

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 549; 543.428.3; 622.77

### МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗНОВИДНОСТИ ЗОЛОТА В РУДНОМ И ТЕХНОГЕННОМ СЫРЬЕ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Н. Ф. Усманова<sup>1,2</sup>, В. И. Брагин<sup>2,1</sup>, А. М. Жижжаев<sup>1</sup>,  
Е. Н. Меркулова<sup>1</sup>, Ю. Ю. Фисенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН, E-mail: usman@icct.ru,  
ул. Академгородок, 50, стр. 24, 660036, г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет,

просп. Свободный, 79, 660041, г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup>ООО “НВП Центр-ЭСТАгео”, просп. Ленинский, 6, стр. 1, 119049, г. Москва, Россия

Представлены результаты изучения морфологии золота в исходной руде и техногенных илах коры выветривания Енисейского кряжа методами оптической и электронной микроскопии. Определены крупность, формы золотин, характер срастания золота с рудными и породообразующими минералами в исследуемом материале, микропримеси, характерные для свободных частичек золота, обнаруженных в исходной руде и лежалом сырье хвостохранилища.

*Кора выветривания, морфология золота, техногенное сырье*

Одним из основных источников информации для разработки эффективной технологии извлечения ценных компонентов из перерабатываемых руд служат максимально достоверные сведения о минеральном составе исходного сырья, формах обнаружения и вкрапленности ценных компонентов, химическом составе, текстурно-структурных особенностях, физико-механических свойствах. Так, в золотодобывающей промышленности практический интерес представляют “нетрадиционные” источники золота — коры выветривания [1–3], пригодные для извлечения металла с применением новых совершенных технологий, комплексные золотополиметаллические руды, песчано-гравийные отложения, золошлаки ТЭЦ [4, 5], техногенные золотосодержащие образования, хвостохранилища, сформировавшиеся в результате россыпной и коренной золотодобычи. В техногенном сырье за многие годы образовался сложный минеральный комплекс, представленный различными первичными и вторичными минеральными ассоциациями. Первичный вещественный состав обусловлен отходами обогащения руд и вмещающих их пород, а вторичный — процессами гипергенеза [6, 7]. В результате образуются новые минеральные соединения, которые в ходе переработки будут оказывать существенное влияние на технологию и эффективность обогащения. По различным оценкам [8], в техногенном сырье запасы золота составляют 2000–3000 т.

Применение в минералогических исследованиях наряду с современной оптической микроскопией методов сканирующей электронной микроскопии дает возможность подробно изучать минеральные фазы в наноразмерной крупности, детально диагностировать микро- и взаимопрорастания минералов, что позволяет по-новому взглянуть на уже изученные объекты, более детально исследовать новые рудные объекты [9, 10]. При переработке руд исследование продуктов обогащения методами электронной микроскопии дает полную картину о наличии микропримесей и характере сростания ценного компонента с породообразующими минералами, позволяет скорректировать технологию извлечения для получения высоких технологических показателей.

Вовлекаемые в последние годы в освоение руды относятся в основном к труднообогатимым. Одним из примеров таких руд являются золотоносные коры выветривания из-за повышенного содержания глинистой фракции, большого количества золота в сростках в тонких классах. Например, в Южно-Енисейском рудном районе Енисейского кряжа золотоносные участки коры выветривания относятся к гидрослюдисто-каолинитовому типу, размеры золотинок, определенные при геологическом изучении, 0.1–0.3 мм, реже 0.5–0.8 мм, форма частиц разнообразная. Значительная часть золота связана с частицами гидроокислов железа [11].

#### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектом исследований послужили представительные пробы золотосодержащей руды коры выветривания участка Верхнеталовский (содержание золота в руде 2.8 г/т) и пробы техногенного материала илонакопителей участка Центральный (исходное содержание золота 1.86 г/т) месторождения Самсон Енисейского кряжа.

Пробоподготовку образцов из исходного рудного материала осуществляли сначала разделением по классам крупности со стандартным набором сит. Далее из мелких классов промывкой в лотке выделяли тяжелые фракции. Из тонких классов богатые по золоту продукты получены в тяжелых жидкостях — растворе Клеричи и бромформе. Отдельные золотины в тяжелых фракциях мелких классов изучали на оптическом микроскопе Nikon SMZ 1500.

