

Отбор проб россыпного золота – полная погрешность измерения при применении гравитационного обогащения в процессе подготовки пробы

Стефан Брошо^а и Франсуа Муни^б

^аCaspeo, SARL, ул. Авеню Клода Гиймен, 3, г. Орлеан, Франция

^бIDM Guyane, Ремир-Монжоли, Французская Гвиана

Труды конференции WCSB7, Июнь 2015

АННОТАЦИЯ

Россыпные месторождения как правило характеризуются низкими содержаниями золота. Это справедливо и для Французской Гвианы, где основные россыпные месторождения сосредоточены в руслах рек. Большая часть таких месторождений уже разрабатывается мелкими компаниями с использованием шлюзов. Хотя эта технология эффективна для крупного золота, при ее применении мелкое золото попадает в хвосты. В последние годы был проведен ряд исследований, затронувших различные предприятия, в рамках которых была выполнена оценка извлечения при такого рода разработке. Извлечение составило 40%-60% в зависимости от гранулометрического распределения частиц золота и качества настройки шлюзового оборудования. В связи с этим существует множество площадок с текущими и лежалыми хвостами с значительным количеством оставшегося золота, что порождает возможности для их переработки.

Хвосты как правило представляют собой песчаные отвалы разгрузки шлюзов в форме конуса выноса. В силу значительной неоднородности распределения золота, при измерении параметров таких отвалов необходимо отбирать множество проб в множестве точек. Чтобы быть представительными относительно материала, пробы также должны быть достаточно крупными. Поскольку в такого рода партиях золото по большей части раскрыто, типовая процедура подготовки проб с последовательным сокращением размеров и отбором подпроб неэффективна и может быть дорогостоящей. В настоящей статье освещается другой, предпочтительный в таких случаях, подход, основанный на классификации и гравитационном обогащении по классам крупности. Статья представляет процедуру отбора и подготовки проб и затем фокусируется на оценке полной погрешности измерения, формируемой при использовании такой процедуры. В материале также представлен ряд различных примеров хвостов, для которых решение об их переработке зависело от уровня достоверности оценки количества извлекаемого золота.

ВВЕДЕНИЕ

Исторически большая часть производства золота в Французской Гвиане связана с россыпями. Сегодня это по-прежнему так, хотя все больше и больше разработки приходится на коренные месторождения. В качестве основной технологии извлечения золота применяются шлюзы. Такой подход эффективен по большей части для крупных частиц свободного золота, и в меньшей степени для мелкого свободного золота и оставшихся частиц золота в форме сростков с минералами, происходящих из коренных месторождений. По этой причине хвосты шлюзов содержат существенное количество золота, извлечение которого может стать экономически оправданным при достаточно высоких ценах на металл, наблюдаемых на сегодняшний день. В 2006 и 2007 годах был проведен ряд специализированных исследований, затронувших несколько производственных площадок, целью которых были оценка количества золота, оставшегося в отходах шлюзов, а также экономическое обоснование их переработки.

В рамках исследований ставились следующие основные задачи:

- оценка количества золота в хвостах шлюзов;
- проектирование процесса переработки хвостов и оценки его рентабельности;

- проектирование ЗИФ для россыпных месторождений для максимизации извлечения и минимизации потерь золота с хвостами.

Знание точности измерений (или наоборот, составление измерительных процедур, позволяющих достичь целевого показателя точности) было ключевым шагом для оценки финансовых рисков.

Методика подготовки проб с таких россыпных месторождений, основанная на классификации и гравитационном обогащении, применялась исторически – с самого начала отбора проб с россыпей. В давние времена старатели использовали обыкновенный лоток [1]. В прошлом веке в помощь были изобретены пробоподготовительные комплексы, использующие различные технологии от шлюзов до центробежных концентраторов [2]. Хотя все эти методики упомянуты в Теории отбора проб [4, 5], их преимущества с точки зрения полной погрешности измерения редко подвергались анализу.

