

УДК 553.411.068.5 (571.6)

© И.В.Кузнецова, 2014

## ПРОБЛЕМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО ЗОЛОТА ПРИ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОДОБЫЧЕ НА ПРИМЕРЕ ПРИАМУРЬЯ

И.В.Кузнецова (Институт геологии и природопользования ДВО РАН)

*На примере золотоносных россыпей Приамурья рассмотрены проблемы извлечения наноразмерного золота и определения его содержания в гравитационных концентратах, полученных при дражной и гидравлической добыче. Экспериментально установлено, что практически не извлекается золото наноразмерное и в сростках с другими минералами. Комплексные исследования форм выделения и распределения наноразмерного золота в рудах месторождений показывают возможность существенного наращивания ресурсного потенциала металла.*

*Ключевые слова: наноразмерное золото, золотоносные россыпи, минералы-концентраты золота.*

*Кузнецова Инна Владимировна, kuzia67@mail.ru*

## THE PROBLEMS OF NANOGOLD EXTRACTION DURING THE MINE FROM PLACERS IN CASE OF PRIAMURIE

I.V.Kuznetsova

*On the example of goldfields of Priamurie region issues related to nanogold extraction were reviewed, along with the problems of its content determination among gravitation concentrates, which were obtained as a result of drag-and hydro-mining. Experimentally proven, almost all nanogold and gold in intergrowths with other minerals cannot be sufficiently extracted. It is demonstrated that complex investigations of allocations and distributions of nano-sized gold ore deposits allow us to assert the possibility of substantial increase in the resource potential of this noble metal.*

*Key words: nanogold, gold-placer mine, minerals-concentrators of gold.*

Добыча золота в Приамурье ведется более 100 лет и за это время многие из россыпей обрабатывались по нескольку раз. Главная причина плохого извлечения благородного металла состоит в том, что основное количество золота пылевидное, либо закапсулировано в других минералах. Если раньше проблемы, связанные с невидимым золотом, считались незначительными (из-за наличия легко перерабатываемых богатых руд), то по мере вовлечения в переработку бедных упорных руд эта точка зрения изменилась.

В 90-х годах прошлого столетия среднее содержание Au в обрабатываемых отдельным способом песках уменьшилось в 2–3 раза, а в дражной горной массе снизилось на 28% и составило 180 мг/м<sup>3</sup> [17]. Средняя крупность золота в перерабатываемой продуктивной массе при этом уменьшилась в 2,5–3 раза, что привело к увеличению в ней доли мелкого золота до 40%, а в отдельных россыпях до 94% [8, 14]. Значительное сокращение балансовых запасов россыпного золота, а также резкое снижение прироста разведанных запасов за последние годы (не более 35% от объемов добычи) вызвало вовлечение в разработку техногенных образований (эфельных отвалов и хвостов шлихообогатительных установок) [4, 9].

Как известно, золото относится к числу немагнитных минералов, но часто значительное его коли-

чество, теряемое при гравитационном обогащении, связано с минералами железа — покрыто оксидами и гидроксидами железа и титанистого железняка, содержит их вкрапления или пленки («ржавое» золото, золото «в рубашке»), что обуславливает слабо- и среднемагнитные свойства (за счет железной матрицы) таких частиц золота. Так, по некоторым данным, частота встречаемости примесей железа в самородном золоте составляет до 97,9%, в россыпях магнитными свойствами обладает до 28,14% золота, в хвостах обогащения рудного золота — от 42,67 до 100% [3]. Это определяет высокие потери золота в магнитную фракцию при обработке золоторудных и россыпных месторождений. Вовлечение в промышленную эксплуатацию отходов горнорудного производства требует создания и применения нестандартных технологических схем переработки руды [7]. Помимо установления исходного состава концентрата, изучаются свойства минералов и их поведение в технологическом процессе.

Шлиховое золото, выделяемое в концентраты методами гравитационного обогащения руд на центробежных гравиконцентраторах, драгах, при последующем обогащении их на концентрационных столах и других устройствах обычно доводится, в зависимости от природы руд, до следующего состава (% от массы): золота 10–20, серебра 1–40, свинца, сурьмы и мышьяка в сумме 1–20, магнетита, ильменита,

циркона, граната, касситерита 5–80. Наличие в концентратах высоких содержаний упорных золотосодержащих минералов (углерода, ильменита, магнетита) может создать определенные сложности при проведении пробирного анализа [16].