Для исследований на сканирующем электронном микроскопе взяты аншлифы из исходной руды, материала классов крупности, продуктов обогащения, техногенного материала. Образцы перед микроскопическим изучением готовили импрегнированием эпоксидной смолой EpiFix, последовательной обработкой поверхности наждачной бумагой SiC P200-P2000 и корундовыми суспензиями различной крупности с последующей финишной полировкой суспензиями коллоидного кремнезема на шлифовально-полировальном станке TegraPol-15 (Struers, Швейцария).

Изучение продуктов обогащения проводили на сканирующих электронных микроскопах РЭМ-100У (во вторичных электронах) и Hitachi TM-1000, Hitachi TM-3000 (в обратноотраженных электронах) с системами микроанализа SwiftED (Oxford Electronics, Англия) и Quantax 70 (Bruker, Германия) соответственно.

Рентгенофазовый анализ исходной руды выполнен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с излучением  $\text{Cu-K}\alpha$ , шаг сканирования 0.02 град, время накопления в точке 1 с. Расчет и расшифровка данных осуществлены по стандартной методике с использованием картотеки эталонных порошковых спектров JCPDS.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

По результатам рентгенофазового анализа породообразующие минералы как в илах, так и в исходной руде представлены каолинитом, кварцем, гидрогетитом, мусковитом, хлоритом. В исходной руде каолинит в максимальной степени представлен в шламе – 0.044 мм и

в крупных классах, где он слагает плотные агрегаты с кварцем. Мусковит в руде встречается в незначительных количествах, содержание его повышается в крупных классах (более 5 мм), где он находится в составе реликтов сланцев. Содержание гетита существенно возрастает в классах  $-0.315 + 0.074$  мм. Кроме того, в исходной руде присутствует ильменит, в меньшей степени апатит, фосфаты редкоземельных элементов. Химический состав руды, %:  $\text{SiO}_2$  — 48.45,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 15.8,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 18.39,  $\text{CaO}$  — 1.35,  $\text{MgO}$  — 2.12,  $\text{Na}_2\text{O}$  — 0.1,  $\text{TiO}_2$  — 2.56,  $\text{K}_2\text{O}$  — 0.3,  $\text{MnO}$  — 0.2,  $\text{P}_2\text{O}_5$  — 3.10,  $\text{S}_{\text{общ}}$  — 0.079,  $\text{Zn}$  — 0.18,  $\text{Pb}$  — 0.03,  $\text{As}$  —  $< 0.001$ . Содержание золота и серебра в исходной руде, определенное пробирным анализом, составило соответственно 2.8 и 2.0 г/т.

Лежалые илы имеют крупность  $-0.5$  мм. В илах в тонких классах концентрируются глинистые минералы, оксиды и гидроксиды железа и хлорит, относительно крупные классы обогащены кварцем.

В исходной руде золото находится в свободном виде (рис. 1) в мелких и тонких классах, в сростках с сульфидами (рис. 2б) и породообразующими минералами (рис. 2а, в, г). Крупность золотинок различная, варьирует от 1–3 до 200 мкм. Золотины в свободном виде имеют причудливые окатанные и полуокатанные формы с извилистым внешним контуром. Рельеф поверхности ямчато-бугорчатый (рис. 1а, б), относительно ровный (рис. 1в). Частицы золота, заключенные в сростках, характеризуются губчатой, пористой, “изъеденной” структурой.

