



А. И. Романчук
ФГУП ЦНИГРИ



В. А. Богомолов
ФГУП ЦНИГРИ



Е. И. Никитенко
ЗАО «Полюс»



П. И. Кушнарёв
ЗАО «Полюс»

Сравнительная оценка достоверности определения содержания золота в рудах

Дегдеканского рудного поля традиционным пробирным анализом и по методике с предварительным гравитационным концентрированием свободного золота

Приведены результаты статистической обработки результатов 1200 определений содержания золота в рудах Дегдеканского месторождения. Установлено, что применение методики предварительного гравитационного концентрирования золота из навесок массой 1 кг позволяет снизить коэффициент вариации в 2,0-2,7 раза, а доверительный интервал – в 2,2-3,0 раза по сравнению с определениями его содержания традиционным пробирным анализом.

Results of statistical data manipulation of 1200 tests of gold content in ores of Degdekan mineral deposit are presented. It is determined that using of technique of preliminary gravity concentration of gold from samples in weight of 1 kg leads to decreasing of variation factor 2,0-2,7 times and confidence interval 2,2-3,0 times in comparison with traditional assay.

Ключевые слова: руда, золото, гравитация, концентрат, хвосты, пробирный анализ.
Keywords: ore, gold, gravitation, concentrate, tailings, assay.

Решение задач выявления и подсчета запасов драгоценных металлов в золоторудных месторождениях невозможно без правильной методики пробоподготовки и определения содержания золота в геологических пробах руд на всех этапах геологического изучения недр. Ошибки в определениях создают недостоверную базу для выполнения различных видов расчетов при разведке и последующей эксплуатации месторождений и к нерациональному использованию природных ресурсов.

Большое значение это имеет при разведке крупнообъемных объектов с низким содержанием золота, вовлечение в промышленную эксплуатацию которых должно обеспечить развитие золотодобывающей отрасли России. К таким объектам относится Дегдеканское рудное поле, расположенное на территории Центрального Колымского региона в северо-западной части Аян-Юряхского антиклинория.

Рядом исследователей отмечены расхождения между результатами параллельных определений содержания золота в рудах Дегдекана пробирным методом и количественным минералогическим анализом, что объясняется присутствием достаточно крупных частиц самородного золота и его неравномерным распределением при отборе аналитических навесок «эффект самородка» [3]. По данным ООО «Станнолит», крупность золота в рудах достигает 0,5 мм (*табл. 1*), размеры отдельных зерен может превышать 1 мм.

Гранулометрический состав золота в рудах Дегдеканского месторождения

Таблица 1

количество проб	Размерность, мм				
	-0.025	+0.025-0.05	+0.05-0.1	+0.1-0.25	+0.25-0.5
1	4.5	17.5	21.4	35.6	20.9
1	3.5	15.9	26.6	53.9	-
1	2.0	10.2	27.4	39.5	21
39	1.0	17.1	38.3	41.1	2.6
1	2.4	11.7	32.2	53.6	-
5	1.4	12.2	32.9	39	14.4
Среднее	2.5	14.1	29.8	43.8	9.8

Для устранения влияния «эффекта самородка» применяются технологические приемы, основанные на предварительном отделении или растворении крупных частиц золота из укрупненных навесок руд с целью обеспечения равномерного распределения золота в оставшейся массе материала. Для этого используют его отсев из измельченной руды на сите с размером ячеек 0,074 или 0,1 мм¹ и цианирование руды. Содержание золота в исходной руде определяется расчетом, в соответствии с выходом технологических продуктов и результатами их анализа.

Оба метода широко используют зарубежные лаборатории. Но они имеют ряд недостатков. При классификации измельченной руды масса навески составляет не более 500 г, что недостаточно для многих типов руд. Классификация навесок большей массы трудоемка. Для некоторых типов руд, в частности с высоким содержанием углистых сланцев, требуется применение «мокрого» отсева и последующей сушки всей массы продуктов отсева. При выполнении массовых анализов нельзя исключить возможность «заражения» проб за счет недостаточной очистки сит.