Известно, что основные потери при добыче россыпного и рудного золота приходятся на мелкое, пластинчатое, пылевидное и связанное золото с размером частиц от миллиметра до нескольких нанометров [13]. Причем часто при повторной и последующей отработке россыпи количество добытого ценного компонента мало изменяется, что свидетельствует об относительном постоянстве технологических потерь металла [4]. По современным оценкам и многочисленным публикациям, старательские артели, использующие традиционные промысловые приборы, теряют от 20 до 50% свободного золота [2]. Применение шлюзов мелкого наполнения или отсадочной технологии позволяет уменьшить потери, но не решает эту проблему, поскольку извлечение мелких классов золота остается низким:  $-0,25+0,1$  мм — 76%,  $-0,1+0,05$  мм — 48%,  $-0,05$  мм — 18% [1]. Технологии извлечения россыпного золота несовершенны и не предусматривают извлечения тонкого, а также наноразмерного золота. Связанное (закапсулированное в других минералах) золото на сегодняшний день также практически не извлекается. В балансе золота в горной массе отвалов из различных россыпей доля связанного золота по отношению к свободному по разным оценкам составляет в среднем 60–90% [13, 15]. Это приводит к большим потерям драгоценного металла и частичному накоплению его в техногенных отвалах.

За десятки лет добычи и переработки руд и горной массы россыпей в стране образовалась огромная масса отходов в виде отвалов и хвостохранилищ, содержание ценных компонентов в которых позволяет рассматривать их как реальный дополнительный ресурс благородных металлов [18]. Ресурсный потенциал техногенных золотосодержащих объектов России оценивается во многие сотни

### 1. Усредненное содержание минералов в тяжелой фракции шлиха из россыпи руч. Веселый Нижнеселемджинского золотоносного узла, мас. %

Минералы	Фракции, %				Общий вес 100%
	Магнитная 1,32	Электромагнитная 49,29	Немагнитная тяжелая 48,61	Легкая 0,78	
Ильменит	-	30,06	-	-	30,06
Циркон	-	3,38	24,63	-	28,01
Галенит	-	2,43	21,58	-	24,01
Монацит	-	9,82	-	-	9,82
Рутил	-	2,41	-	-	2,41
Касситерит	-	0,51	1,24	-	1,75
Пирит	-	Знаки	1,26	-	1,26
Магнетит	0,93	-	-	-	0,93
Кварц лимонитизированный	-	-	-	0,79	0,79
Гранат	-	0,56	-	-	0,56
Мартит	0,4	Знаки	-	-	0,4
Хромит	-		-	-	Знаки
Лимонит	-		-	-	
Эпидот	-		-	-	
Колумбит	-		-	-	
Висмутит	-		-	Знаки	
Au, мг	-	-	0,09	-	

тонн Au, что соответствует 55–60% от объемов добытого в стране золота. Количество золота в техногенных отвалах страны составляет не менее 18% от запасов россыпного золота. По данным Г.С.Мирзаханова [10], перспективы техногенных россыпных месторождений золота только юга Дальнего Востока России можно оценивать в объеме 10–200% от изъятых запасов.

В целях оценки качества минерального сырья и обоснования наиболее перспективных для отработки месторождений золота, в том числе и техногенных, работы по выявлению новых объектов уже на ранних стадиях геологического изучения недр должны сопровождаться исследованиями вещественного состава руд и их технологических особенностей. Надежная оценка бедных и техногенных россыпей невозможна без знания минералов-концентраторов золота и определения в них содержания тонкого и наноразмерного золота [5]. Для возможной переоценки промышленной золотоносности аллювиальных и техногенных россыпей необходимы дополнительные минералого-геохимические и экспериментальные исследования.

