

**И.Ю. Рассказов**

д-р техн. наук
доцент
Институт горного дела ДВО РАН
директор
rasskazov@igd.khv.ru

**Т.Н. Александрова**

д-р техн. наук
Национальный минерально-сырьевой
университет «Горный» (Санкт-Петербург)
доцент, зав. кафедрой обогащения полезных
ископаемых
alexandrova@igd.khv.ru
IGD@rambler.ru

**М.А. Гурман**

канд. техн. наук
Институт горного дела ДВО РАН
старший научный сотрудник
mgurman@yandex.ru

**Н.М. Литвинова**

канд. техн. наук
Институт горного дела ДВО РАН
зав. лабораторией, старший научный сотрудник
nauka22@yandex.ru

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

Применение инновационных технологий переработки и обогащения минерального сырья дает возможность освоения месторождений со сложными горно-геологическими условиями и относительно низкими содержаниями ценных компонентов, что имеет большое значение для экономического развития Дальневосточного региона России

Application of innovative technologies of processing and enrichment of mineral raw materials enables the development of deposits with complex mountain-geological conditions and relatively low content of valuable components, which is of great importance for the economic development of Far Eastern region of Russia

Ключевые слова: упорная золотосодержащая руда, флотационное обогащение, «трудные» зерна, реагентная обработка, сорбенты

Keywords: refractory gold ore, flotation, «difficult» grains, reagent processing, sorbents

Дальневосточный регион РФ является крупнейшим в стране по разнообразию и богатству природных ресурсов. Здесь сосредоточены основные запасы алмазов, практически вся сырьевая база оловянной отрасли, более половины запасов золота, серебра, меди и полиметаллов, коксующихся углей. Регион располагает месторождениями железных руд, марганца, титана, редких и редкоземельных металлов и ряда других ПИ [1]. Всего на территории ДФО выявлено более тысячи рудных месторождений, большинство из которых до сих пор не освоены.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ И СОЗДАНИЮ НОВЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТРУДНОБОГАТИМОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ЯВЛЯЮТСЯ ПРИОРИТЕТНЫМИ В НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА ГОРНОГО ДЕЛА ДВО РАН

Главными ПИ на протяжении многих лет, наряду с алмазами и УВС, месторождения которых расположены в Якутии и на шельфе Сахалина, являются драгоценные металлы, в первую очередь – золото. Этому во многом способствуют высокие мировые цены на этот самый ликвидный вид ПИ. В 6 субъектах ДФО добывается половина общего количества производимого в России золота [2], что составляет 70–100 т ежегодно (*табл. 1*)

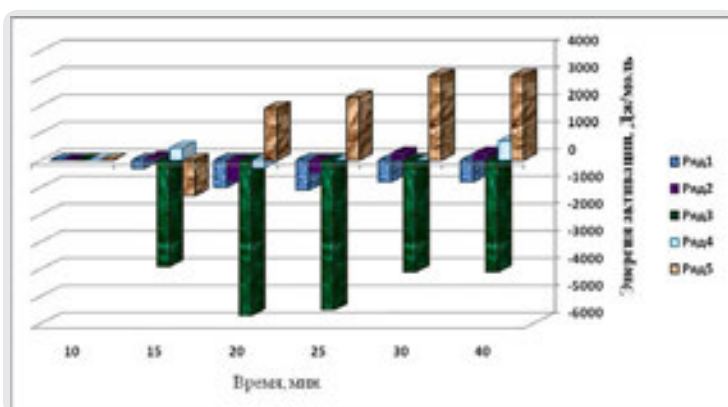
Сохранение высоких темпов добычи благородных металлов предопределяет необходимость вовлечения в эксплуатацию месторождений в неосвоенных районах, характеризующихся сложными горно-геологическими условиями и низкими содержаниями

ценных компонентов. Значительная часть общих запасов золотосодержащих руд Дальневосточного региона относится к труднообогатимым (упорным) рудам, характеризующимся тонкой вкрапленностью золота в пирите и арсенопирите, присутствием минералов-примесей – депрессоров золота, наличием углистых веществ. Многие россыпные месторождения, особенно в южной части региона, характеризуются наличием мелкого золота и высокой глинистостью (в отдельных случаях более 60% глинистой фракции), что приводит к высоким потерям металла и делает нерентабельной отработку без применения современных технологий и оборудования. Эффективное освоение таких месторождений возможно на основе новых принципов, где важную роль играют технологии глубокой переработки минерального сырья.

