

Отбор проб для металлургических исследований: как результаты GRG теста могут быть использованы для оценки уровня их достоверности

Стефан Брошо

Caspeo, SARL, ул. Авеню Клода Гиймен, 3, г. Орлеан, Франция
Труды конференции IMPC XXVIII, г. Квебек, Канада, Сентябрь 2016

АННОТАЦИЯ

Множество проб для металлургических исследований отбирается при разработке рудных проектов. Проба может быть представлена в форме составной пробы, состоящей из материала ряда различных продуктов бурения, или являться пробой, отобранной при первичном опробовании месторождения. Это также может быть проба, отобранная из процесса действующего предприятия, для целей исследования возможностей его улучшения. Масса пробы может составлять несколько тонн, которые анализируют и делят для использования в рамках различных исследований.

В рамках настоящей статьи речь пойдет о составной пробе, предназначенной для проведения исследования на определение количества золота, извлекаемого гравитацией (GRG теста). Интересующими свойствами являются исходное содержание золота, гранулометрическое распределение материала, а также содержание золота по классам крупности. Пробу смешивают, затем отбирают подпробу для измерения свойств питания: гранулометрическое распределение и содержание золота по классам крупности. Оставшийся материал пробы подают на первую стадию обогащения в лабораторный концентратор Knelson. Концентрат анализируют в полном объеме, от хвостов отбирают пробу для того же анализа. Оставшиеся хвосты измельчают для формирования питания второй и третьей стадии обогащения. Аналогичный отбор проб проводят на каждой стадии. Далее показатели обогащения анализируют с точки зрения таких измерений.

Но какова точность измерения свойств в рамках такой процедуры? Теория отбора проб Пьера Ги и модель неоднородности материала, составленная с использованием результатов GRG теста, позволят ответить на этот вопрос. Настоящая статья на практическом примере показывает расчет погрешности измерений гранулометрического распределения и содержания золота по классам крупности, выполненных в рамках GRG теста. Затем приведен расчет неопределенности показателей обогащения и оценки классов раскрытия, проанализировано влияние такой неопределенности на интерпретацию результатов.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке рудных проектов отбирают множество проб для металлургических исследований. Проба может быть представлена как в форме составной пробы, состоящей из материала ряда различных продуктов бурения, так и являться пробой, отобранной при первичном опробовании месторождения. Это также может быть проба, отобранная из процесса действующего предприятия, для целей исследования возможностей его улучшения. Проба может представлять собой несколько тонн материала, которые анализируют и делят для использования в рамках различных исследований. Для принятия во внимание изменчивости руды в части форм нахождения в ней золота, рекомендуется проводить исследования такой изменчивости, используя пробы, представляющие различные горизонты или годы производства (Dominy, Murphy, & Gray, 2011, Dominy, 2013). При этом для заданного типа руды может быть необходимым проведение множества исследований в различных операционных условиях (Brochot, 2012a). В таком случае изменчивость проб объясняется только неоднородностью состава первичной пробы, но не неоднородностью распределения в месторождении. Уровень достоверности оцениваемых показателей производительности напрямую связан с полной погрешностью измерений, выполняемых в рамках исследований (включающей погрешность отбора проб).

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 (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 (OE) включает множество составляющих, которые, следуя классификации Пьера Ги (Gu, 1979), возможно разделить в два основных компонента: полную погрешность отбора проб (TE) и аналитическую погрешность (AE).

Причиной аналитической погрешности часто является несовершенство процедур и средств, используемых для выполнения аналитических операций. 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 (Brochet, 2012a, 2012b, 2013).

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 (TE_n). 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 (PE), 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 (CE), 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 (QE_2) и периодических (QE_3) 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).

Большинства упомянутых компонентов погрешности отбора проб можно избежать или минимизировать путем добросовестного выполнения процедур и применения лучших практик. Вместе с тем, фундаментальную погрешность отбора проб (FE) и погрешность объединения и сегрегации (GE) невозможно сократить, но возможно рассчитать с помощью точно определенной модели материала.

В нашем случае составная проба золотосодержащей руды предназначена для проведения GRG теста с помощью лабораторного концентратора Knelson (LKC). Интересующими свойствами являются исходное содержание золота, гранулометрическое распределение материала, а также содержание золота по классам крупности. Показатели обогащения анализируют с точки зрения таких измерений. Какова точность измерения свойств в рамках такой процедуры? Теория отбора проб Пьера Ги и модель неоднородности материала, составленная с использованием результатов GRG теста, позволят ответить на этот вопрос. Они дадут возможность рассчитать погрешности измерений гранулометрического распределения и содержания золота по классам крупности, выполненных в рамках GRG теста, и, как следствие, неопределенности показателей обогащения и оценки классов раскрытия.

