

Пробирный анализ или скрин-анализ? Использование полной погрешности измерения для выбора наиболее подходящей процедуры.

Стефан Брошо

Caspeo, SARL, ул. Авеню Клода Гиймен, 3, г. Орлеан, Франция

Труды конференции Sampling Conference, г. Перт, Австралия, Август 2012

АННОТАЦИЯ

В случае присутствия на месторождении крупного золота, для анализа проб обычно выполняют скрин-анализ (Screen fire assay, далее по тексту - СА). Несомненно, эта процедура является более точной в сравнении с обыкновенным пробирным анализом (Fire assay, далее по тексту ПА) и снижает риски возникновения систематической погрешности. Вместе с тем, различия в аналитических погрешностях обеих процедур становятся менее заметны, если рассматривать процесс измерения в комплексе – с учетом отбора проб, предшествующего анализу. Т.е. при добавлении полной погрешности отбора проб к аналитической погрешности для получения полной погрешности измерения. В этом случае, преимущества СА не оправдывают его более высокой стоимости.

Настоящая статья рассматривает этот вопрос для случая золоторудного месторождения с видимыми частицами крупного золота для различных вариантов отбора проб (керновых проб при опережающей разведке, проб при бурении взрывных скважин в рамках эксплуатации рудника). Полная погрешность измерения оценивается с учетом аналитической погрешности и всех компонентов погрешности отбора проб в соответствии с Теорией отбора проб Пьера Ги.

Сначала в статье рассматривается только заключительный этап отбора проб – отбор пробы непосредственно на анализ, в рамках которого или от истертой пробы отбирают одну аналитическую пробу на ПА, или ее сначала подвергают рассеву, а затем отбирают несколько проб на СА. Расчетная погрешность измерения явно показывает преимущество СА, в особенности при наличии крупного золота. Затем процесс измерения расширяют на примере отбора керновых проб – к итоговому этапу отбора аналитической пробы добавляют несколько предшествующих этапов отбора и подготовки керна, рассматриваются и поясняются расхождения, наблюдаемые при анализе двух половин керна. После этого приводится еще один пример расширения процесса измерения, касающийся отбора проб при бурении. Проводится расчет полной погрешности измерения с применением ранее составленных моделей неоднородности с целью демонстрации, что относительное преимущество СА нивелируется в случае высокой полной погрешности отбора проб.

В заключение, обсуждается выбор аналитической процедуры с точки зрения полных погрешностей измерения и с учетом целей анализа.

ВВЕДЕНИЕ

Отбор проб и измерение содержания золота в рудах с крупным золотом широко изучены, что подтверждается большим объемом соответствующих материалов (Wooldridge, 1998; Frempong, 1999; Dominy et al, 2000; Dominy, Johansen and Annels, 2001; Cossio et al, 2003; Roberts, Dominy and Nugus, 2003; Dominy et al, 2003; Johansen et al, 2003; Dominy and Petersen, 2005; Johansen and Dominy; 2005; Dominy, Xie and Platten, 2008; Dominy, Platten and Xie, 2008; Carswell et al, 2009; Dominy, 2009; Dominy, 2010; Dominy, Platten and Minnitt, 2010; Dominy, Platten and Nugus, 2010; Dominy, Platten and Xie; 2010; Pitard and Stevens, 2011).

В случае присутствия на месторождении крупного золота, для анализа проб обычно выполняют СА (Dominy, Xie and Platten, 2008). Несомненно, эта процедура является более точной в сравнении с ПА и снижает риски возникновения систематической погрешности (Johansen et al, 2003; Johansen and

Dominy; 2005). Вместе с тем, различия в аналитических погрешностях обеих процедур становятся менее заметны при рассмотрении полной погрешности измерения, получаемой путем добавления полной погрешности отбора проб, предшествующего анализу, к аналитической погрешности (Johansen et al, 2003). В этом случае, преимущества СА не оправдывают его более высокой стоимости.

Для иллюстрации рассмотрим случай месторождения рудного золота, характеризуемого наличием большой доли самородного и крупного золота в минерализованных жилах в твердой материнской породе. Крупное золото было видно в основном в трещинах до 4 см длиной и 1 мм шириной. Остальное золото было ассоциировано с пиритом, арсенопиритом, кварцем и карбонатами. Рассмотрим два варианта отбора проб: керновых проб при разведке, и проб при бурении взрывных скважин в рамках эксплуатации рудника. Полную погрешность измерения будем оценивать с учетом аналитической погрешности и всех компонентов погрешности отбора проб в соответствии с Теорией отбора проб Пьера Ги (Gu, 1979).

В первом разделе рассмотрим только заключительный этап отбора проб, в рамках которого или от истертой пробы отбирали одну аналитическую пробу на ПА, или ее подвергали рассеvu для последующего отбора проб на СА. Расчетная погрешность измерения явно показывала преимущество СА, в особенности при наличии крупного золота.

Во втором разделе расширим процесс измерения на примере отбора керновых проб – к заключительному этапу отбора аналитической пробы добавим несколько предшествующих этапов отбора и подготовки керна, рассмотрим расхождения, наблюдавшиеся при анализе двух половин керна. После этого рассмотрим еще одно расширение процесса измерения на примере отбора проб при бурении, в рамках которого применим уже составленные модели неоднородности, чтобы показать, что относительное преимущество СА нивелируется в случае высокой полной погрешности отбора проб.

ПРОЦЕДУРЫ ОТБОРА ПРОБ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ

Множество процедур используется на золотодобывающих предприятиях для измерения содержания золота в рудах или хвостах обогащения. Каждый тип материала и контекст исследования требует особенной процедуры – от отбора первичной пробы и нескольких этапов ее сокращения и подготовки, до итогового анализа. Отбор проб на содержание золота требуется на стадии геологоразведки для расчета запасов руд в месторождении и его расширениях. В этом случае, отбор первичной пробы заключается в технологическом бурении для получения керна, характеризующего геологический объект. В рамках управления предприятием необходим контроль содержания золота в руде до и после вскрышных работ для планирования разработки блоков и шихтовки руды. До вскрыши первичные пробы возможно отобрать в форме сколовых проб или шламовых проб при бурении взрывных скважин. После вскрыши пробы часто отбирают вычерпыванием. Отбор проб может также производиться после первичного дробления, если оно выполняется на площадке рудника. Производительность ЗИФ контролируется по меньшей мере по пробам питания, концентрата и хвостов. Отбор проб промежуточных потоков выполняется по большей части для контроля производительности различных производственных участков фабрики. Схожим образом, контроль содержания требуется и в золотоприемной касе.