Настоящая статья подробно описывает применявшуюся в рамках исследований процедуру отбора и подготовки проб, а также различных выполнявшихся на них измерений. При применении такой хорошо структурированной методики, стало возможным оценить погрешность отбора проб и аналитическую погрешность через моменты компонентов таких погрешностей, которые возможно рассчитать (таких, как фундаментальная погрешность отбора проб, погрешность группировки и сегрегации, или прямые погрешности измерения, связанные с конкретными устройствами). Помимо задачи определения характеристик материала для целей обогащения, результаты, полученные в рамках такого опробования, были использованы для оптимизации процедуры отбора проб для измерения содержания золота в россыпных месторождениях или хвостах их разработки. Статья также кратко излагает ключевые стадии предложенной оптимизированной общей процедуры.

ПРОЦЕДУРЫ ОТБОРА ПРОБ И ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Ряд представленных в настоящей статье исследований был проведен в интересах нескольких компаний, субъектов малого и среднего предпринимательства, занимающихся производством золота на небольших аллювиальных россыпях или коренных месторождениях в Французской Гвиане, расположенной между Бразилией и Суринамом.

Такие месторождения как правило представляют собой небольшие территории посреди тропических лесов, доступ к которым осуществляется по большей части по воде или по воздуху, и очень редко по дороге. В такой ситуации средства для отбора и подготовки проб ограничены тем, что есть на площадке. Поэтому при последующем описании процедур, мы определили четыре различных локации:

- Площадка: местоположение отвала хвостов шлюзов или россыпи;
- Поселок: место проживания персонала, где присутствуют некоторые средства для подготовки проб, расположено близко к Площадке;
- Технологическая лаборатория: расположена в городе на удалении от площадки, обладает оборудованием для обогащения, классификации, отработки вод;
- Аналитическая лаборатория: подрядчик, выполняющий процедуры тонкой классификации, истирания и пробирного анализа.

Некоторые Площадки были достаточно оснащены для выполнения в Поселке работы, которую обычно выполняли в Технологической лаборатории. Помимо задачи получения точных значений измеряемых показателей, такие исследования помогли оптимизировать процедуры в части минимизации обработки материала и сокращения числа и масс проб и подпроб, которые необходимо было транспортировать между Площадкой и Поселком, а также между Площадкой и Технологической лабораторией. Это было актуально, поскольку стоимость транспортировки в город по воздуху была слишком высокой, а при транспортировке по воде или по суше существенно возрастали риски заражения или потери материала проб.

Характеристики материала, необходимые для настоящей работы, включали: гранулометрическое распределение песков и содержание золота по классам крупности, из которых затем рассчитывалось гранулометрическое распределение частиц золота и общее содержание золота. Для этого на пробах проводились следующие измерения: масса пробы, масса каждого класса крупности после классификации (рассева), пробирный анализ золота в каждом из самых мелких классов.

Процесс обогащения золота и описание отвала хвостов

Наиболее распространенной технологией обогащения россыпного золота в Французской Гвиане являются шлюзы. Песок извлекается из обрабатываемого блока с помощью экскаватора и подается в наклонный бункер, где для промывки добавляется вода. Некоторые бункера оснащены решеткой (с размером отверстий – 20-35мм) для отсева крупных фракций, что обеспечивает лучшую эффективность обогащения на шлюзе. Крупные частицы надрешетного продукта хранятся в отвале рядом со шлюзом. Полученная пульпа затем подается на самородкоуловитель, где отлавливаются крупные частицы золота, и далее поступает на графареты шлюза, где концентрируются чешуйчатое золото и тяжелые минералы. Пустая пульпа слива шлюза разгружается в предыдущий отработанный блок, в котором частицы песков формируют отвал в форме конуса выноса. Мелкие чешуйки золота и мелкие тяжелые минералы, которые не были извлечены шлюзом, в основном оказываются в таком отвале. При этом очень мелкие и коллоидные частицы глины увлекаются водой вверх в отстойник вместе с очень мелкими частицами золота.