ХАРАКТЕРИСТИКА НЕОДНОРОДНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ GRG ТЕСТА

Стандартный GRG тест обладает преимуществом предоставления информации не только о способности руды быть обогащенной путем гравитационной концентрации, но и о раскрытии значимых минералов (в данном случае самородного золота или золотосодержащих минералов) и их распределении (Wardell-Johnson, Wax, Staunton, McGrath, & Eksteen, 2013). Такие результаты предоставляют первичное описание неоднородности руды в части значимых металлов и минералов. Для увеличения детализации описания неоднородности, на концентратах и хвостах могут быть проведены дополнительные исследования (разделение свободного золота и тяжелых минералов, цианирование, количественная минералогия). Данный подход с тем же уровнем детализации может быть применен и к другим типам металлургических исследований, таких, как флотационное обогащение, магнитная сепарация или обогатимость.

В соответствии с терминологией Пьера Ги (Gu, 1979), целевым компонентом называется компонент материала, который необходимо измерить. Целевым содержанием называется измеренное содержание целевого компонента. Для GRG теста целевым компонентом может быть как класс крупности, массовая доля которого является целевым содержанием, так и металл (золото) или включающий минерал и его содержание.

Результаты GRG теста

Стандартный GRG тест выполняется в три стадии, при этом хвосты каждой стадии измельчаются для питания следующей (Laplante, Woodcock, & Huang, 2000). Также были предложены упрощенные варианты GRG теста в две или в одну стадию, которые представляются частными случаями стандартного (Clarke, 2005; Laplante, & Staunton, 2005).

От первичной пробы массы M_{G1} , раздробленной и измельченной до 100% класса -850мкм, отбирают вторичную пробу массой M_{S1} для питания первой стадии. Типовая масса этой пробы составляет 50 кг, но это значение может изменяться (от 25 кг до 140 кг) в зависимости от ожидаемого количества золота, извлекаемого гравитацией, и гранулометрического распределения. В общем случае, гранулометрическое распределение и содержание золота по классам крупности в питании пересчитывают из результатов анализа концентрата и хвостов. При этом, для определения гранулометрического распределения, от измельченной первичной пробы могут отбирать подпробу массой M_{S1A} . Концентрат массой M_{C1} (~ 100 г) в полном объеме направляют на анализ гранулометрического распределения. Подпробу массой M_{T1A} (как правило, 600 г; Woodcock, 1994) отбирают от хвостов (массой M_{T1}) для анализа гранулометрического распределения. Другую пробу массой M_{G2} отбирают и измельчают до 45-60% класса -75мкм; если измельчают все оставшиеся хвосты, то $M_{G2} = M_{T1} - M_{T1A}$. Пробу массой M_{S2} (около 25 кг) отбирают от измельченного материала для питания второй стадии; как правило, измельчают только питание, поэтому $M_{S2} = M_{G2}$. При необходимости, подпробу массой M_{S2A} могут отбирать от питания второй стадии для анализа гранулометрического распределения. Что касается второй стадии, весь концентрат полной массой M_{C2} направляют на анализ, от хвостов (массой M_{T2}) отбирают подпробу массой M_{T2A} на анализ. Схожим образом измельчают пробу массой M_{G3} , от нее при необходимости могут отбирать подпробу массой M_{S3A} на анализ гранулометрического распределения, а масса M_{S3} питает третью стадию и формирует концентрат массой M_{C3} и хвосты массой M_{T3} , от которых отбирают пробу массой M_{T3A} . Рисунок 3 показывает схему этой процедуры.