Следующие подразделы описывают примеры процедур для этих различных случаев. Последние из них посвящены процедурам ПА и СА.

Процедура отбора керновых проб

Целью технологического бурения является расчет запасов руд с помощью геостатистического расчета на связанной геологической модели. КERN обладает преимуществом сохранения литологии и возможностью последующей стратификации рудного тела. Поэтому, считается, что кERN длиной,

ограниченной геологами двумя отметками глубины, характеризует пласт с расширением в других направлениях в зависимости от геологической модели и сетки бурения.

После документирования, керн опробуется на содержание золота. Обычно анализируют половину керна, вторую половину при этом оставляют в хранилище для геологических или минералогических исследований, или для контроля содержания в будущем. Для этого керн разрезают пополам по всей длине, получая при этом два полуцилиндра. Количество пробы варьируется от нескольких сотен грамм до нескольких килограмм в зависимости от диаметра и длины керна (в рассматриваемом нами случае – от 500 г до 4 кг).

Пробу керна высушивают при необходимости, затем дробят на щековой дробилке до размера, соответствующего истирателю (в нашем случае 6-15 мм). Если количество пробы слишком большое (>3,5 кг), выполняют деление. Проба истирается до 85% подрешетного продукта в 75 мкм (с использованием кольцевой вибрационной мельницы LM5). Затем, если присутствует видимое золото или есть подозрение на наличие крупного золота, выполняется СА. Иначе, выполняется ПА.

Процедура отбора буровых проб

В рамках горных работ, материал, извлекаемый при бурении взрывных скважин, опробуется с целью контроля содержания в обрабатываемом блоке. Выполняется бурение с обратной промывкой, материал извлекается с помощью циклона и мешочного фильтра. Такому извлечению и правильности соответствующего отбора проб необходимо уделять особое внимание (Pitard, 2008; Pitard and Stevens, 2011; Chieragati et al, 2011)

Собранную пробу высушивают и дробят на щековой дробилке до 2 мм. Затем делят и истирают одну четверть до 85% подрешетного продукта в 75 мкм (с использованием кольцевой вибрационной мельницы LM2). Далее направляют на ПА.

Процедура пробирного анализа (ПА)

Истертую пробу делят для получения одной пробы в 30-50 г на ПА и одной подпробы в 200 г, направляемой в контрольную лабораторию для проверки. Дополнительные пробы в 30-50 г могут отбирать в качестве дубликатов. Вес пробы на анализ зависит от происхождения исходной пробы: 30 г для сколковых проб, 50 г – иначе. Пробу на анализ взвешивают на точных весах.

Затем такую пробу смешивают с 170 г флюсов и плавят в печи при температуре в 1050°C в течение 45 минут. Расплавленную пробу выливают в перевернутый конус. После отвердевания, шлак откалывают вручную. Оставшийся веркблей затем купелируют в печи при 960°C в течение часа. Полученный золотосеребряный королек далее могут взвешивать (гравиметрическим способом) или извлекают для кислотного растворения. В последнем случае его помещают в пробирку, добавляют в нее 1 мл 50% азотной кислоты и оставляют в теплой ванной с температурой в 75°C на 15 минут, затем добавляют в пробирку 1 мл соляной кислоты и оставляют в теплой ванной еще на 15 минут. Затем пробирку охлаждают, добавляют 8 мл деионизированной воды. После смешивания раствор анализируют с помощью ААС.

Процедура скрин-анализа (СА)

Истертую пробу делят для получения одной подпробы в 500 г, которую рассеивают на металлическом сите на 106 мкм. Надрешетный продукт взвешивают и направляют на ПА. Подрешетный продукт взвешивают и делят для получения трех 50 г проб на анализ, которые взвешивают на точных весах и направляют на ПА. В дальнейшем этот вариант будем называть СА3. Используется также вариант, когда отбирают только одну 50 г пробу на ПА, его будем называть СА1.

Если массу надрешетного продукта обозначить m_o , содержание золота в нем - a_o , массу подрешетного продукта - m_u , массы проб на анализ в подрешетном продукте - m_{ui} , содержания золота в них - a_{ui} , то содержание золота в партии (лоте) a_L рассчитывается по следующей формуле:

$$a_L = \frac{m_o a_o + m_u \frac{\sum m_{ui} a_{ui}}{\sum m_{ui}}}{m_o + m_u}$$

ОТБОР ПРОБ НА ПРОБИРНЫЙ АНАЛИЗ И СКРИН-АНАЛИЗ

Преимущества процедуры СА для руд с крупным золотом широко обсуждались с точки зрения точности анализа (Johansen et al, 2003). Целью настоящего раздела является сравнение процедур ПА и СА для измерения содержания золота с точки зрения полной погрешности измерения.

Абсолютная погрешность измерения показателя определяется как разница между его измеренным и истинным значениями, последнее по определению неизвестно. Относительная погрешность измерения показателя определяется как соотношение абсолютной погрешности к истинному значению. Ниже по тексту статьи, при упоминании погрешности, мы всегда будем подразумевать относительную погрешность, за исключением случаев, когда будет прямо использован термин «абсолютная погрешность».

В силу естественной изменчивости, свойственной любой процедуре измерения, погрешность измерения представляет собой случайную величину, следующую вероятностному закону, который может быть выведен с помощью различных подходов. В рамках статистического подхода, одно и то же измерение выполняется большое число раз, затем на полученных результатах собирается статистика. Вероятностный подход в свою очередь основывается на теориях, таких, как Теория отбора проб Пьера Ги (Gu, 1979). Для оценки полной погрешности измерения возможно использовать комбинацию этих двух подходов.

Для характеристики погрешности используются моменты распределения вероятности. Первый момент, математическое ожидание, дает оценку систематической погрешности, т. е. систематического отклонения между измеренными и истинными значениями показателя, представляет собой меру точности измерения. Второй момент, дисперсия, количественно оценивает воспроизводимость (или прецизионность) измерения.

Полная погрешность измерения (ОЕ) включает множество составляющих, которые, следуя классификации Пьера Ги (Gu, 1979), возможно разделить в два основных компонента: полную погрешность отбора проб (ТЕ) и аналитическую погрешность (АЕ).

Причиной аналитической погрешности часто является несовершенство процедур и средств, используемых для выполнения аналитических операций. Если рассмотреть процедуры определения содержания, анализ выполняется на пробе, полученной в рамках заключительной стадии отбора проб (пробоподготовки), выполняемой как правило в лаборатории. Оценка аналитической погрешности требует разложения соответствующей процедуры на этапы с целью нахождения источников погрешности. Затем для расчета полной аналитической погрешности используются специальные расчетные правила и метрологический подход.