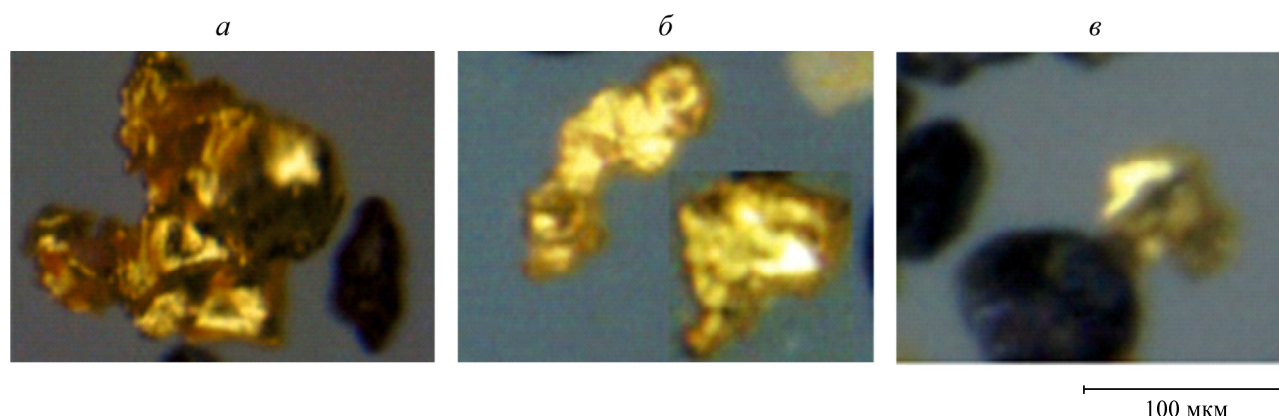


Рис. 1. Золото в классах крупности исходной руды:  $-0.315 + 0.16$  мм (а);  $-0.16 + 0.1$  мм (б);  $-0.1 + 0.074$  мм (в)

В результате гравитационного обогащения в концентрат переходит как свободное золото, так и относительно крупные частицы металла, заключенные в сростках (рис. 2). Пробность золота колеблется от 72.5 до 84.7 мас. % (табл. 1). Исследованные золотины неоднородны по составу серебра, содержание которого изменяется от 3.93 до 12.7 % от центра золотины к периферии в объеме одной частички (рис. 2а). Кроме золота и серебра, в частичках золота в небольших количествах присутствуют Si, Fe, Ti (табл. 1). Наличие таких примесей определяется присутствием дисперсных включений и примазок. Присутствие примесей титана характерно для золотинок, обнаруженных в рудном сырье Енисейского кряжа [12].

Для представленных на рис. 2 частиц золота характерны микропористость, губчатый характер поверхности золотинок, которые обычно формируются в процессах выщелачивания, сопровождающих формирование коры выветривания [6, 12]. Золотины часто находятся в сростках с хемогенными вторичными минералами, свойственными для коры выветривания, — слюдами, оксигидроксидами железа [1].

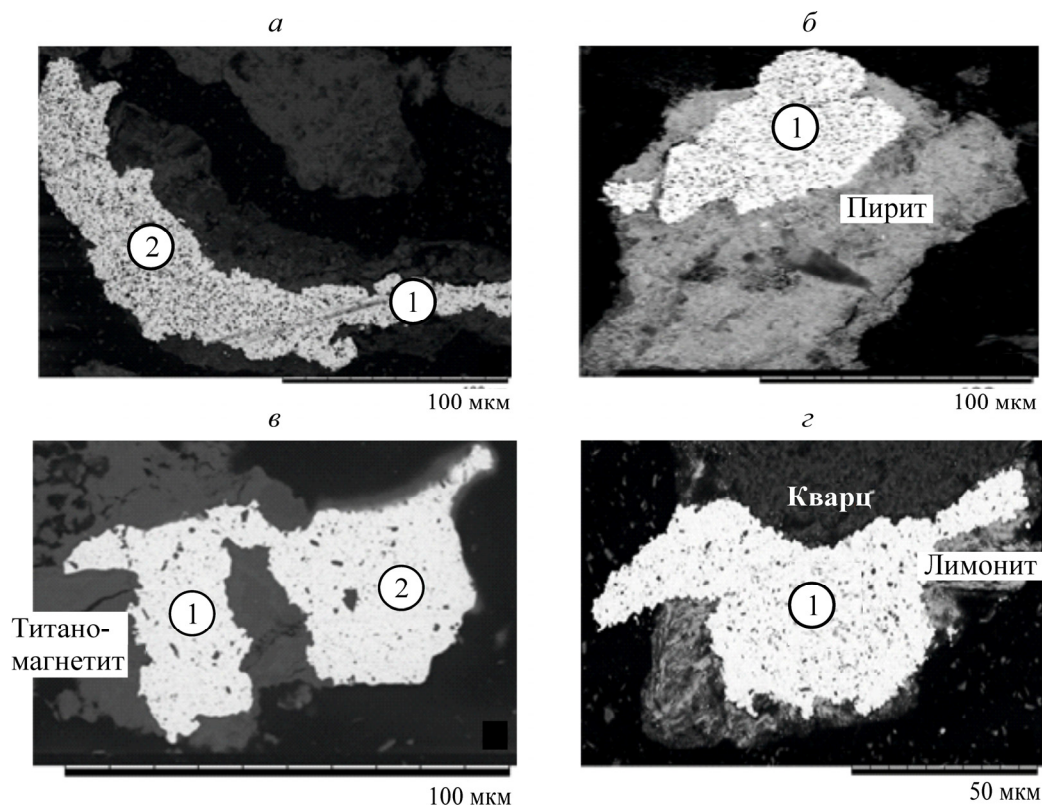


Рис. 2. SEM-изображения в обратноотраженных электронах золотин в аншлифах черного гравиоконцентрата