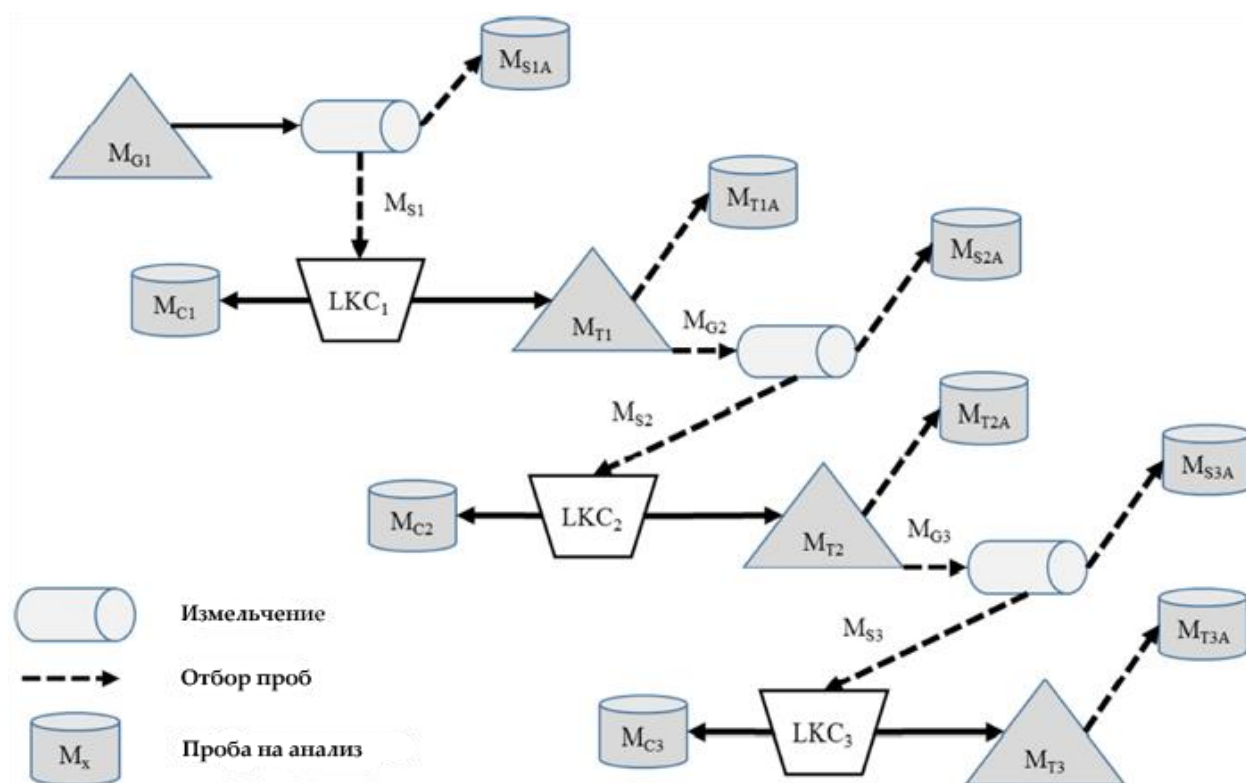


Рисунок 1. Схема GRG теста с использованием лабораторного концентратора Knelson (LKC).

Анализ концентратов и проб хвостов состоит в определении их гранулометрического распределения путем отсева. Для последующего анализа содержания золота по классам крупности требуется физическое разделение классов. Как правило используют набор сит 25, 37, 53, 75, 105, 150, 212, 300, 425, 600, и 850 мкм; последнее используют для контроля крупности первичного измельчения. При наличии значительной разницы в содержании классов 20-25 мкм и -20 мкм, могут использовать сита еще мельче, такие, как 20 мкм (Laplante, Woodcock, & Huang, 2000). Класс крупности, обозначаемый индексом i , содержит частицы, размер которых попадает в диапазон $[d_{i+1}; d_i[$, где d_i это размер отверстия сита с индексом i . Индекс 1 соответствует наибольшему размеру отверстия сита (в данном случае 850 мкм). Если M_{xi} это масса материала в классе крупности

i пробы x (где x это $S1A, C1, T1A, S2A, C2, T2A, S3A, C3$ или $T3A$), долю класса крупности (в г/г) рассчитывают, как $f_{xi} = M_{xi}/M_x$.

Каждый класс крупности могут подвергать дополнительному разделению, например, гидросепарации (Laplante, Woodcock, & Huang, 2000). Действительно, крупные фракции (+150 мкм) концентрата первой стадии могут включать частицы золота, не извлекаемые гравитацией. Оседающие и всплывающие частицы извлекают отдельно, взвешивают и анализируют. Схожим образом, при наблюдении крупного свободного золота, для извлечения золотин могут применять отмывку в лотке, хвосты затем анализируют отдельно. Такая процедура обладает преимуществом лучшего описания частиц свободного золота в части гранулометрического распределения и коэффициента формы. Если M_{xia} и M_{xib} это массы материала соответственно оседающего и всплывающего продуктов (чешуек и хвостов) в классе крупности i пробы x (где x это $C1, C2$ или $C3$), долю «класса плотности» (в г/г) рассчитывают, как $f_{xia/b} = M_{xia/b}/M_{xi}$.

Каждый класс крупности концентратов (или каждый класс плотности в каждом классе крупности) в полном объеме подлежит пробирному анализу, что дает содержание золота a_{xi} или $a_{xia/b}$. Классы хвостов крупнее 105 мкм истирают до -105 мкм. Каждый класс крупности пробы хвостов делят для получения пробы массой M_{xiFA} (где x это $T1A, T2A$ или $T3A$) в 30-50 г, в зависимости от ожидаемого содержания золота, на пробирный анализ, что дает содержание золота a_{xi} . Такую же процедуру применяют для анализа проб питания (если выполняется), с тем исключением, что для крупных классов в случае присутствия крупного золота может понадобиться скрин-анализ (Brochot, 2012b).

В случае отбора и анализа проб питания, соответствующие результаты могут сравнивать с значениями, пересчитанными на основе результатов анализа продуктов. Применение в такой ситуации согласования данных с учетом погрешностей измерения дает возможность определения наиболее точных значений всех измерений.