Целями исследований были оценка количества золота, оставшегося в таких отвалах хвостов шлюзов, и подбор наиболее подходящего процесса их обогащения. Рисунок 1 показывает типовую форму отвала с осью симметрии по направлению канала шлюза. Поскольку отвалы формируются слоями, соответствующими различным частям обрабатываемого блока (с изменяющимся содержанием), можно предположить вертикальную стратификацию. Циклы извлечения концентрата также являются источниками такой неоднородности вертикального распределения (под неоднородностью распределения понимается, что пропорции различных типов частиц в партии материала могут изменяться в зависимости от местоположения в партии или со временем). Вместе с тем, кинетика осаждения частиц золота будет формировать большую неоднородность распределения именно по горизонтали, в рамках чего крупные частицы золота накапливаются непосредственно за точкой разгрузки шлюза, и чем мельче частицы, тем дальше они оседают. По этой причине содержание золота в хвостах уменьшается от вершины к основанию.

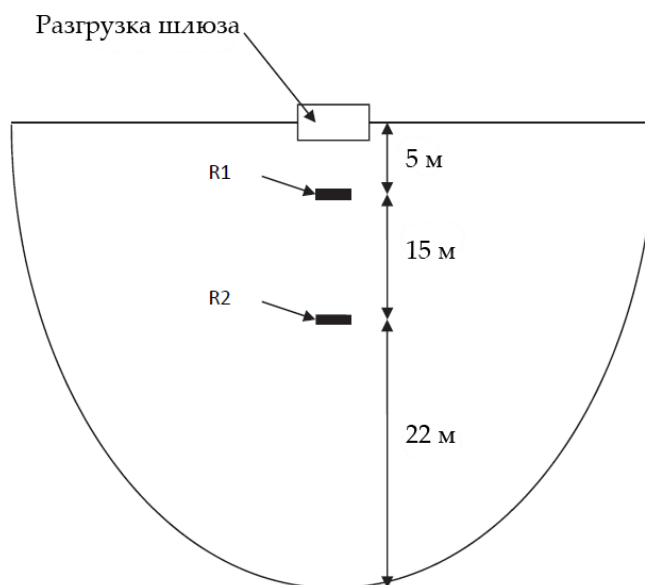


Рисунок 1. Обзор типовой формы отвала хвостов шлюза и местоположение точек отбора проб R1 и R2.

В силу относительно постоянного характера течения воды на поверхности отвала, гранулометрическое распределение частиц песков представляется одинаковым везде кроме области в непосредственной близости к разгрузке шлюза, где оседают крупные частицы.

Отбор проб отвала хвостов

В силу неоднородности распределения в горизонтальном направлении, для оценки распределения золота и соответствующих объемов, необходимых для расчета средневзвешенных значений различных измеряемых параметров, на одном отвале мог требоваться отбор нескольких проб. Рисунок 1 показывает случай, в рамках которого были отобраны две пробы R1 и R2. До этого было проведено предварительное исследование, которое заключалось в отборе множества проб по обе стороны оси симметрии отвала. Наиболее нетипичной была проба, отобранная на разгрузке шлюза, где концентрировались оставшиеся крупные частицы золота. В части представительности, она отражала свойства только самой себя. Через несколько метров, распределение становилось менее неоднородным. Было отмечено, что пробы, отобранные по оси симметрии на расстоянии от 5 м до 10 м от разгрузки шлюза, обладают характеристиками (гранулометрическим распределением песков и содержанием золота), близкими к средним. С целью ограничения числа обрабатываемых проб и, как следствие, стоимости проведения опробования, для некоторых отвалов была отобрана только одна первичная проба.

Неоднородность распределения в вертикальном направлении диктовала необходимость отбора пробы по всей высоте отвала. Вместе с тем, как было указано выше, вертикальная неоднородность определено меньше горизонтальной. Поэтому было принято решение об ограничении глубины отбора проб несколькими десятками сантиметров. При опробовании застарелых лежалых хвостов, поверхностный слой отвала можно было считать сильно измененным рабочими активностями или погодными явлениями (например, могло происходить увлечение мелких частиц песков дождем и ветром, или перемещение частиц золота при просачивании дождевой воды). В таких случаях сначала систематически удаляли 30 см поверхностного слоя, затем проводили отбор пробы в форме параллелепипеда, одним действием с помощью экскаватора. После отбора ковш разгружали в контейнер для сбора первичной пробы, масса которой в зависимости от крупности песков составляла 140-320 кг. В зависимости от условий транспортировки, часть стадий пробоподготовки, с целью снижения количества материала, которое необходимо было доставлять в Поселок, могли выполнять на Площадке.

