

УДК 622.7:622.341

В.А. Богомолов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗОЛОТА В РУДАХ СО СВОБОДНЫМ ЗОЛОТОМ

Разработана методика подготовки к анализам проб, содержащих свободное золото. Методика основана на гравитационном выделении свободного золота из измельченных руд в концентрат, получении бедных хвостов, анализе, и последующем расчете содержания золота по балансу этих продуктов.

Ключевые слова: золотосодержащие руды, свободное золото, предварительное концентрирование, концентратор «Бегущая волна».

При разведке месторождений, содержащих свободное золото, возникает задача его правильного определения в геологических пробах руд. Определение достоверного содержания драгоценных металлов в рудах осложняется в случае присутствия частиц свободного золота. Высокая ковкость золота обуславливает его плохую дезинтеграцию при дроблении и измельчении. Присутствие частиц золота крупностью более 100 мкм не позволяет обеспечить его равномерное распределение в процессе пробоподготовки. В результате содержание золота в навесках, отбираемых для выполнения пробирных анализов, не соответствуют содержанию в исходной руде. Наиболее значительные ошибки возникают при опробовании объектов, содержащих среднее и крупное золото. Учитывая, что масса направляемой на истирание навески руды, как правило, не превышает 1 кг, а на пробирный анализ поступает только 50—100 г истертого материала, вероятность попадания средних и крупных частиц золота в направляемые на анализ навески снижается. Для достоверного определения содержания золота в таких рудах необходимо увеличить массу ана-

лизируемой навески и, соответственно, проводить большое количество пробирных плавок, но это не возможно в связи с трудоемкостью выполнения анализов.

ОСтом 48—276—86 предполагается предварительный отсев из измельченной руды на ситах с размером ячеек 0,074 или 0,1 мм, однако недостатком этого метода является его трудоемкость, поэтому масса навесок обычно не превышает 300—500 г, что недостаточно для многих типов руд. Кроме того, при массовых анализах трудно полностью исключить возможность «заражения» проб за счет недостаточной очистки сеток сит.

Определение содержания золота цианированием укрупненных навесок также является неэффективным, ввиду высокой продолжительности цианирования, которая может достигать нескольких суток.

Более перспективным является выделение частиц свободного золота гравитационными методами с получением золотосодержащего концентрата и хвостов. Вся масса концентрата поступает на пробирную плавку. Хвосты гравитации характеризуются равномерным распределением золота,