Полная погрешность отбора проб в свою очередь должна учитывать последовательность этапов измельчения и сокращения количества материала. Она представляет собой сумму полных погрешностей отбора проб каждого этапа (ТЕН). Под этапами понимается первичный отбор из процесса и отбор в рамках каждой стадии подготовки пробы для лабораторного анализа.

В рамках операций по подготовке проб формируется погрешность подготовки пробы (РЕ), источниками которой могут являться, например, загрязнение пробы другими материалами, потери

материала, химическое и физическое изменение материала, намеренные и ненамеренные ошибки персонала, которые могут случиться в процессе подготовки.

Операция отбора небольшого количества материала от партии (лота) с целью получения пробы формирует непосредственно погрешность отбора проб (SE). Ее компоненты возможно классифицировать в погрешность непрерывного выбора (SE), связанную с выбором мест отбора точечных проб, и погрешность формирования точечной пробы (ME), связанную с тем, что материал состоит из частиц (не является сплошным).

Источником компонентов погрешности непрерывного выбора является неоднородность опробуемого материала. Фундаментальная погрешность отбора проб (FE) и погрешность объединения и сегрегации (GE), совместно именуемые погрешностью краткосрочных колебаний качества (QE1), формируются за счет неоднородности состава материала (в материале могут смешиваться различные типы частиц с различными характеристиками: размером, составом, плотностью, и др.). Погрешность долгосрочных (QE2) и периодических (QE3) колебаний качества, а также погрешность взвешивания (WE) происходят в свою очередь от неоднородности распределения материала в пространстве или по времени (пропорции различных типов частиц в материале могут меняться от одного места отбора к другому, от одного момента времени отбора к другому).

Погрешность формирования точечной пробы в свою очередь состоит из погрешности ограничения объема (DE) и погрешности извлечения (EE).

Возвращаясь к аналитическим процедурам, ПА начинается с партии (лота) истертой руды, от которой отбирают пробу на анализ. В случае СА, процедура также начинается с партии (лота) истертой руды, от которого отбирается подпроба на рассев. Надрешетный продукт и от одной до трех проб подрешетного продукта на анализ затем направляются на ПА.

В обоих случаях исходная партия (лот) представляет собой 500 г – 3,5 кг истертой руды. Например, при отборе проб из процесса это может быть истертый концентрат или хвосты. Масса партии (лота) достаточно мала, чтобы ее можно было легко обработать и гомогенизировать. Поэтому партия (лот) считается безразмерной (Gu, 1979), отсюда погрешность взвешивания и погрешности долгосрочных и периодических колебаний качества являются незначительными в сравнении с фундаментальной погрешностью отбора проб.

Фундаментальная погрешность отбора проб на содержание золота

Теория отбора проб позволяет рассчитать фундаментальный компонент погрешности отбора проб. Для начала необходимо описать неоднородность материала относительно измеряемого параметра, в нашем случае – содержания золота. Подробное описание неоднородности выводится из анализа гранулометрического распределения и распределения плотности. Относительная дисперсия фундаментальной погрешности отбора проб для измерения содержания ценного компонента a_L в партии (лоте) задается уравнением (1).

$$\sigma^2(FE) = \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) \sum_{i=1}^{N_F} m_i t_i \left(\frac{a_i - a_L}{a_L} \right)^2 \quad (1)$$

Где M_S это масса пробы, M_L – масса партии (лота). Частицы классифицируются в различные семейства неоднородности в соответствии с их массой (средней массой одной частицы в семействе) и содержанием в них ценного компонента. Семейства частиц N_F должны быть настолько однородными, насколько это возможно. Это значит, что все частицы одного семейства должны обладать примерно одинаковой массой m_i , и примерно одинаковым содержанием ценного компонента a_i . t_i это массовая доля семейства в партии (лоте). Такая классификация называется «моделью неоднородности». Это теоретическая модель, основанная на реалистичных

предположениях. Она может быть составлена на основе исследований, характеризующих частицы с точки зрения их неоднородности. Такую модель неоднородности необходимо составлять для каждого этапа процедуры отбора и подготовки проб. Действительно, при измельчении или рассеивании материала перед вторичным и последующими отборами проб, неоднородность в части гранулометрического распределения и раскрытия минералов изменяется.

В качестве семейств, используемых в уравнении 1, часто берут классы крупности или классы плотности (Gu, 1979). Действительно, гранулометрическое распределение и плотность частиц возможно достаточно легко определить экспериментально. Также возможно принять во внимание форму частиц, хотя ее уже сложнее описать и оценить. Обозначим диапазон размеров частиц одного семейства $[y_{a+1}; y]$, диапазон плотностей $[\rho_\beta; \rho_{\beta+1}]$, предположим, что форма частиц описывается коэффициентом (фактором) формы f . Во избежание неоднородности внутри семейств, диапазоны крупности и плотности, должны быть настолько малыми, насколько это возможно. В этом случае, можем считать, что рассматриваемые частицы обладают средним размером \bar{x}_i и средней плотностью $\bar{\rho}_i$. Тогда массу частиц возможно рассчитать следующим образом:

$$m_i = f \bar{x}_i^3 \bar{\rho}_i$$

В случае только свободного золота, частицы золота распределяются в набор семейств с индексами из подмножества $I_G \subset \{1 \dots N_F\}$ в соответствии с их размерами и формой. Такие семейства характеризуются содержанием золота $a_i = 1$, и сумма их массовых долей представляет собой содержание золота в партии (лоте):

$$\sum_{i \in I_G} t_i = a_L$$

Остальные частицы распределяются в другие семейства в соответствии с их размером, плотностью и формой. Такие семейства характеризуются нулевым содержанием золота.

