНИЕ

Многолетнее изучение типоморфизма самородного золота в экзогенных условиях позволило установить его эволюцию во времени и пространстве. В зависимости от термодинамических параметров среды и длительности пребывания самородного золота в приповерхностных условиях происходит преобразование его морфологии, внутренней структуры и химического состава.

Цель настоящей работы — проследить основные тенденции эволюции самородного золота в различных экзогенных условиях — гипергенных, гидродинамических, техногенных и других. Наряду с известными фактами изменения золота в экзогенной среде, в статье рассматриваются некоторые впервые выявленные аспекты эволюции самородного золота в результате воздействия эоловых процессов, влияния литостатического давления в древних золотоносных конгломератах, а также изменение золота в метаморфогенных толщах в зависимости от  $P$ - $T$  условий.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены результаты полевых и экспериментальных работ, а также аналитических исследований по минералогии самородного золота самых разных регионов. Объектами изучения являлись россыпи золота востока Сибирской платформы, Тувы, Монголии, золотоносные конгломераты Тиманского кряжа, техногенные россыпи золота Партизанского и Южно-Енисейского россыпных районов Енисейского кряжа, каолинитовые и латеритные коры выветривания Салаира, Казахстана, Республики Гвинея, коллекции россыпного золота Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН, ЦНИГРИ, МГА, ЗАО «ВНЕШМЕТ».

В ходе экспериментальных исследований [Филиппов, Никифорова, 1988; Никифорова, Филиппов, 1990] впервые изучено механическое преобразование форм золота при воздействии на них песчано-воздушного потока в эоловых условиях, а также литостатического давления вышележащих толщ на золотоносные отложения (коллекторы).

Золото техногенных россыпей изучалось по следующей методике: обогащение крупнообъемных проб на концентраторе Knelson-7.5, расситовка концентрата, раздельная доводка каждой фракции в лабораторных условиях, а затем детальное изучение его типоморфных особенностей.

При изучении типоморфных особенностей самородного золота использован широкий комплекс известных минералого-геохимических методов анализа. Все аналитические работы выполнены в лаборатории физико-химических методов анализа ИГАиБМ СО РАН (г. Якутск) и в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Изучение морфологии, структур поверхности и внутреннего строения золотин проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа «JEOL JSM-6480LV», стереоскопического микроскопа «LEICA» MZ6 и рудного микроскопа «JENAVERT SL 100». Микроэлементный состав золота анализировался на микроанализаторе «JSA-50A, JSM-6480LV». Содержание элементов-примесей в золоте исследовалось атомно-эмиссионным спектральным методом. Микровключения в золоте выявлялись при помощи сканирующего электронного микроскопа «JEOL JSM-6480LV» с использованием энергетического дисперсионного спектрометра Energy 350 of Oxford Instruments. Количественный анализ и обработка результатов осуществлялись по методу XPP в программном обеспечении INCA Energy Software. Внутренние структуры самородного золота изучались по общепринятой методике [Петровская и др., 1980].

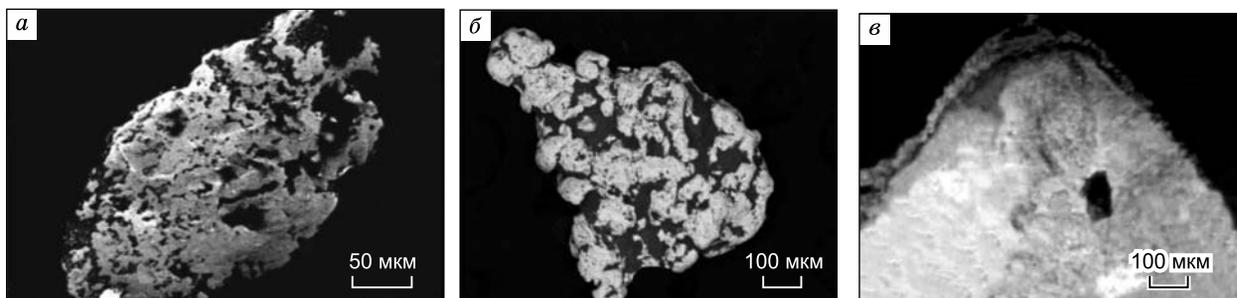
## САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО В КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ

История эволюции самородного золота в экзогенной среде начинается с момента вывода эндогенных золотосодержащих минеральных парагенезисов на дневную поверхность. Начало формирования профиля коры выветривания (как частный случай, зоны окисления) можно рассматривать в качестве нулевой точки отсчета. Под корой выветривания в настоящее время понимается геологическое тело, сложенное элювием, являющееся неотъемлемой частью единого гипергенного покрова, формирующегося постоянно на суше под влиянием комплекса факторов (тектонических, геоморфологических, климатических, в том числе палеоклиматических и других). В зависимости от степени проявления этих факторов, происходит формирование элювиальных образований кор выветривания. Дальнейшее разрушение, перемещение и переотложение продуктов кор выветривания приводит к образованию россыпей, к относительному или абсолютному обогащению отложений золотом и другими устойчивыми минералами.

В мировой литературе, базирующейся на изучении профилей выветривания Австралии, Амазонии, Африки, Юго-Восточной Азии, рассматриваются и обсуждаются «зрелые» коры выветривания латеритного типа и поведение золота в них. Результатом проводимых исследований явилось обоснование, что высокая подвижность золота в корях выветривания в настоящее время является очевидной [Mann, 1984; Lawrance, Griffin, 1994; Freyssinet et al., 2000; Townley et al., 2003; Anand, Butt, 2010; Reith et al., 2012; Kalinin et al., 2019].

Новизной настоящего исследования является выявление новых фактов мобильности золота при формировании не только латеритных, но и каолинитовых кор выветривания. Примеры изученных месторождений золотоносных кор выветривания латеритного (Западная Африка, Республика Гвинея) и каолинитового (Салаир, Кузнецкий Алатау, Алтай, Казахстан, Урал) профилей показывают, что наряду с эндогенным первичным Au, присутствует гипергенное самородное золото. Оно представлено новообразованными кристаллами, друзовидными агрегатами и мельчайшими формами роста на поверхности более ранних частиц золота [Калинин и др., 2006, 2009]. Гипергенное золото в виде ограненных кристаллографических форм с гладкой блестящей поверхностью подробно описано в литературе [Нестеренко и др., 1985; Colin, Vieillard, 1991; Craw, MacKenzie, 2015].

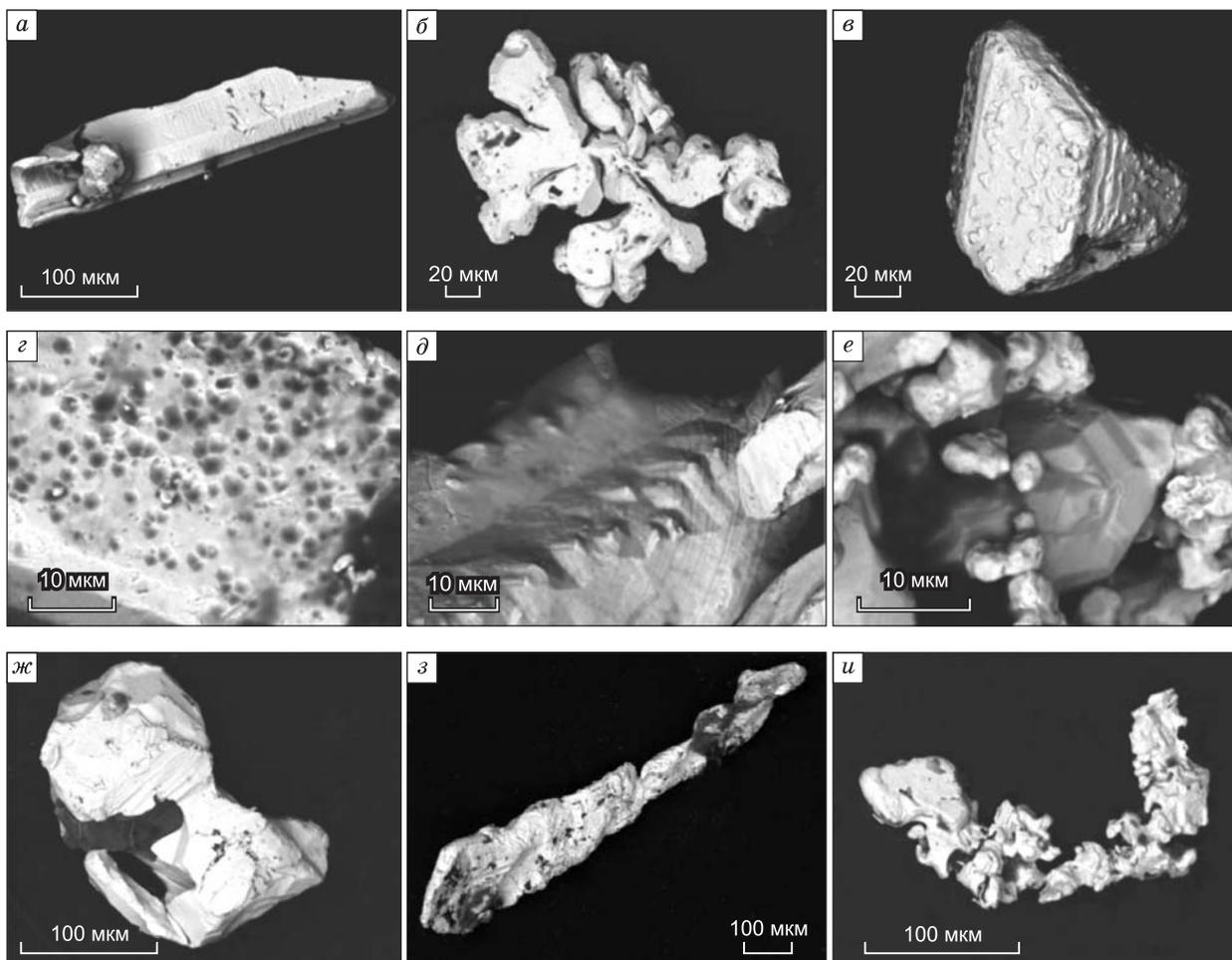
Именно на этом этапе экзогенной истории первичное золото преобразуется максимально как по морфологии, так и по составу. Принципиальным вопросом является не столько общая степень изменений первичного эндогенного золота в коре выветривания, сколько масштабы этих процессов. В регио-



**Рис. 1 . Морфология золота из зоны гипергенеза:**

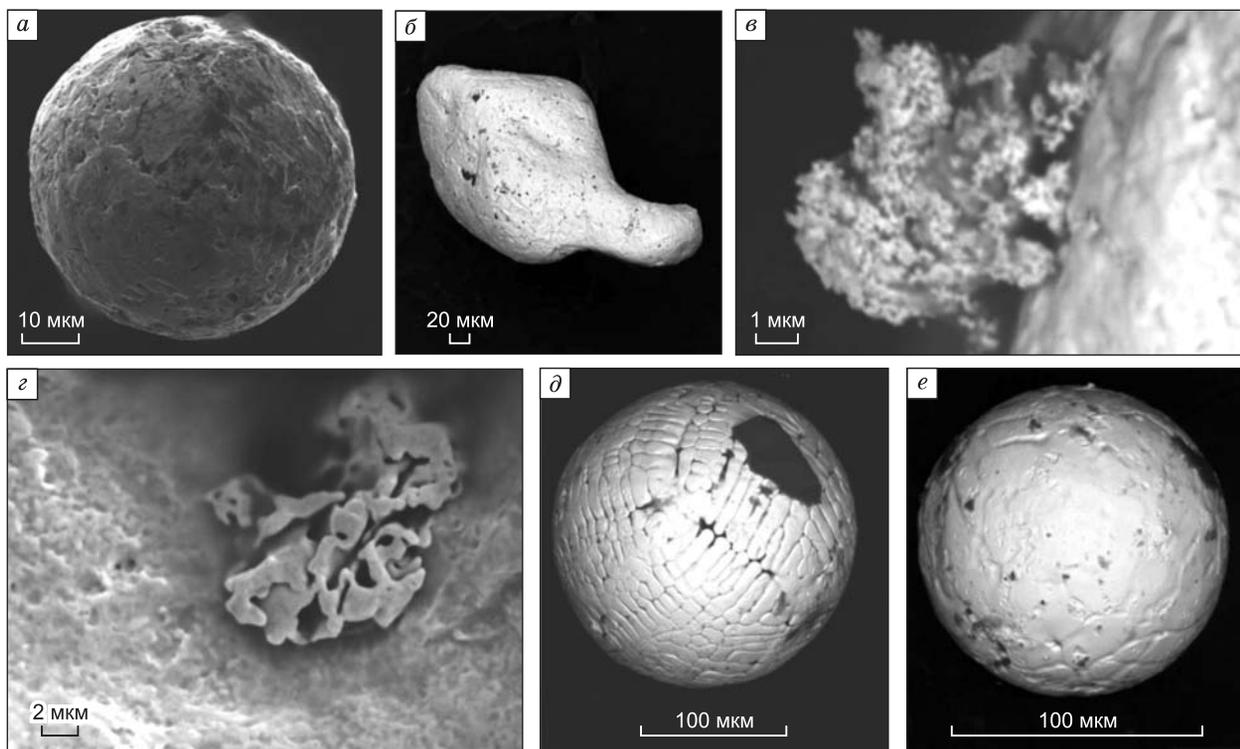
*а* — горчичное, *б* — почковидное, *в* — пористое строение высокопробной оболочки.