Модель неоднородности

Базовые формулы Теории отбора проб (Gy, 1979; Pitard, 2009), такие, как неоднородность состава, рассматривают каждую частицу в отдельности с учетом ее ключевых параметров: массы и содержания ценного компонента. Поскольку обладать столь подробным описанием материала невозможно, частицы классифицируют в семейства, в рамках которых они предполагаются одинаковыми. Каждое семейство затем характеризуют тремя параметрами: средней массой частиц, средним содержанием ценного компонента в частицах, массовой долей семейства в пробе. Такие семейства должны быть настолько однородными, насколько это возможно, но в разумных количествах. Параметры семейств должны быть получены путем измерения в рамках специальных испытаний. По этой причине первой методикой в области отбора проб руд была классификация по размеру и плотности (Gy, 1979; Pitard, 2009; Pitard, & Stevens, 2011). Это наиболее подходящий способ, поскольку масса частиц в основном зависит от размера и плотности, и целевое содержание также связано с плотностью. В других случаях, для классификации частиц одного размера в части содержания ценного компонента необходимо выполнять специальные испытания (Wavter, Botané and Brochot, 2013). Иногда можно предположить источники неоднородности, но способа их измерения или не существует, или необходимые средства в условиях проекта недоступны или слишком дороги. В таких ситуациях выдвигают гипотезы и выполняется анализ чувствительности для оценки их влияния (Brochot, 2015; Brochot, & Mounié, 2015).

Как правило, в качестве первичного описания семейства выступают классы крупности, образованные набором сит, использованным для измерения гранулометрического распределения. Часто соотношение размеров отверстий двух последовательных сит является слишком большим для рассмотрения единого размера частиц в таком интервале. Поэтому выбор среднего размера частиц в семействе должен быть консервативным, но ограничивающим чрезмерную переоценку дисперсии погрешности отбора проб (Brochot, 2013). Второй уровень описания неоднородности происходит от

самого GRG теста: обогащенные частицы обладают более высокой плотностью, которая в общем случае связана с более высоким содержанием золота. Вместе с тем, гидросепарация крупных классов открывает различные типы частиц: тяжелые частицы с очень высоким содержанием золота и более легкие частицы с средним содержанием золота. Такое различие также может проявиться в хвостах, где могут наблюдаться проскочившие золотины (Dominy, 2013). Действительно, основное различие заключается в нераскрытых минералах, попадающих в хвосты в одной стадии, и оказывающихся в концентрате после измельчения. Такие различия могут быть получены из результатов последующих стадий. Наконец, распределение мелких зерен золота в частицах (мелко вкрапленное, включенное, в сростках с определенным минералом) можно оценить из минералогических наблюдений и результатов различных металлургических исследований (Dominy, Platten, & Xie, 2010; Dominy, 2013).

Модель неоднородности составляется для текущего состояния партии (лота) материала. Действительно, любая обработка материала, такая, как измельчение, разделение или растворение, изменяет неоднородность. Поэтому для каждой стадии исследования необходима новая модель неоднородности, в особенности, если присутствуют промежуточные стадии отбора проб. Что касается разделения частиц на основе физических свойств (классификация по размеру, гравитационное, магнитное, флотационное обогащение), существуют простые соотношения между моделями неоднородности питания и продуктов. Например, модель неоднородности питания стадии гравитационного обогащения может быть получена путем комбинирования моделей неоднородности концентрата и хвостов. В случае измельчения соотношение является более сложным: оно должно принимать во внимание поведение материала в части сокращения размера частиц и распределения целевых компонентов в частицах продукта, феномен, который обычно называют «раскрытием минералов». При растворении происходит переход материала, в т.ч. целевого компонента, из твердого состояния в жидкое, что изменяет характеристики неоднородности. Если набор семейств для моделей неоднородности различных стадий приблизительно одинаковый, доли таких семейств в партии (лоте) изменяются в силу измельчения и раскрытия минералов.

Гранулометрическое распределение получают путем измерения массовых долей частиц в каждом классе. В этом случае целевой компонент представляет собой частицы, принадлежащие к классу крупности, а целевое содержание является их массовой долей. Для такого измерения модель неоднородности может быть ограничена основным свойством, которое необходимо принять во внимание: полным гранулометрическим распределением (Gu, 1979). Влияние числа и ширины классов крупности на расчет фундаментальной погрешности отбора проб обсуждался ранее (Brochot, 2012a, 2013). Классы плотности также могут повлиять на расчет, это как раз случай GRG теста, где плотность частиц в концентрате может быть значительно выше, чем в хвостах.