Принимая во внимание модель неоднородности и предполагая, что содержание золота в партии (лоте) очень мало в сравнении с единицей, становится возможным записать уравнение (1) в виде (2) (Pitard and Stevens, 2011).

$$\sigma^2(FE) = \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) \left[\frac{\bar{m}_G}{a_L} + \sum_{i \notin I_G} m_i t_i \right] \quad (2)$$

Где средняя масса частиц золота определяется следующим образом:

$$\bar{m}_G = \frac{\sum_{i \in I_G} m_i t_i}{\sum_{i \in I_G} t_i} = f_G g_G \rho_G d_G^3$$

Где средний коэффициент формы (f_G), коэффициент гранулометрического распределения (g_G), средняя плотность (ρ_G), и значение размера наиболее крупных частиц золота (d_G) определены в соответствии с Теорией отбора проб Пьера Ги (Gu, 1979). Второе слагаемое суммы в уравнении 2 очень близко к средней массе остальных частиц, которая может быть посчитана из среднего коэффициента формы, коэффициента гранулометрического распределения, средней плотности, и значения размера наиболее крупных пустых частиц.

$$\bar{m}_B = \frac{\sum_{i \in I_G} m_i t_i}{\sum_{i \in I_G} t_i} = f_B g_B \rho_B d_B^3 \approx \sum_{i \notin I_G} m_i t_i$$

Если размер крупных частиц руды достаточно мал, это (второе) слагаемое является незначительным относительно первого слагаемого суммы в уравнении 2, поэтому уравнение 2 становится возможным записать в упрощенном виде для свободного золота:

$$\sigma^2(FE) = \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) f_G g_G \frac{\rho_G}{a_L} d_G^3 \quad (3)$$

Частный случай только свободного золота имеет место быть для некоторых россыпных месторождений или для некоторых материалов, истертых мельче размера раскрытия частиц золота. В нашем случае это не так, руда характеризуется жилами минерализации с видимыми частицами золота, которые легко раскрыть, и минералами, включающими мелкое золото с классом раскрытия значительно меньше крупности в 75 мкм, которую получаем при истирании. Уравнение 1 будем использовать для расчета дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб на основании модели неоднородности, составленной с применением результатов специальных исследований и некоторых предположений. Для сравнения в некоторых случаях будем применять и уравнение 3.

Для составления подробных моделей неоднородности было разработано множество подходов, таких, как тест для определения количества золота, извлекаемого гравитацией (GRG) (Laplante, Woodcock and Huang; 2000) или характеристика CGG (Dominy, Platten and Xie; 2010). Доля и гранулометрическое распределение свободного золота являются ключевыми параметрами (Johansen and Dominy; 2005). При этом распределение включенного золота (мелковкрапленного очень тонкого золота, тонкого золота или твердого раствора в сростках с мелковкрапленными или неравномерно распределенными минералами) также играет важную роль. Методика, использованная в нашем случае для составления модели неоднородности, состояла в рассеве дробленной руды для определения гранулометрического распределения, промывке каждого класса крупности в лотке для концентрации золота и тяжелых минералов, подсчете и взвешивании частиц свободного золота для крупнейших классов, анализе содержания в тяжелых минералах и легких фракциях.

Для сравнения двух процедур анализа была отобрана проба истертой руды, полученной из половины керна, характеризующего минеральную жилу. В таблице 1 представлена использованная модель неоднородности, составленная путем подробного анализа дробленной руды (как описано выше) и принятия некоторых предположений о раскрытии золота. В модели рассматриваются три класса крупности (-75 мкм, 75-106 мкм и +106 мкм) и три типа частиц (пустые, включающие золото и свободное золото), которые формируют 9 семейств. Предполагается, что 80% золота является свободным, пустые и включающие минералы обладают одинаковым гранулометрическим распределением, количество золота в классах 75-106 мкм и +106 мкм одинаково, пустые минералы представляют 10% включающих (разбавляют минерализованную жилу). Таблица 1 показывает средние массы частиц, доли (семейств в исходной пробе) и содержание золота в семействах.

Таблица 1. Модель неоднородности истертой руды.

Семейства	Средняя масса частиц (мкг)	Доля семейства в исходной пробе (%)	Содержание золота (1/млн)
Пустые -75 мкм	0,8	8,36	0
Пустые 75-106 мкм	2,2	0,36	0
Пустые +106 мкм	6,4	0,36	0
Включающие -75 мкм	0,8	83,63	8,0
Включающие 75-106 мкм	2,2	3,64	8,0
Включающие +106 мкм	6,4	3,64	8,0
Свободное золото -75 мкм	1,5	0,00231	1 000 000
Свободное золото 75-106 мкм	4,1	0,000335	1 000 000
Свободное золото +106 мкм	12,0	0,000262	1 000 000
ИТОГО:		100,0	36,4

Аналитическая погрешность

Хотя аналитическую погрешность возможно рассчитать априори путем разложения процедуры анализа на этапы и принимая во внимание все источники погрешности на каждом из них, в нашем случае была выполнена апостериорная оценка с использованием статистики результатов измерения содержания в стандартных образцах. Рисунок 1 показывает дисперсию аналитической погрешности измерения содержания золота для различных стандартных содержаний. Подгонка степенной функцией дает аппроксимацию дисперсии аналитической погрешности как функции от содержания золота в пробе (Hanson, 1990). Для примера, приведенного выше, она показывает аналитическую погрешность в 3%, что является достаточно существенным в сравнении с фундаментальной погрешностью отбора проб.

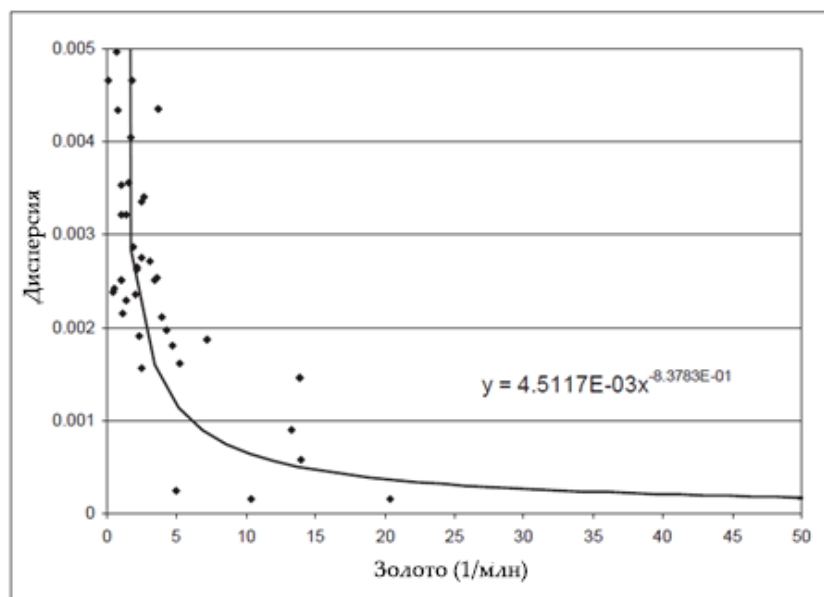


Рисунок 1. Дисперсия аналитической погрешности измерения стандартного содержания золота.

