УДК 546.59: 553.04: 66.01

К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ ЗОЛОТА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ “НАГИМА”

Агееев О.А.[1], Медков М.А.[2], Иванников С.И.[2], Юдаков А.А.[2], Таскин А.В.[3]

[1] Амурский научный центр ДВО РАН, Благовещенск, Россия
[2] Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
[3] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке
соглашения о предоставлении субсидии №14.578.21.0015 от 15.06.2014 г.
между Министерством образования и науки РФ
и ФГАОУ ВПО Дальневосточный федеральный университет

АННОТАЦИЯ

Приведены характеристики месторождения «Нагима»: особенности строения и формирования; распределение и формы нахождения золота; использованные ранее и применяемые в настоящее время технологии отработки. Проведена прогнозная оценка качества минерального сырья и анализ содержания золота в различных техногенных объектах месторождения «Нагима», с применением методов пробирного и нейтронно-активационного анализа.

Показана перспективность использования техногенных россыпей месторождения «Нагима» в качестве важного источника сырьевой базы для добычи золота. Установлено, что применение современных бесцианидных методов гидрометаллургии, в частности аммиачно-тиосульфатного выщелачивания, позволяет эффективно извлекать тонкое и сверхтонкое золото из техногенных объектов месторождения «Нагима».

ВВЕДЕНИЕ

На территории России техногенные россыпи золота начали появляться после открытия в 1814 году Л.И. Брусницыным первой золотопесчаной россыпи на Урале. Ни одна из отработанных россыпей никуда не исчезла, все сохранились, только перешли в разряд техногенных. В настоящее время техногенных россыпей в России огромное количество. В каждой из отработанных россыпей осталось золото, так как полностью извлечь его невозможно: в некоторых - 10-15% от добытого, в других до 50% [1]. Большая часть золота в таких объектах представлена тонкой и сверхтонкой фракциями с размерами частиц менее десятков микрон, плотно ассоциированными с минеральными компонентами различной природы. Поскольку именно несовершенство использованных раннее технологий извлечения золота привело к появлению таких своеобразных месторождений, их эффективное освоение невозможно без применения современных методов как для оценки запасов, так и для извлечения золота.

Одним из таких объектов является расположенное в Амурской области месторождение «Нагима». Особенностями этого месторождения является наличие труднопромывистых песков со значительной долей глинистого материала и высоким удельным весом мелкого, тонкого и пылевидного золота (МТПЗ). Потери золота при отработке данной россыпи неизбежны. Неполное извлечение полезных металлов при добыче способствовало формированию техногенных образований. При применении современных технологий по аналитике и добыче золота техногенную россыпь месторождения «Нагима» можно рассматривать как важный резерв пополнения сырьевой базы золотодобычи.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение «Нагима» - сложный по генезису объект, в строении которого значительная роль принадлежит аллювиальным и пролювиальным образованиям. Месторождение «Нагима» характеризуется наличием целого ряда обогащенных пластов мощностью 0,8 – 4,4 м. с содержанием золота на пласт 16 и более г/м^3. При этом весьма показательно, что содержание МТПЗ в общем весе составляет от 15,1 до 91,1% и, в среднем, составляет около 70%.

© Агееев О.А., Медков М.А., Иванников С.И., Юдаков А.А., Таскин А.В.

Последнее изучение месторождения «Нагима» проводилось в 2006-2007 гг. [2]. Обобщенный разрез месторождения представлен в следующем виде: на коре выветривания диоритов, сложенной глинами с обломками и дресвой (2 м), залегают пески среднекрупнозернистые, каолиносодержащие ожелезненные (1,5-2 м) с линзами бурых углей, выше они сменяются песками средне-мелкозернистыми, каолиносодержащими (около 2 м) с линзами бурых углей. Верхняя часть разреза россыпи сложена глинами зеленовато-серыми, каолиновыми с галькой и полуокатанным щебнем (1,5-2 м) и глинами коричневато-бурыми песчаными со слабоокатанной галькой, валунами и щебнем (10 м).

В пробирной лаборатории Института геологии и природопользования ДВО РАН был выполнен гранулометрический анализ этих пород с выделением алевритовой и глинистой фракций.