Под руководством В.Г.Моисеенко проведены экспериментальные исследования проб гравитационных концентратов, полученных в результате дражной и гидравлической отработки россыпей

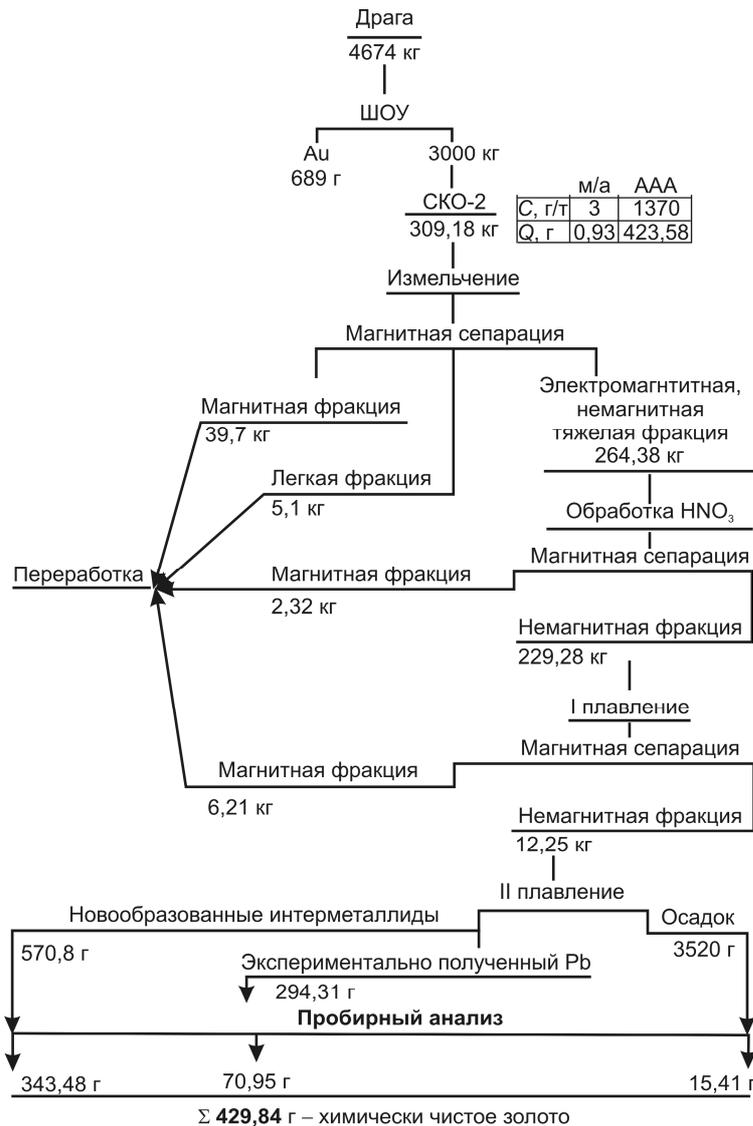


Рис. 1. Схема экспериментальных работ:

С — содержание Au; Q — запасы; м/а — данные минералогического анализа; ААА — данные атомно-абсорбционного анализа

Приамурья. В концентратах содержится большое количество тяжелых минералов железа и свинца. В процессе золотодобычи основная масса самородного золота из концентрата (материала съемок) извлекалась методом гравитационного дообогащения. В отходах шлихообогатительной установки (ШОУ) осталось закапсулированное в минералах микрометровое и наноразмерное золото, которое традиционными методами практически не извлекается.

При дражной отработке россыпи руч. Веселый (Нижнеселемджинский золотоносный узел, Приамурье) промыто 4777 м<sup>3</sup> породы, получен гравитационный концентрат (съемка) 4675 кг, из которого при обогащении на ШОУ извлекли 689 г свободного

золота. Остался так называемый обеззолоченный шлик массой 3 т, в котором среднее содержание Au по данным атомно-абсорбционного анализа составило 32 г/т. Этот промпродукт был дополнительно сконцентрирован на концентрационном столе СКО-2 до массы 309,18 кг и взят для исследования остаточного золота (рис. 1). Основной минеральный состав пробы — ильменит (30%), циркон (28%), галенит (24%), монацит (10%). В небольших количествах присутствуют рутил, касситерит, пирит, магнетит, гранат, мартит (табл. 1).

По данным минералогического анализа среднее содержание в концентрате свободного остаточного Au размерностью >50 мкм составило 3 г/т. Общее содержание Au в этом материале по данным атомно-абсорбционного анализа 1370 г/т. Сравнение этих результатов позволяет полагать, что 95% золота в концентрате пылевидное и закапсулировано в золотосодержащих минералах.