Гранулометрическое распределение крупных классов

В такого рода хвостах шлюзов практически невозможно найти частицы золота крупнее 1 мм. Поэтому массу пробы возможно было сократить путем простого отсева. Рассев в свою очередь возможно было выполнять прямо на Площадке или, в целях обеспечения лучших условий подготовки проб, в Поселке. Рассев пробы также позволял измерить доли крупных классов песков.

Применяемый набор сит включал классы 50 мм, 25 мм, 10 мм и 2,5 мм. Если на питании шлюза использовалась решетка, сито на 50 мм при отсеивании не применяли. В противном случае, отбирали большую пробу и подрешетный продукт могли сокращать желобчатым делителем. При крупности до 10 мм проводили сухой рассев. Если пески были достаточно сухими, то частицы надрешетного продукта были чистыми и соответствующие классы возможно было взвесить и затем осмотреть с целью определения наличия крупных частиц золота или потенциально золотосодержащих минералов. Если пески были влажными, с налипанием мелких частиц на крупные, то надрешетные классы промывали минимальным объемом чистой воды в емкость, после чего высушивали и взвешивали. Промывочную воду отстаивали, аккуратно сливали, затем после грубой сушки смешивали полученный осадок с подрешетными классами. Для 2,5 мм проводили мокрый рассев, как правило непосредственно перед обогащением в Технологической лаборатории. Класс +2,5 мм высушивали и осматривали для контроля отсутствия крупных частиц золота или потенциально

золотосодержащих минералов. В двух специфических случаях потребовалось проведение дополнительного отсева на 1100 мкм и 500 мкм перед обогащением. Классы 1100-2500 мкм и 500-1100 мкм были промыты на лотке, затем, для контроля отсутствия крупных частиц золота или потенциально золотосодержащих минералов, были осмотрены тяжелые частицы.

Во всех случаях надрешетные классы не содержали крупного золота или золотосодержащих минералов. Поэтому было сделано предположение, что все оставшееся золото в хвостах шлюзов концентрируется в классе -2,5 мм, составляющем 20%-60% хвостов, в редких случаях больше. Рассев позволил сократить массу проб в 2-5 раз не оказывая при этом существенного влияния на фундаментальную погрешность отбора проб в части содержания золота. Простой расчет в соответствии с Теорией отбора проб показал, что дробление песков до -2,5 мм практически не имело воздействия на постоянный множитель неоднородности состава материала (под неоднородностью состава понимается, что в партии материала могут смешиваться различные типы частиц с различными характеристиками: размером, составом, плотностью, и др.). Иначе говоря, дробление, в отличие от отсева, не сокращает массу пробы и, для такого рода материалов с низким содержанием, на отбор вторичной и последующих проб может влиять Пуассоновский процесс.

Обогащение золота на концентрационном столе

Исходя из того, что тонкий рассев представлялся более сложным для выполнения, и того, что классы -2,5 мм могли содержать частицы золота, гравитационное обогащение было еще одним способом сокращения массы пробы путем концентрации большей части золота в ее маленькой доле. Все подпробы -2,5 мм были полностью отработаны на концентрационном столе Gemini, хорошо адаптированном для извлечения свободного золота и тяжелых минералов, которые потенциально могли быть золотосодержащими. Операционные условия стола корректировались визуально, чтобы извлекать черные минералы в концентрат. Сухая масса материала -2,5 мм, подаваемого на обогащение, должна была измеряться настолько точно, насколько это представлялось возможным. Поэтому подрешетный продукт -2,5 мм до мокрого взвешивания отстаивали, сливали воду, затем отбирали небольшую пробу для измерения содержания влаги.