Другие компоненты

В случае большой доли свободного золота, погрешность объединения и сегрегации может вносить не только значительную дисперсию, но и существенную систематическую погрешность, связанную с поведением раскрытых частиц золота в процессе деления (Johansen et al, 2003). Применение подходящих инструментов деления проб может снизить этот риск (Allen and Khan, 1970; Hatton, 1978). На этапе истирания, путем агрегации и изменения формы, могут быть созданы крупные частицы золота. Использование подходящих мельниц сможет минимизировать этот эффект (Wooldridge, 1998). Дисперсию погрешности объединения и сегрегации с запасом возьмем эквивалентной фундаментальной погрешности отбора проб, поэтому погрешность краткосрочных колебаний качества (их сумма) равна двойной фундаментальной погрешности.

Погрешности ограничения объема и извлечения могут быть минимизированы только путем применения подходящих инструментов для отбора точечных проб, правильно спроектированных и правильно используемых, что по большей части верно в условиях лаборатории. Схожим образом компоненты погрешности подготовки пробы могут быть минимизированы только путем применения лучших практик квалифицированным персоналом. Особое внимание необходимо уделять процессу истирания, где потери и заражение крупного золота могут иметь место быть в случае ненадлежащей чистки оборудования (Roberts, Dominy and Nugus, 2003).

Погрешность измерения пробирного анализа (ПА)

От партии (лота) истертой руды в 4 кг отбирается проба в 50 г. При использовании уравнения 1 и модели неоднородности из Таблицы 1, расчетное значение дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб составило $1,19 \cdot 10^{-3}$, что соответствует погрешности в 7% (с 95% уровнем доверия – двойное стандартное отклонение). При использовании уравнения 3 с средней массой частиц семейства Свободное золото +106 мкм и коэффициентом гранулометрического распределения в 0,25, расчетное значение фундаментальной погрешности отбора проб составило 8,1%, что не столь отличается от значения, посчитанного с помощью уравнения 1 для случая, если 80% золота считать свободным.

Принимая во внимание дисперсию погрешности объединения и сегрегации и дисперсию аналитической погрешности, полная погрешность измерения содержания золота при проведении ПА в описанных выше условиях составила 10,3%. Напомним, что эта погрешность касается только заключительного этапа отбора проб – отбора пробы непосредственно на анализ, т.е. не учитывает погрешностей отбора проб этапов, предшествующих истиранию.

Погрешность измерения скрин-анализа (СА)

От партии (лота) истертой руды в 4 кг отбирается проба в 500 г. При использовании уравнения 1 и модели неоднородности из Таблицы 1, расчетное значение дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб составило $0,106 \cdot 10^{-3}$, что соответствует погрешности в 2,1% (с 95% уровнем доверия). Аналогично, при использовании уравнения 3, расчетное значение фундаментальной погрешности отбора проб составило 2,5%.

Далее полученную пробу в 500 г отсеивают на сите на 106 мкм. Надрешетный продукт обладает массой m_o в 20 г. Поскольку он в полном объеме идет на анализ, необходимо учесть только аналитическую погрешность. Содержание золота a_o в надрешетном продукте составило 72,7 млн-1 с аналитической погрешностью в 2,3%. От подрешетного продукта (массой $m_u = 480$ г), были отобраны три пробы массой 50 г. При использовании уравнения 1 и модели неоднородности из Таблицы 1, ограниченную семействами -106 мкм, расчетное значение дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб составило $0,744 \cdot 10^{-3}$, что соответствует погрешности в 5,45% (с 95% уровнем доверия). Учитывая, что пробы было три, погрешность составила всего 2,8% поскольку она соответствует большей массе в 150 г. Содержание золота a_{ui} в подрешетном продукте составило 34,8 млн-1 с аналитической погрешностью в 3,1%.

Дисперсия полной погрешности измерения содержания золота при проведении СА на пробе массой 500 г рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma^2(a_L) = \left(\frac{m_o}{m_o + m_u}\right)^2 \left(\frac{a_o}{a_L}\right)^2 \sigma^2(a_o) + \left(\frac{m_u}{m_o + m_u}\right)^2 \sum \left(\frac{m_{ui}}{\sum m_{ui}}\right)^2 \left(\frac{a_{ui}}{a_L}\right)^2 \sigma^2(a_{ui})$$

Это уравнение использует дисперсию аналитической погрешности $\sigma^2(a_o)$ для надрешетного продукта отсева, и сумму дисперсий фундаментальной погрешности отбора проб, погрешности объединения и сегрегации и аналитической погрешности подпроб подрешетного продукта $\sigma^2(a_{ui})$.

Добавление к этому результату дисперсий фундаментальной погрешности отбора проб и погрешности объединения и сегрегации первой стадии отбора (с 4 кг до 500 г), дает полную погрешность измерения содержания золота при проведении СА3 в 4,9%, и 8,2% при проведении СА1.

Сравнение ПА и СА

Таким образом, рассматривая партию (лот) истертой руды массой в 4 кг с содержанием золота в 36,4 млн-1, с 80% золота в свободной форме и с 8% класса +106 мкм, ПА показывает погрешность измерения содержания золота в 10,3%, тогда, как СА1 показывает 8,2%, а СА3 – 4,9%.

Хотя увеличение точности в случае СА1 не слишком высокое, преимущество проведения СА3 очевидно. Преимущество усилится с возрастанием доли крупного золота в классе +106 мкм. Если такая доля увеличится до 24%, три указанные полные погрешности измерения содержания золота составят соответственно 13,5% (ПА), 8,2% (СА1) и 5,5% (СА3).

Для исследуемого нами месторождения, наблюдаемое в минерализованной жиле содержание золота широко варьируется в диапазоне 1-1000 млн-1. Изменим модель неоднородности в таблице 1, чтобы отразить такой разброс содержания золота. Для этого изменим только общую пропорцию золота для сохранения 80% его присутствия в свободной форме и гранулометрическое распределение свободного и включенного золота. Рисунок 2 показывает изменение полной погрешности измерения содержания золота.