Исследования, направленные на совершенствование и создание новых эффективных технологий переработки труднообогатимого минерального сырья, являются приоритетными в научной деятельности Института горного дела ДВО РАН. Объектами комплексных исследований золото-платиносодержащих руд и россыпей Дальнего Востока, характеризующихся широким разнообразием вещественного состава, являются месторождения Многовершинное, Албазинское, Учаминское, Дурминское, Боргуликанское, Кутын, Колчан, Болотистое, Нагима, Гайфон, Соболиное, Кондер (Pt).

Результаты рационального анализа проб золотосодержащих руд свидетельствуют о том, что фазовый состав золота в рудах различен для каждого из изученных месторождений. Упорность руд определяется набором факторов (*табл. 2*). Руды Албазинского месторождения отнесены к категории технологически упорных вследствие значительной доли золота (57,85%), ассоциированного с сульфидами (пиритом и арсенопиритом), заключенного в минералах, растворимых в соляной кислоте (8,35% Au), а также тонко-вкрапленного в кварце, только 33,8% золота переходит в цианистый раствор. Первичные руды Учаминского месторождения также упорны к цианированию: доля золота, связанного с сульфидами составляет 61,07%, доля цианируемого золота составляет 35,66%. В рудах месторождения Многовершинное до 20% золота связано с окисленными минералами железа, карбонатами, а также является тонкой вкрапленностью в породообразующие минералы. Более 15% золота рудной зоны Родниковой месторождения Кутын связано с сульфидными минералами, 2% – с гидроокислами железа и кварцем. Проба Дурминского золото-

Рис. 1. Динамика изменения энергии активации при измельчении пробы Боргуликанского месторождения, классы крупности: ряд 1 – (-0,63 + 0,4 мм); ряд 2 – (-0,4 + 0,315 мм); ряд 3 – (-0,315 + 0,2 мм); ряд 4 – (-0,2 + 0,1 мм); ряд 5 – (-0,1 + 0 мм)



Добыча золота в России и субъектах ДФО в 2005–2012 гг.

Таблица 1

Субъект РФ	Добыча золота по годам, т							
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Республика Саха	18,78	19,92	18,92	18,94	18,6	18,59	19,38	20,9
Магаданская область	22,69	17,29	15,29	13,92	13,7	15,63	15,61	20,7
Амурская область	14,73	14,49	14,71	18,75	21,9	19,81	29,11	29
Чукотский АО	4,73	4,79	4,35	20,09	31,2	24,88	20,06	18
Хабаровский край	18,22	15,74	14,77	16,23	14,7	15,22	12,48	18,1
Камчатский край	1,95	1,36	2,12	14,75	2,3	2,44	2,49	2,5
Дальневосточный ФО	79,34	73,6	70,17	89,4	105	96,56	99,12	109,3
Россия	152,06	147,62	144,79	163,9	178,43	176,25	185,6	199,8

Прочностные свойства и формы нахождения золота в рудах ряда месторождений Дальнего Востока

Таблица 2

Месторождение	Содержание золота, г/т	Прочностные характеристики		Формы нахождения золота и характер ассоциации его с компонентами руды			
		Доля «трудных» зерен, %	Твердость пород	Цианируемое золото, %	Ассоциированное с окисленными минералами железа, карбонатами, покрытое пленками, %	Ассоциированное с сульфидами, %	Тонковкрапленное в порообразующие минералы, %
Многовершинное (Фланговое рудное тело)	6,2	29,68	6,4	79,21	19,26	0,63	0,9
Албазинское (Анфисинское рудное тело)	9,09	13,41	5,9	33,9	4,5	57,6	0,52
Учаминское (Учаминская рудная зона), первичные руды	3,35	13,15	6,44	35,66	0,72	61,07	2,35
Учаминское (Учаминская рудная зона), частично окисленные руды	9,09	19,81	6,87	62,85	3,92	32,1	1,13
Кутын (зона Родниковая)	3,6	–	–	81,66	2	15,93	0,41
Дурминское	2,8	–	–	–	Сорбционная активность, обусловленная углистым веществом		

серебряного месторождения характеризуется присутствием в руде углистого вещества, проявляющего сорбционную активность по отношению к золотоцианистому комплексу.

