

УДК 620.11

## К МЕТОДИКЕ ДОСТОВЕРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОБАХ С КРУПНЫМИ ВЫДЕЛЕНИЯМИ САМОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

С. В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, Л. Л. БЕДЕРОВА<sup>2</sup>, А. П. БОРОЗДИН<sup>1</sup>

(1 – Санкт-Петербургский государственный университет, РФ; 2 – ООО «ЛИМС», РФ)\*

Необходимость написания данной статьи стала очевидной после проведения ряда исследований, связанных с определением содержания золота в пробах. Методика предварительного выделения свободного золота гравитационными методами с последующей пробирной плавкой высушенного концентрата и хвостов представляется менее эффективной, нежели описанный в данном исследовании метод скрин-анализа. Предлагаемый метод предусматривает использование различных техник выделения крупного золота и раздельный анализ истертого материала. Измельченный материал просеивается, после чего надрешетный и подрешетный продукты отправляются на пробирную плавку. Содержание золота в исходной пробе высчитывается по уравнению баланса, основанного(?) на результатах анализа продуктов грохочения. В качестве примера применения данной методики приведены результаты определения содержания золота в пробах руды с крупным самородным золотом месторождения Голец Высочайший в Иркутской области. Отмечается, что использование рассматриваемой методики позволяет оперативно определять содержание золота в образцах массой более 1–2 кг, исключить негативное влияние результатов анализа присутствующего в пробах свободного золота и повысить точность выполнения анализа.

**Ключевые слова:** пробирный анализ, скрин-анализ, золото, платина.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/or.2015.04.08>

Правильное определение содержания благородных металлов в рудах осложняется в случае присутствия крупных самородных частиц (золото, серебро, платино-железистые сплавы и т. п.). Высокая ковкость металлов обуславливает плохую дезинтеграцию (металлов, руд?) при дроблении и измельчении.

При этом наблюдаются два процесса:

– уплотнение (расплющивание, срезание, волочение) самородных частиц, в результате чего образуются листоватые, диско- и лепешкообразные формы, чешуйки;

– изометризация (сминание, сгибание, завальцовывание, комкование), приводящая к образованию округлых, комковатых или смятых, согнутых форм, по очертаниям приближающихся к изометрическим.

При дезинтеграции проб золотых руд эти процессы идут одновременно, наиболее сильно меняется морфология крупных и средних золотинок. Морфология мелких золотинок (менее 0,1–0,2 мм) при подготовке проб изменяется слабо [1, 2]. В процессе пробоподготовки платинометаллических руд отмечается преимущественная изометризация частиц.

Важным является тот факт, что при дезинтеграции меняется только морфология частиц металлов, а не их масса. Поэтому часто наблюдается явление квазиукрупнения золотинок в пробах при измельчении.

\* Петров Сергей Викторович – заведующий кафедрой, канд. геол.-минерал. наук, s.petrov@spbu.ru; Бедерова Лела Львовна – заместитель директора по развитию, аспирант; Бороздин Алексей Павлович – старший преподаватель.

© Петров С. В., Бедерова Л. Л., Бороздин А. П., 2015

Вследствие расплющивания (уплощения) золотинок их ситовой размер увеличивается при неизменной массе.

Рассмотрим поведение таких крупных золотинок при квартовании проб. Если в пробе присутствует крупное самородное золото, то, как правило, количество таких крупных золотинок в навесках дробленых интервальных проб руды невелико (единицы, первые десятки штук). После мелкого дробления и истирания навесок (например, массой 1–2 кг) приступают к квартованию пробы для выделения аналитических навесок (массой 50–100 г). Крупные золотины при этом распределяются неравномерно. При истирании аналитической навески массой 50–100 г также не происходит существенного измельчения золотинок, а только их развальцовывание в тонкие пластинки. В результате не обеспечивается равномерного распределения частиц золота при сокращении проб и в анализируемые навески попадает различное количество золота разной крупности [3]. Аналогичные явления наблюдаются и при изучении россыпных и коренных месторождений с крупными выделениями самородных платино-железистых сплавов [4].