Анализ содержания золота проводится для каждого класса крупности каждого продукта. Классы концентратов анализируют в полном объеме, поэтому на этом этапе погрешности отбора проб нет. Тем не менее, набор частиц в классе крупности концентрата формируется тремя случайными процессами: 1) отбор проб до питания концентрата; 2) процесс концентрации, который протекает неидеально, позволяя легким пустым частицам попадать в концентрат и тяжелым золотосодержащим частицам проскакивать в хвосты; 3) рассев, который также не является идеальным. Эти случайные процессы формируют изменчивость содержания золота в доле золота, извлекаемого гравитацией. Второй из них хорошо определяется при последующей сепарации (гидросепарации или отмывке). В этом случае модель неоднородности можно улучшить для учета таких различных типов частиц с различным содержанием золота. По факту они также присутствуют и в хвостах, в особенности первой стадии, что можно наблюдать в последующих стадиях при раскрытии минералов. На основании результатов 2й и 3й стадий, а также с несколькими предположениями о раскрытии минералов, становится возможным улучшить модель неоднородности и для хвостов. Для упрощения модели каждый класс крупности может быть разделен в два подкласса: включающие и пустые частицы. Действительно, нет необходимости учета

всего спектра содержаний золота, достаточно рассмотреть лишь экстремумы в качестве консервативного варианта, при использовании которого погрешность будет несколько переоценена. Подкласс пустых частиц может обладать нулевым содержанием, что соответствует «фону» (задаваемому более низким содержанием, наблюдаемым в хвостах третьей стадии). Содержание подкласса включающих частиц в хвостах не может быть больше, чем оно же в концентрате следующей стадии. Эти два ограничения предотвращают переоценку. Таблица 1 показывает такой набор семейств.

Таблица 1. Модель неоднородности одной стадии концентрации, в рамках которой каждый класс крупности разделен на два продукта, каждый из которых разделен в два подкласса – включающих и пустых частиц. Таблица слева показывает целевое содержание a_x для измерения 4го класса крупности питания (+212-300 мкм). Таблица справа показывает целевое содержание для измерения доли материала в концентрате.

Класс крупности	Концентрат		Хвосты		Класс крупности	Концентрат		Хвосты	
	Включ.	Пустые	Включ.	Пустые		Включ.	Пустые	Включ.	Пустые
850	0	0	0	0	850	1	1	0	0
600	0	0	0	0	600	1	1	0	0
425	0	0	0	0	425	1	1	0	0
300	1	1	1	1	300	1	1	0	0
212	0	0	0	0	212	1	1	0	0
150	0	0	0	0	150	1	1	0	0
106	0	0	0	0	106	1	1	0	0
75	0	0	0	0	75	1	1	0	0
53	0	0	0	0	53	1	1	0	0
37	0	0	0	0	37	1	1	0	0
25	0	0	0	0	25	1	1	0	0
20	0	0	0	0	20	1	1	0	0

Применение модели неоднородности для оценки фундаментальной погрешности отбора проб

При условии, что число частиц в различных семействах модели неоднородности достаточно высоко для заданного размера пробы, распределение вероятности приблизительно соответствует нормальному распределению, которое можно охарактеризовать его дисперсией. В других случаях может возникать эффект самородка и необходимо рассмотреть распределение Пуассона (Pitard, 2011; Dominy, Platten, & Minnitt, 2010; Dominy, 2013). Теория отбора проб (Gu, 1979; Pitard, 2011) задает соотношение между относительной дисперсией фундаментальной погрешности отбора проб (FSE) и неоднородностью материала, описанной моделью неоднородности. Для измерения содержания целевого компонента a_L в партии (лоте) FSE задается уравнением (1).

$$\sigma^2(a_L) = \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) \sum_{x \in I_F} m_x t_x \left(\frac{a_x - a_L}{a_L} \right)^2 \quad (1)$$

Где M_S это масса пробы, M_L – масса партии (лота). Семейства частиц N_F , нумеруемые индексами $x \in I_F$, должны быть настолько однородными, насколько это возможно. Это значит, что все частицы одного семейства должны обладать примерно одинаковой массой m_x , и примерно одинаковым содержанием ценного компонента a_x . t_x это массовая доля семейства в партии (лоте). В нашем случае семейства группируют частицы, относящиеся к подклассам классов крупности одного из продуктов обогащения. Индекс x обозначает продукт и представляет или букву C (концентрат) или T (хвосты). Индекс i обозначает класс крупности. Буквы A (включающие частицы) или B (пустые частицы) обозначают подкласс. Например, t_{C4B} это доля пустых частиц в 4м классе крупности (+212-300 мкм) концентрата относительно питания. Целевое содержание в партии (лоте) неизвестно, но

может быть оценено как средневзвешенное по всем семействам модели неоднородности (уравнение 2).

$$a_L = \sum_{x \in I_F} t_x a_x \quad (2)$$

В Таблице 2 перечислены измерения целевого содержания, выполняемые в процессе GRG теста, использованные для оценки дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб таких измерений. Таблица 1 дает значения целевого содержания по каждому семейству в случае измерения гранулометрического распределения питания и доли концентрата.