ТАБЛИЦА 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа по точкам, указанным на рис. 2

Элемент	Позиция, содержание элементов, мас. %					
	<i>а</i>		<i>б</i>	<i>в</i>		<i>г</i>
	1	2		1	2	
Au	72.5	78.1	77.54	81.53	84.7	70.22
Ag	12.7	3.93	4.37	6.04	4.38	9.15
Si	2.0	7.62	7.61	1.02	0.7	8.15
Fe	2.23	2.09	1.56	1.05	1.59	1.92
Ti	1.61	1.7	1.94	2.54	2.46	2.18

Микроскопическое изучение “золотой головки” гравиоконцентрата позволило более детально рассмотреть формы и поверхность свободных золотин. Частички золота имеют сложные формы. Присутствуют частицы с неровными, хаотично выступающими “рваными” краями (рис. 3а), комковидные полуокатанные агрегаты неправильных форм с полостями, из глубины которых видны новые скульптуры роста (рис. 3б). Обнаружена сложная частичка золота грибообразной формы. Основанием частицы (“ножкой гриба”) служит золотина неправильной прямоугольной формы. “Шляпка гриба” имеет куполообразную губчатую форму (рис. 3д). Грибообразная частица золота является ответвлением от агрегата правильной кубической скульптуры.

Рельеф золотин сложный, неровный. При детальном микроскопическом исследовании обнаруживается, что поверхность некоторых золотин покрыта слоем тонкодисперсных (субмикронных) частиц неокатанного золота остаточного либо гипергенного генезиса (рис. 3в, е).



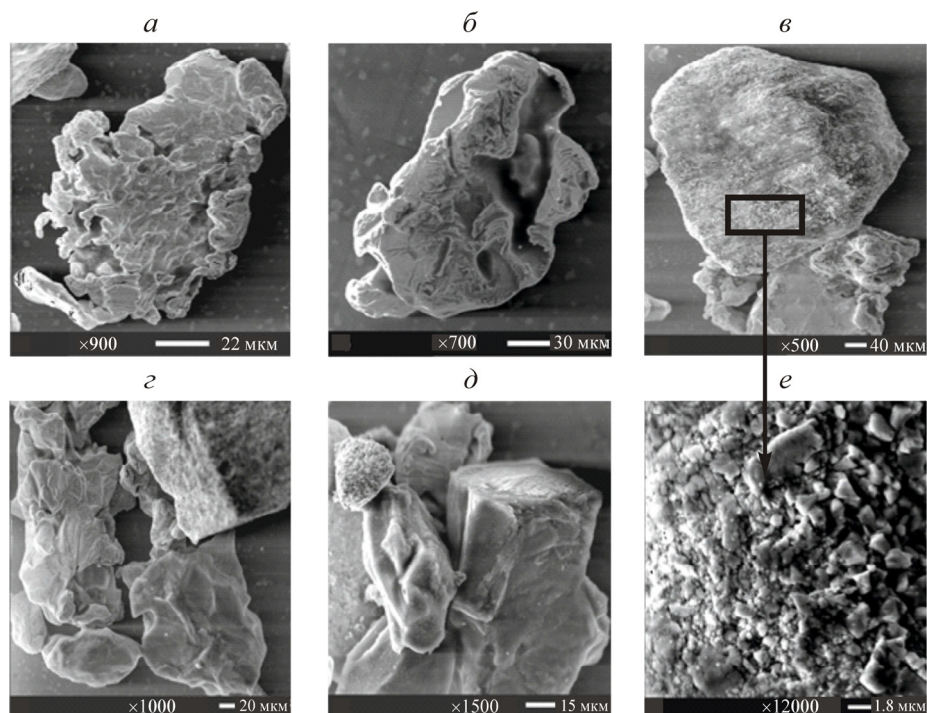


Рис. 3. Золото в гравиметрическом концентрате доводки черного концентрата (“золотая головка” гравиметрического концентрата). СЭМ-изображение, полученное во вторичных электронах