В случае проведения пробирного анализа из навески отбирается материал массой 20–40 г, т. е. при этом опять будет сказываться влияние неравномерности распределения крупных золотинок. При применении атомной абсорбции для растворения берется еще более мелкая навеска – 5–10 г. При этом влияние присутствия или отсутствия золотины в аналитической навеске становится критическим (табл. 1). Всего одна золотиночка размером 1 мм ответственна за 2–4 г/т содержания золота в аналитической навеске, а присут-

Таблица 1

**Влияние размера частиц самородного золота в аналитических навесках разной массы на результат определения содержания металла**

Размер золотины, мкм	Масса золотины, мг	Влияние одной золотины на содержание, г/т	
		В навеске 5–10 г	В навеске 20–40 г
150	0,0015	±0,15–0,3	± 0,04–0,07
250	0,003	± 0,3–0,6	± 0,07–0,15
500	0,0077	± 0,8–1,5	± 0,2–0,4
750	0,014	± 1,4–2,7	± 0,3–0,7
1000	0,02	± 2–4	± 0,5–1

ствии или отсутствие этой золотины в навеске статистически случайное.

Данное явление известно давно и даже применяется для извлечения золота из руды – гравитационное извлечение свободного крупного золота в циклах измельчения золотосодержащих руд [5].

Для целей достоверного анализа предлагается использовать различные методики, которые позволяют выделять разными способами крупное золото и отдельно анализировать крупную и мелкую части дробленной пробы, например методику, разработанную ФГУП ЦНИГРИ [6]. Эта методика подготовки к анализам проб руд драгоценных металлов основана на предварительном выделении свободного золота гравитационным методом с получением концентрата и хвостов. Вся масса полученного концентрата сушится и после взвешивания направляется на пробирную плавку. От хвостов гравитации после сушки, взвешивания и перемешивания отбираются навески для определения содержания золота. Содержание золота в исходной пробе рассчитывается по балансу на основании результатов анализов концентрата и хвостов гравитации. Хотя данная методика требует довольно значительных затрат на приобретение необходимого оборудования, она обеспечивает вполне достоверные результаты.

В различных модификациях эта методика довольно активно применяется на предприятиях золотодобывающей промышленности [6, 7].

С советских времен известна более простая, но не менее надежная методика достоверного определения содержания золота в пробах с крупными выделениями самородного металла. В последние годы эта методика снова вошла в практику геологоразведочных работ под названием скрин-анализа золотых руд [8].

В настоящей статье мы предлагаем свой подход к проблеме достоверного определения содержания благородных металлов с рекомендациями практического характера. Наша методика опробована при выполнении пробирных анализов руд месторождений золота Голец Высочайший, Воронцовское, Майское, Албазинское, Кутынское, Бакырчик и др., а также месторождений платинометалльных руд в пределах массивов Гальмознанского, Кондерского и Светлоробского.

### Назначение и область применения методики

Методика касается технологии проведения работ по подготовке к анализам проб руд драгоценных металлов, содержащих свободное золото, и рекомендуется к применению при геологическом изучении недр, а также при определении содержания золота в продуктах обогащения руд при выполнении научно-исследовательских работ и промышленной эксплуатации месторождений руд драгоценных металлов.

Настоящая методика соответствует требованиям ГОСТ 14180–80, ОСТ 48-276–86 и ОСТ 41-08-249–12 в части методов отбора и подготовки проб, конкретизированных в соответствующих разделах методики.

### Сущность методики

1. Настоящая методика подготовки к анализам проб руд драгоценных металлов основана на предварительном выделении свободного золота путем просеивания через контрольное сито аналитической навески истертого материала. В результате просеивания получают два продукта – надрешетный и подрешетный. Вся масса полученного надрешетного продукта после тщательного взвешивания направляется на пробирную плавку целиком. От подрешетного продукта после взвешивания обычным квартованием отбирается аналитическая навеска массой 50–100 г для определения содержания золота.

2. Содержание золота в исходной пробе рассчитывается по балансу на основании результатов анализов надрешетного и подрешетного продуктов.

3. Применение методики обеспечивает оперативное определение содержания золота в пробах массой более 1–2 кг, исключает негативное влияние на результаты анализа присутствующего в рудах свободного золота и позволяет улучшить точность выполнения анализов.