Таблица 2. Перечень измерений, выполняемых в рамках GRG теста. Значения целевого содержания a_x для каждого семейства и для всей партии (лота) для 1ой стадии обогащения.

Измерение	Целевое содержание в семействе a_x	Целевое содержание в лоте a_L
Гранулометрическое распределение питания: доля класса крупности j	$a_{CjA} = a_{CjB} = a_{TjA} = a_{TjB} = 1$ $a_{CiA} = a_{CiB} = a_{TiA} = a_{TiB} = 0$ для $i \neq j$	$a_L = \frac{M_{S1Ai}}{M_{S1A}}$
Доля концентрата в классе крупности j относительно питания	$a_{CjA} = a_{CjB} = 1$ $a_{TjA} = a_{TjB} = 0$ $a_{CiA} = a_{CiB} = a_{TiA} = a_{TiB} = 0$ для $i \neq j$	$a_L = \frac{M_{C1i}}{M_{S1}}$
Доля частиц, попадающих в концентрат (выход)	$a_{CiA} = a_{CiB} = 1 \quad \forall i$ $a_{TiA} = a_{TiB} = 0 \quad \forall i$	$a_L = \frac{M_{C1}}{M_{S1}}$
Гранулометрическое распределение хвостов: доля класса крупности j	$a_{TjA} = a_{TjB} = 1$ $a_{TiA} = a_{TiB} = 0$ для $i \neq j$ $t'_{CiA} = t'_{CiB} = 0 \quad \forall i$ $t'_{TiA} = t'_{TiA}/t_T$ $t'_{TiB} = t'_{TiB}/t_T \quad \forall i$ $t_T = M_{T1}/M_{S1}$	$a_L = \frac{M_{T1Ai}}{M_{T1A}}$
Содержание золота в питании	$a_x =$ содержание золота в соответствии с Таблицами 3 и 4	$a_L = \sum_{x \in I_F} t_x a_x$

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И УРОВЕНЬ ДОСТОВЕРНОСТИ GRG ТЕСТА

Полная погрешность измерения включает множество компонентов. Большую часть из них можно минимизировать путем добросовестного выполнения процедур и применения лучших практик. Погрешности долгосрочных колебаний качества могут быть оценены только на основе статистики и вариографического анализа. Аналитическая погрешность обсуждалась ранее (Brochot, 2012a, 2012b, 2013, 2015). Мы сфокусируемся на фундаментальной погрешности отбора проб (FSE), считая погрешность объединения и сегрегации приблизительно пропорциональной FSE.

Таблица 3 показывает результаты первой стадии GRG теста для минерализованной части золотосодержащей руды из гидротермального месторождения (что объясняет высокое содержание в 23,5 г/т). Пять крупнейших классов крупности концентрата направили на гидросепарацию, что дало концентрат, состоящий из включающих частиц, и хвосты, которые в модели неоднородности мы обозначили пустыми частицами (см. Таблицу 1)

Таблица 3. Результаты первой стадии GRG теста (сод. – содержание, извл. - извлечение).

Класс, мкм	Концентрат				Хвосты				Питание			
	Масса г	Сод. %	Извл. г/г	Извл. %	Масса г	Сод. %	Извл. г/г	Извл. %	Масса г	Сод. %	Извл. г/г	Извл. %
850	11,48	14,85	2063	43,22	3504	13,63	8,88	56,78	3515	13,63	15,59	9,03
600	10,36	13,40	1339	26,12	4351	16,92	9,02	73,88	4361	16,91	12,18	8,75
425	10,93	14,14	2410	44,27	3597	13,99	9,22	55,73	3608	13,99	16,49	9,80
300	8,18	10,58	3052	58,88	2650	10,31	6,58	41,12	2658	10,31	15,95	6,99
212	9,51	12,30	3965	75,08	2435	9,47	5,14	24,92	2445	9,48	20,55	8,27
150	8,42	10,89	4885	83,42	1781	6,93	4,59	16,58	1789	6,94	27,55	8,12
106	6,41	8,29	6396	87,21	1415	5,50	4,25	12,79	1421	5,51	33,07	7,75
75	3,65	4,72	8732	89,02	1136	4,42	3,46	10,98	1140	4,42	31,42	5,90
53	3,52	4,55	14026	92,68	989	3,85	3,94	7,32	993	3,85	53,67	8,78
37	2,06	2,66	22507	92,04	893	3,47	4,49	7,96	895	3,47	56,28	8,30
25	1,16	1,50	25781	92,56	415	1,61	5,79	7,44	416	1,61	77,64	5,32
20	1,64	2,12	34780	72,32	2547	9,91	8,57	27,68	2549	9,88	30,94	12,99
ИТОГО	77,32	100	5474	69,73	25713	100	7,15	30,27	25790	100	23,54	100

Таблица 4. Результаты переработки пяти крупнейших классов концентрата ЛКС (сод. – содержание, извл. - извлечение).