нах с широким развитием латеритного выветривания очень часто наблюдается укрупнение золотин и общее обогащение золотом зоны гипергенеза. Например, в юго-западной части Индии отмечается значительное увеличение среднего размера золотин от 0.2 мм в кварцевых жилах до 0.5 мм в латеритной коре над ними, на фоне почти пятикратного обогащения [Santosh, Omana, 1991]. При этом наблюдаются



**Рис. 2. Морфология гипергенного золота из кор выветривания месторождений Суздальское (*а—е*), Райгородок (*ж—и*) (Казахстан):**

*а* — удлиненный кристалл, на поверхности которого наблюдается новообразованное золото, кристалл роста; *б* — сростки изометричных кристаллов; *в* — изометричный кристалл с многочисленными формами роста на поверхности; *г* — фрагмент поверхности золота на наноразмерном уровне; *д, е* — фрагменты кристаллов, грани роста; *ж* — изометричный кристалл со ступенчатыми гранями роста; *з* — скипетровидный кристалл с гранями роста; *и* — сростки изометричных кристаллов.



**Рис. 3. Морфология золота из коры выветривания:**

*a–z* — латеритной (Западная Африка): *a* — сфероидальное; *б* — кристалл со сглаженными гранями; *в, z* — нарастание золота: *в* — губчатого Au на массивной сфероидальной форме; *z* — «мозговидного» Au на удлиненном кристалле; *д, е* — шарики высокопробного Au из каолиновой коры выветривания (Салаирский кряж).

как явления растворения, так и нарастания частиц золота и образование самородков дендритовидной формы [Nair et al., 1987]. Общее укрупнение золота в коре выветривания также фиксируется и на месторождении Поссе (Центральная Бразилия) [Porto, Hall, 1995].

В коре выветривания изменение морфологических форм и вещественного состава первичного золота происходит в зависимости от формационного типа эндогенного оруденения. В корях выветривания, развитых по Au-Te и Au-Sb рудам, образуется «вторичное» горчичное и почковидное золото (рис. 1, *a, б*). Новообразование до первых десятков микрометров и повышение пробности золота отмечается в зонах окисления колчеданных и полиметаллических руд [Петровская, 1973; Николаева и др., 2015]. Новообразованное золото, определяемое как аутигенное, представлено очень часто мельчайшими выделениями (первые микрометры) в виде глобулей и пластинчатых кристаллов [Амосов и др., 1988; Генкин и др., 1994]. Наряду с изменением морфологии частиц золота фиксируется повышение его пробности. Одновременно с повышением пробности в среднем до 1000 ‰ в краевых частях золота происходит вынос элементов-примесей, особенно Cu, Pb, Hg, Bi и др. При этом образуется высокопробная оболочка, которая имеет пористое строение и резко отличается от высокопробной плотной оболочки, сформированной в эоловых условиях (см. рис. 1, *в*).

Изучение морфологии самородного золота из кор выветривания позволило выявить признаки нарастания позднего золота на первичном, а также следы растворения и спирального роста (рис. 2) [Калинин и др., 2009, 2018]. Установлено, что для «гипергенного» золота характерны разнообразные морфологические признаки — золотины кристаллических форм с примазками глин и гидроксидов Fe, дендриты, чешуйчатые и проволочковидные образования, которые наблюдаются в существенно глинистом матриксе. Часто пленочные и каплевидные формы вторичного Au отмечаются в колломорфных и пизолитовых образованиях гетит-каолинового состава.

В результате проведенных микроскопических исследований обнаружено, что золото из верхних частей профиля выветривания (кираса, крапчатая зона) характеризуется разнообразными формами — округлые кристаллы со сглаженными гранями (рис. 3), изометричные зерна, шарики идеальной формы более крупной размерности (0.2—0.3 мм), чем в подстилающих горизонтах глинистой коры выветривания и сапролите [Жмодик и др., 2012].

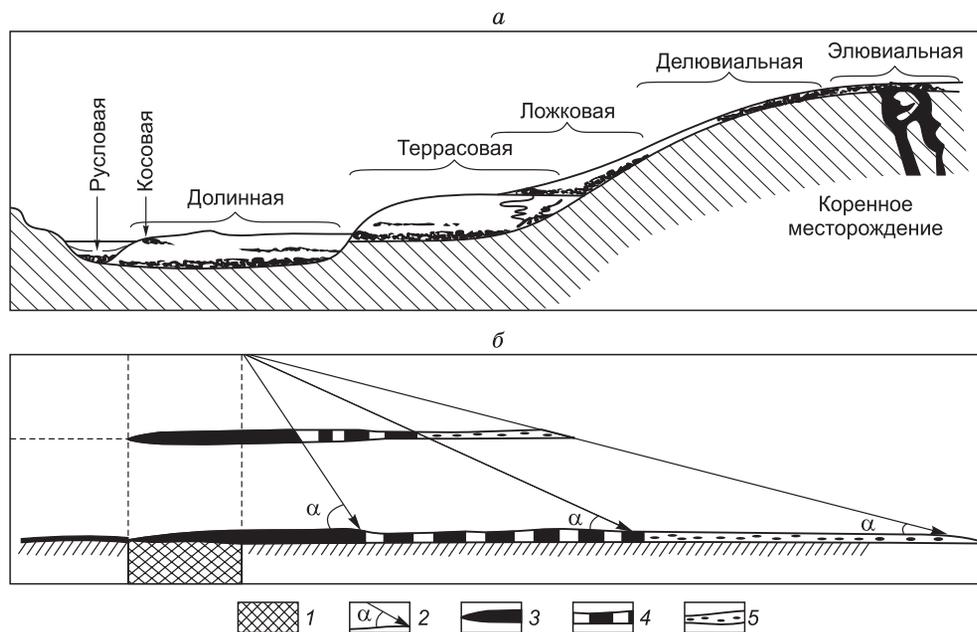
При формировании золотоносной коры выветривания сульфиды, теллуриды и другие минералы, содержащие тонкодисперсное и наноразмерное золото, растворяются, при этом происходит высвобождение самого золота и его осаждение. Золото переходит в мобильные комплексные соединения, мигрирует и восстанавливается на геохимических барьерах (щелочном, восстановительном, сорбционном и др.). Оно осаждается на затравках — углеродных частичках, сульфидах, гидроксидах Fe и Mn, а также на зернах первичного самородного золота с укрупнением последних, формируя «гипергенные» образования [Калинин и др., 2009, 2018]. Нередко новообразованное золото составляет существенную часть от общей массы золота из коры выветривания.

Таким образом, в результате изучения золота из различных зон кор выветривания на микро- и наноуровне ранее высказанные предположения обоснованы фактическим материалом. Действительно, на поверхности первичного эндогенного золота на микро- и наноуровне обнаружены структуры растворения и роста кристаллов, повышение пробности и уменьшение элементов-примесей в краевых частях золотин с образованием высокопробной оболочки (до 1000 ‰). Кроме этого, установлено, что в коре выветривания происходит высвобождение золота из золотосодержащих сульфидов, теллуридов, оксидов железа и других минералов и осаждение золота на определенных геохимических барьерах. Золото переходит из неустойчивых соединений в устойчивую минеральную форму дисперсного и наноразмерного уровня, о чем свидетельствуют обнаружение на поверхности различных затравок значительного количества более поздних новообразованных микрокристаллов золота, а также срастания новообразованного золота с хемогенными минералами: лимонитом, ярозитом, гетитом, гидроксидами Mn, опалом, гипсом, глинистыми минералами, кальцитом и другими.

### САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

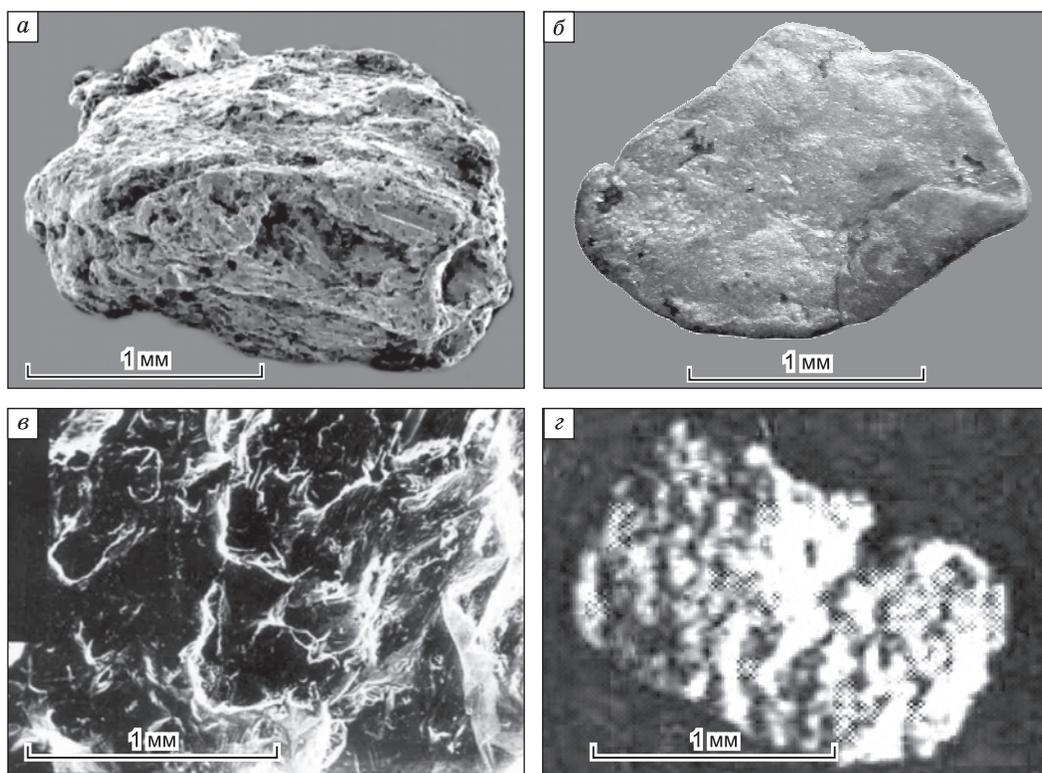
Известно, что в гидродинамической среде, независимо от изначальной конфигурации, золотины приобретают уплощенную форму. Выявленная закономерность впервые доказана экспериментальными исследованиями Е.И. Тищенко [1981]. Обосновано, что при поступлении золота из коренного источника происходит проецирование золота на тальвег долины и дифференциация металла по крупности и толщине, в зависимости от гидравлической крупности (рис. 4) [Трушков, 1971; Филиппов, 1991; Избеков, 1995; Копылов, 2002]. Поэтому в головках всех классических россыпей наблюдаются разнообразные по форме золотины, представленные идиоморфными, гемидиоморфными, интерстициальными и другими образованиями (см. рис. 4), а в хвосте россыпи лишь только уплощенные.