В технологической цепочке процесса обогащения упорных руд важным элементом является этап разупрочнения минерального сырья, на который идет до 65–70% от общего объема затрат на переработку. Именно на этапе дроб-

ильно-измельчительного передела происходит усреднение материала, разубоживание по некоторым вредным примесям, подготавливается поверхность золота к цианированию, нарабатываются «трудные» зерна, представляющие собой сложные для измельчения сростки с прочными границами срастания и т.д. В условиях непрерывного процесса такие зерна распределяются в пески гидроциклонов,

промпродукты, существенно дольше находятся в процессе обогащения и имеют тенденцию накапливаться в циркулирующих нагрузках, изменяя вещественный состав материала в операциях обогащения.

Исследована возможность использования эффекта механической активации для интенсификации процесса измельчения различных руд. Для оценки процесса использовался критерий – энергия активации процесса. Каждая реакция характеризуется определенным энергетическим барьером, и для его преодоления требуется определенная энергия, которой должны обладать материалы для эффективного взаимодействия. На *рис. 1* приведены результаты исследований кинетики процесса измельчения на примере материала золотосодержащей руды Боргуликанского месторождения.

Анализ данных показывает, что наибольшей активации подвергается класс крупности $-0,315 + 0,2$ мм. Чем меньше энергия активации, тем выше скорость измельчения материала определенного класса крупности. Самым трудноизмельчаемым является класс $-0,1+0$ мм (так называемые «трудные зерна»), характеризующийся положительной энергией активации. Для руды данного месторождения оптимальное время измельчения для достижения энергетического минимума составляет 20 мин. Увеличение реакционной способности измельчаемого материала возможно путем химической модификации среды активирования, способствующей целенаправленному изменению прочностных свойств породы под действием поверхностно-активных веществ (ПАВ) с одновременным регулированием гранулометрического состава продукта и уменьшением выхода шламовых фракций.

На основе проведенных исследований разработаны методы интенсификации рудоподготовки золотосодержащего сырья, предусматривающие введение на стадии измельчения химических добавок, в качестве которых использованы борнилацетат, комплекс ПАВ, окислительный комплекс, содержащий йод и сернистый натрий, комплексный реагент на основе отбеленной глины и др. По результатам исследований предложены технологические схемы переработки упорных руд [3]. На *рис. 2* приведена схема флотационного обогащения, где на стадии рудоподготовки материала применяется окислительный комплекс, содержащий йод и сернистый натрий.

Измельчение материала при введении в мельницу смеси реагентов – гидроксида натрия (50 г/т), сернистого натрия (10 г/т) и йода (50 г/т) – сопровождается локальным на-