Метод цианирования требует еще больших затрат времени (для растворения крупных частиц золота необходимо более 20 часов), применения ядовитого реагента – цианида и обезвреживания продуктов цианирования.

В требованиях ГКЗ² для руд с крупными зёрнами золота, особенно с невысоким его содержанием (до 5 г/т), для надежности определений рекомендуется проводить плавку всего материала пробы пробирным методом или применять гравитационное выделение свободного золота.

По опыту авторов, предпочтительным является метод предварительного гравитационного концентрирования, который не ограничивает массу пробы руды, что, с одной стороны, увеличивает ее представительность и обеспечивает попадание в пробу зерен золота всего диапазона крупности, с другой – исключает возможность появления «ураганных» содержаний золота за счет его неравномерного распределения в пробе. Современные гравитационные аппараты позволяют надежно извлекать золото крупностью более 30 мкм и получать хвосты гравитации с равномерным его распределением.

Для реализации метода при выполнении массовых анализов предложена простая

1 ОСТ 48-276-86. Руды и концентраты цветных металлов с сопутным содержанием благородных металлов. Отбор и подготовка проб для определения содержания благородных металлов и влаги.

2 «Требования к обоснованию достоверности опробования рудных месторождений» (утверждены Председателем ГКЗ В.М.Толкачевым 23.12.1992). В: «Сборник нормативно-методических документов по геолого-экономической оценке месторождений полезных ископаемых (государственная комиссия по запасам полезных ископаемых Министерства природных ресурсов Российской Федерации).

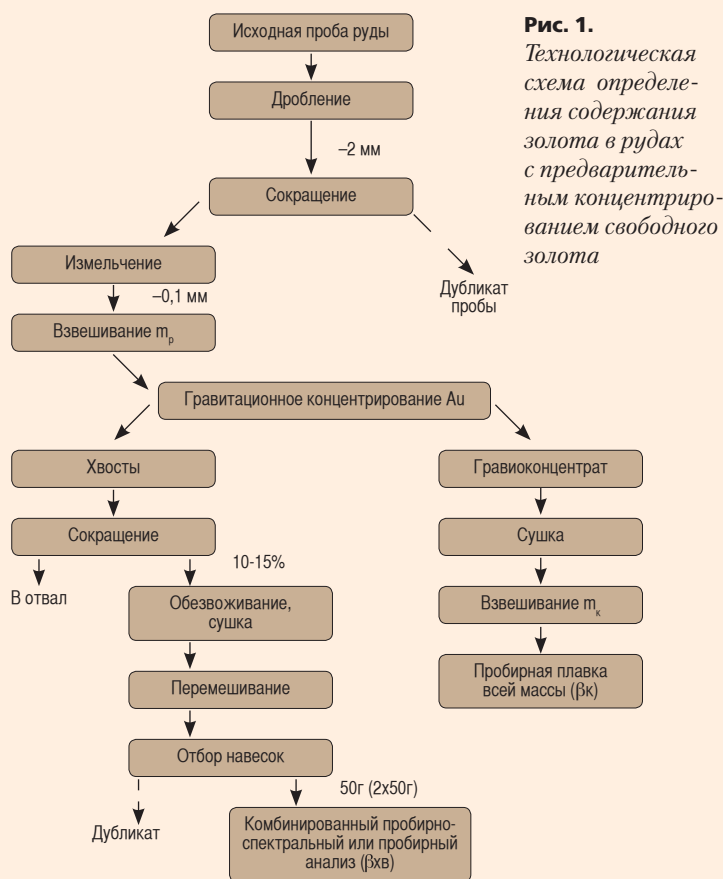


Рис. 1. Технологическая схема определения содержания золота в рудах с предварительным концентрированием свободного золота