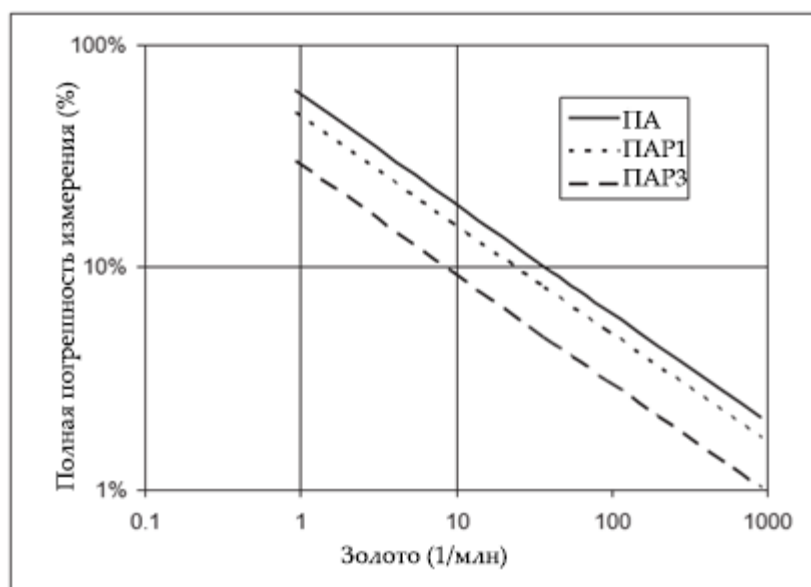


Рисунок 2. Изменение полной погрешности измерения содержания золота (истертая руда).

ОТБОР ПРОБ КЕРНА

Целью настоящего раздела является сравнение процедур ПА и СА для измерения содержания золота в половине керна с точки зрения полной погрешности измерения. В этом случае до процедуры анализа добавляются этапы разрезания керна и дробления одной из полученных половин.

Для сравнения двух аналитических процедур взяли руду из половины керна, характеризующего минерализованную жилу. Составленная в результате подробного анализа такой руды модель неоднородности представлена в Таблице 2. Поскольку kern состоит из твердой породы, которая изначально не была раздроблена, частицы невозможно описать с точки зрения гранулометрического распределения. Поэтому были использованы всего три семейства, соответствующие трем типам включения золота, использованным в предыдущем разделе: пустые частицы, частицы, включающие золото, и свободное золото. Kern затем рассматривался как «замороженная» смесь крупного золота и частиц минералов, включающих золото, случайно распределенных по kernу, пространство между которыми заполняли пустые минералы (Luman, 2011). Пустые частицы предполагались достаточно малыми, чтобы считать их «жидкостью»,

заполняющей промежутки. Поэтому их средняя масса принималась равной нулю. В случае зерна термин «свободное золото» не совсем подходит, поскольку такое золото фактически заключено в зерне. При этом он по-прежнему определяет крупные видимые частицы золота, которые легко раскрыть дроблением. Доля таких частиц золота была оценена в 40%. Путем подробного анализа, средняя масса частиц была оценена в 2 мг, что соответствовало чешуйкам размером в 800 мкм с коэффициентом формы в 0.2. Оставшиеся 60% золота представляли собой мелкие частицы в форме включений в золотосодержащие минералы. Как видно из предыдущего раздела, 40% из таких оставшихся частиц были раскрыты при истирании, последние 20% не были раскрыты будучи очень тонкими частицами или включениями. Включающие минералы обладали средней массой частиц в 2 мг, что соответствовало миллиметровым частицам. Пустые частицы представляли 10% включающих частиц (разбавляли минерализованную жилу). Таблица 2 показывает средние массы частиц, доли (семейств в исходной пробе) и содержание золота в семействах.

Таблица 2. Модель неоднородности зерна минерализованной жилы.

Семейства	Средняя масса частиц (мкг)	Доля семейства в исходной пробе (%)	Содержание золота (1/млн)
Пустые	0,0	9,09	0
Включающие	2,0	90,91	24
Свободное золото	2,0	0,00145	1 000 000
ИТОГО:		100,0	36,4

От партии (лота) зерна в 8 кг отбирается проба в 4 кг – половина зерна. При использовании уравнения 1 и модели неоднородности из Таблицы 2, расчетное значение дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб составило $2,7 \cdot 10^{-3}$, что соответствует погрешности в 10,5% (с 95% уровнем доверия). При использовании уравнения 3 с средней массой частиц семейства Свободное золото и коэффициентом гранулометрического распределения в 0,5 (материал не измельчался), расчетное значение фундаментальной погрешности отбора проб составило 11,7%, что не столь отличается от значения, посчитанного с помощью уравнения 1 для случая, если 40% золота считать свободным.

При добавлении этой дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб и соответствующей погрешности объединения и сегрегации к дисперсиям, посчитанным в предыдущем разделе (мы фактически расширили процедуру измерения из предыдущего раздела этапами отбора проб зерна), полные погрешности измерения содержания золота составят соответственно 18,0% (ПА), 16,9% (СА1) и 15,6% (СА3). Таким образом, преимущество проведения СА менее заметно, если рассматривать процедуру отбора проб начиная с зерна.

Затем, по аналогии с предыдущим разделом, изменим модель неоднородности в таблице 2, чтобы отразить разброс содержания золота в 1-1000 млн-1. Для этого изменим только общую пропорцию золота для сохранения 40% его присутствия в свободной форме и гранулометрическое распределение свободного и включенного золота. Рисунок 3 показывает изменение полной погрешности измерения содержания золота. В сравнении с рисунком 2, преимущество СА также представляется менее заметным, что может поднять вопрос о необходимости его проведения.

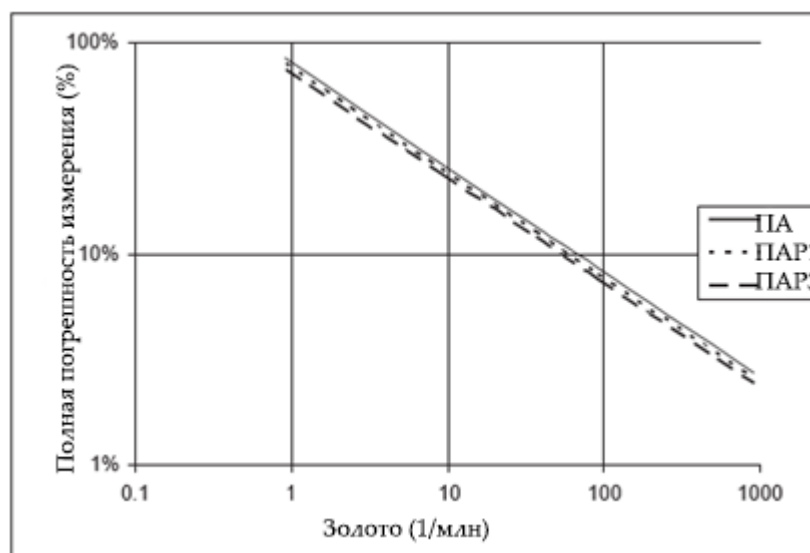


Рисунок 3. Изменение полной погрешности измерения содержания золота (керна)

Рисунок 3 показывает уменьшение погрешности с увеличением содержания золота. При этом модель неоднородности не учитывает увеличения свободного крупного золота с увеличением содержания золота. Поэтому модель необходимо исправить, чтобы принять этот факт во внимание и учесть риски того, что полная погрешность измерения может оказаться значительно выше в случае высокого содержания золота. Это и наблюдается при контрольном анализе второй половины керна. Отклонения объясняются по большей части изменчивостью, связанной с полной погрешностью измерения. Рисунок 4 показывает содержание золота, измеренное на второй половине керна, и содержание золота, измеренное на первой половине керна. Пунктирные линии показывают двойное стандартное отклонение, ограничивающее полную погрешность измерения. Более 95% точек попадает в эти границы.