Поверхность золотин в гидродинамической среде изменяется от грубоямчатой до мелкошагреновой — полированной. На поверхности россыпного золота ближнего сноса отмечаются отпечатки руд-



**Рис. 4. Схема перемещения россыпного золота:**

*а* — в русло реки; *б* — проецирование золота на тальвег долины и дифференциация его в зависимости от гидравлической крупности: 1 — рудное тело; 2 — угол проецирования металла; 3 — крупное, 4 — среднее, 5 — мелкое золото.



**Рис. 5. Морфология золота из аллювиальных отложений:**

*a* — комковидное; *б* — пластинчатое с простой деформацией; *в* — пористое строение поверхности золота при ув. 500; *г* — отложение хлорного золота на золотине в виде шаровидных образований.

ных минералов, грани роста, характерные для рудного золота. Совершенно окатанное аллювиальное россыпное золото характеризуется ровной полированной поверхностью, однако при больших увеличениях ( $\times 500$ — $2000$  и более) она имеет рыхлое пористое строение (рис. 5, *в*). На поверхности некоторых золотинок иногда отмечаются отложения аутигенного золота (хлорного золота  $\text{AuCl}_3$ , образующегося по реакции  $3\text{AuCl} \rightarrow \text{AuCl}_3 + 2\text{Au}$ ) в виде шаровидных образований размером первые десятки микрометров. Например, на поверхности чешуйчатых золотинок в истоках рек Кемпедяйской дислокации (восток Сибирской платформы), где циркулируют соляные растворы, наблюдается отложение хлорного золота шаровидной формы размером первые десятки микрометров (см. рис. 5, *г*).

Изменение химического состава и внутренней структуры в гидродинамической среде практически не происходит. Химический состав и внутреннее строение россыпного золота зависят от этапа рудообразования и от формационного типа золоторудного источника [Никифорова и др., 2013, 2018]. Выявлена некоторая закономерность в минералогии россыпного золота докембрийского этапа рудообразования. Для данного этапа рудообразования характерно в основном мелкое золото размером  $0.10$ — $0.25$  мм, оно имеет очень высокую пробность — более  $900\%$ , удивительно малый диапазон вариаций пробности и низкий уровень содержаний элементов-примесей (Ag, Cu, Hg). Это объясняется тем, что при неоднократном переотложении из древних золотоносных отложений докембрийского возраста в более молодые золото в экзогенных условиях облагораживается, происходит вынос серебра и элементов-примесей. Как следствие, внутреннее строение данного золота существенно преобразовывается, в нем формируются структуры перекристаллизации, рекристаллизации, линии деформаций и мощные высокопробные оболочки ( $10$ — $30$  мкм), свидетельствующие о длительном пребывании золота в различных экзогенных обстановках. Россыпное золото мезозойского этапа рудообразования менее изменено, оно представлено как тонкодисперсным, так и крупным (до  $1$ — $2$  мм и более), в нем установлена пробность от низкой до высокой и обнаружен широкий набор элементов-примесей. Для него характерны в основном монозерна, крупно- и средnezернистые внутренние структуры. Выявленные индикаторные типоморфные признаки россыпного золота двух этапов рудообразования не изменяются в гидродинамической среде (речном потоке, прибрежно-пляжевых обстановках и др.).

## САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО В ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЯХ

Самородное золото в техногенных россыпях и хвостах шлихообогатительных фабрик (ШОФ) подвергается определенным изменениям. В последние годы, в связи с ростом практического интереса к техногенным россыпям, данная проблема приобрела актуальность [Фельдбарг, Захарова, 1984; Парий, Амосов, 1998; Мязин, Татауров, 2000; Макаров, 2001; Ковлеков, 2002; Наумов 2010]. Изучение изменения золота в техногенных россыпях чрезвычайно важно как с научной точки зрения, так и с практической для их повторной обработки. Масштаб и скорость этих преобразований зависят главным образом от применяемой технологии обработки россыпей и ландшафтно-климатических условий.

Золото отвалного комплекса техногенных россыпей отличается от металла исходных объектов морфологическими особенностями и гранулометрическим составом. В эфельных отвалах накапливается более мелкое золото, для галечных отложений характерен тот же гранулометрический состав и весовые характеристики золота, что и для целиковых россыпей. Кроме этого установлено, что в техногенных россыпях (эфелях) наблюдается преобладание пластинчатого золота за счет его более низкой гидравлической крупности и максимального смыва со шлюзов. Так, в отвалах россыпей р. Большая Пенченга и среднего течения р. Удерея доля пластинчатого металла составляет 90 %, тогда как в исходных песках не превышает 20 % [Макаров, Самородский, 2018]. При наличии в россыпях сульфидных минералов под воздействием атмосферных вод идет формирование гидроксидов железа. В.А. Наумовым [2010] в техногенных россыпях Урала описаны процессы формирования корок гидроксидов железа мощностью до 15 см, а также сцементированные гидроксидами железа конгломераты мелкогравийной размерности с повышенными содержаниями золота.

Считается, что при определенных условиях на золотосодержащих отвалах могут отмечаться процессы высвобождения золота, его укрупнение, а также перераспределение на геохимических барьерах. Высказываются предположения о возможности относительно быстрой естественной регенерации обработанных россыпей [Freise, 1931; Смирнов, 1955]. При этом указывается на положительное влияние органики и бактерий [Маракушев, 1997]. Масштабы и механизм этих процессов детально не исследованы. Нами при изучении золота в отвалных комплексах более чем 30 техногенных россыпей в ландшафтно-климатических условиях Центральной Сибири не было отмечено укрупнения золота вне связи с процессами амальгамации.

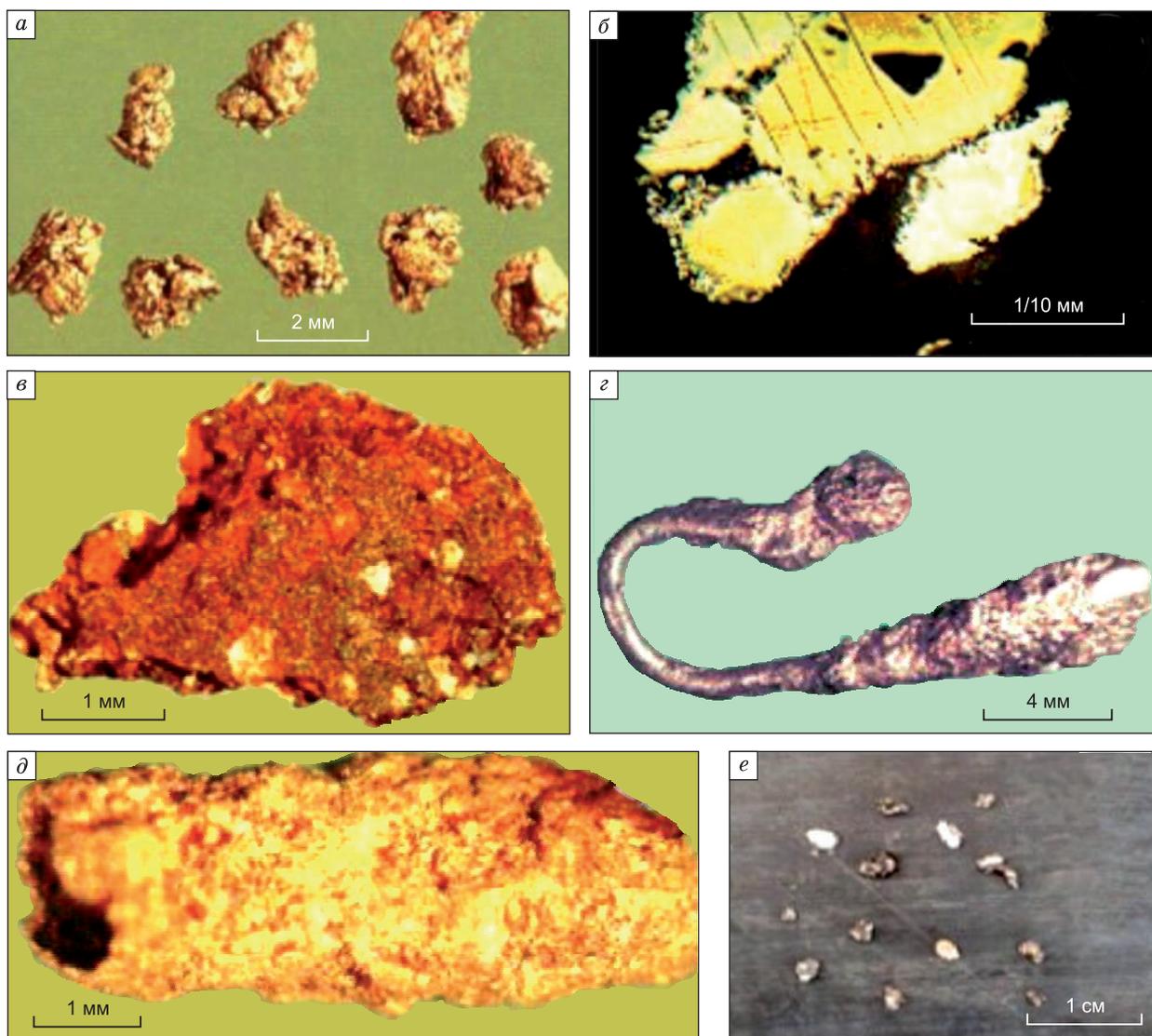
Свидетельств влияния ртути на преобразование морфологических особенностей золота в отвалных отложениях и хвостов ШОФ достаточно много. Ртуть применялась на шлюзовых установках для улавливания мелкого и тонкого золота и накапливалась в отвалах как в свободном виде, так и в виде амальгам. Золотые амальгамы техногенных россыпей характеризуются очень широкими вариациями соотношения золота и ртути. Они отличаются по цвету, агрегатному состоянию, составу минеральных примесей и химических соединений. Наряду с амальгамами, отмечается жидкая металлическая ртуть в виде сферических и полусферических частиц, в которых нами выявлено содержание золота от 0.5 до 3.0 %. Техногенная ртуть способствует срастанию природных золотин и изменению их микрорельефа в виде каверн и ажурных наростов (рис. 6, а, б). Самородное золото в отвалном комплексе и в хвостах ШОФ нередко цементируется гидроксидами железа (см. рис. 6, в). Микронзондовым анализом установлено, что в золотилах из эфельных отвалов россыпей, обрабатывавшихся с применением ртути, содержания ее в кайме золотин относительно центральной части увеличивается в несколько раз. Следует отметить, что на этих золотилах выявлена пористая или губчатая поверхность [Макаров, Самородский, 2018].

Самородное золото в хранилищах хвостов ШОФ, как правило, присутствует в ртутной рубашке (см. рис. 6, е), также наблюдается обрастание золотом металлических предметов: медной проволоки, гвоздей, свинцовой дроби и др. (см. рис. 6, г, д). Фрагменты лома цветных металлов в большинстве случаев покрыты золотосодержащей ртутной амальгамой.

Таким образом, по результатам изучения типоморфных особенностей золота техногенных россыпей можно заключить следующее. В эфельных отвалах происходит накопление более мелкого золота, чем в исходных песках и галечных отвалах, а также увеличивается доля металла пластинчатых форм и снижение веса золотин в определенных классах крупности. Изменение состава и морфологии зерен золота в техногенных россыпях и хвостах ШОФ в большей степени обусловлено влиянием применения ртути при извлечении мелкого и тонкого золота. Новообразованное «техногенное» золото представлено мельчайшими кристалликами, осажденными на различных металлических частичках (проволока, дробь и т.д.), а также амальгамированным золотом в виде псевдоморфоз в срастании с оксидами железа и другими минералами.

## САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО В ЭОЛОВЫХ УСЛОВИЯХ

В эоловых условиях золото в результате механического преобразования под воздействием ветра и песка в зависимости от первоначальной формы золотин приобретает различные формы: чешуйчатые —

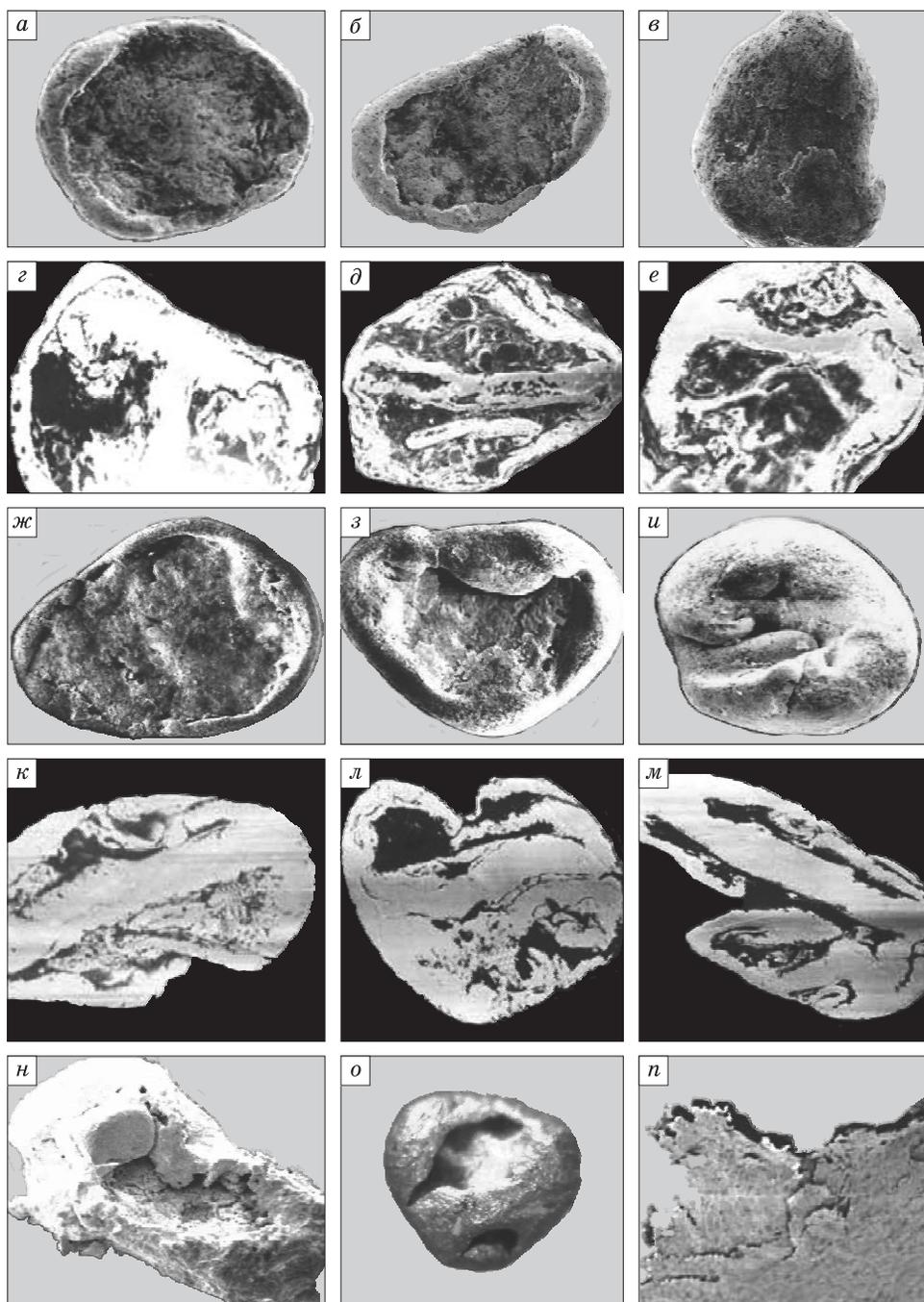


**Рис. 6. Техногенные новообразования золота и золото-ртутной амальгамы в отвалах россыпей и хвостах шлихообогатительных фабрик (ШОФ).**

*a* — агрегаты амальгмированных золотин; *б* — зерна золота различного состава, сцементированные амальгамой; *в* — агрегат золотин, сцементированный гидроксидами железа; *г* — нарастание золота на рыболовном крючке; *д* — псевдоморфоза амальгмированного золота по медной проволоке; *е* — самородное золото из хвостов ШОФ в ртутной рубашке. Материалы А.С. Пария, Р.А. Амосова [1998] — *a, в, г, д*; В.А. Наумова [2010] — *б*.

тороидальные, а затем шаровидно-пустотелые; пластинчатые — валик по периферии; таблитчатые — дисковидные; дендритовидные — комковидно-массивные с округлыми выступами, что доказано экспериментально (рис. 7) [Филиппов, Никифорова, 1988]. В отличие от золота из аллювиальных отложений, поверхность совершенно окатанного эолового золота представлена, независимо от масштаба увеличения, плотным и гладким микрорельефом. При увеличении  $\times 300$  на данном золоте наблюдается специфическая, пленочно-волоконистая поверхность (см. рис. 7, *в*). При дальнейшем увеличении ( $\times 2000$ — $5000$ ) поверхность эолового золота остается прежней — ровной, плотной и гладкой с редкими порами. Механизм образования пленочно-волоконистой поверхности следующий. В эоловых условиях в результате обработки песчинками золото вытягивается в виде тончайших пленок, которые, накладываясь друг на друга, образуют плотную, ровную пленочно-волоконистую поверхность (см. рис. 7, *н*), полученную экспериментальным путем.

При механогенном преобразовании самородного золота в эоловых условиях происходит активное влияние механических и химических процессов, и в связи с этим обнаружено изменение не только



**Рис. 7. Морфология золота из эловых отложений ( $\times 300$ ):**

1-й ряд — последовательность преобразования природных чешуйчатых золотин в эловых условиях (*a–e*): *a* — чешуйка с тонким валиком по периферии, *б* — тороидальная, *в* — шаровидно-пустотелая форма с пленочно-волокнистой поверхностью; 2-й ряд — внутреннее строение шаровидно-пустотелого золота из природных объектов в срезе (*z–e*); 3-й ряд — последовательное изменение чешуйчатого золота в ходе эксперимента (*ж–и*): *ж* — чешуйка с валиком по периферии, *з* — тороидальная, *и* — шаровидно-пустотелая форма; 4-й ряд — сечения различных форм пустотелого золота, полученных в ходе эксперимента (*к–м*); 5-й ряд — форма элового золота: *н* — пластинчатое с валиком по периферии (Витватерсранд), *о* — комковидное с признаками эловой обработки (Тува); *п* — пленочно-волокнистая поверхность, полученная путем эксперимента.

формы, но и вещественного состава, а также внутренней структуры (табл. 1). Выявлена четкая закономерность: повышение пробности золота от 900 до 980 ‰ и более, уменьшение элементов-примесей и микротвердости при преобразовании чешуйчатого золота в тороидальную, а затем в шаровидно-пустотелую форму.

Таблица 1.

**Типоморфные особенности сложнодеформированного (олового) золота  
Лено-Виллойского междуречья**

Форма золотин	Средняя масса золотин (мг) по фракциям, мм		Средняя крупность, мм	Средняя толщина, мм	Средняя гидрокрупность, м/с	Степень обработанности поверхности	Пробность, % диапазон/средняя	Элементы-примеси, мас. %	Степень расковки	Основные внутренние структуры
	0.1	0.25								
Чешуйчатая	0.009	0.05	0.25—0.5	0.02	5—6	От ямчато-бугорчатой до полированной	(810—970)/890	Pb — 0.003 Cu — 0.05 Fe — 0.1 Mn — 0.01 Pd — сл. Ni — сл. Hg — сл.	Начальная	Разнозернистые линии Людерса; наличие высокопробной оболочки; частичная рекристаллизация
Тороидальная	0.012	0.05	0.15—0.2	0.05	7—10	Тонкошагрeneвая, полированная	(920—970)/940	Fe — 0.1 Cu — 0.02 Mn — 0.03 Ni — сл. Hg — +	Средняя	Мелко-, среднезернистые, высокопробные оболочки; межзерновые прожилки, частичная и полная рекристаллизация
Шаровидно-пустотелая	0.013	0.05	0.1—0.16	0.1	12—17	Тонкошагрeneвая, полированная	(960—990)/970	Fe — 0.1 Cu — 0.017 Mn — 0.001	Конечная	Мелко- и тонкозернистые, полная рекристаллизация (разуплотнение)

Данные, полученные атомно-абсорбционным методом, свидетельствуют о повышении пробности золота от 810 до 970 % (см. табл. 1) при преобразовании чешуйчатой золотины в шаровидно-пустотелую форму. Постоянными элементами-примесями золота чешуйчатых форм являются железо, свинец, никель, медь, марганец и некоторые другие, а в шаровидных золотинах установлены лишь такие элементы-примеси, как железо, медь и марганец.

Изучение микронзондовым анализом пробности отдельных участков золотин (рис. 8, табл. 2) показало, что чешуйки со среднезернистой структурой имеют пробность от 747 до 780 %, например, зерно С-9а, а его оболочка — от 950 до 988 %. В чешуйке П-138 с частично перекристаллизованной каймой пробность последней составляет 900—970 %, а середина 814—860 %. Полностью перекристаллизованная чешуйка 8642 имеет максимальную пробность 990—1000 %. Пробность шаровидного пустотелого золота в пределах одного индивида высокая по абсолютному значению и составляет 1000 %. Так, например, в зерне П-60а (17 определений) обнаружены незначительные колебания пробности в интервале 992—1000 %, а в зерне П-60б (13 определений) выявлена высокая пробность золота 1000 %. Оболочка шаровидно-пустотелых образований постоянно обнаруживает высокую пробность. Лишь в отдельных индивидах сохранившееся в перегородке первичное золото характеризуется пониженной пробностью в диапазоне от 860 до 919 %, например, зерно Б-19б. В целом изучение внутреннего строения золотин и их химического состава показало, что преобладает золото тонко- и мелкозернистое, в основном очень высокой пробности, с минимальным содержанием в нем элементов-примесей. Известно, что деформация золота сопровождается его перекристаллизацией с выщелачиванием серебра и рекристаллизацией, способствующей выносу из золота элементов-примесей. Действительно, за счет интенсивной расковки золота в ходе его сложной деформации вытягиваются тончайшие пленки золота, которые, накладываясь друг на друга, образуют оболочку шаровидных форм. При этом увеличивается поверхность золота для активного химического взаимодействия с компонентами среды. Поэтому длительное время преобразования способствовало максимальному выносу серебра и элементов-примесей из золота исходных форм. Именно этим можно объяснить уменьшение набора и содержания элементов-примесей, повышение пробности золота при переходе от чешуйчатых к шаровидным формам и очень высокую пробность в оболочке. Процесс облагораживания золота механохимическим путем при его обработке был доказан Х. Летчменом экспериментально [Letchtman, 1979]. По результатам его опытов, облагороженный слой чистого золота появлялся при многократном чередовании микроковки с обработкой в слабом растворе аммиака сплава золота и меди, где исходное содержание золота не превышало 12 %.

Таким образом, при механогенном процессе воздействия песчаного материала на чешуйчатое золото в оловых условиях происходит преобразование его морфологических особенностей, вызванное сложной деформацией исходного индивида. Каждой стадии сложной деформации чешуек в оловых условиях при влиянии механических и химических процессов соответствует закономерное изменение

Таблица 2.