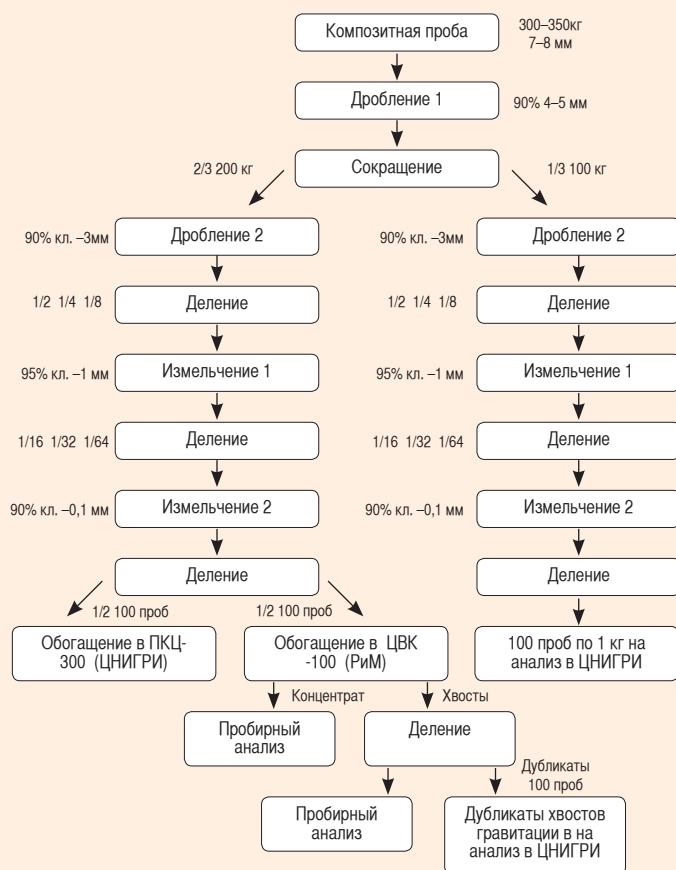


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема подготовки комбинированных проб

технологическая схема и ее аппаратное оформление, основанная на применении современного дробильно-измельчительного и гравитационного оборудования [5].

Рекомендуемая технологическая схема (рис. 1) длительное время применяется в ЦНИГРИ для выполнения контрольных анализов геологических проб, а также при технологических исследованиях руд с крупным золотом [6]. Метод освоен лабораторией фабрики ОАО «Рудник им. Матросова» с производительностью 4 тыс. проб в месяц для определения содержания золота в геологических пробах руд Наталкинского месторождения и применяется при анализе руд месторождения Дегдекан [1].

Относительно методики определения содержания золота в рудах последнего объекта приводятся противоречивые сведения. Авторами работы [4], на основании анализа результатов определений содержаний золота в пробах руд участка «Верный» Дегдеканского рудного поля традиционным пробирным анализом и по методике с гравитационным концентрированием, сделан вывод о занижении содержания золота при определении пробирным анализом. Для расчета истинных содержаний рекомендованы поправочные коэффициенты, численное значение которых колеблется от 1,3 до 10

в зависимости от содержания золота, установленное пробирным анализом. Учитывая, что рекомендации сделаны на основании обработки небольшого количества керновых проб (39) массой до 0,5 кг, они не представляются достаточно обоснованными и корректными.

Одной из главных задач при анализе руд со свободным золотом является определение минимальной массы представительной навески, которая зависит от ожидаемого содержания золота и его гранулометрического состава. В работе [7] на основании данных гранулометрического состава золота участка «Верный» выполнены расчеты, свидетельствующие, что при содержании золота 1 г/т для попадания в пробу всех классов крупности золота ее масса должна быть не менее 1,0 – 1,2 кг при этом, для попадания в анализируемую навеску не менее 20 золотин максимальной крупности и обеспечении точности определений + 50% масса пробы должна быть увеличена до 20,5 кг.