### Аппаратура

1. Для отбора проб используется аппаратура в соответствии с ГОСТ 14180–80.

2. Для дробления, истирания и сокращения проб используются: дробилки щековые; сократители механические и ручные; делители механические; истиратели вибрационные, шаровые мельницы; совки для загрузки руды в дробильно-измельчительные аппараты и отбора проб.

3. Контрольное грохочение по классу 0,07 (0,1) мм (какая аппаратура?).

4. Взвешивание продуктов просеивания:

– весы лабораторные 3 класса точности с наибольшим пределом взвешивания 10 кг для взвешивания подрешетного продукта;

– весы лабораторные 2 класса точности с наибольшим пределом взвешивания 60 г для взвешивания надрешетного продукта.

Отбор и обработка проб

1. Отбор, дробление, перемешивание и сокращение исходных проб до крупности –2 мм проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 14180–80 с учетом дополнений ОСТ 48-276–86.

Масса материала проб при сокращении в процессе дробления определяется по формуле Ричардса–Чечотта

$$Q = Kd^\alpha,$$

где  $Q$  – масса пробы на данной стадии ее сокращения, кг;  $K$  – коэффициент, зависящий от крупности золота, неравномерности его распределения в руде и однородности руды (рекомендуемое значение – 1);  $d$  – максимальный диаметр кусков руды, мм;  $\alpha$  – показатель степени приближения формы зерен руды к шаровидной (рекомендуемое значение – 2).

2. Для подготовки к анализу руд со свободным золотом применяют схему, приведенную на рисунке.

3. Число стадий подготовки проб может быть уменьшено за счет применения оборудования с более высокой степенью измельчения. Все используемое оборудование и пробоприемные устройства должны быть очищены от загрязнений после обработки каждой пробы.

4. Дробление проб рекомендуется проводить в щечковых дробилках с гладкими щеками.

5. После дробления до крупности –2 мм проба массой 4 кг поступает на измельчение до крупности 50–60 % класса –0,1 мм.

6. После первой стадии измельчения проба сокращается до 1 кг и затем истирается до крупности 95–98 % класса –0,1 мм.

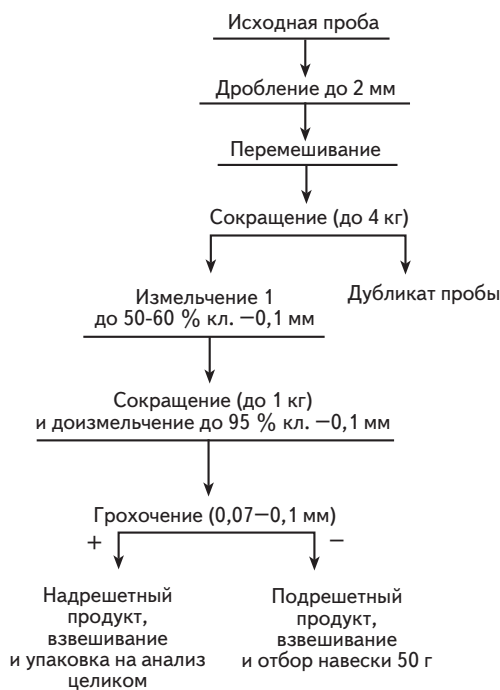


Схема подготовки пробы к анализу

7. Сокращение материала на всех стадиях обработки проб предпочтительно проводить при помощи механических сократителей, обеспечивающих равномерную подачу материала и отбор проб поперечным пересечением всей струи пробоотбирающим устройством с числом отсечек не менее 40 мин<sup>-1</sup>.

8. При отборе и обработке проб необходимо обеспечить условия безопасности труда в соответствии с требованиями ГОСТ 14180–80.

9. Масса измельченной пробы, поступающей на контрольное просеивание на сите 0,07 (0,1) мм, должна быть не менее 1 кг (ОСТ 48-276–86). Грохочение проводится мокрым способом, что предпочтительнее грохочения всухую. Однако, если возможность организовать мокрое грохочение отсутствует, нет никаких препятствий для применения сухого грохочения. Сита после грохочения должны очищаться в ультразвуковых ваннах.