## Пробность отдельных участков золотин, ‰

Точка замера пробности	Морфологический тип золота									
	Чешуйчатое			Шаровидно-пустотелое						
				Перекристал- лизованное		Рекристаллизованное				
С-9а	П-138	8642	Б-19а	В-196	П-141а	П-141б	П-123	П-60а	П-60б	
1	759	973	998	903	860	990	997	1000	996	1000
2	747	941	996	912	867	Не опр.	992	955	996	1000
3	759	933	998	907	869	»	983	997	999	1000
4	756	Не опр.	984	904	919	990	991	999	1000	1000
5	757	908	994	912	—	988	985	996	999	1000
6	755	920	997	902	—	996	996	995	997	1000
7	758	860	996	901	—	980	987	1000	992	1000
8	769	892	997	—	—	999	984	938	992	1000
9	766	978	1000	—	—	980	970	930	999	1000
10	953	814	—	—	—	989	995	993	994	1000
11	783	896	—	—	—	994	985	997	1000	1000
12	979	806	—	—	—	993	995	995	1000	1000
13	986	956	—	—	—	990	987	Не опр.	1000	1000
14	970	937	—	—	—	920	995	»	1000	—
15	974	973	—	—	—	932	1000	903	1000	—
16	988	974	—	—	—	994	988	912	1000	—
17	970	900	—	—	—	998	987	910	1000	—
18	—	—	—	—	—	987	1000	1000	1000	—
19	—	—	—	—	—	—	998	999	—	—
20	—	—	—	—	—	—	998	Не опр.	—	—
21	—	—	—	—	—	—	991	»	—	—
22	—	—	—	—	—	—	1000	»	—	—
23	—	—	—	—	—	—	983	»	—	—
24	—	—	—	—	—	—	996	1000	—	—
25	—	—	—	—	—	—	998	1000	—	—
26	—	—	—	—	—	—	999	1000	—	—
27	—	—	—	—	—	—	—	1000	—	—
28	—	—	—	—	—	—	—	1000	—	—

Примечание. Расположение точек анализа дано на рис. 8.

внутренней структуры золота, повышение пробности и уменьшение содержания элементов-примесей. Чешуйчатые золотины характеризуются средней и мелкой зернистостью, линиями Людерса и хорошо развитыми высокопробными оболочками. Тороидальные и шаровидно-пустотелые золотины имеют в основном перекристаллизованные тонко- и мелкозернистые структуры с ярко выраженными высокопробными оболочками.

Изменение внутренней структуры способствовало выносу серебра и элементов-примесей, что привело не только к облагораживанию металла, но и к понижению микротвердости золота, которая составила 21 кг/мм<sup>2</sup> (рис. 9, табл. 3).

Измерение микротвердости шаровидно-пустотелого золота проводилось на микротвердомере ПМТ-3. Выполнено 55 определений в 12 сечениях золотин шаровидного пустотелого золота (см. рис. 9, табл. 3), в четырех золотилах (1—4) отчетливо наблюдается повышение микротвердости от центра перегородки к торцу. Причем микротвердость между отдельными зернами золотин (1, 2) различается в два раза. Одинаковая микротвердость характерна для различных участков шаровидно-пустотелых форм (6, 7, 9). Образец 12 показал повышение микротвердости от внешней части торца к центру перегородки. Остальные четыре золотины не имеют какой-либо отчетливой закономерности в распределении микротвердости.

При изучении микротвердости эолового золота выявлено, что микротвердость зависит от степени изменения внутренней структуры и химического состава золота в экзогенных условиях. Обнаружено,

что сложнодеформированное оловое золото с перекристаллизованной структурой, высокой пористостью до 1000 % и практически отсутствием элементов-примесей, имеет низкие показатели микротвердости. Впервые установлен нижний предел микротвердости сложнодеформированного шаровидно-пустотелого олового золота, который составил 21 кг/мм<sup>2</sup>. В целом следует отметить относительно низкую микротвердость исследуемого олового золота по сравнению с золотом аллювиальных россыпей. Микротвердость самородного золота ранее изучалась С.И. Лебедевой [1963], Р.П. Бадаловой с соавторами др. [1968], Н.В. Петровской [1973], Г.С. Попенко [1982]. Ими установлено, что микротвердость изменяется в среднем от 40 до 100 кг/мм<sup>2</sup> и зависит от химического состава золота (процентного содержания серебра, элементов-примесей) и от его внутренней структуры. Известно, что примеси Ag и Cu существенно увеличивают микротвердость золота. Наличие примесей Pt, Sn, Al обуславливает также резкое повышение микротвердости золота. Наибольшей микротвердостью 100 кг/мм<sup>2</sup> обладает золото с низкой пористостью 550—650 % [Попенко, 1982], нижний предел микротвердости 40 кг/мм<sup>2</sup> установлен ранее С.И. Лебедевой [1963]. Не исключено, что относительно низкая микротвердость обусловлена разуплотнением отдельных участков оболочки и торца шаровидно-пустотелого золота. Н.В. Петровской [1973] установлено, что структуры рекристаллизации приводят к разуплотнению, снятию напряжений, выносу серебра и элементов-примесей. В данном случае в исследуемом шаровидном пустотелом золоте обнаружены структуры разуплотнения и ничтожно малое количество элементов-примесей, что привело к увеличению его пористости до 1000 % и способствовало понижению микротвердости.

Обширный ореол рассеяния тороидального и шаровидно-пустотелого золота впервые был обнаружен в отложениях различного возраста Сибирской платформы. Оно встречается как в головной части россыпи, так и в хвостовой. В связи с этим тороидальные и шаровидно-пустотелые золотины могут служить поисковым критерием для обнаружения оловых россыпей золота. При этом следует подчеркнуть, что оловое золото в гидродинамических условиях не сохраняет свои морфологические особенности, а приобретает уплощенные формы — чешуйки, пластинки.

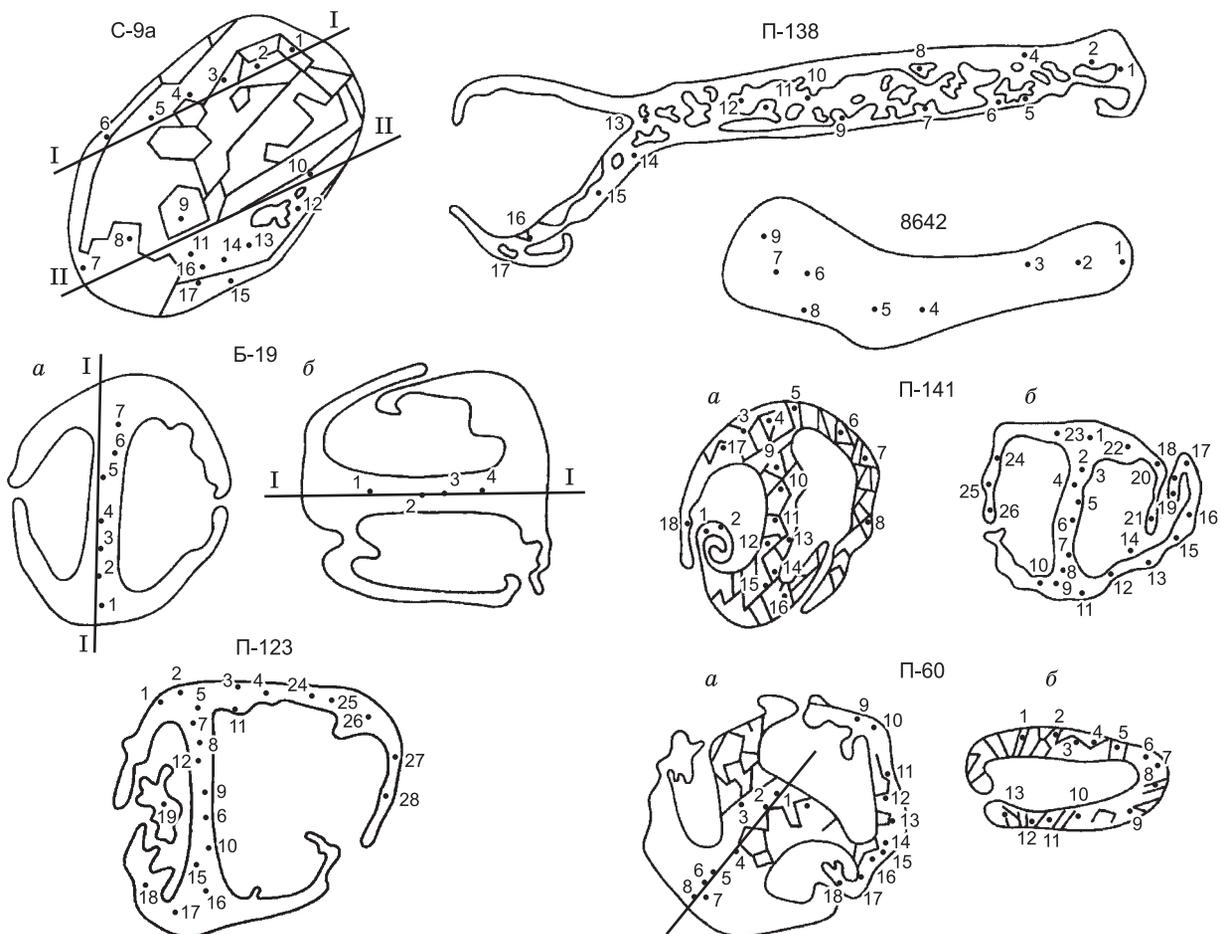
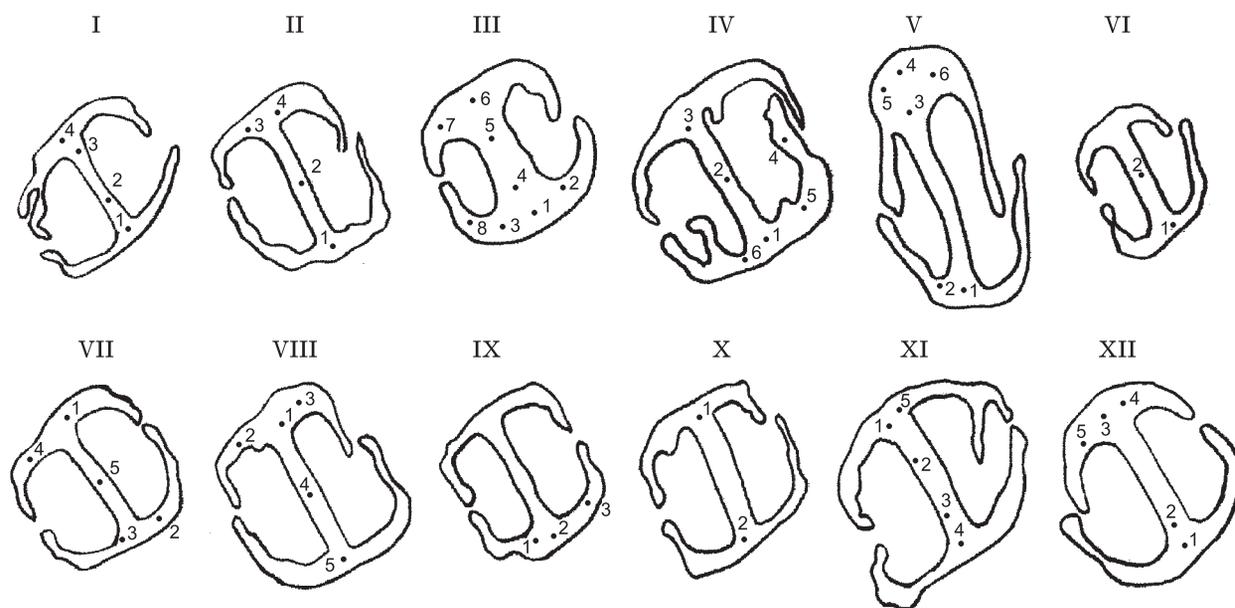


Рис. 8. Сечение золотин и точки определения пористости.



**Рис. 9. Местоположение точек определения микротвердости шаровидного пустотелого золота.**

I—XII — см. табл. 3.