Анализ их свидетельствует о следующем: в коре выветривания диоритов основные концентрации золота распределены во фракциях – 0,044 (осадок, взвесь, раствор); в песках в основном сохраняется та же тенденция, что, в общем, характерно и для каолиновых глин; в венчающих разрез бурых глинах распределение золота более равномерное по фракциям включая 0,160 – 0,044 и 0,074 – 0,044; золото содержат также бурые угли и углистые глины.

Вышеприведенные данные указывают на весьма неравномерное распределение золота в палеоген-неогеновых россыпях Верхнего Приамурья.

В частности, по данным минералогического анализа шлиховое золото (ШЗ), в основном, концентрируются во фракциях –0,5 +0,25 (в пределах 30%), а МТПЗ преимущественно во фракциях –0,25 +0,12 мм (немногим более 60%); анализ позволяет предположить, что общий баланс ШЗ и МТПЗ не полон, т.к. во фракции менее –0,044мм (осадок, взвесь, раствор) по специальной методике установлены значительные концентрации золота - от десятых долей до первых граммов на тонну.

Это позволяет предполагать, что значительная часть золота в глинистой фракции присутствует не только в дисперсном виде, но также, вероятно, и в форме наночастиц.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «НАГИМА»

В геологическом отношении техногенные россыпи месторождения «Нагима» состоят из ряда отличающихся по многим признакам образований: отвалы вскрышных пород, гале-валунистые отвалы (после гидромонитора), эфельные отвалы промытых песков, отходов шлихообогатительных установок, илов в отстойниках технологической воды.

Гале-валунистые отвалы могут содержать значительное количество золота по нескольким причинам. При неудовлетворительной промывке глинистых песков монитор смывает в отвал гальку и валуны с примазками глины, а иногда куски глинистых и мерзлых песков вместе с золотом. Галя может содержать также самородки и золотокварцевые агрегаты размером +80 мм.

Эфельные отвалы промытых песков в техногенных россыпях считаются наиболее привлекательными для повторной переработки. Наиболее высокое содержание в них можно ожидать после отработки богатых россыпей с весьма мелким золотом и глинистыми песками, а также на вечномерзлых россыпях.

Контрольные опробования и лабораторные исследования Иркутского государственного института благородных и редких металлов и алмазов (Иргиредмета) показали, что золото мельче 0,1 мм практически не извлекается на шлюзах глубокого наполнения, а потери металла крупностью 0,25-0,1 мм достигают 60% [3]. Отходы шлихообогатительных установок (ШОУ) в зависимости от степени извлечения золота из шлихового концентрата при проведении доводочных мероприятий на ШОУ могут быть сырьем или отходами. Если потери золота при доводке на ШОУ значительные, хвосты являются сырьем, необходим их сбор для дальнейшей переработки. Если потери минимальные, хвосты являются отходами, необходима их утилизация.

Илоотстойники образуются в результате переноса потоками технологической воды во взвешенном состоянии весьма мелких частиц глины, илов и различных минералов, в том числе, частиц золота. Содержание в твердой фазе илов некоторых ценных минералов может быть значительно выше, чем в исходном сырье. Золото в илах весьма мелкое, значительная часть представлена рассеянными в кристаллической решетке минералов-носителей отдельными атомами (дисперсное золото), а также наноразмерными скоплениями-кластерами (нанозолото).

Жидкая фаза илоотстойников (водные растворы) также содержит золото в форме наночастиц, но их количество, длительность удержания и процесс накопления не изучены.

Золото в илоотстойниках – наиболее сложное для извлечения. Содержание золота в илах может быть более 10 г/т., но удачного опыта добычи золота из илоотстойников техногенных россыпей гравитационными методами нет.

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ЗОЛОТА В ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «НАГИМА»

Потери золота при отработке месторождения «Нагима» можно разделить на два вида:

1. Эксплуатационные потери – при извлечении золотосодержащих песков из недр (потери в недрах - отвалы вскрышных пород, недоработки пласта по мощности, внутриконтурные технологические целики, законтурные целики).

Технологические характеристики песков и золота в этих отвалах практически такие же, как в исходной россыпи, но пески предельно разубожены, содержание золота на общую массу незначительно и практического интереса эти отвалы не представляют.