Трудности в обнаружении примесных элементов в минералах, в особенности золота, во многом обусловлены низкими его содержаниями и ограниченными в связи с этим техническими возможностями их изучения. Не всегда удается выявить самородное золото в минералах-концентраторах растровым электронным микроскопом, так как данная марка микроскопа дает возможность обнаружить содержание Au >0,01% и частицы размером >40 нм. В то же время определение золота в

составе минералов атомно-абсорбционным и пробирным анализами однозначно подтверждает наличие невидимого Au в минералах-концентраторах.

Последующее щадящее измельчение материала пробы до крупности <0,5 мм позволило высвободить из матрицы золото, находящееся в сростках с минералами, которое при использовании шлюзовых технологий теряется полностью [11]. В процессе дробления пробы часть сростков и минералов-концентраторов разрушилась с высвобождением заключенного в них самородного золота. По результатам промывки количество такого золота по данным минералогического анализа (размерностью >50 мкм) составило 896 г/т (табл. 2.). Часть галенита в пробе

**2. Минералогический состав тяжелой фракции шлиха из россыпи руч. Веселый  
Нижнеселемджинского золотоносного узла после измельчения и промывки**

Минералы	Фракции, %				Общий вес 100%
	Магнитная 16,6	Электро- магнитная 58,8	Немагнитная тяжелая 22,1	Легкая 2,5	
Ильменит	-	52,31	-	-	52,31
Галенит	0,35	0,69	16,68	-	17,72
Мартит	11,07	-	-	-	11,07
Лимонит, гетит	1,38	2,48	-	-	3,86
Магнетит	3,46	-	-	-	3,46
Циркон	-	0,14	2,97	-	3,11
Гранат	-	2,49	-	-	2,49
Кварц желез- ненный	-	-	-	2,42	2,42
Рутил	-	Знаки	0,97	-	0,97
Монацит	-	0,07	0,83	-	0,9
Пирит	0,35	0,48	-	-	0,83
Касситерит	-	-	0,69	-	0,69
Англезит	-	-	Знаки	-	Знаки
Au самородное	-	25,08 мг в аналитической навеске 28 г	-	-	896 г/т

разрушилась, и его содержание уменьшилось до 17,72% (см. табл. 1, 2.). При этом увеличилось количество железистых минералов, %: ильменита до 52,31, мартита до 11,03, магнетита до 3,46, лимонита и гетита до 3,86.

Далее материал пробы разделялся на фракции магнитной и электромагнитной сепарацией. Из общего концентрата отделялись легкая и магнитная фракции с низкой концентрацией золота, массой 44,8 кг. Основное количество золота осталось в электромагнитной и немагнитной тяжелых фракциях (264,38 кг), которые и легли в основу дальнейших экспериментов (см. рис. 1).

Для выделения из оставшегося концентрата связанного и тонкого золота проведена постадийная термохимическая обработка. Предварительная обработка исходного материала кислотой позволяет еще до основных стадий обогащения разрушить часть минералов и удалить из концентрата растворившиеся компоненты матрицы. Пробу прокипятили с 30%-ным раствором  $\text{HNO}_3$ . При этом минералы-концентраторы золота (пирит и галенит) разрушились. При разложении вышеназванных минералов высвобождается закапсулированное в них химически устойчивое тонкодисперсное и наноразмерное самородное золото в нейтральной форме, которое не реагирует с  $\text{HNO}_3$  и выпадает в осадок. В результате такой обработки в раствор кроме примесей может перейти и золото, находящееся в минерале в ионной форме. Анализ кислотной вытяжки показал, что содержание золота в ионной форме составляет 0,02% от общего его содержания.

Осадок, полученный после кислотной обработки пробы, сплавлялся с едким натром при 450–600°C. Плавень выщелачивали водой. Полученный в результате реакции щелочной раствор содержал ионное золото в количестве 0,054% от его массовой доли в пробе. Из полученного осадка удаляли магнитную фракцию. Оставшийся концентрат содержал видимое золото размером <1 мм, представленное сростками пластинчатых и игольчатых форм.