Самородное золото, преобразованное в эоловых условиях, кроме рассмотренных тороидальных и шаровидных пустотелых форм, представлено и более массивными золоти́нами: пластинчатыми, таблитчатыми индивидами, имеющими утолщения по периферии и образующими корытовидные, канозвидные и бумеранговидные морфологические формы, а также гантелевидными и массивно-комковидными образованиями. Все вышеназванные формы имеют специфическую пленочно-волоконистую поверхность, характерную для золота, преобразованного в эоловых процессах. Крупность золота таких форм от 0.25 до 5.00 мм и более. Средняя толщина 0.1—0.8 мм. Средний вес зерна 0.5 до 50.0 мг, средняя пробность от 750 до 900 ‰. Гранулометрический и химический состав золота с признаками эолового преобразования зависит от типа коренного источника.

Комковидное золото массивное, его выступы имеют округлую, овальную форму и специфическую пленочно-волоконистую поверхность, характерную для эолового преобразования. Размер золоти́н более 0.25 мм. Средняя пробность и элементы-примеси в разных объектах различны. Они отражают первичный состав самородного золота коренных источников. Внутренняя структура может быть крупнозернистой, среднезернистой, или же индивид представляет собой монозерно. Отмечается наличие тонких оболочек высокопробного золота. В целом рассматриваемое золото химически менее измененное. Оно характеризуется большей крупностью и поэтому малоподвижно, встречается только в базальном эоловом горизонте на относительно небольшом расстоянии от источника. Такое золото может образовывать повышенные концентрации и представлять промышленный интерес. Согласно опубликованным данным, пластинчатые и таблитчатые золоти́ны с валиком по периферии или комковидные формы с округлыми выступами обнаружены в ряде объектов Вилуйской синеклизы [Избеков, 1972], Анабарской антеклизы [Шпунт, 1974], а также на Урале [Рыжов и др., 1977]. Поскольку эоловые признаки дефляционного золота выражены менее ярко, ореолы его распределения обнаружены не столь широко, как ореолы тороидального и шаровидно-пустотелого золота.

Анализ закономерности распределения тороидального и шаровидного пустотелого золота по литературным данным позволил выявить, что подобные формы золоти́н широко распространены на всех платформах и обнаружены в отложениях от протерозоя до кайнозоя, в частности, на востоке Сибирской и Европейской, на Северо-Американской, Южно-Американской, Африканской и Австралийской платформах [Никифорова и др., 2005].

Эоловое золото встречается как в протерозойских, так и в кайнозойских отложениях и характерно для большинства эпох развития Земли там, где интенсивно проявлялись эоловые процессы. При этом выявлено, что эоловое золото имеет не только научный «минералогический интерес», но и формирует концентрации в промышленных масштабах. Например, знаменитое месторождение Витватерсранд — здесь эоловые формы золоти́н образуют ураганные содержания металла в специфических отложениях (конгломератах), в которых отмечаются ветрогранники и практически отсутствует глинистый материал

Таблица 3.

Микротвердость элементов сечения шаровидного золота, кг/мм<sup>2</sup>

№ образца	Элементы сечения шаровидной формы					
	Торец 1	Перегородка	Торец 2	Основание		Оболочка
				торца 1	торца 2	
I	$\frac{65.4}{4}$	$\frac{41.2}{2.3}$	$\frac{55}{1}$	—	—	—
II	$\frac{25.7}{3.4}$	$\frac{21}{2}$	$\frac{28.6}{1}$	—	—	—
III	$\frac{41.2}{6}$	$\frac{25.7}{5.4}$	$\frac{32.1}{1}$	$\frac{55}{7}$	$\frac{41.2}{2}; \frac{25.7}{3}$	$\frac{23.2}{8}$
IV	$\frac{46.2}{1}$	$\frac{42.0}{2.3}$	—	$\frac{64.2}{6}$	—	$\frac{57.2}{5}; \frac{46.7}{4}$
V	$\frac{47.3}{4}$	$\frac{32.1}{3}; \frac{25.7}{2}$	$\frac{25.7}{1}$	$\frac{55}{5}; \frac{23.2}{6}$	—	—
VI	$\frac{43.0}{1}$	$\frac{41.2}{2}$	—	—	—	—
VII	$\frac{64.5}{4}$	$\frac{64.5}{5}$	$\frac{64.5}{2}$	$\frac{64.5}{3}$	$\frac{41.2}{1}$	—
VIII	$\frac{47.3}{1}$	$\frac{47.3}{4}$	$\frac{32.1}{5}$	$\frac{32.1}{2.3}$	—	—
IX	$\frac{28.6}{1}$	—	—	$\frac{28.6}{2}$	—	$\frac{28.6}{3}$
X	$\frac{47.3}{1}$	$\frac{55.0}{2}$	—	—	—	—
XI	$\frac{36.2}{1}$	$\frac{47.3}{2}; \frac{36.2}{3}$	$\frac{36.2}{4}$	$\frac{41.2}{5}$	—	—
XII	$\frac{47.3}{3}$	$\frac{55}{2}$	$\frac{41.2}{1}$	$\frac{36.2}{4}$	$\frac{32.1}{5}$	—

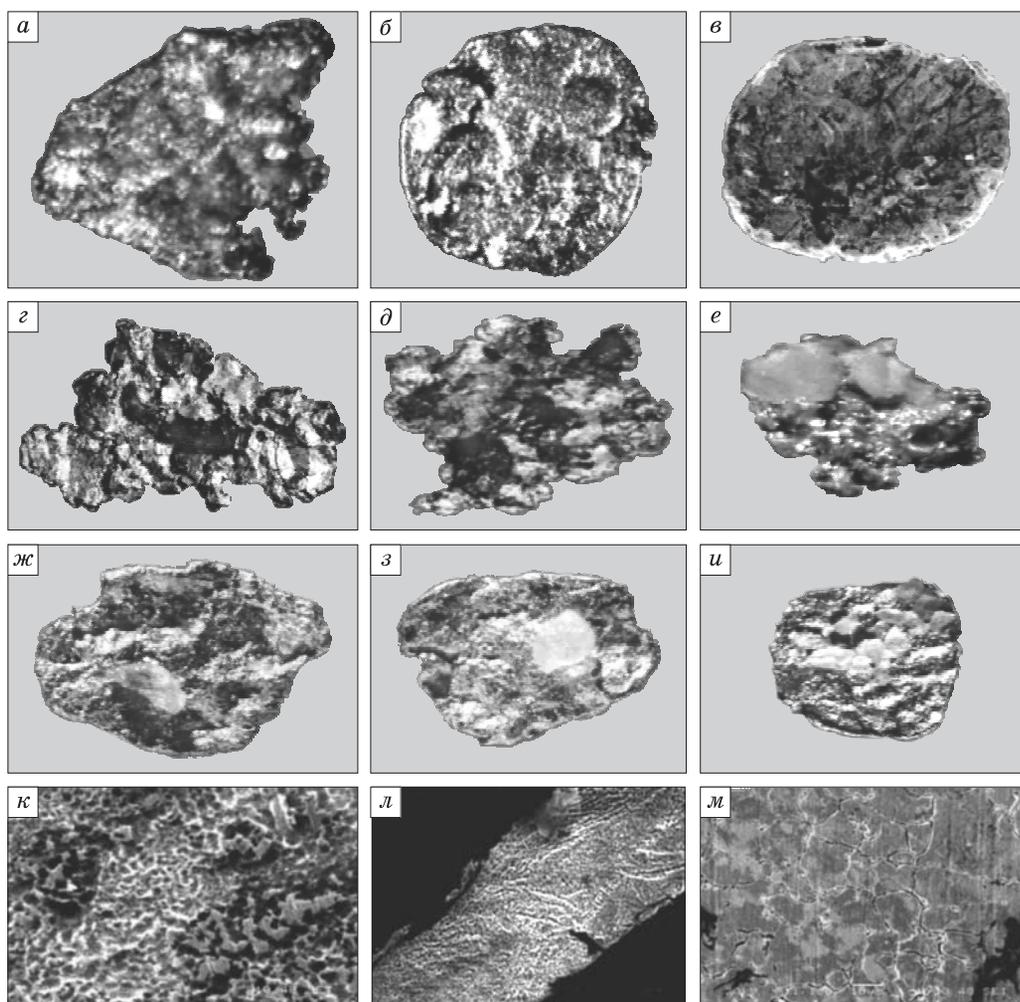
Примечание. Над чертой — значение микротвердости, под чертой — номер соответствующего замера.

[Minter et al., 1993; Филиппов и др., 1994; Сафонов и др., 2000]. Высокие содержания элового золота до 30 г/м<sup>3</sup> обнаружены в древней россыпи Тиманского кряжа в конгломератах девонского возраста [Никифорова и др., 1991]. Широкое распространение элового золота, судя по описанию форм предшественниками, установлено в четвертичных отложениях на всех платформах. Золото с признаками эоловой обработки отмечается на Северо-Американской платформе в россыпных месторождениях Альберты в Канаде, Абитиби (штаты Онтарио и Орегон), на Аляске (мыс Ном) [Giusti, 1986]. Эоловое золото обнаружено на Южно-Американской платформе в россыпных месторождениях Боливии, Колумбии, Панамы, Эквадора, юго-восточной части Африканской платформы — на территории Мозамбика, Зимбабве, Танзании [DiLabio, 1988]. Золото с признаками эоловой обработки выявлено на Европейской платформе, в частности на Северном Урале [Рыжов и др., 1977], Балтийском щите [Негруца, 1973], Кольском полуострове [Сурков, 2000], а также в центральной части Русской платформы [Лукьяненко, Колпаков, 1995; Кальниченко и др., 1995]. Эоловое золото обнаружено в россыпях Монголии (прииск Заамар) и Тувы (Танку-Тува). Поскольку золотины с эоловой обработкой представляют не только минералогический интерес, но и образуют высокие концентрации металла, обоснован вывод о перспективности обнаружения эоловых россыпей золота различного возраста на всех платформах, а также на территории Тувы и Монголии.

#### САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО В ДРЕВНИХ ЗОЛОТОНОСНЫХ КОНГЛОМЕРАТАХ И МЕТАМОРФОГЕННЫХ ТОЛЩАХ

В золотоносных конгломератах (древних ископаемых россыпях) золото не сохраняет свои морфологические особенности, а приобретает псевдорудный облик. Генезис золота таких форм объясняется воздействием литостатического давления вышележащих толщ и горизонтальных подвижек на сформированную россыпь, при этом происходит вдавливание в золото минералов вмещающих отложений, и оно приобретает рудный облик, что доказано экспериментально [Никифорова, Филиппов, 1990].