2. Технологические потери – при обогащении песков и дальнейшей переработке концентрата (галевалунистые отвалы, эфельные отвалы, отходов шлихообогатительных установок, илоотстойники).

Технологические потери при промывке песков по данным Иргиредмета составляют 30-50% от исходного содержания, а при отработке россыпей с весьма мелким золотом и глинистыми песками потери превышают 50%.

Амурским научным центром ДВО РАН в 2012 году были выполнены лабораторно-аналитические исследования техногенных образований ОАО Прииск «Соловьевский». В частности, был произведен отбор 8 проб из эфельных отвалов промытых песков месторождения «Нагима». Кроме этого было отобрано 4 пробы из илоотстойников этого месторождения и 2 пробы были отобраны из вторично переработанных хвостов ШОУ**.**

По полученным данным пробирного анализа содержание золота в эфельных отвалах промывных песков составило 0,15 - 0,82 г/т, в илоотстойниках – 0,19 - 0,33 г/т и в хвостах ШОУ – 5,02 - 15,11 г/т.

Проводящимися научно-исследовательскими работами в АмурНЦ ДВО РАН установлено, что при контакте тонких фракций минеральной золотосодержащей массы с водой золото в форме наноминералов, обладающее повышенной аномальной подвижностью способно переходит в водную фазу без окисления и комплексообразования.

Образованные техногенные россыпи месторождения «Нагима» можно рассматривать в качестве важного источника сырьевой базы добычи золота. Вовлечение их в промышленную отработку требует определенной подготовки, как на стадии установления их запасов, так и при выборе технологии извлечения золота.

Поскольку проведенные пробирно-аналитической лабораторией АмурНЦ ДВО РАН исследования показали, что золото в техногенном месторождении «Нагима» представлено преимущественно тонкой фракцией, а значительная часть золота в глинистой фракции присутствует не только в дисперсном виде, но и в форме наночастиц, то классические методы определения содержания золота в таких объектах могут давать систематическое занижение результатов, за счет неполного извлечения золота при вскрытии образца. Так, контрольными опробованиями и исследованиями Иргиредмета установлено, что фактическое количество золота (мельче 250 мкм) в 2-3 раза превышает определенное разведкой, проведенной стандартными методиками и учтенное в запасах. Поскольку результаты по определению содержания золота в пробах занижаются, то, соответственно происходит некорректная оценка потерь и планирование извлечения [3].

Выходом из этой ситуации может быть использование ядерно-физических методов анализа, при использовании которых отсутствует систематическое занижение результатов при анализе тонкого золота [4]. В частности, перспективным является использование инструментального нейтронно-активационного анализа (НАА) с использованием калифорниевого источника нейтронов [5]. Данный метод позволяет проводить определение золота в навесках до 300 г, что снимает вопрос о представительности пробы.

Для проб илов, отобранных из илоотстойников отработанной гидромеханизированным способом части россыпи «Нагима», в Институте химии ДВО РАН было проведено определение содержания золота методом НАА в соответствии с методикой НСАМ [6]. По полученным данным содержание золота колеблется от менее 0,2 г/т до 4,0 г/т, составляя в среднем 0,96 г/т, что существенно выше результатов полученных пробирным анализом.

Таким образом, применение метода НАА для определения содержания золота в техногенных объектах месторождения «Нагима» позволяет уточнить запасы сырья, произвести более полную оценку запасов тонкого и сверхтонкого золота в данном месторождении, повысить его статус и экономическую привлекательность.

АММИАЧНО-ТИОСУЛЬФАТНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЗОЛОТА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Поскольку при работе с техногенными объектами месторождения «Нагима» необходимо извлекать золото, значительная часть которого представлена тонкой и сверхтонкой фракцией, то механические способы концентрирования и извлечения золота оказываются малоэффективны. При работе с тонкими фракциями золота эффективность извлечения золота обратно-пропорциональна размеру золотин, а золото крупностью менее 0,03 мм вообще не улавливается известными способами механического обогащения [8]. Поэтому решение проблемы извлечения золота

такого типа следует искать в применении методов гидрометаллургии.