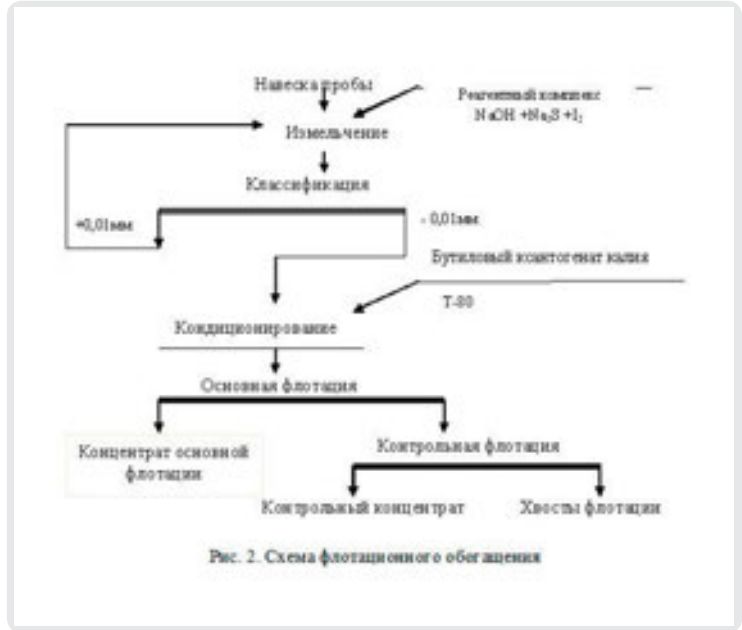
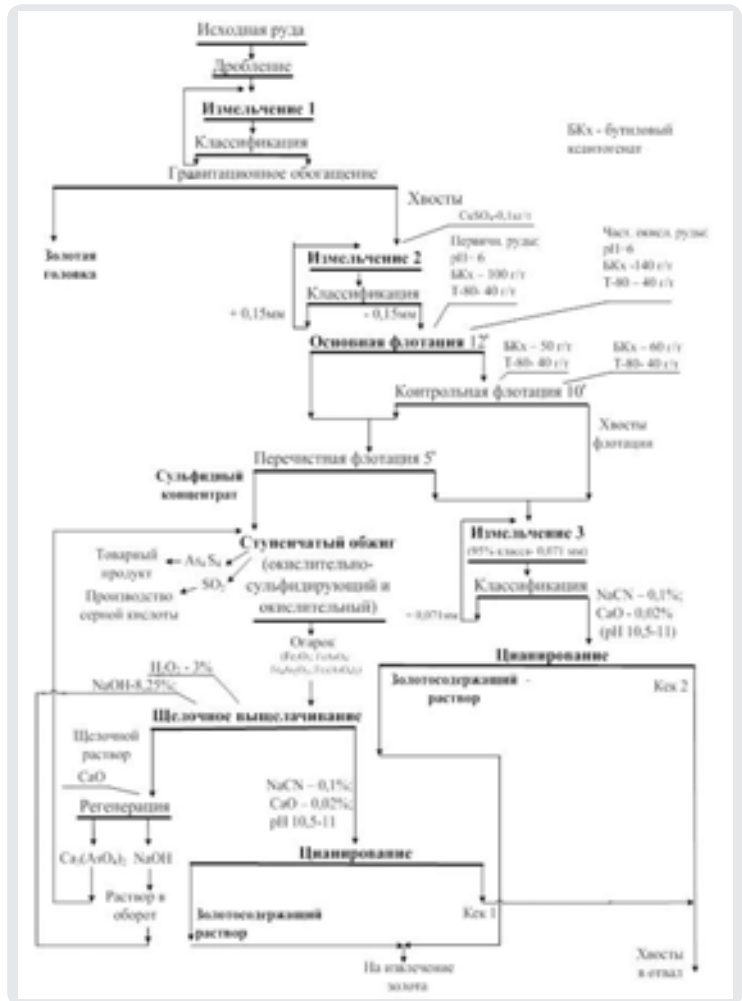


Рис. 2. Схема флотационного обогащения

Рис. 3. Комбинированная схема переработки упорных золотомышьяковых руд Учаминского месторождения



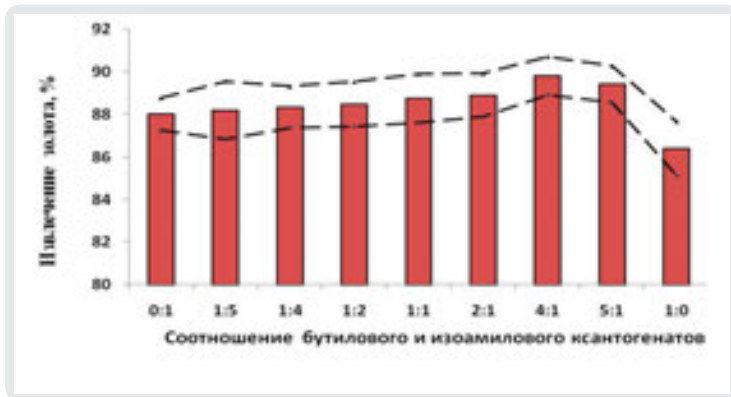


Рис. 4. Зависимость извлечения золота от соотношения бутилового и изоамилового ксантогенатов