В аншлифах, подготовленных из техногенных илов, золотины представлены конгломератами крупностью менее 10 (5) мкм, состоящими из тонких частичек золота различных причудливых форм. Частицы неоднородны по своему составу: обнаружены золотины с преобладанием в составе Au до 73,9 мас. % (рис. 4а) и Ag-Au частицы с преобладанием серебра над золотом в отношении до 3 : 1 (рис. 4б–г). В серебряно-золотых конгломератах отмечается наличие железа, кремния, алюминия и хлора.

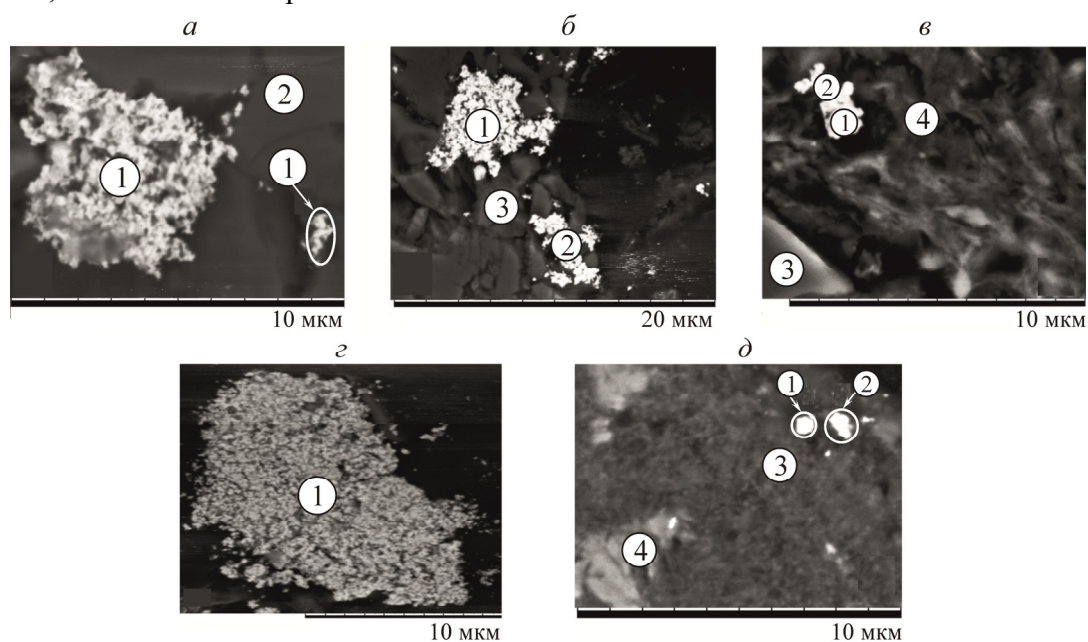


Рис. 4. SEM-изображения в обратноотраженных электронах золотосодержащих конгломератов в аншлифах техногенных илов

Содержание серебра и золота в объеме одной пластины также может быть неоднородно (рис. 4в, табл. 2в). Обнаружены включения микронных частиц золота в клинохлоре, а также во вторичных лимонитизированных породах (рис. 4д). Высокое содержание железа по результатам микрорентгеноспектрального анализа обусловлено вмещающими породами, в которые заключены микронные частички золота (табл. 2д).

ТАБЛИЦА 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа по точкам, указанным на рис. 4

Элемент	Позиция, содержание элементов, мас. %													
	а		б			в				г	д			
	1	2	1	2	3	1	2	3	4	1	1	2	3	4
Au	73.9	—	26.9	33.7	—	8.1	10.4	—	—	30	5.5	19.3	—	—
Ag	23.1	—	65.4	58.6	—	25.4	30.4	—	—	62.3	—	—	—	—
Si	1.5	89.6	2.5	3.8	90.5	8.0	11.8	98.2	36.9	4.3	14.0	16.3	40.5	5.4
Al	1.4	—	—	—	1.3	1.8	2.6	—	18.8	—	10.3	8.2	23.9	4.2
Fe	—	10.4	5.2	3.9	8.2	56.7	44.8	1.8	40.2	3.4	67.8	51.9	32.9	90.4
Cl	—	—	—	—	—	—	—	—	4.1	—	2.4	4.4	2.7	—

В отличие от золотин исходной коры выветривания, в техногенных илах обнаружена золотина, где в качестве примесей присутствует Cl в сочетании с относительно повышенным количеством железа (табл. 2д). Обнаруженные в техногенных илах серебристые золотины типичны для агрегатов наночастиц “нового” золота [10].