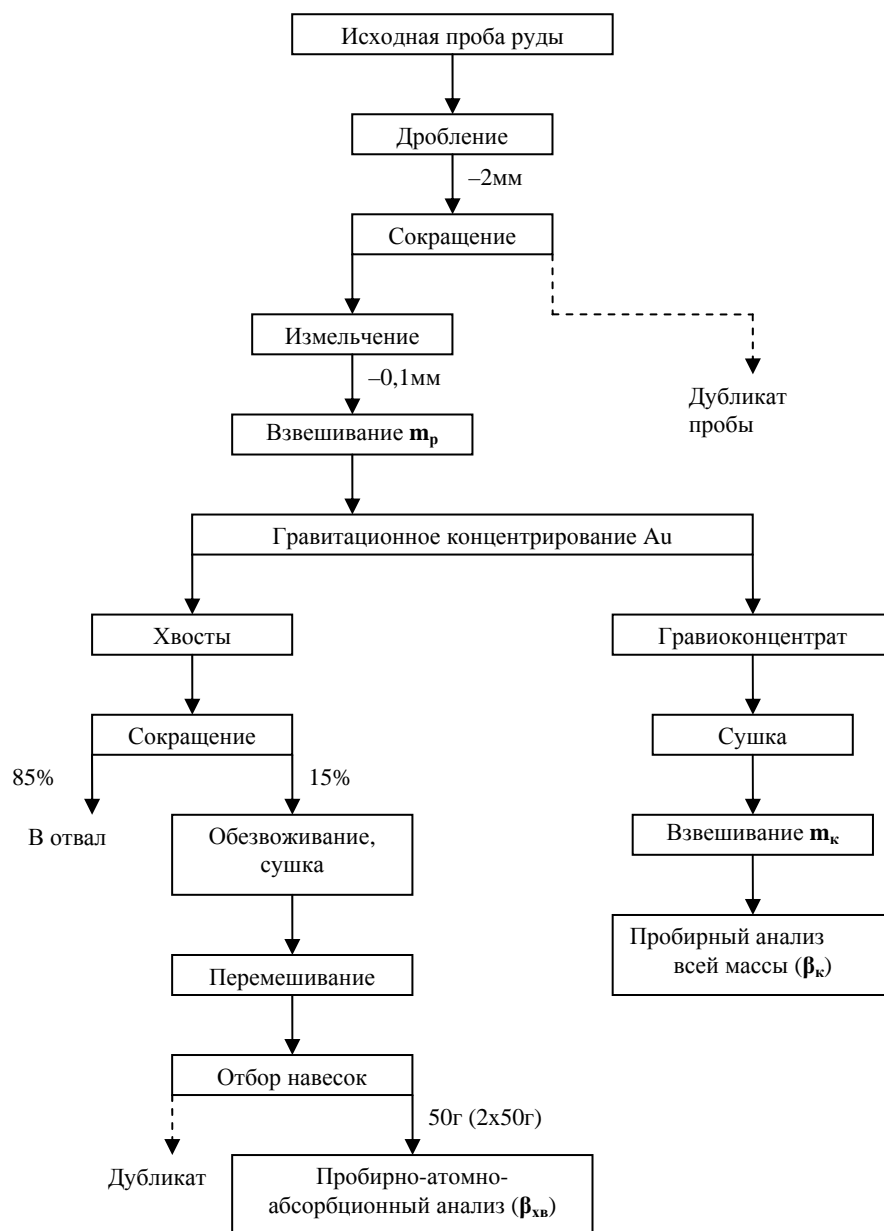


Рис. 1. Схема подготовки проб руд

поэтому проблем с отбором представительных навесок не возникает. Содержание золота в исходной пробе рассчитывается по балансу.

Для применения указанного метода при массовом анализе проб необходимо соблюдение нескольких условий:

— технологическая и аппаратурная схемы пробоподготовки должны включать минимальное количество операций классификации и сокращения проб;

— применяемое оборудование должно хорошо зачищаться и обеспечивать оперативную подготовку проб;

— выход концентрата со свободным золотом должен быть минимальным.

Разработана простая схема оперативной подготовки проб, основанная на гравитационном выделении свободного золота из измельченных руд (рис. 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 [1].

Дробление исходной руды осуществляется в дробильно-сократительном модуле «Бойд», который обеспечивает получение материала крупностью 85—90 % класса — 2 мм и отбор из общего потока дробленой руды от 10 до 50 % материала среднего состава. В случае необходимости подготовки крупнокусковых проб массой более 100 кг руда предварительно дробится в щековой дробилке в одну или две стадии с последующим сокращением. Для определения минимальной массы дробленой руды после сокращения используется известная формула

$$m_d = kd^2, \quad (1)$$

где: m_d — минимальная масса пробы дробленой руды после сокращения, кг; k — коэффициент, зависящий от степени неоднородности содержания золота в руде (во всех случаях принимался равным 1,0); d — размер максимального куска руды, мм.

Измельчение дробленой руды массой не менее 4 кг до крупности 85—90 % класса — 100 мкм проводится в двухъярусной непрерывной кольцевой мельнице. Производительность мельницы по указанному классу крупности в среднем составляет 300 г/мин. Для теоретического определения минимальной массы руды, направляемой на последующее гравитационное концентрирование, используется формула Ф. Питарда [2]

$$m_{pmin} = \frac{f \times g \times p \times d_{Au}^3}{a \times S^2} \quad (2)$$

где: m_{pmin} — минимальная масса руды; f — коэффициент формы частиц (для золота рекомендуется 0,2); g — гранулометрический фактор (для золота рекомендуется 0,25); p — удельная плотность золота, г/см³; d_{Au} — максимальный диаметр частицы золота, см; a — ожидаемое содержание золота в руде, выраженная как часть единицы; S — допустимая вариация определения содержания золота (15 %).

Гравитационное концентрирование золота осуществляется в центробежно-прецессионном концентраторе «Бегущая волна», оборудованном пробоотборником хвостов гравитации. Конструкция сепаратора позволяет выполнять отсечки хвостов с частотой 130 мин⁻¹. В результате от общего потока хвостов гравитации отбирается представительная по химическому и гранулометрическому составу навеска для выполнения определений содержания золота. Ее масса составляет 12—14 % от общей массы хвостов гравитации, что упрощает их подготовку к анализам. Для определения содержания золота в хвостах гравитации рекомендуется комбинированный пробирно-атомно-абсорбционный метод.