10. Желательно, чтобы масса получаемых надрешетных продуктов не превышала 20–50 г, т. е. массы единичной навески для пробирной плавки. Надрешетный продукт, содержащий частицы свободного золота, взвешивается и целиком направляется на пробирный анализ. В случае если вся масса концентрата не может быть проплавлена одной пробирной плавкой, проводится несколько плавков. По результатам пробирных анализов определяется средневзвешенное содержание золота в надрешетном продукте.

11. После взвешивания подрешетного продукта из него отбираются пробы (50 г) для определения содержания золота пробирным анализом.

12. После получения результатов анализов определяется содержание золота в исходной пробе руды по формуле

$$\alpha = \frac{\gamma_1\beta_1 + \gamma_2\beta_2}{100},$$

где  $\gamma_1$  – выход надрешетного продукта, % от массы пробы, поступающей на контрольное просеивание;  $\beta_1$  – содержание золота в надрешетном продукте, г/т;  $\gamma_2$  – выход подрешетного продукта, % от массы пробы, поступающей на гравитационное выделение свободного золота;  $\beta_2$  – содержание золота в подрешетном продукте, г/т;  $\alpha$  – содержание золота в исходной пробе, г/т.

В качестве примера применения данной методики представляем результаты определения содержания золота в пробах руды с крупным самородным золотом месторождения Голец Высочайший в Иркутской области (табл. 2). В таблице приведены массы навесок надрешетного продукта при грохочении на сите 0,1 мм, которые полностью поступили на пробирную плавку. Из подрешетного продукта квартованием выделены две навески массой 40 г каждая для выполнения анализа. Результаты анализа двух параллельных навесок показали хорошую сходимость. Расчетное содержание золота в исходной руде определено по результатам расчета баланса вещества. Анализ

Таблица 2

Результаты расчета содержания золота в пробах с крупными выделениями металла в руде месторождения Голец Высочайший

Но- мер про- бы	Надрешетный про- дукт (+0,1 мм)			Подрешетный продукт (-0,1+0 мм)					Расчет- ное со- держание в исхо- дной про- бе, г/т
	Выход		Содер- жание Au, г/т	Выход		Содержание Au, г/т			
	г	%		г	%	1 парал- лельная навеска	2 парал- лельная навеска	Сред- нее	
1	1,650	0,171	1526	964,2	99,829	2,2	2,05	2,125	4,731
2	2,365	0,241	883	977,8	99,759	3,58	3,7	3,64	5,759
3	0,889	0,088	120,6	1006,3	99,912	1,54	1,58	1,56	1,665
4	2,269	0,196	88,4	1158,2	99,804	1,83	1,93	1,88	2,050
5	5,661	0,601	26,4	936,8	99,399	0,95	0,96	0,955	1,108
6	5,870	0,588	37,9	993,1	99,412	1,3	1,34	1,32	1,535
7	7,482	0,735	502	1009,9	99,265	2,22	2,37	2,295	5,968
8	2,690	0,243	812	1102,3	99,757	3,42	4,4	3,91	5,874
9	2,336	0,234	2236	995,5	99,766	6,27	7,16	6,715	11,932
10	3,489	0,385	202	902,6	99,615	3,33	3,09	3,21	3,975

результатов этого расчета показал, что в надрешетном продукте грохочения измельченной пробы концентрация золота на один–два порядка выше, чем в подрешетном продукте (минимальное превышение – 28 раз, максимальное – 718 раз). В надрешетном продукте самородное золото часто наблюдается визуально, оно представлено крупными плоскушками, листочками, лепешкообразными индивидами размером до 0,3–0,7 мм. Количество золота в надрешетном продукте может достигать до 44–62 % от общего количества металла в пробе даже в пробах с небольшим содержанием крупного самородного золота, извлечение металла в надрешетный продукт – от(?) 6–8 %.

В заключение несколько экономических аспектов. Во-первых, данный вид анализа дороже, чем рядовой пробирный анализ золота, который стоит от 700 до 1300 руб. [9] (включая два параллельных определения). Основное отличие состоит в том, что при данном анализе проводятся две дополнительные операции: а) контрольное грохочение (или гравитационное обогащение и б) дополнительная пробирная плавка надрешетного продукта. Кроме того, требуется дополнительные затраты на оформление результата анализа. Следовательно, суммарные расценки на скрин-анализ (или анализ с гравитационной сепарацией пробы) должны быть в 2,5 раза выше, чем на обычный рядовой пробирный анализ.