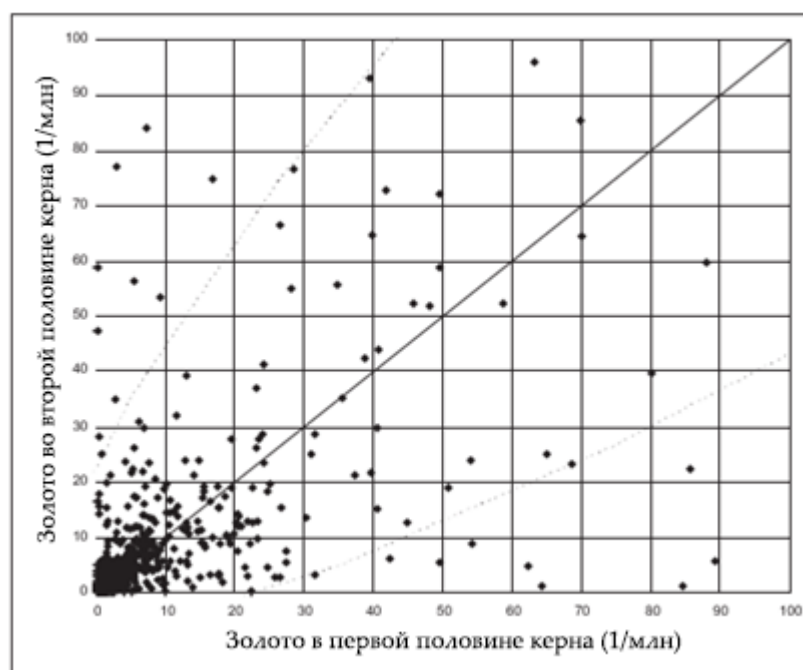


Рисунок 4. Сравнение измерений содержания золота в первой и второй половинах керна.

ОТБОР ПРОБ ПРИ БУРЕНИИ

Задача заключалась в измерении содержания золота в блоке массой приблизительно в 300 т путем отбора материала, образующегося при бурении взрывной скважины. При этом этапы бурения,

отбора проб извлеченного при бурении материала и его дробления были добавлены к процедуре анализа.

Использованная модель неоднородности была схожа с моделью из предыдущего раздела. Действительно, материал, извлекаемый при бурении очень похож на материал керна, за исключением степени разбавления. Теперь минерализованная жила представляет собой лишь малую долю руды. При разбавлении в 400% такая доля составила 20% с средним содержанием золота 8 млн-1. Таблица 3 показывает эту модель неоднородности. Бурение производит сыпучий материал, поэтому средняя масса пустых частиц теперь ненулевая.

Таблица 3. Модель неоднородности геологического блока.

Семейства	Средняя масса частиц (мкг)	Доля семейства в исходной пробе (%)	Содержание золота (1/млн)
Пустые	2,0	80,00	0
Включающие	2,0	20,00	24
Свободное золото	2,0	0,00032	1 000 000
ИТОГО:		100,0	8

От партии (лота) руды в 300 т отбирается проба в 4 кг. При использовании уравнения 1 и модели неоднородности из Таблицы 3, расчетное значение дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб составило $24,7 \cdot 10^{-3}$, что соответствует погрешности в 31,5% (с 95% уровнем доверия).

При добавлении этой дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб и соответствующей погрешности объединения и сегрегации к дисперсиям, посчитанным в разделе с описанием погрешностей ПА и СА (мы фактически расширяем процедуру измерения из того раздела этапами отбора проб блока), полные погрешности измерения содержания золота составят соответственно 49,5% (ПА), 47,7% (СА1) и 45,7% (СА3). В такой ситуации преимущество проведения СА скрыто за высокой полной погрешностью отбора проб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для случая руд с крупным золотом проведено сравнение процедур пробирного анализа (ПА) и скрин-анализа (СА) с точки зрения полных погрешностей измерения содержания золота. Сравнение показало преимущество проведения СА в случае рассмотрения только заключительных этапов процедуры измерения: отбора проб от партии (лота) в 4 кг истертой руды ($d_{85} = 75$ мкм) и непосредственно анализа. При проведении СА, полная погрешность измерения была два раза ниже, чем при проведении ПА.

Преимущество проведения СА менее заметно в случае рассмотрения отбора проб керна. В этом случае процедура измерения начинается с отбора пробы в 4кг от 8кг керна путем распила по всей длине, дробления и истирания половины керна, и далее анализа. В таких условиях, полная погрешность измерения при проведении СА оказалась на 20% ниже, чем при ПА.

Преимущество практически исчезает в случае отбора проб при бурении взрывных скважин. Процедура измерения начинается с отбора проб извлеченного материала: отбора пробы геологического блока массой в 300 т, дробления и истирания пробы в 4 кг, и затем анализа. Полная погрешность измерения при проведении СА была на 10% ниже, чем при ПА.

Хотя СА представляет собой точную процедуру определения и количественной оценки крупного золота, его проведение не всегда необходимо, когда требуется выполнение большого числа анализов. В таком случае СА рекомендуется проводить только для проб, для которых есть подозрение на наличие крупного золота (видимое крупное золото на поверхности керна или в шламах буровых скважин, видимые минералы с включенным крупным золотом, видимое золото на

сите на этапе истирания). Вопрос проведения или не проведения СА должен решаться для каждого месторождения индивидуально и зависит от целей измерений.

Настоящее исследование было выполнено в 2003 году на основе реальных данных, при этом для расчета погрешностей измерения был сделан ряд предположений. Проверка всех таких предположений не является однозначно необходимой. Действительно, значения некоторых параметров лишь незначительно влияют на расчетную погрешность. С этой целью был выполнен анализ чувствительности моделей неоднородности. Вместе с тем, в свете недавно опубликованных исследований, модели неоднородности можно в некоторой степени улучшить: учесть подробное описание распределения золота и характеристики включающих золото минералов, или улучшить модель раскрытия с использованием подходов количественной минералогии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тема настоящей статьи родилась из работ, выполненных в институте BRGM и в компании Caspeo, начиная с 2000 года. Автор выражает благодарности этим организациям и их партнерам за поддержку работы, а также рецензентам от AusIMM за их полезные замечания.