Определение содержания золота в концентрате осуществляется пробирным методом. На пробирную плавку поступает вся масса концентрата. Как правило, масса гравитационного концентрата не превышает 50 г. В случае получения концентрата большей массы, проводится две или более пробирные плавки и рассчитывается средневзвешенное содержание золота в концентрате.

Расчет содержания золота в исходной руде проводится по формуле:

$$\alpha = \frac{m_k}{m_p} \cdot \beta_k + \left(1 - \frac{m_k}{m_p}\right) \cdot \beta_{хв}, \quad (3)$$

где: α — содержание золота в исходной руде, г/т; m_p — масса руды, направляемой на гравитационное концентрирование, кг; m_k — масса гравитационного концентрата, кг; β_k — содержание золота в концентрате; $\beta_{хв}$ — содержание золота в хвостах гравитации.

По предложенной методике проведено множество экспериментов, подтверждающих ее высокую эффективность.

Пример 1. На месторождение золото-кварцевых убогосульфидных прожилково-вкрапленных руд проводятся поисково-оценочные работы. По данным пробирных анализов содержание золота в руде колеблется в пределах от 3,5 г/т и выше, при этом установлено, что крупность золота может достигать 3,0 мм.

Крупное самородное золото имеет уплощенную форму с неровными краями, мелкие золотины отличаются преимущественно комковидной формой. Встречается тонкодисперсное золото в виде микровключений в сульфидах при размере выделений 0,002—0,003 мм. При измельчении руды золото хорошо раскрывается, так при крупности помола 90 % кл. — 0,071 мм массо-



Рис. 2. Результаты определений содержания золота в руде

Результаты определения содержания золота прямым пробирным анализом и по методике предварительного гравитационного концентрирования золота

| Прямой пробирный анализ | | Определение с предварительным концентрированием золота | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|---------------|---|------------------------------|--------|--------------------------|------------------------|
| Содержание Au, г/г | Кэфф. вариации (v_n), % | Содержание Au (а), г/г | Кэфф. вариации (v_d), % | Выход к-та, % | Содержание Au в к-те ($\beta_{к-т}$), г/г | Содержание Au в хвостах, г/г | | | Извлечение Au в к-т, % |
| | | | | | | Опр. 1 | Опр. 2 | Среднее ($\beta_{ср}$) | |
| 4,66 | 51,3 | 6,5745 | 8,1 | 0,47 | 880,00 | 2,72 | 2,18 | 2,45 | 62,9099 |
| 3,51 | | 5,9443 | | 0,42 | 934,00 | 2,08 | 1,98 | 2,03 | 65,9929 |
| 8,21 | | 7,6929 | | 0,63 | 908,00 | 1,88 | 2,09 | 1,985 | 74,3595 |
| 9,1 | | 6,2795 | | 0,71 | 560,00 | 2,28 | 2,36 | 2,32 | 63,3169 |
| 3,82 | | 7,3874 | | 0,40 | 1309,00 | 2,07 | 2,25 | 2,16 | 70,8778 |
| 12,5 | | 6,7022 | | 0,52 | 890,00 | 2,06 | 2,11 | 2,085 | 69,0524 |
| 6,9667 (M_п) | | 6,7634 (M_к) | | | | | | | |

вая доля свободного золота достигает 81,4 % отн., в полураскрытой форме в сростках — 17 % отн., доля нераскрытого золота незначительна и составляет лишь 1,6 % отн.

Расчетная минимальная масса пробы по формуле 2, при максимальной крупности золота 3,0 мм и его минимальном содержании 3,5 г/т, составляет 275 г. Определение содержания золота в руде по традиционной методике свидетельствуют о значительном влиянии на результаты определений «эффекта самородка». Результаты определений содержания золота пробирным методом из параллельных навесок колеблются в широких пределах — от 3,51 до 12,5 г/т (рис. 2), коэффициент вариации превышает 50 % (табл. 1). Таким образом, метод прямого определения содержания золота пробирной плавкой из навесок массой 50 г для данной руды неприемлем.

В результате гравитационного концентрирования подавляющая часть свободного золота извлекается в концентрат, выход которого из проб массой 4,4 кг не превышает 0,71 %, или 31 г по весу. При просмотре под микроскопом выделенного из концентратов золота отмечено, что его частицы крупнее 0,1 мм в процессе измельчения подверглись деформации, но не разрушились. Такие частицы в процессе отбора от исходной измельченной пробы небольших по массе навесок распределяются неравномерно и искажают результаты анализов.