Для дальнейшего разложения упорных минералов полученный после сплавления и выщелачивания остаток подвергали повторной термохимической обработке с добавлением в шихту восстановителя в количестве 10%. В результате всех операций в раствор перешло 97% исходного состава матрицы и в осадке концентрация золота увеличилась в 36 раз. Образовался богатый концентрат, в котором преобладали сфероидные выделения различного состава (от собственно Au до Au-Pb и Pb-Au) и крупные сростки драгметаллов ячеисто-сотового строения [6, 12]. Если до опыта в пробе фиксировалось незначительное количество видимого золота (3 г/т), то в процессе эксперимента произошло разрушение минералов-концентраторов с высвобождением золота и его укрупнение от наноразмерного до тонкого и крупного, вплоть до возникновения самородков.

Применение изложенного подхода позволило выделить из отходов ШОУ, обогащенных минералами железа и свинца, дополнительно 429,84 г химически чистого золота и более точно определить содержание тонкого и наноразмерного золота

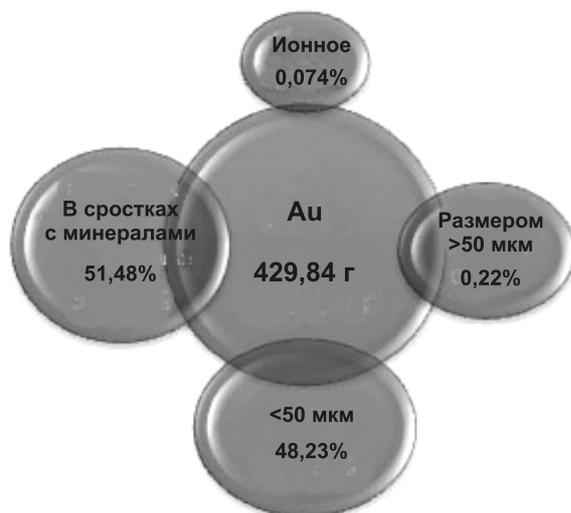


Рис. 2. Доизвлеченное в процессе эксперимента золото из гравитационного концентрата, полученного после ШОУ при дражной отработке россыпи руч. Веселый

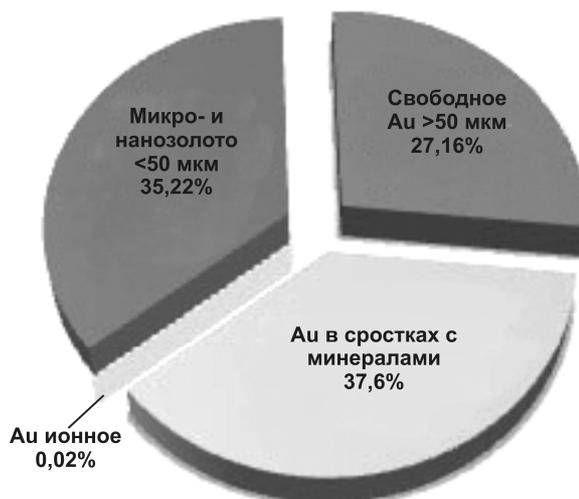


Рис. 3. Содержание различных форм самородного золота в гравитационном концентрате из россыпи руч. Веселый

в гравитационных концентратах. В исследованном концентрате доля остаточного свободного золота (размерность  $>50$  мкм) составила 0,2%, золота в сростках с другими минералами — 51,48%, ионного, входящего в решетку минералов-концентраторов, — 0,074%, микрометрового и наноразмерного ( $<50$  мкм), закапсулированного в минералах-концентраторах, — 48,25% (рис. 2).

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитать соотношение самородного золота по размерности в дражных концентратах из россыпи руч. Веселый. При гравитационной отработке россыпи в концентрате содержится свободное золото размерностью  $>50$  мкм 59%; золото в сростках с другими минералами 21%; золото в ионной форме 0,03%; микрометровое и наноразмерное золото ( $<50$  мкм) 19,97% (рис. 3).

На примере Нижнеселемджинского золотоносного узла установлено, что при дражной и гидравлической отработках россыпей золота извлекается в основном свободное золото размером  $>50$  мкм. Следовательно, при традиционных методах добычи россыпного золота не извлекается из гравиконцентратов 41% золота — тонкое и наноразмерное, а также золото в сростках с другими минералами.