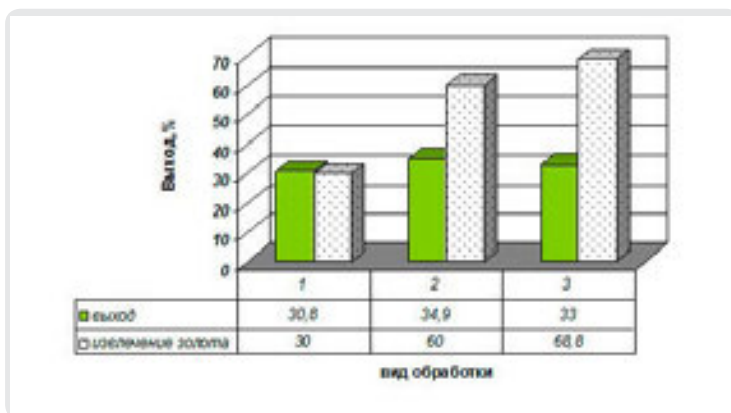
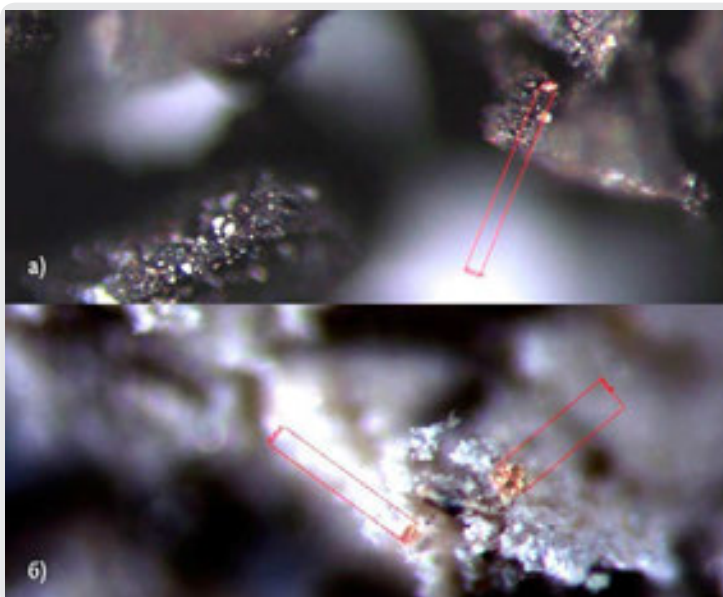


Рис. 5. Результаты гравитационного обогащения: 1 – схема обогащения без реагентной обработки; 2 – схема обогащения с обработкой содовоалогенидной смесью в гидроциклоне; 3 – схема обогащения с обработкой гексаполифосфатом в гидроциклоне

Рис. 6. Микроскопическое изображение сорбентов с включениями золота: а) растительного происхождения; б) на основе бутадиенового каучука и технического углерода



греванием поверхности минеральных частиц, интенсифицирующим развитие окислительных процессов, что позволяет получать более однородный гранулометрический состав по готовому классу, способствуя снижению доли «трудных классов». В результате применения смеси реагентов при рудоподготовке материала к флотации наблюдается снижение потерь ценного компонента в хвосты флотации на 9%.

По результатам комплексных исследований обоснованы эффективные технологические решения по извлечению золота из упорных руд с применением современных пиро- и гидрометаллургических методов [4–5]. Разработана комбинированная технологическая схема переработки первичных и частично окисленных золотомышьяковых руд Учаминского месторождения, включающая гравитационное обогащение, флотацию, ступенчатый окислительно-сульфидирующий и окислительный обжиг, щелочное выщелачивание в присутствии пероксида водорода, раздельное цианирование щелочных кеков и хвостов флотации (рис. 3). Реализация комбинированной схемы обеспечивает суммарное извлечение золота 84,3% из первичных и 93,51% – из частично окисленных руд, при извлечении мышьяка на уровне 92,1–95,6% в виде малотоксичного тетрасульфида.

Руды, содержащие золото и углистое вещество, представляют особый вид золоторудного сырья, требующий применения специальных методов обогащения и металлургической переработки. Предложен способ управления режимными параметрами процесса извлечения золота из упорной бедной руды Дурминского месторождения, обладающей сорбционной активностью, на основе комбинирования последовательной флотации углистого вещества и золотосодержащих сульфидов. Применение нового реагента – активатора лаурилсульфоэтоксилата натрия, способствует улучшению взаимодействия реагентов-собираателей с поверхностью углистых веществ [6]. Для интенсификации процесса флотации золотосодержащих сульфидов определена эффективная комбинация бутилового и изоамилового ксантогенатов, имеющих одинаковые солидофильные группы, но отличающиеся длиной и структурой углеводородных цепей [7]. Экспериментально подтверждено, что для флотации золота и золотосодержащих сульфидов наиболее эффективным собирателем является смесь растворов бутилового и изоамилового ксантогенатов в соотношении 4 : 1 (рис. 4).

Значительный объем исследований выполнен на пробах из россыпных месторождений Дальнего Востока, характеризующихся наличи-

ем мелкого и тонкого золота, высоким содержанием глинистой фракции. Для интенсификации процесса извлечения золота из труднопромывистых песков россыпи Колчан материал подвергался предварительной реагентной обработке [8]. В качестве реагентов использовались галогениды, гексаполифосфат натрия.