К псевдорудному золоту относятся в основном золотины размером 0.10—0.25 мм, иногда с равными краями или со сквозными отверстиями, с высокой пробностью, измененной внутренней структурой. Псевдорудное золото часто формирует агрегаты, как бы «сростки» золота с кварцем и другими

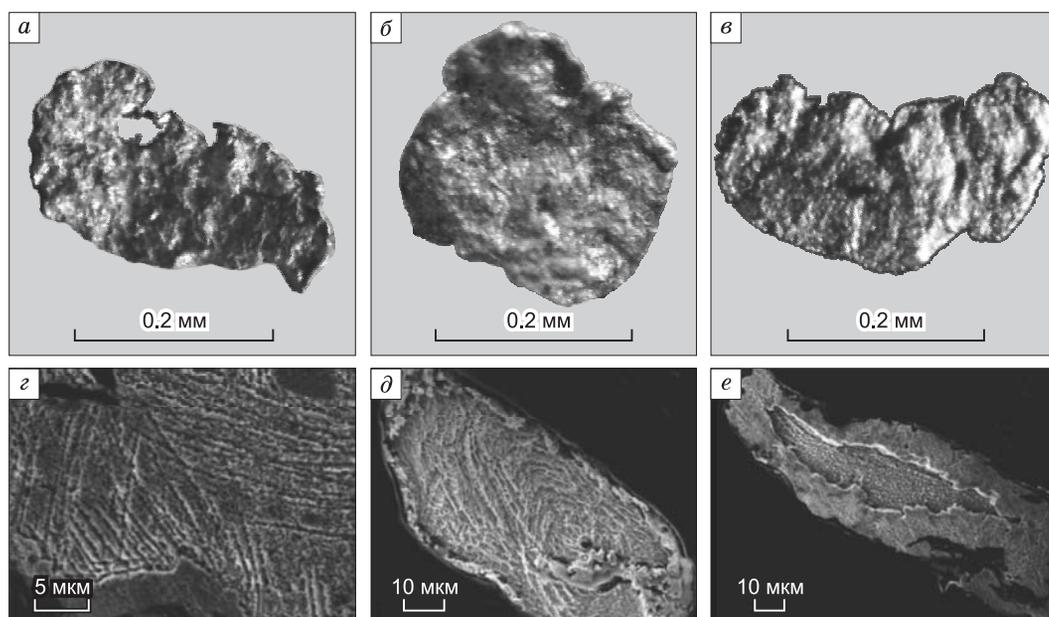


**Рис. 10. Псевдорудное золото из разновозрастных отложений востока Сибирской и Восточно-Европейской платформ:**

1-й ряд — чешуйки с отпечатками вдавливания минералов вмещающих отложений: *а* — с рваными краями, *б* — с округлыми отпечатками, *в* — пластинка со следами борозд и шрамов на поверхности увел.  $\times 25$ ; 2-й ряд — псевдосрастания золотин: *з*, *д*, *е* — с кварцем, ильменорутилом и гранатом (Тиман), увел.  $\times 20$ ; 3-й ряд — поверхность золотин: *ж*, *з*, *и* — с отпечатками вдавленных в него песчинок, полученных в ходе эксперимента, увел.  $\times 25$ ; 4-й ряд — внутренняя структура золота: *к* — рекристаллизация ( $\times 2500$ ), *л* — многочисленные линии деформации ( $\times 2500$ ), *м* — грануляция ( $\times 1100$ ).

минералами, не типичные для рудного золота, поскольку в них отсутствуют прочные контакты срастания золота с минералами. Поверхность псевдорудного золота из древних конгломератов имеет грубоямчатый, бугорчатый, мелкочаечистый микрорельеф с отпечатками вдавливания минералов вмещающих отложений (рис. 10, *а*, *б*). От первичных отпечатков рудных минералов они отличаются округлыми формами без острых выступов по краям углублений, а от коррозионных структур рельефа зон гипергернеза более глубоким диапазоном углублений от 0.01 до 0.05 мкм. На поверхности золотин наблюдаются угловатые, удлиненные вмятины в виде шрамов, продольных борозд, царапин, участки зеркальной полированной поверхности (см. рис. 10, *в*).

В связи с влиянием в древних конгломератах постоянных температур и давления происходит рекристаллизация золота (см. рис. 10, *к*) с выносом серебра и элементов-примесей, что приводит к обогащению золота и повышению пробности золотин. Иногда в золотоносных конгломератах обнаруживаются единичные золотины со структурами грануляции (см. рис. 10, *м*), которые возникли в результате замещения среднепробного золота с выносом серебра и формирования низкопробных прожилков вокруг высокопробного золота. Установлено, что при горизонтальных подвижках в золоте формируются многочисленные линии деформации (см. рис. 10, *л*), образование которых предшественниками [Петровская, 1973; Николаева и др., 2015] объяснялось воздействием механических процессов в гидродинамической среде.



**Рис. 11. Морфология и внутренние структуры метаморфогенного золота:**

1-й ряд — морфология золотинок: *а* — чешуйка с рваными краями, *б*, *в* — золотины пластинчатой формы; 2-й ряд — внутренние структуры метаморфогенного золота: *з*, *д* — многочисленные линии деформации, *е* — чешуйка с мощной высокопрочной оболочкой.

Псевдорудное золото впервые было обнаружено нами при изучении золота из россыпи девонского возраста на Тиманском кряже [Никифорова и др., 1991], где в результате тектонических процессов сформированная россыпь была погребена мощными (до 700 м) отложениями. В связи с этим золотоносные отложения россыпи были подвергнуты как вертикальным, так и горизонтальным подвижкам. При литостатическом воздействии вышележащих толщ и их смещении произошли вертикальные и горизонтальные микроподвижки тонкообломочного материала, что привело к деформации частиц россыпного золота. Под воздействием вертикального литостатического давления осадочные толщи уплотнились, а при прогибании отложений произошли горизонтальные подвижки. Это привело к смещению обломочного материала параллельно плоскостям наслоения. При вертикальном давлении вышележащих толщ произошло вдавливание минералов вмещающих отложений, а при горизонтальном смещении на золотилах появились царапины, борозды, зеркала скольжения вплоть до разрыва золотинок. Процесс деформации частиц золота под воздействием литостатического давления (вертикальных и горизонтальных микроподвижек), как показано выше, доказан нами экспериментально (см. рис. 10, *ж—и*) [Никифорова, Филиппов, 1990].

Выявленное ранее золото рудного облика — «белигес-хайский» [Избеков, 1972] и «оленекский» [Шпунт, 1974] типы на Лено-Вилуйском и Анабаро-Оленекском междуречьях востока Сибирской платформы выделено нами как псевдорудное золото. Золото псевдорудного облика обнаружено во всех водотоках востока Сибирской платформы [Никифорова и др., 2013]. Присутствие золота псевдорудного облика в аллювиальных россыпях свидетельствует, что россыпные проявления сформировались за счет поступления золота из древних промежуточных коллекторов, а не из коренных источников. Таким образом, выявление псевдорудного золота в аллювиальных россыпях является критерием определения, за счет каких источников образовалась золотоносная россыпь.

В метаморфогенных толщах архея и раннего протерозоя россыпное золото представлено в основном высокопрочными чешуйчатыми и тонкопластинчатыми золотинами размером 0.10—0.25 мм с удивительно малым набором элементов-примесей: Ag, Cu, Fe (рис. 11, *а—в*). Внутреннее строение золота характеризуется структурами рекристаллизации, перекристаллизации, многочисленными линиями деформации и мощными высокопрочными оболочками (см. рис 11, *з—е*). Такой набор типоморфных признаков золота свойствен метаморфогенному золоту, поскольку при метаморфизме осадочных толщ при воздействии постоянных температуры и давления золото преобразуется [Моисеенко, 1965]. При этом происходит процесс изменения внутренней структуры первичного золота, сопровождающийся выносом серебра и примесей, что способствует появлению структур перекристаллизации, рекристаллизации, вы-

сокопробных оболочек, а при динамометаморфизме (горизонтальных подвижках) — многочисленных пластических деформаций. Действительно, по данным А.В. Копелиовича [1965], при глубинном эпигенезе — длительном воздействии постоянного давления, осуществляется своеобразное «перекачивание» элементов-примесей из внутренних частей минералов к периферии, в связи с этим происходит «самоочистка» минералов от содержащихся в них примесей. Обращаем внимание, что, хотя метаморфогенное золото изучалось в разное время такими известными минералогами по золоту, как Н.В. Петровская [1973], Г.С. Попенко [1982], Н.Е. Савва [1990], Л.А. Николаева и др. [2015] и др., эта проблема нуждается в серьезном исследовании.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наряду с общеизвестными факторами изменения самородного золота в экзогенных условиях, впервые установлены некоторые аспекты преобразования золота по морфологии, вещественному составу и внутренней структуре в зависимости от того, в какой среде оно пребывало и воздействию каким процессам оно подвергалось.

В золотоносных корах выветривания латеритного и каолинового профиля, наряду с эндогенным, формируется гипергенное самородное золото. Оно представлено новообразованными кристаллами, друзовидными агрегатами, изометричными образованиями, шариками, а также мельчайшими формами роста на поверхности более ранних частиц золота. При высвобождении дисперсного Au из сульфидов, теллуридов и других минералов происходит его укрупнение и повышение пробности.

В гидродинамической среде россыпное золото, независимо от формы (гемидиоморфные, идиоформные, интерстициальные и др.), уплотняется и подвергается простой деформации, химический состав и внутренняя структура золота в данной среде практически не изменяются. Однако при продолжительном пребывании и при неоднократном переотложении из древних отложений (докембрийских) в более молодые (четвертичные) происходит изменение химического состава и внутренней структуры золота.

В техногенных россыпях золото преобразуется как по морфологии, так и по химическому составу, оно представлено мельчайшими кристалликами, осажденными на различных металлических частичках (провода, дробь и т. д.), а также амальгамированным золотом в виде псевдоморфоз в сростании с оксидами железа и другими минералами. Установлено, что изменение золота зависит от технологии отработки россыпей и ландшафтно-климатических условий.

В оловоносной среде при механогенном преобразовании россыпное золото различной конфигурации стремится приобрести шаровидную форму с характерной пленочно-волокнутой поверхностью, при этом наблюдается изменение не только формы золота, но и его обогащение — повышение пробности, уменьшение элементов-примесей и, как следствие, понижение микротвердости.

В древних золотоносных коллекторах россыпное золото не сохраняет свои морфологические особенности, а приобретает псевдорудный облик. В результате воздействия литостатического давления вышележащих толщ золото образует неустойчивые псевдосрастания с минералами вмещающих отложений, на поверхности золотин появляются шрамы, царапины, сквозные отверстия и др.

В метаморфогенных толщах золото обогащается вследствие воздействия постоянных температур и давления, происходит перекристаллизация и рекристаллизация золота с повышением пробности и очищение его от элементов-примесей.

В целом установлено, что экзогенные процессы четко отражаются на изменении морфологии, минералого-геохимических свойств и внутренней структуре самородного золота. Ярким примером влияния экзогенных процессов на самородное золото является уникальное месторождение Витватерсранд, формирование которого длилось 2.7—3.1 млрд лет. В золотоносных конгломератах Витватерсранда, по нашему мнению, обнаружено золото с индикаторными признаками влияния процессов зоны гипергенеза, гидродинамической и оловоносной среды, литостатического воздействия и влияния  $P$ - $T$  условий. Выявление тороидального и шаровидного-пустотелого, а также псевдорудного и метаморфогенного золота свидетельствует о первично-осадочном происхождении этих отложений [Никифорова, Филиппов, 1990; Филиппов и др., 1994]. Генезис этих конгломератов до сих пор спорный. Присутствие россыпного золота с характерными индикаторными признаками аллювиальных, оловяных отложений в древних золотоносных конгломератах и метаморфогенных толщах дает основание предположить о первичном осадочном происхождении Витватерсранда [Oberthur, Saagger, 1986; Minter et al., 1993; Филиппов, 1997; Сафонов и др., 2000; и др.], а затем наложенной дополнительной минерализации.

Итак, обосновано, что золото в экзогенных условиях подвергается ранее не рассмотренным аспектам эволюции во времени и пространстве. В коре выветривания происходит новообразование наночастиц и микрочастиц за счет разложения сульфидов, теллуридов и других неустойчивых соединений, содержащих золото. На основании полученных результатов экспериментальных и минералогических исследований доказано, что при воздействии оловяных процессов на самородное золото наблюдается

преобразование не только формы, но и химического состава. При влиянии на россыпное золото литостатического давления вышележащих отложений в древних россыпях формируется псевдорудное золото, а при проявлении постоянных температур и давления в метаморфогенных толщах отмечается облагораживание золота.

Таким образом, выявленные индикаторные признаки россыпного золота для различных экзогенных обстановок позволяют реконструировать геологогеоморфологическую обстановку россыпеобразования — определить генетический тип россыпей (коры выветривания, аллювиальные, золовые и др.), а также установить источники питания (промежуточные коллекторы или коренные), что дает возможность более корректно подобрать методику поиска россыпных и рудных месторождений золота.

Работа выполнена по государственному заданию ИГАиБМ СО РАН и ИГМ СО РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

**Амосов Р.А., Козырева Н.А., Дейнекина Л.М.** Морфология «неизвлекаемого» золота в корах выветривания // Докл. АН СССР, 1988, т. 303, № 3, с. 711—714.