Однако известно, что наиболее распространенный на сегодняшний день метод цианидного выщелачивания золота представляет большую опасность для окружающей среды. Кроме того, он малоэффективен для извлечения золота из углеродистого и органического сырья, чувствителен к присутствию меди, цинка, никеля, сурьмы и мышьяка.

Современной альтернативой цианидному выщелачиванию является аммиачно-тиосульфатное выщелачивание [9]. Тиосульфаты щелочных металлов биоразлагаемы и практически безопасны, что позволяет применять их в геотехнологиях подземного и кучного выщелачивания, они дешевле цианидов, более эффективны в случае упорных углеродистых и медь-содержащих руд. Вместе с тем, оптимизация условий тиосульфатного выщелачивания, по сравнению с цианидным выщелачиванием, является значительно более сложной задачей вследствие большого количества параллельных реакций окисления и диспропорционирования, протекающих с участием тиосульфатов, значительным влиянием pH и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) системы на состав образующихся комплексов.

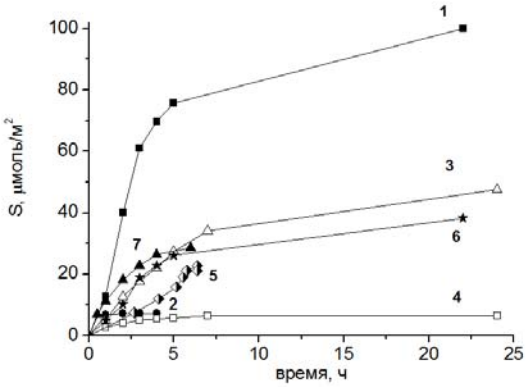

Рис. 1 Кинетика растворения (S) золота в растворах выщелачивания различного состава

Для оптимизации состава раствора выщелачивания было исследовано влияние pH, концентрации тиосульфата натрия и ионов меди (II) на скорость растворения золотой фольги (рисунок 1). Путем варьирования концентрации тиосульфата в диапазоне 0.01–0.2 М в системе с содержанием 0.2 М водного раствора аммиака и 0.015 М сульфата меди, было установлено, что оптимальной является концентрация тиосульфата 0.1 М (рисунок 1, кривая 1). Как увеличение, так и уменьшение содержания тиосульфата в растворе приводит к резкому падению эффективности растворения золота. Снижение концентрации ионов меди (II) в растворе выщелачивания относительно оптимально установленного уровня (0.015 М) также приводит к снижению эффективности растворения золота (рисунок 1, кривая 5).

Исследование кинетики выщелачивания золота аммиачно-тиосульфатным раствором показали, что для модельных глинистых объектов эффективность выщелачивания достигает 90% за менее, чем 30 минут контакта с пробой, при соотношении Т:Ж равном 1:1 и объеме промывных вод в 2 раза превышающем объем раствора выщелачивания (рис. 2, кривая 3).

При использовании раствора такого же состава, выщелачивание золота из техногенных объектов месторождения «Нагима» (отходы ЩОУ), происходит со сравнимой эффективностью, но за более продолжительное время (рис. 2, кривые 1−2). По-видимому, различие в скорости выщелачивания золота связано с более крупными размерами частиц золота в техногенных объектах (от 5 мкм и выше).

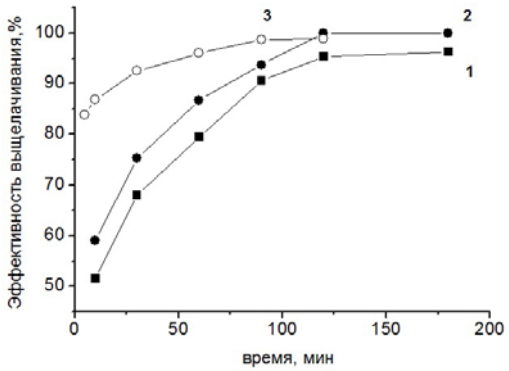

Рис. 2 Кинетика выщелачивания золота из различных проб при соотношении Т:Ж 1:1 раствором 0.2М NH_3, 0.015М $CuSO_4$, 0.1М $Na_2S_2O_3$, pH=10.4

Проведенные исследования аммиачно-тиосульфатного выщелачивания для техногенных объектов месторождения «Нагима» показали, что существует возможность переводить в раствор выщелачивания до 97% золота при следующих условиях: 0,1М тиосульфата натрия; 0,2М водного раствора аммиака; 0,015М сульфата меди; pH=10.4, Т:Ж=1:2.