В зарубежной практике для расчета значения минимальной массы пробы применяется формула Ф. Питарда [7]:

$$m_{p \min} = \frac{f \cdot g \cdot p \cdot d_{Au}^3}{a \cdot S^2}, \quad (1)$$

где: $m_{p \min}$ – минимальная масса руды;

f – коэффициент формы частиц (для золота рекомендуется 0,2).

g – гранулометрический фактор (для золота рекомендуется 0,25);

ρ – удельная плотность золота (рекомендуется 16 г/см^3);

d_{Au} – максимальный диаметр частицы золота; a – ожидаемое содержание золота в руде, выраженное как часть единицы;

S – допустимая вариация определения содержания золота (15 %).

При расчете по этой формуле, с использованием в качестве исходных данных приведенных в **табл. 1** сведений о гранулометрическом составе золота, минимальная масса пробы для анализа должна составлять 4,4 кг. Учитывая неопределенность рекомендаций по оптимальной массе пробы, обеспечивающей необходимую достоверность определений содержания золота в рудах Дегдеканского месторождения, ООО «Магаданское геологоразведочное предприятие» совместно с ЦНИГРИ и ОАО «РиМ» провели специальные экспериментальные работы.

Методика выполнения работ. Из дубликатов геологических проб скважин большого диаметра составлены композитные пробы массой 300 – 350 кг 4-х классов содержания золота: класс 1 – от 0 до 0,6 г/т; класс 2 – от 0,6 до 1,0 г/т; класс 3 – от 1,0 до 2,0 г/т; класс 4 – более 2,0 г/т.

Пробы были подвергнуты стадийному дроблению, тщательному перемешиванию после каждой стадии дробления, сокращению с применением механических делителей и делителя Джонса с соблюдением на каждой операции требований к массе пробы известного уравнения $Q = K d^2$ при $K=1,0$ (**рис. 2**).

Дробление руды осуществляли в дробильно-сократительном модуле Бойд, измельчение в непрерывных кольцевых мельницах Rocklabs. В результате по каждому из четырех интервалов содержаний получено по 300 дубликатов массой около 1 кг крупностью 95% класса -0,074 мм. Из них по 100 проб каждого интервала направлены в ОАО «РиМ» для определения содержания золота по методике с предварительным гравитационным концентрированием и по 200 направлены в ЦНИГРИ. В том числе 100 проб для определений содержания золота прямым пробирным анализом и 100 проб – по методике с гравитационным концентрированием. Дальнейшие работы проводили независимо в двух указанных организациях.

В ОАО «РиМ» предварительное концентрирование осуществляли в центробежном концентрате ЦВК – 100. Полученный концентрат полностью направляли на пробирный анализ (две плавки по 20-25 г). Всю

массу хвостов обогащения обезвоживали и после сушки и тщательного перемешивания отбирали пробы для пробирного анализа из двух навесок массой по 25 г. Содержание золота в хвостах рассчитывали как среднее из результатов двух определений. Дубликаты проб хвостов анализировали в аналитическом центре ЦНИГРИ более чувствительным комбинированным пробирно-масс-спектрометрическим методом.

В ЦНИГРИ концентрирование вели в прецессионно-центробежном концентрате ПКЦ-300. В традиционных центробежных концентраторах различных моделей, включая ЦВК, «Knelson» и «Falcon», тяжелая фракция руды накапливается в рифлях чаши, объем которых постоянен и в значительной степени определяет выход концентрата. В результате выход концентрата (в абсолютных величинах) мало изменяется при обогащении проб руд различной массы и минерального состава. В прецессионно-центробежном концентрате тяжелая фракция образует на днище чаши постоянно перемываемую постель, в которой концентрируется золото. Поэтому выход концентрата непостоянен и зависит от содержания в руде тяжелой фракции, крупности измельчения руды, а также технологических параметров ведения процесса: расхода воды на промывку концентрата, продолжительности промывки, скорости прецессионного вращения чаши и угла прецессии. Указанные конструктивные особенности обеспечивают возможность получения высокой степени концентрирования золота и небольшого выхода золотосодержащего концентрата при обогащении навесок руд различной массы. Аппарат оборудован пробоотборником, отсекающим в отдельную емкость весь поток хвостов с частотой 135 раз в минуту в течение всего процесса обогащения руды и промывки оборудования. Общая масса отбираемой для анализа пробы хвостов составляет 12% от их общей массы. Анализ проб исходной руды, хвостов гравитации и концентратов проводили пробирным методом из навесок массой 50 г.