В результате проведенных исследований на материале из различных россыпей Приамурья подобраны физико-химические параметры, позволяющие высвободить и концентрировать благородные металлы из шлихов сложного состава, обогащенных минералами железа и свинца. Показано, что труднообогатимые магнитные и немагнитные

отходы гравитационной отработки золоторудных и россыпных месторождений можно эффективно использовать для дополнительного извлечения Au при условии применения принципиально новых технологических и технических решений.

Предложенный подход может быть использован как один из способов пробоподготовки для комплексных концентратов и отвалных продуктов золотодобычи с повышенным содержанием свинец- и железосодержащих минералов в целях более точного определения в них количества тонкого и наноразмерного золота. В перспективе его можно будет применить при переоценке запасов Au в россыпных (в том числе техногенных) и рудных месторождениях золота. Найденные приемы по определению содержания связанного, тонкого и наноразмерного золота в минералах и их выделению отработаны на реальных концентратах различного состава и заверены на Красноярском аффинажном заводе.

Полученные нами результаты, подтвержденные на примере различных россыпей Приамурья, свидетельствуют о значительных перспективах доизвлечения наноразмерного золота из россыпей, а также о необходимости создания оптимальных условий и способов переработки минеральных комплексов и упорных концентратов для более полного извлечения из них золота. Комплексные исследования форм выделения и распределения наноразмерного золота в рудах месторождений позволяют утверждать о возможности существенного наращивания ресурсного потенциала этого благородного металла.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-05-00738а) и ДВО РАН (грант 12-ША08-182).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Афанасенко С.И., Лазариди А.Н. Золотая жила техногенных отвалов // Золотодобыча. Иркутск, 2009. № 133. С. 33–35.
2. Золото Бурятии / П.А.Рошкетаяев, А.Г.Миронов, Г.И.Дорошкевич и др. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2004.
3. Ковлеков И.И. Техногенное золото Якутии. – М.: МГУ, 2002.
4. Костромин М.В., Юргенсон Г.А., Позлутко С.Г. Проблемы дражной разработки континентальных россыпей. – Новосибирск: Наука, 2007.
5. Кузнецова И.В. Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла (Приамурье): Дис... канд. геол.-минер. наук. – Благовещенск, 2011.
6. Кузнецова И.В., Моисеенко В.Г. Поведение золота и свинца в зоне гипергенеза // Руды и металлы. 2011. № 2. С. 24–27.
7. Лодейщиков В.В. Извлечение золота из упорных сульфидных и углисто-сульфидных руд: аналитический обзор. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2007.
8. Макаров А.В. Золото техногенных россыпей Красноярского края (геологические и технологические аспекты) // Разведка и охрана недр. 1997. № 10. С. 10–14.
9. Макаров В.А. Условия формирования техногенных золотосодержащих объектов и особенности методики их геолого-технологической оценки: Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. – Красноярск, 2001.
10. Мирзаханов Г.С. Условия формирования, принципы прогноза и оценки ресурсов техногенных образований отработанных россыпей золота (на примере юга Дальнего Востока): Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. – Благовещенск, 2005.
11. Моисеенко В.Г., Остапенко Н.С., Миронюк А.Ф. Нетрадиционный подход к отработке техногенных золотосодержащих россыпей // Горный журнал. 2006. № 4. С. 66–68.
12. Моисеенко В.Г., Кузнецова И.В. Роль наночастиц золота, серебра и свинца в образовании месторождений благородных металлов // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 377–381.
13. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества / Н.П.Юшкин, А.М.Асхабов, Е.А.Голубев и др. – СПб.: Наука, 2005.
14. Прусс Ю.В. Проблема учета запасов «мелкого» и «тонкого» золота россыпей // Разведка и охрана недр. 1987. № 12. С. 22–23.
15. Рыбакова О.И. Разработка комбинированной технологии извлечения тонкого золота из отвальных продуктов. – Смоленск: Изд. Смоленского региона ИРА, 2003.
16. Совершенствование технологии переработки песков и методики оценки россыпей, содержащих упорные формы золота / К.А.Брик, В.В.Мурзин, В.В.Киселева и др. // Научные доклады (препринт). – Свердловск, 1989.
17. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. Гравитационные методы обогащения: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1993.
18. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. 2008. № 6. С. 71–74.