Извлечение из руды свободного золота обеспечивает его равномерное распределение в хвостах гравитации, о чем свидетельствуют результаты определений содержания золота из двух параллельных навесок (табл. 1). По данным баланса количества золота в концентрате и

хвостах его содержание в руде составляет 6,76 г/т. Коэффициент вариации и доверительный интервал снижаются более чем в шесть раз — с 51,3 до 8,1 и с 3,57 до 0,54 г/т, соответственно, по сравнению с прямым пробирным анализом (рис. 2, табл. 1).

Необходимо отметить, что среднее содержание золота в руде по результатам шести прямых пробирных анализов и определений по рекомендуемой методике практически совпадают. В процессе пробирных анализов в общей сложности было проплавлено 300 г руды. Это превышает минимальную расчетную массу пробы по формуле (2) и подтверждает возможность ее практического применения для расчета минимальной массы представительной для анализа массы пробы для руд данного месторождения. Тем не менее, учитывая его недостаточную изученность и возможность присутствия золота большей крупности, рекомендуется проводить концентрирование золота из навесок массой не менее 4 кг.

Опыт 2.

На руде, содержащей от 30 до 75% свободного золота крупностью до 1 мм, были проведены опыты по 100 средним пробам каждым из методов. Вся масса руды (~200 кг) была поделена пополам, и каждая половина, в свою очередь, подроблена и поделена на 100 проб. Масса каждой отдельной пробы составляла 1 кг. От первых 100 проб были отобраны 50 г навески и проанализированы прямым пробирным анализом. Определение содержания золота оставшихся 100 проб было проведено с использованием методики предварительного гравитационного концентрирования. Результаты опытов представлены на рис. 3.