В целом, по методике гравитационного концентрирования в двух независимых лабораториях выполнено 800 определений содержаний золота в навесках руд Дегдеканского месторождения массой по 1 кг четырех интервалов содержаний и 400 определений стандартным пробирным анализом из навесок массой по 50 г

Пробирные анализы показали, что результаты параллельных определений содержания золота колеблются в значительных пределах: в классе 1 – от 0,14 до 1,34 г/т (среднее – 0,38 г/т); классе 2 – от 0,26 до 1,98 г/т (среднее – 0,64 г/т);

классе 3 - от 0,20 до 3,97 г/т (среднее – 1,34 г/т); классе 4 - от 2,03 до 12,2 г/т (среднее - 3,86 г/т). Это указывает на неравномерное распределение зерен золота при отборе навесок небольшой массы – 50 г и заметное влияние «эффекта самородка» на результаты определений. Стандартное отклонение определений составило 0,216 – 1,429, а коэффициент вариации 37,0 – 56,6%, причем наибольшее его значение относится к рудам с низким содержанием золота (рис. 3). Это, очевидно, связано как с увеличением влияния на результаты анализов присутствия крупных частиц золота на фоне относительно низкого его содержания в руде, так и погрешностями при определении низких содержаний золота при выполнении пробирных анализов.

Рис. 3. Статистические характеристики определений содержания золота в рудах Дегдеканского месторождения

Результаты предварительного концентрирования свободного золота из проб массой 1 кг, выполненные в ЦНИГРИ и ОАО «РиМ» показали, что выход концентрата при обогащении в аппарате ПКЦ – 300 более чем в два раза ниже и составляет в среднем 1,75 – 2,23%, против 4,28 – 4,47% в ЦВК – 100 (табл. 2). Соответственно, среднее содержание в нем золота существенно выше, и в концентрате из руды класса 4 достигает 117,97 г/т.

Рис. 4. Изменение коэффициента вариации и доверительно-го интервала определений содержания золота в рудах Дегдеканского месторождения в зависимости от массы анализируемой пробы

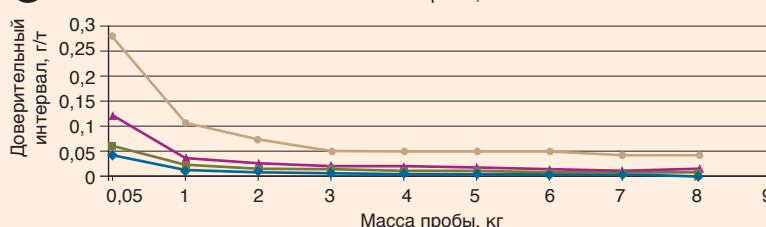
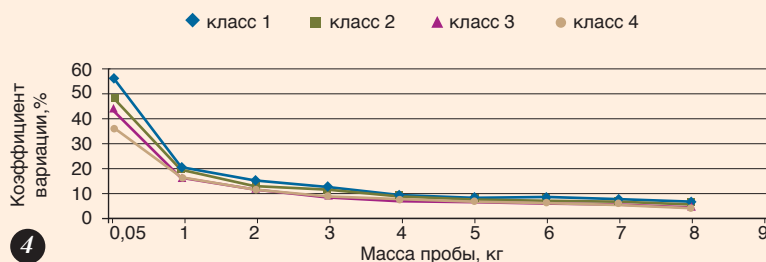
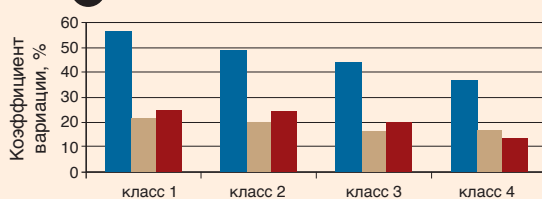
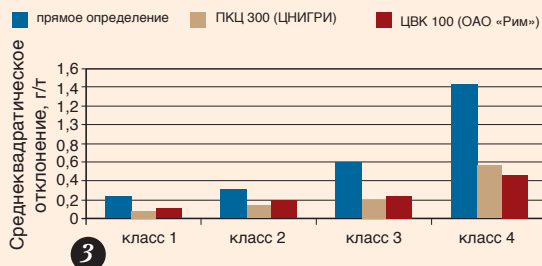
Результаты определений золота в хвостах классов 2-4 в ЦНИГРИ комбинированным методом практически совпадают с определениями в лаборатории ОАО «РиМ» весовым методом. При этом отмечается тенденция к снижению содержания золота в хвостах в случае применения комбинированного метода анализа. Больших значений в относительных величинах (в среднем 23 %) различия в определениях указанными методами достигают при анализе хвостов класса 1 с низким содержанием золота.