Класс, мкм	Концентрат				Хвосты				Питание	
	Масса г	Сод. %	Извл. г/г	Извл. %	Масса г	Сод. %	Извл. г/г	Извл. %	Масса г	Сод. г/г
850	0,39	3,40	58819	97,0	11,09	96,60	63,05	3,0	11,48	2060,75
600	0,22	2,12	61786,8	97,9	10,14	97,88	28,25	2,1	10,36	1337,53
425	0,24	2,23	103938	96,3	10,69	97,77	92,16	3,7	10,93	2407,92
300	0,41	5,00	57081,4	93,5	7,77	95,00	209,83	6,5	8,18	3053,41
212	0,33	3,47	104360	91,4	9,18	96,53	353,18	8,6	9,51	3962,22
ИТОГО	1,59	3,16	75122,8	94,6	48,87	96,84	140,0	5,4	50,46	2506,7

В качестве первого приближения рассмотрим только один подкласс для хвостов и для семи самых мелких классов концентрата. Такое приближение может быть легко обосновано для самых мелких классов, поскольку они обладают незначительным влиянием на фундаментальную погрешность отбора проб различных выполняемых измерений (FSE). При этом оно в меньшей степени обосновано для хвостов. В случае анализа пробы питания, дисперсия FSE для гранулометрического распределения может быть посчитана с помощью Уравнения 1, левой части Таблицы 1 и первой строчки Таблицы 2. Например, если доля класса +212-300 мкм (10,31) измерена на пробе в 600 г питания, измельченного до -850 мкм, отобранной от партии (лота) в 26 кг, стандартное отклонение FSE составит 0,07%. Стандартное отклонение долей других классов крупности варьируется от 0,04% для самых мелких до 0,21% для крупнейших классов.

Если гранулометрическое распределение питания пересчитывают из измерений гранулометрического распределения концентрата и хвостов, расчет должен принять во внимание промежуточное опробование хвостов. Уравнение 3 задает долю класса крупности в питании f_i через различные измерения массы:

$$f_i = \frac{M_{C1i}}{M_{S1}} + \frac{M_{T1Ai}}{M_{T1A}} \frac{M_{T1}}{M_{S1}} \quad (3)$$

Дисперсия FSE для f_i зависит от дисперсий трех соотношений масс. Поскольку концентрат анализируют в полном объеме, FSE первого соотношения (вторая строчка Таблицы 2) равна нулю,

поскольку проба представляет собой всю партию (лот). Схожим образом, FSE третьего соотношения – доли материала, попадающего в хвосты (как третья строчка Таблицы 2 при замене С на Т) – также равна нулю. Дисперсия FSE второго соотношения, измеренного гранулометрического распределения хвостов (четвертая строчка Таблицы 2) рассчитывается по Уравнению 1. Поскольку количество концентрата мало в сравнении с питанием, в гранулометрическом распределении питания преобладает гранулометрическое распределение хвостов и, как следствие, дисперсия FSE пересчитанного гранулометрического распределения питания будет несколько ниже, чем у гранулометрического распределения питания, измеренного на пробе. Поэтому в части гранулометрического распределения нет никакого преимущества анализировать отдельную пробу питания.

Модель неоднородности может быть использована для оценки погрешности других измерений, таких, как измерение содержания золота путем выполнения пробирного анализа типичной пробы. Рассмотрим для примера контроль качества потока разгрузки первичного измельчения, в котором гранулометрическое распределение схоже с питанием первой стадии (последняя строчка Таблицы 2). Составную пробу отбирают в течение смены и делят для получения пробы приблизительно в 500 г, которую затем истирают до -106 мкм для отбора пробы в 50 г на пробирный анализ. Дисперсия фундаментальной погрешности отбора проб такой первой стадии отбора (отбор 500 г материала от огромной партии/лота) дает относительное стандартное отклонение в 1,25%. Эта погрешность является относительно низкой, поскольку касается только минерализованной части месторождения. При этом в питании фабрики минерализованная часть разбавлена пустой или бедной рудой. Модель неоднородности может быть с легкостью адаптирована для учета соотношения такого разбавления (например, 500% разбавления) в качестве нового набора семейств, обладающих тем же гранулометрическим распределением, что и хвосты, но с нулевым содержанием золота. В этом случае относительное стандартное отклонение составит 3,05% для содержания золота в 3,92 г/т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Это краткое изучение погрешностей измерения, которые возникают вокруг GRG теста, представляет собой первый шаг более подробного исследования изменчивости такого рода металлургических исследований, независимо от того, говорим мы о greenfield проекте или о задаче оптимизации действующей фабрики. Преимущество таких исследований, включающих подробную характеристику материала и продуктов, заключается в формировании большого объема информации, на основе которой возможно составить реалистичную модель неоднородности материала, с минимумом предположений, которую возможно затем использовать для оценки уровня достоверности результатов самого исследования. Кроме этого, такую модель неоднородности возможно будет использовать для оценки точности других типов измерений, например анализа ядерных проб, контроля качества (содержания золота) в потоках, анализа питания фабрики. Такой расчет погрешности, отражающей изменчивость, которую можно ожидать, не ограничивается GRG тестом и может быть с легкостью экстраполирован на любые виды металлургических исследований. Подобный системный подход должен применяться для любых проектов, поскольку является базисом для оценки финансовых рисков будущих инвестиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Brochot, S.** (2012a). Sampling for grinding pilot plant test: The effect of size distribution variability. Proceedings of the Sampling 2012 Conference (pp. 127-134). Perth, Western Australia, Australia: AusIMM.
- Brochot, S.** (2012b). Standard Fire Assay or Screen Fire Assay? Application of the overall measurement error approach to choose the most appropriate method. Proceedings of the Sampling 2012 Conference (pp. 135-142). Perth, Western Australia, Australia: AusIMM.