Во-вторых, временной промежуток на анализ одной пробы скрин-методом увеличивается на несколько часов (3–4 часа), которые требуются на процесс мокрого грохочения, сбор, сушку и упаковку надрешетного продукта, сбор подрешетной пульпы, ее квартование, фильтрацию аналитических навесок, сушку и упаковку навесок для пробирного анализа.

В третьих, различия при подготовке и анализе проб скрин- и гравитационным методами в случае подготовки единичных проб не существенные, но при потоковом анализе проб скрин-метод имеет преимущ-

ества, поскольку он менее трудоемок и требует меньшего количества хвостовых продуктов. Данный метод обладает большей гибкостью, характеризуется меньшими затратами электроэнергии, может проводиться сухим способом. Гравитационный метод более затратный как по эксплуатационным расходам, так и по капитальным затратам, однако с его помощью можно получить дополнительную информацию о размерах и морфологии частиц самородного золота (или платино-железистых сплавов), а также о минеральном составе тяжелой фракции. Поэтому гравитационный метод мы советуем применять для единичных проб на поисковых стадиях исследований, а также

при выполнении исследования вещественного состава технологических проб.

Несмотря на сложности и относительную дороговизну предлагаемых методик определения содержания крупного самородного золота и платино-железистых сплавов, эти способы являются единственными надежными для достоверного определения содержаний благородных металлов в рудах с крупными частицами самородных фаз.

Исследование выполнено при содействии проектов НИР Санкт-Петербургского государственного университета: 18.38.418.2015 «Географические закономерности современных процессов почвообразования и выветривания в ландшафтах холодного сектора Евразии, оценка возможности их самовосстановления и регенерационного преобразования» и 3.38.690.2013 «Условия зарождения, эволюции и постмагматических преобразований минералов-концентраторов «критических металлов» в комплексах интрузивных и вулканических горных пород».


*Список литературы*

1. Петров С. В. Морфологические особенности самородного золота и их влияние на результаты обогащения руд // Обогащение руд. 1996. № 2. С. 34–38.
2. Петров С. В. Методологические и терминологические аспекты изучения форм нахождения золота в рудах // Обогащение руд. 2005. № 2. С. 27–30.
3. Домарев В. С. Опыт сравнения результатов ковшевой промывки проб рудного золота с данными химических анализов // Золотодобыча. 2012. № 161, апрель.
4. Особенности обогащения минерального сырья с высокой неравномерностью распределения полезных компонентов (на примере платиновых руд) / А. В. Богданович, С. В. Петров, Ю. В. Назимова, А. М. Васильев, С. А. Урнышева // Обогащение руд. 2010. № 4. С. 3–8.
5. Богданович А. В., Петров С. В., Шумская Е. Н. Особенности поведения частиц самородного золота в цикле измельчения // Обогащение руд. 2000. № 2. С. 20–23.

6. Сравнительная оценка достоверности определения содержания золота в рудах Дегдеканского рудного поля традиционным пробирным анализом и по методике с предварительным гравитационным концентрированием свободного золота / А. И. Романчук, В. А. Богомолов, Е. И. Никитенко, П. И. Кушнарев // Недропользование — XXI век. 2011. № 3. С. 59–63.

7. Кавчик Б. К. Схема обработки проб с предварительным извлечением крупного золота // Золотодобыча. 2013. № 177, август.

8. Столяров В. В. Крупность золота в рудоносных скарпах восточной части Передового хребта по данным фракционного скрин-анализа // Минералы: строение, свойства, методы исследования: сб. тезисов и статей Всероссийской молодежной конференции. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2012. С. 118–121.

9. Кавчик Б. К. Выбор метода анализа проб с учетом погрешности оценки содержания и стоимости // Золотодобыча. 2009. № 130. 

Obogashchenie Rud, 2015, No. 4, pp. .

DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/or.2015.04.08>

**UPON THE METHOD OF RELIABLE DETERMINATION OF NOBLE METALS GRADES IN SAMPLES WITH HIGH OCCURRENCE OF NATIVE METALS**

1) PETROV Sergey Viktorovich; 2) St. Petersburg State University (Russia); 3) Ph. D. in Geology and Mineralogy; 4) Head of Chair; 5) s.petrov@spbu.ru;

1) BEDEROVA Lela Lvovna; 2) ООО «LIMS» (Russia); 3) Postgraduate (SPbSU); 4) Deputy Director;

1) BOROZDIN Aleksey Pavlovich; 2) St. Petersburg State University (Russia); 4) Senior Lecturer.

1) Surname, name, patronymic; 2) Job; 3) Academic degree and knowledge; 4) Position; 5) Contacts.

A necessity to write this article became obvious after performance of a number of studies, related to determination of gold grade in samples. The method of preliminary separation of free gold by gravity methods with subsequent fire assay of dried concentrate and tailings appears to be less effective, than the screen-analysis method, described in this work. The proposed method provides for application of different techniques for separation of large gold grains and separate analysis of ground material. Ground material is screened, then oversize and undersize are subjected to fire assay. Gold grade in initial sample is calculated by balance equation, based on screened products analysis. By way of example of this method application, the results of gold grade determination in ore samples with large grains of native gold taken from the Golets Vysochaishiy deposit in the Irkutsk region are presented. It is noted, that application of the proposed method permits to promptly determine gold content in specimens of over 1–2 kg of mass, excluding negative effect of free gold analysis results, occurring in samples, and increase precision of the analysis performance.

**Key words:** fire assay, screen-analysis, gold, platinum.

*References*

1. Petrov S. V. Morphological characteristic properties of native gold and their influence on the results of ore beneficiation. *Obogashchenie Rud*, 1996, No. 2, pp. 34–38.

2. Petrov S. V. Methodological and terminological aspects of study of forms of gold occurrence in ores. *Obogashchenie Rud*, 2005, No. 2, pp. 27–30.

3. Domarev V. S. Experience of comparing the results of gold ore samples ladle rinsing with the data of chemical analysis *Zolotodobycha*, 2012, No. 161, April.

4. Bogdanovich A. V., Petrov S. V., Nazimova Yu. V., Vasilyev A. M., Urnysheva S. A. Specialties of processing minerals with high non-uniformity of valuable components distribution (by the example of platinum ores). *Obogashchenie Rud*, 2010, No. 4, pp. 3–8.

5. Bogdanovich A. V., Petrov S. V., Shumskaya E. N. Native gold particles behavior features in grinding circuit. *Obogashchenie Rud*, 2000, No. 2, pp. 20–23.

6. Romanchuk A. I., Bogomolov V. A., Nikitenko E. I., Kushnarev P. I. Comparative evaluation of reliability of gold determination in ores of the ore field Degdekan by traditional assay analysis and method of preliminary gravity concentration of free gold. *Nedropolzovanie — XXI vek*, 2011, No. 3, pp. 59–63.

7. Kavchik B. K. Scheme of processing samples with preliminary extraction of large gold. *Zolotodobycha*, 2013, No. 177, August.

8. Stolyarov V. V. Fineness of gold in the ore-bearing skarns of the eastern part of the Front Range according to the data of screen fraction analysis. *Mineraly: stroeniye, svoystva, metody issledovaniya. Sbornik tezisov i statey Vserossiyskoy molodezhnoy konferentsii* (Minerals: structure, properties, methods. Collection of articles and abstracts of All-Russian Youth Conference). Novocherkassk, YURGPU (NPI) — Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), 2012, pp. 118–121.

9. Kavchik B. K. Choice of method of analysis of samples taking into account content and value error estimation. *Zolotodobycha*, 2009, No. 130.

*Acknowledgements*

The work was performed for Projects and Research of the St. Petersburg State University of the Russian Federation: 18.38.418.2015 «The geographic regularities of modern processes of soil formation and weathering in landscapes of cold regions of Eurasia, estimation of self-regeneration and regenerative transformation» and 3.38.690.2013 «The conditions for occurrence, evolution and postmagmatic transformations of minerals-concentrators of «critical metals» in complexes of intrusive and volcanic rocks».