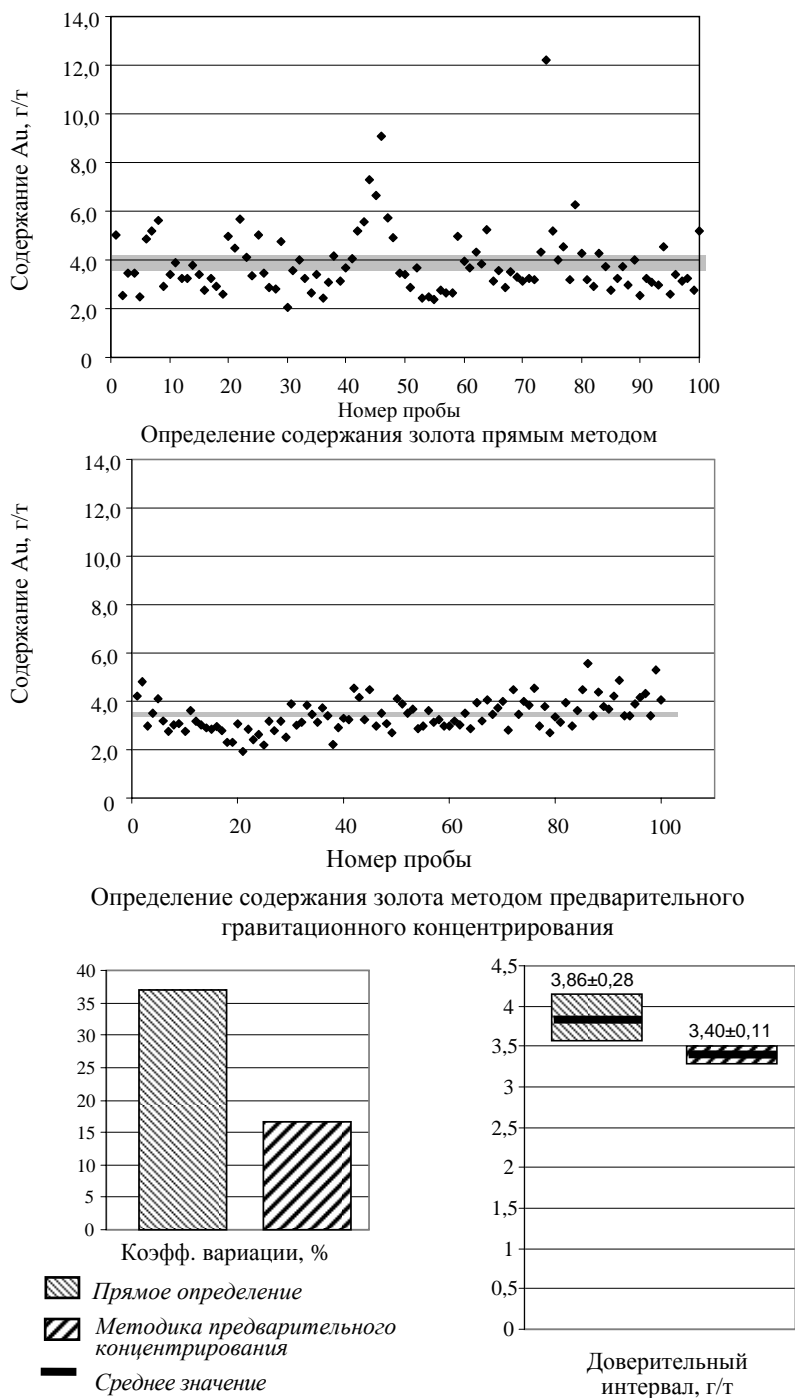


Рис. 3. Определение содержания золота прямым пробирным анализом и по методике с предварительным гравитационным концентрированием

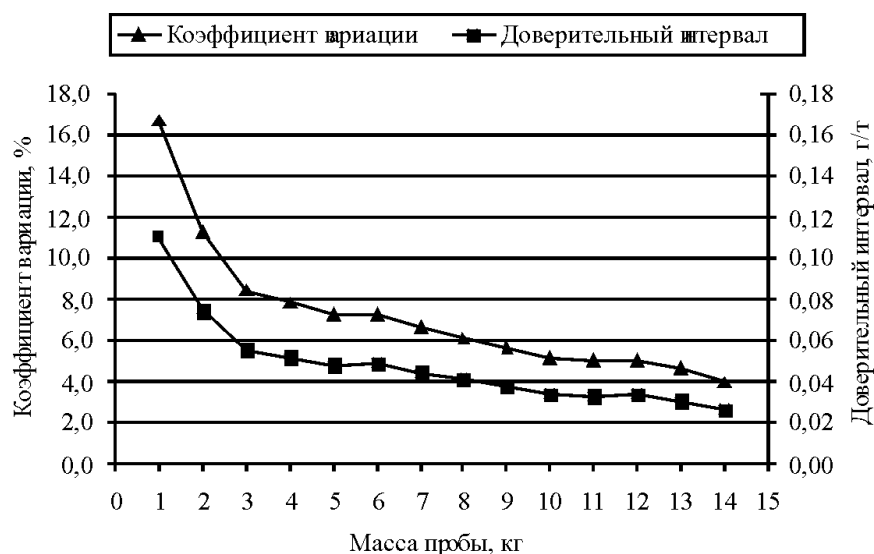


Рис. 4. Изменение статистических показателей в зависимости от массы проб

Как и в предыдущем случае, из-за отсутствия свободного крупного золота, при прямом определении содержания золота, имел место большой разброс результатов. Определенное значение содержания золота в пробах варьировалось в пределах от 2,03 до 12,02 г/т. В тоже время, при определении содержания золота по методике с предварительным гравитационным концентрированием разброс значительно сократился. Коэффициент вариации понизился в 2,3 раза с 37 до 16%, доверительный интервал также понизился в 2,5 раза с $\pm 0,28$ до $\pm 0,11$ г/т.

С целью определения тенденции повышения достоверности определения содержания золота при увеличении массы пробы, провели расчеты, суть которых заключалась в определении средневзвешенного содержания золота в объединенных пробах массой 2, 3, 4 кг и более. При этом сделано допущение, что результаты определений содержания золота по методике предварительного гравита-

ционного концентрирования в каждой из навесок массой 1 кг достоверны.

Группировка проб проводилась следующим образом:

Выборку из 100 определений содержания золота по методике предварительного концентрирования использовали для составления 100 групповых проб массой от 2 до 14 кг. Составление групповых проб осуществлялось случайным образом. В этом случае результаты анализа каждой частной пробы могли использоваться многократно.

Результаты статистической обработки полученных результатов приведены на рисунке. 4. Видно, что значения коэффициента вариации и доверительного интервала снижаются при увеличении массы пробы, что свидетельствует об увеличении точности определений.