Концентрационные столы Gemini обладают тремя выходами для тяжелого, среднего и легкого продуктов. В данном случае тяжелый и средний продукты комбинировали как «концентрат», легкий продукт направлялся в «хвосты». Выход концентрата варьировался в интервале 1,2%-78,5%, что соответствовало коэффициенту концентрации в интервале 1,3-82. Большая часть отработанных проб показывала выход на уровне 5%-20% (коэффициент концентрации в интервале 5-20). Много внимания было уделено снижению флотации мелких частиц золота, в особенности в контейнере для продуктов стола, вода из которого сливалась и не извлекалась. К счастью, хвосты шлюзов не содержали очень мелких и коллоидных частиц, которые уходили в отстойник при первичном обогащении.

Гранулометрическое распределение и содержание золота в продуктах концентрационного стола

Концентрат стола просеивали на 500 мкм в Технологической лаборатории. Класс +500 мкм высушивали, взвешивали, промывали в лотке, после чего осматривали для контроля отсутствия крупных частиц золота или потенциально золотосодержащих минералов. В случае присутствия таких частиц, концентрат лотка высушивали, взвешивали и затем направляли в Аналитическую лабораторию. Класс -500 мкм высушивали, взвешивали и направляли в Аналитическую лабораторию для тонкого отсева на 250 мкм, 125 мкм и 63 мкм. В редких случаях, класс -500 мкм сокращали для выполнения отсева на меньшем количестве, при этом из второй части отбирали подпробу для анализа. Классы 250-500 мкм и 125-250 мкм истирались до -125 мкм. Четыре класса крупности делили для получения 50 г пульпы на пробирный анализ.

Хвосты столов полностью извлекали в виде мокрого материала, отстаивали, сливали воду насколько это было возможным, заботясь при этом о том, чтобы не потерять мелкие и легкие частицы. Хвосты гомогенизировались (поскольку в емкостях, в которые их сливали, происходила сегрегация) и их затем распределяли по пластиковому листу для отбора подпробы путем отбора множества точечных проб. Такую подпробу далее направляли в Аналитическую лабораторию, где ее сушили, взвешивали, стирали и сокращали для получения итоговой пробы в 50 г на пробирный анализ.

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОТБОРА ПРОБ И ИЗМЕРЕНИЯ

Основной целью этого раздела является демонстрация расчета полной погрешности измерения среднего содержания золота в отвале хвостов шлюза. Расчет погрешности измерения гранулометрического распределения ранее обсуждался в предыдущих работах [6, 7]. Поскольку целью настоящей статьи является демонстрация преимущества использования рассева и гравитационного обогащения для увеличения точности отбора проб, с целью упрощения предполагаем, что отвал хвостов является однородным в части распределения или, поскольку мы точно знаем, что это не так, что хотя бы часть отвала, окружающая место отбора пробы, является однородной и представляет собой партию (лот), значительно большую чем масса пробы. Иными словами, единственной погрешностью, которую мы будем принимать во внимание для стадии первичного отбора проб, будет фундаментальная погрешность отбора проб (Fundamental sampling error - FSE).

Модель неоднородности

Базовые формулы Теории отбора проб [3-5, 8, 9], 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 классифицируются в семейства, в рамках которых они предполагаются одинаковыми. Каждое семейство затем характеризуется 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 пределах. 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 [5, 8, 9, 10]. Это наиболее подходящий способ, поскольку масса частиц в основном зависит от размера и плотности, и содержание ценного компонента также связано с плотностью. В других случаях, для классификации частиц одного размера в части содержания ценного компонента необходимо выполнять специальные испытания [11]. 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 выдвигаются гипотезы и выполняется анализ чувствительности для оценки влияния таких гипотез.