**Бадалова Р.П., Николаева Э.П., Толкачева Л.Ф.** Изучение микротвердости минералов ряда золото—серебро из золоторудных месторождений Узбекистана // Физические свойства редкометаллических минералов и методы их исследований. М., Наука, 1968, с. 72—75.

**Генкин А.Д., Лопатин В.А., Савельев Р.А., Сафонов Ю.Г., Сергеев Н.Б., Керзин А.Л., Цепин А.И., Амштутц Х., Афанасьева З.Б., Вагнер Ф., Иванова Г.Ф.** Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский кряж, Сибирь) // Геология рудных месторождений, 1994, т. 36, № 2, с. 111—136.

**Жмодик С.М., Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Миронов А.Г., Михлин Ю.Л., Белянин Д.К., Немировская Н.А., Спиридонов А.М., Нестеренко Г.В., Айриянц Е.В., Мороз Т.Н., Бульбак Т.А.** Наночастицы благородных металлов в зоне гипергенеза // Геология рудных месторождений, 2012, т. 54, № 2, с. 168—183.

**Избеков Э.Д.** Особенности россыпного золота Вилуйской синеклизы и прилегающих районов // Россыпи золота и их связи с коренными источниками в Якутии. Якутск, Якут. кн. изд-во, 1972, с. 178—199.

**Избеков Э.Д.** Система коренной источник—россыпь. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1995, 202 с.

**Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г.** Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2006, 339 с.

**Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Наумов Е.А., Кириллов М.В.** Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (3), с. 241—257.

**Калинин Ю.А., Пальянова Г.А., Бортников Н.С., Наумов Е.А., Ковалев К.Р.** Механизмы агрегации и дифференциации золота и серебра при формировании золотоносных кор выветривания (на примере месторождений Казахстана) // ДАН, 2018, т. 482, № 2, с. 190—195.

**Кальниченко С.С., Иванов Н.М., Каримова Н.А., Коняев М.В., Филиппов В.П., Яблокова С.В.** Основные типы золотосодержащих месторождений осадочного чехла центральной части Восточно-Европейской платформы // Руды и металлы, 1995, № 6, с. 5—15.

**Ковлеков И.И.** Техногенное золото Якутии. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 303 с.

**Копелиович А.В.** Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы. М., Наука, 1965, 311 с.

**Копылов Р.Н.** Дифференциация золота в аллювиальных пластовых россыпях. Якутск, Изд-во НИПК «Сахаполиграфиздат», 2002, 144 с.

**Лебедева С.И.** Определение микротвердости минералов. М., Изд-во АН СССР, 1963, 122 с.

**Лукьяненко Н.П., Колпаков В.В.** Открытие россыпного золота в Белоруссии // Золото России, 1995, № 1—4, с. 35—40.

**Макаров В.А.** Геолого-технологические основы ревизии техногенного минерального сырья на золото. Красноярск, Изд-во ООО «Поликом», 2001, 132 с.

**Макаров В.А., Самородский П.Н.** Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота // Золото и технологии, 2018, т. 42, № 4, с. 82—96.

**Маракушев С.А.** Геомикробиология и биохимия трансформации золота: Автореф. дис.... д.г.-м.н. М., 1997, 47 с.

**Моисеенко В.Г.** Метаморфизм золота месторождений Приамурья. Благовещенск, Хабар. кн. изд-во, 1965, 127 с.

**Мязин В.П., Татауров С.Б.** Новые технические разработки поточных линий (схем) для переработки золотосодержащих песков техногенных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2000, № 5, с. 174—178.

**Наумов В.А.** Минерагения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия: Автореф. дис.... д.г.-м.н. Пермь, 2010, 39 с.

**Негруца В.З.** Некоторые закономерности распределения и морфологические типы золота в докембрийских метатерригенных породах восточной части Балтийского щита // Докл. АН СССР, 1973, т. 211, № 1, с. 197—200.

**Нестеренко Г.В., Воротников Б.А., Николаева Н.М., Пещевицкий Б.И.** Новообразования минералов золота в зоне окисления сульфидных месторождений Казахстана // Зап. ВМО, 1985, ч. СХIV, вып. 5, с. 555—568.

**Никифорова З.С., Филиппов В.Е.** Золото псевдорудного облика в древних конгломератах // Докл. АН СССР, 1990, т. 311, № 2, с. 455—457.

**Никифорова З.С., Филиппов В.Е., Цаплин А.Е.** Эоловое золото одного из россыпных месторождений Тиманского кряжа // Геология рудных месторождений, 1991, т. 33, № 2, с. 112—116.

**Никифорова З.С., Филиппов В.Е., Герасимов Б.Б.** Влияние эоловых процессов на образование золотоносных россыпей в различные эпохи развития Земли // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (5), с. 517—528.

**Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Глушкова Е.Г., Каженкина А.Г.** Золотоносность востока Сибирской платформы: россыпи—коренные источники // Геология рудных месторождений, 2013, т. 55, № 4, с. 305—319, DOI: 10.7868/S0016777013040060.

**Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Глушкова Е.Г., Каженкина А.Г.** Индикаторные признаки россыпного золота как показатель прогнозирования формационных типов золоторудных месторождений (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1643—1657, DOI: 10.15372/GiG20181009.

**Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В.** Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. М., ЦНИГРИ, 2015, 200 с.

**Парий А.С., Амосов Р.А.** Технологическое опробование техногенных россыпей с мелким и тонким золотом // Горный журнал, 1998, № 5, с. 33—41.

**Петровская Н.В.** Самородное золото. М., Недра, 1973, 347 с.

**Петровская Н.В., Новгородова М.И., Фролова К.Е.** О природе структур и субструктур эндогенных выделений самородного золота // Минералогия самородных элементов. Владивосток, Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1980, с. 10—20.

**Попенко Г.С.** Минералогия золота четвертичных россыпей Узбекистана. Ташкент, Изд-во ФАН, 1982, 14 с.

**Рыжов Б.В., Николаева Л.А., Будилин Ю.С., Ланцев И.П.** Типоморфные особенности золота россыпей Северного Урала // Геология и разведка, 1977, № 5, с. 72—79.

**Сафонов Ю.Г., Бершов Л.В., Богатырев Б.А., Горшков А.И., Дойников О.А., Жуков В.В.** Главнейшие признаки первично-осадочной природы раннепротерозойских золото-урановых руд бассейна Витватерсранд (ЮАР) // XII Международное совещание по геологии россыпей и месторождений кор выветривания. Природные и техногенные россыпи и месторождения кор выветривания на рубеже тысячелетий. М., ИГЕМ РАН, 2000, с. 325—328.

**Смирнов С.С.** Зона окисления сульфидных месторождений. М., Изд-во АН СССР, 1955, 331 с.

**Сурков А.В.** Атлас морфологии самородного золота. Ч. 1. М., Издательско-полиграфическая фирма «СтудиА», 2000, 60 с.

**Тищенко Е.И.** К вопросу об эволюции уплощенности золота в аллювиальных россыпях // Геология и геофизика, 1981 (10), с. 34—40.

**Трушков Ю.Н.** Условия формирования и закономерности распределения россыпей в мезозоидах Якутии. М., Наука, 1971, 265 с.

**Фельдбарг Н.Е., Захарова Е.М.** Специфика поисковых работ на золото в старых горно-промышленных районах // Изв. вузов. Геология и разведка, 1984, № 9, с. 68—73.

**Филиппов В.Е.** Моделирование условий формирования аллювиальных россыпей золота. Якутск, Наука, 1991, 44 с.

**Филиппов В.Е.** Роль эоловых процессов в формировании металлоносных конгломератов и сопутствующих им отложений в бассейнах типа Витватерсранд // Отечественная геология, 1997, № 8, с. 40—42.

**Филиппов В.Е., Никифорова З.С.** Преобразование частиц самородного золота в процессе эолового воздействия // Докл. АН СССР, 1988, т. 299, № 5, с. 1229—1232.

**Филиппов В.Е., Никифорова З.С., Minter W.E.L.** Эоловая концепция формирования месторождений золота бассейна Витватерсранд // Россыпи и месторождения кор выветривания — объект инвестиций на современном этапе: тез. докл. X Международного совещания. М., 1994, с. 216—218.

**Шпунт Б.Р.** Типоморфные особенности и генезис россыпного золота на севере Сибирской платформы // Геология и геофизика, 1974 (9), с. 77—88.

**Anand R.R., Butt C.R.M.** A guide for mineral exploration through the regolith in the Yilgarn Craton, Western Australia // *Aust. J. Earth Sci.*, 2010, v. 57, p. 1015—1114.

**Colin F., Vieillard P.** Behaviour of gold in the equatorial environment: Weathering and surface dispersion of residual gold particles, at Dondo Mobi, Gabon // *Appl. Geochem.*, 1991, v. 6, p. 279—290.

**Craw D., MacKenzie D.** Supergene gold mobility in orogenic gold deposits, Otago Schist, New Zealand // *N. Z. J. Geol. Geophys.*, 2015, v. 58, № 2, p. 123—136.

**DiLabio R.N.W., Newsome J.W., McIvor D.F., Lowenstein P.L.** The spherical form of gold: Man-made or secondary? // *Econ. Geol.*, 1988, v. 83, p. 153—162.

**Freise F.W.** The transportation of gold by organic solutions // *Econ. Geol.*, 1931, v. 6, № 4, p. 599—604.

**Freyssinet P., Romand B., Greffié C., Crouzet C.** Migration processes of soluble and colloidal gold in a lateritic deposit of Amazonia // PDAC-CIM Conference «Mining the Millenium», Toronto, March, 2000, p. 2—9.

**Giusti L.** The morphology, mineralogy and behaviour of «fine-grained» gold from placer deposits of Alberta: Sampling and implications for mineral exploration // *Can. J. Earth Sci.*, 1986, v. 23, p. 1662—1672.

**Kalinin Yu.A., Palyanova G.A., Naumov E.A., Kovalev K.R., Pirajno F.** Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: A case study from Kazakhstan // *Ore Geol. Rev.*, 2019, v. 109, p. 358—369.

**Lawrance L.M., Griffin B.J.** Crystal features of supergene gold at Hannan South, Western Australia // *Mineral. Deposita*, 1994, v. 29, p. 391—398.

**Letchman H.** A Pre-Columbian technique for electrochemical replacement plating of gold and silver on copper objects // *JOM*, 1979, v. 31, № 12, p. 154—160.

**Mann A.W.** Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles; some observations from Western Australia // *Econ. Geol.*, 1984, v. 79, № 1, p. 38—49.

**Minter W.E.L., Goedhart M., Knight J., Frimmel H.E.** Morphology of Witwatersrand gold grains from the Basal reef: Evidence for their detrital origin // *Econ. Geol.*, 1993, v. 88, № 2, p. 237—248.

**Nair N.G.K., Santosh M., Mahadevan R.** Lateritisation as a possible contributor to gold placers in Nilambur Valley, southwest India // *Chem. Geol.*, 1987, v. 60, № 1—4, p. 309—315.

**Oberthur T., Saagger R.** Silver and mercury in gold particles from the Proterozoic Witwatersrand placer deposits of South Africa: Metallogenic and geochemical implication // *Econ. Geol.*, 1986, v. 81, p. 20—31.

**Porto C.G., Hale M.** Gold redistribution in the stone line lateritic profile of the Posse Deposit, central Brazil // *Econ. Geol.*, 1995, v. 90, № 2, p. 308—321.

**Reith F., Stewart L., Wakelin S.A.** Supergene gold transformation: Secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand // *Chem. Geol.*, 2012, v. 320—321, p. 32—45.

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

**Townley B.K., Herail G., MaksaeV., Palacios C., de Parseval P., Sepulveda F., Orellana R., Rivas P., Ulloa C.** Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas // *Geochem. Explor. Environ. Anal.*, 2003, № 3, p. 29—38.

*Рекомендована к печати 31 января 2020 г.  
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию 14 июня 2019 г.,  
после доработки — 9 декабря 2019 г.*