Для проверки теоретических расчетов были проведены эксперименты на пробах массой 4 кг. Они были составлены путем случайной группировки оставшихся частей проб, на-

Таблица 2

Результаты определения содержания золота в 4кг пробах по методике предварительного гравитационного обогащения

| № пробы | Вес, г | | | Содержание Au, г/т | | |
|------------------------|---------------|------------|---------|--------------------|--------|--------------------------|
| | Исходная руда | Концентрат | Хвосты | Концентрат | Хвосты | Исходная руда по балансу |
| 1 | 4515 | 15,63 | 4499,37 | 649 | 1,55 | 3,79 |
| 2 | 4400 | 25,49 | 4374,51 | 398 | 1,55 | 3,85 |
| 3 | 4440 | 22,58 | 4417,42 | 385 | 1,34 | 3,29 |
| 4 | 4535 | 16,66 | 4518,34 | 536 | 1,54 | 3,50 |
| Среднее значение | | | | | | 3,61 |
| Коэффициент вариации | | | | | | 7,191 |
| Доверительный интервал | | | | | | 0,051 |

правленных ранее на определение золота прямым пробирным методом. Таким образом было составлено четыре ~4-кг пробы. Гравитационное концентрирование проводилось аналогично с 1 кг пробами. Результаты обработки полученных данных представлены в табл. 2. Полученные значения содержания золота характеризуются небольшим разбросом (значения определения лежат в пределах 3,29—3,79 г/т), а так же невысокими значениями коэффициента вариации и доверительного интервала, 7,19 % и $\pm 0,051$ г/т.

Полученные данные согласуются с теоретически рассчитанными ранее и подтверждают, основанное на теоретическом расчете предположение о том, что при увеличении массы пробы, поступающей на предварительное гравитационное концентрирование, повышается точность определения содержания золота в исходной руде.

Практическое применение

При проведении работ по доразведке и переоценке запасов золота в убогосульфидных золото-кварцевых рудах Наталкинского месторождения возникла необходимость в пробоподготовке и анализе около 40 000 гео-

логических проб в год. По запасам золота месторождение является крупным, но с низким содержанием золота (в среднем 1,7 г/т). Для таких объектов особенно важным является точность определений содержания золота при проведении геологоразведочных работ.

Эффективность рекомендуемой методики предварительного гравитационного концентрирования оценена на рудах, характеризующих интервалы с различным содержанием золота. Определение содержания золота по рекомендуемой методике позволило существенно увеличить точность определений. На основании полученных данных методика предварительного гравитационного концентрирования была рекомендована для применения при анализе геологических проб. По результатам доразведки руд Наталкинского месторождения с ее применением запасы золота были увеличены на 200 т [3].

Заключение

Применение методики гравитационного концентрирования позволяет исключить влияние «эффекта самородка» и существенно увеличить правильность определений.

Среднее время обработки одной пробы массой 4 кг в концентраторе составляет 10—15 минут, включая загрузку руды и выгрузку концентрата.

Схема отличается минимальным количеством операций, простотой и надежностью используемого оборудования, отсутствием специальных требований к квалификации обслуживающего персонала и минимальным влиянием «человеческого фактора» на

конечные результаты. Характер выполняемых операций и согласованная производительность отдельных узлов аппаратурной схемы создают благоприятные предпосылки для ее автоматизации.

Опыт практического применения рекомендуемой технологической и аппаратурной схемы свидетельствует о возможности ее применения при массовом анализе руд золота и продуктов их обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *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.

З. М.П. Казимиров, Е.М. Никитенко, В.Е. Лукиных, Т.М. Новикова. «Применение технологических методов пробоподготовки для оценки большеобъемных золоторудных объектов на примере Наталкинского месторождения». Бюллетень Золотодобыча № 119. 2008 г. **VIAS**

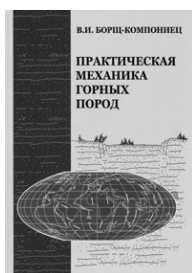
КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Богомолов Василий Андреевич – научный сотрудник отдела обогащения минерального сырья ФГУП ЦНИГРИ, vasya2108@mail.ru

Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, tsnigri@tsnigri.ru



ГОРНАЯ КНИГА



Практическая механика горных пород

В.И. Борш-Компониец

2013 г.

322 с.

ISBN: 978-5-98672-342-6

UDK: 622.83

Приведены общие вопросы механики горных пород, позволяющие читателю получить знания, формирующие системное представление о механических закономерностях, протекающих в массивах при проведении горных выработок. Рассмотрены особенности горных пород и напряженного состояния массивов, закономерности проявления горного давления при проведении одиночных и очистных горных выработок, основные положения сдвига горных пород при подземной и открытой разработке. Описаны методы изучения сдвига и проявления горного давления, виды анкерного крепления, пучения горных пород.