Brochot, S. (2013). Application of sampling theory to optimal design of size distribution measurement procedures. In Beniscelli, J., Felipe Costa, J., Domínguez, O., Duggan, S., Esbensen, K.H., Lyman, G., & Sanfurgo, B. (Eds), *Proceedings of the Sixth World Conference on Sampling and Blending* (pp. 129-140). Lima, Peru: Gecamine

Brochot, S. (2015). The overall measurement error – TOS and uncertainty budget in metal accounting. In Esbensen, K.H., & Wagner, C. (Eds), *TOS Forum – Proceedings of the Seventh World Conference on Sampling and Blending*, 5, 83-86. Bordeaux, France.

Brochot, S., & Mounié, F. (2015). Sampling for grinding pilot plant test: The effect of size distribution variability. In Esbensen, K.H., & Wagner, C. (Eds), *TOS Forum – Proceedings of the Seventh World Conference on Sampling and Blending*, 5, 43-50. Bordeaux, France.

Clarke, J. (2005). A simplified gravity-recoverable-gold test (Master's thesis). Retrieved from Library and Archives Canada (AMICUS No. 39258856).

Dominy, S.C., Platten, I.M., & Minnitt, R.C.A. (2010). Heterogeneity, sampling errors and the nugget effect in gold ores: Implications for evaluation, exploitation and extraction. *Proceedings of the Gravity Gold Conference* (pp. 3-17). Ballarat, Victoria, Australia: AusIMM.

Dominy, S.C., Platten, I.M., & Xie, Y. (2010). Determining gold particle size in gravity ores for sampling and metallurgical characterisation: Discussion and test protocol. *Proceedings of the Gravity Gold Conference* (pp. 83-95). Ballarat, Victoria, Australia: AusIMM.

Dominy, S.C., Murphy, B., & Gray, A.H. (2011). Characterisation of gravity amenable gold ores: Sample representivity and determination methods. *Proceedings of the First AusIMM International Geometallurgy Conference* (pp. 281-292). Brisbane, Queensland, Australia: AusIMM.

Dominy, S.C. (2013). Variability of gravity recoverable gold values in relation to test sample size. *Proceedings of the Second AusIMM International Geometallurgy Conference* (pp. 293-301). Brisbane, Queensland, Australia: AusIMM.

Gy, P. (1979). *Sampling of particulate materials: Theory and practice*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

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

Laplante, A.R., Staunton, W.P. (2005). Gravity recovery of gold: An overview of recent developments. *Proceedings of the International Symposium on the Treatment of Gold Ores*, Calgary, Alberta, Canada: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.

Pitard, F.F. (2009). Pierre Gy's theory of sampling and C.O. Ingamells' Poisson process approach: Pathways to representative sampling and appropriate industrial standards (Doctoral dissertation), Aalborg University, Denmark.

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

Wardell-Johnson, G., Bax, A., Staunton, W.P., McGrath, J. & Eksteen, J.J. (2013). A decade of gravity gold recovery, *Proceedings of the World gold Conference* (pp. 225-232). Brisbane, Queensland, Australia: AusIMM.

Wavrer, Ph., Botané, P., & Brochot, S. (2013). Sampling protocol design for characterization of plastics from small WEEE. In Beniscelli, J., Felipe Costa, J., Domínguez, O., Duggan, S., Esbensen, K.H., Lyman, G., & Sanfurgo, B. (Eds), *Proceedings of the Sixth World Conference on Sampling and Blending* (pp. 143-152). Lima, Peru: Gecamine

Woodcock, F.C. (1994). Use of Knelson unit to quantify gravity recoverable gold in an ore (Master's thesis). Retrieved from Library and Archives Canada (AMICUS No. 37447565).