Для концентрирования золота из растворов выщелачивания (pH 9-10.5) были использованы анионообменные материалы на основе хитозана (нативный хитозан, пиридилэтилхитозан, кватернизованный пиридилэтилхитозан) и анионообменная смола АВ-17. Без регулировки pH при Т:Ж 1:100 наиболее высокие степени извлечения (до 95%) были достигнуты при использовании анионообменной смолы АВ-17.

Поскольку анионообменные смолы и, в частности, анионит АВ-17 существенно превосходят по

стоимости активированный уголь, используемый для извлечения золота в цианидном процессе, для снижения затрат на извлечение золота была исследована возможность многократного использования анионита на этапе извлечения золота из раствора и возможность его повторного использования после регенерации. На рисунке 3 приведены результаты использования АВ-17 для концентрирования золота из растворов аммиачно-тиосульфатного выщелачивания в трех последовательных циклах. Видно, что емкость ионита по нецелевым анионам, присутствующим в растворе выщелачивания, допускает повторное использование АВ-17 в нескольких циклах извлечения без регенерации.

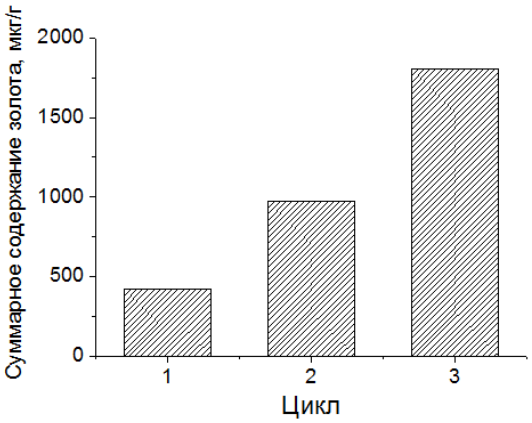

Рис. 3 Концентрирование золота на АВ-17 в последовательных циклах сорбции из аммиачно-тиосульфатного раствора с содержанием золота 15 мг/л

Элюирование золота после концентрирования на ионите АВ-17 осуществляли с использованием 10% раствора тиокарбамида в 0.3М серной кислоте при Т:Ж = 1:5, что позволило десорбировать 95% золота. Регенерированный таким образом ионит АВ-17 можно повторно использовать для извлечения золота из раствора выщелачивания без потери эффективности (рисунок 4).

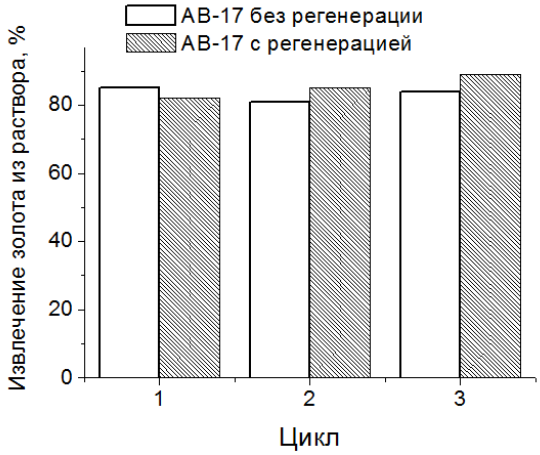

Рис. 4 Концентрирование золота на АВ-17 в последовательных циклах сорбции из аммиачно-тиосульфатного раствора с содержанием золота 15 мг/л

Учитывая высокую эффективность выщелачивания золота аммиачно-тиосульфатным методом, а также возможность концентрирования золота в форме тиосульфатных комплексов на коммерчески доступных анионообменных смолах, можно говорить о перспективности применения данного метода для кучного выщелачивания золота из техногенных объектов месторождения «Нагима».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные работы по исследованию техногенных объектов золотодобычи месторождения «Нагима» показали, что в отвалах золотодобычи прошлых лет присутствует существенное количество золота, что с учетом величины запасов такого техногенного сырья, исчисляемое сотнями тысяч тон, может представлять реальную ценность для повторной золотодобычи из данных объектов. Имеющаяся готовая инфраструктура и предварительные данные по запасам золота повышают инвестиционную привлекательность данного объекта.