Компания с ограниченной ответственностью Caspeo
BP 36009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - Франция
Тел.: 02 38 64 31 96 - Факс 02 38 25 97 42 - e-mail: info@caspeo.net

Эксклюзивный дистрибьютор Caspeo в РФ и СНГ:
Вычислительные Системы, ООО
ул. Кутателадзе, 4г, г. Новосибирск, РФ, 630128
Тел.: +7 (383) 214-09-53, e-mail: sales@procsim.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Allen, T and Khan, A A, 1970. Critical evaluation of powder sampling procedures, *The Chemical Engineer*, 238:108-112.

Carswell, J T, Yulia, K, Lesmana, D and Steamy, K, 2009. Grade control sampling quality assurance/quality control in a high-grade gold mine – Gosowong, Indonesia, in *Proceedings Seventh International Mining Geology Conference*, pp 283-290 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Chieragati, A C, Frontini, B B, Carvalho, D B, Pitard, F F and Esbensen, K H, 2011. Experimental validation of new blasthole sampler for short-term planning, in *Proceedings Fifth World Conference on Sampling and Blending* (eds: M Alfaro, E Magri and F Pitard) pp 345-360 (Gecamin: Santiago).

Cossio, S, Noyola, J-L, Gonzalez, P and Espinosa, R, 2003. Sampling and assaying of coarse gold at La Herradura – Minera Penmont S de R L de C V, Mexico, in *Proceedings 35th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, *CIM Bulletin*, 97(1084):249-262.

Dominy, S C, 2009. Grab sampling for underground gold mine grade control, in *Proceedings Fourth World Conference on Sampling and Blending*, pp 97-106 (The Southern African Institute of Mining and Metallurgy: Johannesburg).

Dominy, S C, 2010. Grade control sampling methods in underground gold mines, in *Proceedings Sampling Conference 2010*, pp 7-20 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Dominy, S C, Annels, A E, Johansen, G F and Cuffley, B W, 2000. General considerations of sampling and assaying in a coarse gold environment, *Trans Inst Min Metall (Sect B: Appl Earth Sci)*, 109:B145-B167.

Dominy, S C, Annels, A E, Platten, I M and Raine, M D, 2003. A review of problems and challenges in the resource estimation of high- nugget effect lode-gold deposits, in *Proceedings Fifth International Mining Geology Conference*, pp 279-298 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Dominy, S C, Johansen, G F and Annels, A E, 2001. Bulk sampling as a tool for the grade evaluation of gold-quartz reefs, *Trans Inst Min Metall, Sect B: Appl Earth Sci*, 110:B176-B191.

Dominy, S C and Petersen, J S, 2005. Sampling coarse gold-bearing mineralisation – Developing effective protocols and a case study from the Nalunaq deposit, Southern Greenland, in *Proceedings Second World Conference on Sampling and Blending*, pp 151-165 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Dominy, S C, Platten, I M and Minnitt, R C A, 2010. Heterogeneity, sampling errors and the nugget effect in gold ores – Implications for evaluation, exploitation and extraction, in *Proceedings Gravity Gold Conference*, pp 3-17 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Dominy, S C, Platten, I M and Nugus, M J, 2010. Application of geology to alleviate sampling bias during the evaluation of high- nugget gold systems, in *Proceedings Sampling Conference 2010*, pp 75-85 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Dominy, S C, Platten, I M and Xie, Y, 2008. Bulk sampling of complex gold deposits – Material characterisation and program design and management, in *Proceedings Sampling Conference 2008*, pp 41-57 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Dominy, S C, Platten, I M and Xie, Y, 2010. Determining gold particle size in gravity ores for sampling and metallurgical characterisation – Discussion and test protocol, in Proceedings Gravity Gold Conference 2010, pp 83-95 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Dominy, S C, Xie, Y and Platten, I M, 2008. Characterisation of in situ gold particle size and distribution for sampling protocol optimisation, in Proceedings Ninth International Congress for Applied Mineralogy, pp 175-185 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Frempong, P K, 1999. The development of a robust sampling strategy and protocol in underground gold mines, *The AusIMM Proceedings*, 304(2):15-22.

Gy, P, 1979. *Sampling of Particulate Materials, Theory and Practice*, 431 p (Elsevier: Amsterdam).

Hanson, N H, 1990. Quality assurance of sampling and assaying in the evaluation of gold resources, in Proceedings Ore Reserve Estimates – The Impact on Miners and Financiers, pp 91-97 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Hatton, T A, 1978. Representative sampling of particles with a spinning riffler: A stochastic model, *Powder Technology*, 19(2):227-233.

Johansen, G F and Dominy, S C, 2005. Development of sampling and assaying protocols at the New Bendigo gold project, Victoria, Australia, in Proceedings Second World Conference on Sampling and Blending, pp 175-183 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Johansen, G F, Raine, M D, Dominy, S C and Bartlett, J K, 2003. Challenges of sampling extreme nugget-effect gold-quartz veins at the New Bendigo Project, Central Victoria, Australia, in Proceedings Fifth International Mining Geology Conference, pp 299-310 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Laplante, A R, Woodcock, F and Huang, L, 2000. Laboratory procedure to characterize gravity-recoverable gold, *SME Transactions*, 308:53-59.

Lyman, G J, 2011. In situ and particulate material heterogeneity, in Proceedings Fifth World Conference on Sampling and Blending (eds: M Alfaro, E Magri and F Pitard) pp 3-21 (Gecamin: Santiago de Chile).

Pitard, F F, 2008. Blasthole sampling for grade control – The many problems and solutions, in Proceedings Sampling Conference 2008, pp 15-21 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Pitard, F F and Stevens, D, 2011. The development of a solution to the sample preparation of coarse gold samples, in Proceedings Fifth World Conference on Sampling and Blending (eds: M Alfaro, E Magri and F Pitard) pp 331-344 (Gecamin: Santiago de Chile).

Roberts, L S, Dominy, S C and Nugus, M J, 2003. Problems of sampling and assaying mesothermal lode-gold deposits – Case studies from Australia and North America, in Proceedings Fifth International Mining Geology Conference, pp 387-400 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Wooldridge, R, 1998. Sample preparation and assaying of coarse gold ores, in Proceedings 1998 AusIMM Annual Conference – The Mining Cycle, pp 143-154 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).