Несмотря на конструктивные отличия используемого оборудования, обуславливающие значительные различия в показателях

гравитационного концентрирования, средние значения содержания золота по результатам 100 определений в лабораториях ЦНИГРИ и ОАО «РиМ» практически совпадают и соответствуют среднему значению содержания золота по результатам 100 определений пробирным методом (табл. 2).

Полученные экспериментальные данные не подтверждают правомерность применения повышающих коэффициентов к результатам прямых пробирных анализов для расчета содержания золота в рудах Дегдеканского месторождения. При этом установлено, что увеличение массы пробы до 1 кг позволяет уменьшить стандартное отклонение в 2,2 – 3,0 раза, а коэффициент вариации до значений от 13,5 до 24,6%, в зависимости от содержания золота в руде. Близкие его значения получены, как по данным ОАО «РиМ», так и по данным ЦНИГРИ (рис. 3).

При увеличении массы проб возрастает вероятность попадания в анализируемый материал золота всего диапазона крупности, в том числе крупного и увеличивается точность анализов, что демонстрируют кривые зависимости изменения статистических характеристик определений от массы анализируемой пробы (рис. 4). Координаты первых двух точек на кривых, соответствующих массе проб 50 г и 1.0 кг, определены на основании обработки фактических результатов анализа 100 проб каждого интервала содержаний. Для расчета остальных принято допущение, что ошибки при проведении анализов продуктов гравитации незначимы и результаты определений золота соответствуют его истинному содержанию в навесках руд. Это позволяет сгруппировать проанализированные навески в пробы разной массы и рассчитать содержание в них золота. Группировка проб в количестве 100 в каждом интервале содержаний проведена с помощью метода случайной выборки.



Результаты определений содержания золота в рудах месторождения Дегдекан по методике с предварительным гравитационным концентрированием и прямым пробирным анализом