При реагентной обработке материала, в частности гексаполифосфатом натрия, наблюдается пептизация шламов, при этом образуются хелатные комплексы со «скрытым» золотом, а поверхностный слой тонкого «плавучего» золота становится гидрофильным, в результате повышается выход золота в концентрат. Реагент малотоксичен, ПДК составляет 3,5 мг/дм³ по (PO43) с лимитирующим показателем вредности по органическому признаку, т.е. применяемый реагент биологически разлагаем. В результате предварительной обработки проб извлечение золота в концентрат повышается в среднем в 2 раза (рис. 5).

При флотационном обогащении золотосодержащих песков перспективным направлением является использование сорбционного процесса, позволяющего повысить извлечение тонкодисперсного золота из шламовых фракций [10]. Проведены эксперименты с введением во флотационную пульпу наряду со стандартными реагентами сорбентов растительного происхождения и на основе бутадиенового кау-

чука и технического углерода. Для модификации сорбентов применялась термо- и химическая обработка с использованием комплекса кислот жирного ряда. Результаты исследований показали, что извлечение золота во флотационный концентрат с использованием сорбента, подвергнутого термообработке при темпера-

По результатам исследований обоснованы эффективные решения по извлечению золота из упорных руд с применением современных пиро- и гидрометаллургических методов

туре 200°С, повышается на 6,4%; химическая обработка сорбента дает прирост извлечения золота на 7,2%. При проведении микроскопических исследований флотационных концентратов были зафиксированы частицы золота на сорбенте на основе бутадиенового каучука и технического углерода (рис. 6).

Применение новых технологических решений при переработке минерального сырья создает возможность вовлечения в эксплуатацию месторождений, характеризующихся не простыми горно-геологическими условиями, сложностью вещественного состава и низким содержанием ценных компонентов, что имеет большое значение для экономического развития Дальневосточного региона России. 

Литература

1. Архипов Г.И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Обзор состояния и возможности развития / Г. И. Архипов. М. 2011. 830 с.
2. Золото-2011. Ежегодный доклад Союза золотопромышленников // Золото и технологии. 2012. № 2. С. 6–27.
3. Мамаев Ю.А. и др. Физико-химические способы интенсификации извлечения золота из упорных руд / Ю.А. Мамаев, Т.Н. Александрова, Н.М. Литвинова, М. А. Гурман // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 11. С. 277–283.
4. Гурман М.А. и др. Исследование руды умеренной сорбционной активности / М.А. Гурман, Т.Н. Александрова, Ю.А. Мамаев // Горный журнал. 2011. № 1. С. 130–134.
5. Гурман М.А. Флотационно-металлургическая схема переработки упорной золотомышьяковой руды / М.А. Гурман // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: труды конференции с участием иностранных ученых (Новосибирск, 28 июня – 02 июля 2010 г.). Новосибирск. 2010. Т. 1. С. 250–255.
6. Патент № 2339454 РФ, МПК В03D 1/02 (2006.01). Способ флотации углистого вещества / Литвинова Н.М., Ятлукова Н.Г., Александрова Т.Н., Гурман М.А., Бабенко Г.И., Билевич И.Я.: заявитель и патентообладатель Институт горного дела ДВО РАН; № 2007117674/03; заявл. 11.05.2007; опубл. 27.11.08, Бюл. № 33. 4 с.
7. Патент № 2452584 РФ, МПК В03D 1/02 (2006.01). Способ флотационного извлечения тонкодисперсного золота / Александрова Т.Н., Гурман М.А., Литвинова Н.М., Богомяков Р.В.: заявитель и патентообладатель Институт горного дела ДВО РАН; № 2010128014/03; заявл. 06.07.10; опубл. 10.06.12.; Бюл. № 16. 5 с.
8. Александрова Т.Н., Литвинова Н.М., Богомяков Р.В. К вопросу извлечения мелкодисперсного золота из песков россыпных месторождений / Т.Н. Александрова, Н.М. Литвинова, Р. В. Богомяков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 2. С. 319–324.
9. Патент № 2388546 РФ, В03В 9/00; В03В 5/32, С22В 11/00. Способ извлечения тонкого золота при обогащении золотосодержащих песков россыпных месторождений / Александрова Т.Н., Рассказов И.Ю., Литвинова Н.М., Богомяков Р.В.: заявитель и патентообладатель Институт горного дела ДВО РАН; № 200919957/03; заявл. 26.05.2009; опубл. 10.05.2010.; Бюл. № 13. 4 с.