Меньшая крупность золота в техногенных илах обусловлена тем, что крупное золото было извлечено в результате первичного гравитационного обогащения. Форму обнаруженных в илах благороднометалльных конгломератов можно объяснить избирательной коагуляцией плавучего золота и остаточных сульфидов и сульфосолей на поверхности шламовой пульпы в процессе переработки коры выветривания. Дополнительным фактором может служить присутствие в илах поверхностно-активной органики, образовавшейся из растительных остатков, а также флокулянтов, добавляемых в оборотную воду при разработке месторождения.

### ВЫВОДЫ

В результате электронно-микроскопического исследования аншлифов исходной руды коры выветривания, техногенных илов и продуктов обогащения установлено, что морфологически золото в илах и в исходной руде коры выветривания существенно различается. В исходной руде оно представлено компактными губчатыми золотинами различной крупности в сростках с минералами, характерными для зоны гипергенеза. В свободной форме присутствуют золотины различных сложных скульптур роста. Крупность золотин варьирует от единичных микроников до 200 мкм.

В илах крупность золотин значительно меньше, присутствуют рыхлые конгломераты крупностью 5–10 мкм, состоящие из субмикронных частиц “нового” золота, которые не могли перейти непосредственно из первичной коры выветривания и были бы разрушены при промывке и гидротранспортировке в отвал. В первичной руде коры выветривания такие образования не обнаружены. Механизм этого процесса требует дальнейшего обсуждения.

На основании обнаруженных морфологических изменений золотин в техногенном сырье хвостохранилища может сделать вывод, что для извлечения золота из данного материала будут эффективны флотационные методы обогащения, поскольку при гравитационном обогащении конгломераты разрушатся и вновь перейдут в хвосты.

Авторы выражают благодарность В. Ф. Каргину за выполнение некоторых электронно-микроскопических исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Ю. А., Росляков Н. А., Прудников С. Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. — Новосибирск: Изд-во “Гео”, 2006.
2. Сердюк С. С. Золотоносные коры выветривания Сибири. — Красноярск: КНИИГиМС, 2002.
3. Полякова Т. Н., Риндзюнская Н. М., Николаева Л. А. Золото в корях выветривания Урала // Руды и металлы. — 1995. — № 1.
4. Черепанов А. А., Кардаш В. Т. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2009. — № 2.
5. Черепанов А. А. Благородные металлы в золошлаковых отходах Дальневосточных ТЭЦ // Тихоокеан. геология. — 2008. — Т. 2. — № 2.
6. Наумов В. А., Наумова О. Б. Преобразование золота в техногенных россыпях // Эл. журнал “Современные проблемы науки и образования”. — 2013. — № 5.
7. Макаров В. А. Геолого-технологические основы ревизии техногенного минерального сырья на золото. — Красноярск: КНИИГиМС, 2001.
8. Луняшин П. Д. Золото для будущего // Металлы Евразии. — 2013. — № 4.
9. Ожогин Д. О., Орлова Н. И., Власов Н. Г. Тонкодисперсное золото в золото-сульфидных и золото-сульфидно-кварцевых рудах // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: тр. Всерос. (с междунар. участием) науч. конф., посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН / под ред. Ю. Л. Войтеховского. — Апатиты, 2010.
10. Баранников А. Г., Осовецкий Б. М. Морфологические разновидности и нанорельеф поверхности самородного золота разновозрастных россыпей Урала // Литосфера. — 2013. — № 3.
11. Цыкин Р. А., Цыкин С. Р. Золотоносные коры выветривания и карстовые образования Енисейского кряжа // Геология и полезные ископаемые Красноярского края. — Красноярск: КНИИГиМС, 1998.
12. Петровская Н. В. Самородное золото. Общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса. — М.: Наука, 1973.

*Поступила в редакцию 17/IX 2014*