Таблица 2

Параметры и показатели среднего значения по результатам 100 определений	Интервалы содержаний золота							
	Класс 1 0-0,6 г/т		Класс 2 0,6-1,0г/т		Класс 3 1,0-2,0г/т		Класс 4 >2,0 г/т	
	ФГУП ЦНИГРИ	ОАО «РиМ»	ФГУП ЦНИГРИ	ОАО «РиМ»	ФГУП ЦНИГРИ	ОАО «РиМ»	ФГУП ЦНИГРИ	ОАО «РиМ»
Масса исходной пробы, г	1026,52	1046,87	1030,29	1044,95	1030,56	1020,04	1023,95	1028,33
Выход концентрата, %	2,17	4,47	1,94	4,38	1,75	4,28	2,23	4,39
Содержание Au в концентрате, г/т	11,94	5,29	21,22	11,65	46,89	20,50	117,97	53,97
Содержание Au в хвостах, г/т	0,21	0,16/0,13*	0,34	0,26/0,24*	0,48	0,35/0,34*	1,28	1,01/0,94*
Содержание Au в руде по методике с гравитационным концентрированием, г/т	0,37	0,39/0,36*	0,70	0,76/0,74*	1,21	1,21/1,20*	3,40	3,33/3,27*
Доверительный интервал, г/т	± 0,02	±0,02/0,02*	±0,03	±0,04/0,04*	±0,04	±0,05/0,05*	±0,11	±0,09/0,10*
Содержание Au в руде по результатам прямого пробирного анализа, г/т	0,38		0,64		1,34		3,86	
Доверительный интервал по результатам прямого пробирного анализа, г/т	± 0,04		±0,06		±0,12		±0,28	

* анализ хвостов гравитационного концентрирования выполнен комбинированным пробирно-масс-спектрометрическим методом

Оказалось, что увеличение массы навесок свыше 1 кг сопровождается менее заметным снижением коэффициентов вариации и при массе 4-5 кг его значение для всех классов содержания золота в руде составляет 7-9% и в дальнейшем мало изменяется. Аналогичным образом снижаются значения доверительных интервалов определений содержания золота в рудах.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Присутствие крупного свободного золота в рудах Дегдеканского рудного поля и его неравномерное распределение при отборе навесок для пробирного анализа приводят к значительному влиянию на результаты анализа «эффекта самородка». Коэффициент вариации определений составляет 37,0 – 56,6% и увеличивается при снижении содержания золота в руде.

2. Определение содержания золота с применением метода предварительного гравитационного концентрирования золота из навесок массой 1 кг позволяет снизить коэффициент вариации до значений 13,5 – 24,6%, в зависимости от интервала содержаний золота в руде, и рекомендовать метод для выполнения анализов проб руд Дегдеканского рудного поля. Коэффициент вариации может быть еще снижен за счет увеличения массы анализируемых навесок, но ее увеличение более чем на 4-5 кг нецелесообразно.

3. Результаты определений содержания золота в 800 навесках руд массой по 1 кг каждая в четырех интервалах содержаний и их статистические характеристики, полученные в двух независимых лабораториях, почти совпадают, что говорит об отсутствии систематических ошибок в определениях и высокой надежности применяемой методики. ■

Литература

1. Казимиров М.П., Никитенко Е.М., Лукиных В.Е., Новикова Т.М. «Применение технологических методов пробоподготовки для оценки большеобъемных золоторудных объектов на примере Наталкинского месторождения». Бюллетень Золотодобыча № 119. 2008 г.
2. Литвиненко И.С. Цимбалюк Н.В. «О достоверности оценки крупнообъемных кварцево-сульфидных месторождений золота в черносланцевых углеродисто-терригенных толщах на Северо-Востоке России», Руды и металлы, 2005, № 2.
3. Михайлов Б.К., Стружков С.Ф., Наталенко М.В. «Многофакторная модель крупнообъемного золоторудного месторождения Дегдекан (Магаданская область) Отечественная геология. - 2010. - N 2.
4. Остапенко Л.А., Стружков С.Ф., Рыжов О.Б. и др. «Оценка достоверности опробования руд на крупнообъемных золоторудных месторождениях». Руды и металлы № 2, 2004.
5. Романчук А.И., Никулин А.И., Жарков В.В. «Технология и технические средства для извлечения свободного золота из проб золотосодержащих руд». Горный журнал № 12. 2003.
6. Романчук А.И., Жарков В.В., Богомолов В.А. «Применение гравитационного концентрирования золота при определении его содержания в рудах». Золотодобывающая промышленность №1(37), 2010 г.
7. Pitard, F F, 2007. The in situ nugget effect: a major component of the random term of a variogram: Third world conference on sampling and blending (WCSB3), pp 91-110.