При этом применение современных технологий для оценки запасов золота, особенно тонкой и сверхтонкой фракций, позволяет существенно пересмотреть оценку запасов золота в сторону увеличения. В тоже время, применение современных бесцианидных методов гидрометаллургии, в частности, аммиачно-тиосульфатного выщелачивания, позволяет эффективно извлекать тонкое и сверхтонкое золото из тех объектов, из которых ранее извлечение золота чисто гравитационными методами или классическим цианированием было заведомо неэффективно, к примеру, из илоостойников, упорных медь- и мышьяксодержащих руд.

Таким образом, техногенные объекты золотодобычи месторождения «Нагима», безусловно, являются перспективным источниками золота, и их освоение с применением современных технологий способно дать не одну тонну столь ценного металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кавчик Б.К. Геологическое строение техногенных россыпей и его влияние на выбор способа отработки / Б.К. Кавчик, В.Г. Пятаков // ОАО Иргиредмет.: Золотодобыча. - 2010. - №135.

   Kavchik B.K. and Pjatakov V.G. (2010) "Structure of geological placers and its influence on the choice of the method of processing" Zolotodobycha, no. 135.

2. Сорокин А.П. Распределение тонкого и мелкого золота в палеоген-неогеновых россыпях Верхнего Приамурья / А.П. Сорокин, В.И. Белоусов, В.М. Кузьминых, Т.В. Артеменко // ГИАБ. - 2007. - №16. - С.123−130.

   Sorokin A.P., Belousov V.I., Kuz'minyh V.M., Artemenko T.V. (2007) "Distribution of dispersed and fine gold in the Paleogene-Neogene deposits of the Upper Priamurye" GIAB, no. 16, pp. 123-130.

3. Замятин О.В. Мелкое золото в россыпях и основные пути снижения его потерь // ОАО Иргиредмет.: Золотодобыча. - №10. С.16−17.

   Zamjatin O.V. "Dispersed gold in placers and the main ways of losses reducing" Zolotodobycha, no. 10, pp. 16−17.

4. Ханчук А.И. Тонкодисперсное золото и платиноиды в графитовых сланцах Бурейского массива - новый тип благородно-металльного оруденения на Дальнем Востоке России / А.И. Ханчук, А.А. Бердников, А.А. Черепанов // ГИАБ. - 2009. - С. 9-18.

   Hanchuk A.I., Berdnikov A.A., Cherepanov A.A. (2009) "Fine gold and platinum graphite schists of the Burakovo array - a new type of noble-metalling mineralization in the far East of Russia" GIAB, pp. 9-18

5. Shilo N.A., Ippolitov E.G., Ivanenko V.V., Kustov V.N., Zheleznov V.V., Aristov G.N., Shtan A.S., Ivanov I.N., Kovalenko V.V., Kondrat'ev N.B. Instrumental neutron activation determination of gold in mineral raw materials using a californium neutron source // J. Radioanal. Nucl. Chem. - 1983. - V. 79. - P. 309-316.

6. Инструкция НСАМ №242-яф. Нейтронно-активационное определение золота в пробах золотокварцевых рудных месторождений с использованием калифорниевого источника и сцинтилляционного спектрометра / М.: Мингео СССР. - 1987. - 8 С.

   Instruction NSAM №242-jaf (1987) "Neutron activation determination of gold in the quartz samples from ore deposits using californialove source and scintillation spectrometer" Mingeo, USSR, pp. 1-8.

7. Валиев Н.Г. Научно-методические и технологические основы гидро-механизированой подготовки золото-содержащих пород для извлечения мелкого золота: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.22. // Екатеринбург. - 2002. − С. 27-36.

   Valiev N.G. (2002) "Scientific-methodological and technological foundations of hydro-mechanized preparation of extracting fine gold from gold-containing rocks" Ekaterinburg, pp. 27-36.

8. Aylmore M.G., Muir D.M. Thiosulfate leaching of gold - a review // Minerals Engineering. - 2001. - V. 14. - P. 135-174.