Как правило, в качестве первичного описания семейства выступают классы крупности набора сит, использованного 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 погрешности отбора проб. В Таблице 1 приведены использованные в исследовании классы крупности и соответствующие средние размеры частиц для расчета массы. Предполагалось, что золото представлено только в виде раскрытых частиц чистого золота. Хотя некоторые минералы могли содержать небольшое количество золота, доля таких включений в его общей массе была достаточно низкой чтобы не оказывать значительного влияния на оценку погрешности отбора проб. Кроме этого, предположение о наличии только раскрытого золота является консервативным. Поскольку в рамках исследования в классе +500 мкм не наблюдалось частиц золота или минералов, при построении моделей неоднородности только классы -500 мкм были разделены на два семейства: пески и золото.

Гранулометрическое распределение измерялось только для концентрата стола. Для хвостов, гранулометрическое распределение которых определено от отличалось от концентрата, измерение не выполнялось. Поскольку такое отличие обладает низким влиянием на оценку фундаментальной погрешности отбора проб, гранулометрическое распределение концентрата было использовано для гранулометрического распределения песков -2,5 мм. Содержание золота по классам крупности концентрата дает гранулометрическое распределение частиц золота в концентрате. Гранулометрическое распределение частиц золота в хвостах не может быть определено без гранулометрического распределения песков и содержания золота в каждом классе крупности. Поэтому, в соответствии с наблюдениями в множестве случаев [12], предполагалось, что в хвосты отходит только тонкое золото класса -63 мкм. Набор семейств частиц, представленный в Таблице 1, используется для различных моделей неоднородности, соответствующих различным стадиям процедуры отбора проб и измерения. Особое внимание необходимо уделять числу частиц в каждом семействе, в особенности это касается крупных частиц золота. Это требуется для проверки обоснованности предположения о Нормальном распределении и в случае наличия риска несоответствия Пуассоновскому процессу [5].

Таблица 1. Модель неоднородности.

Наименование семейства	Крупность	Средний размер	Масса частицы	Содержание золота	Плотность (г/см ³)	Фактор формы
+50 мм пески	50–100 мм	76 мм	591 г	0%	2.7	0.5
+25 мм пески	25–50 мм	38 мм	73.8 г	0%	2.7	0.5
+10 мм пески	10–25 мм	17.7 мм	7.47 г	0%	2.7	0.5
+2.5 мм пески	2.5–10 мм	6.3 мм	332 мг	0%	2.7	0.5
+500 мкм пески	0.5–2.5 мм	1.5 мм	4.5 мг	0%	2.7	0.5
+500 мкм золото	0.5–2.5 мм	1.5 мм	10.7 мг	100%	16	0.2
+250 мкм пески	250–500 мкм	380 мкм	73.8 мкг	0%	2.7	0.5
+250 мкм золото	250–500 мкм	380 мкм	175 мкг	100%	16	0.2
+125 мкм пески	125–250 мкм	190 мкм	9.23 мкг	0%	2.7	0.5
+125 мкм золото	125–250 мкм	190 мкм	21.9 мкг	100%	16	0.2
+63 мкм пески	63–125 мкм	95 мкм	1.16 мкг	0%	2.7	0.5
+63 мкм золото	63–125 мкм	95 мкм	4.13 мкг	100%	16	0.2
-63 мкм пески	-63 мкм	35 мкм	0.056 мкг	0%	2.7	0.5
-63 мкм золото	-63 мкм	35 мкм	0.266 мкг	100%	16	0.2

Фундаментальная погрешность первичного отбора проб

Относительная дисперсия фундаментальной погрешности отбора проб (FSE) для измерения содержания ценного компонента a_L в партии (лоте) задается уравнением (1).

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

Где M_S это масса пробы, M_L – масса партии (лота). Семейства частиц N_F , нумеруемые индексами $i \in I_F = \{1 \dots N_F\}$, 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). Если масса партии (лота) значительно превышает массу пробы, вычитаемое в множителе с разностью в уравнении (1) становится пренебрежимо малым.

В случае только свободного золота, частицы распределяются в набор семейств с индексами из подмножества $I_G \subset I_F$, в соответствии с их размером 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) [5, 10].

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

Где средняя масса частиц золота определяется следующим образом:

$$\bar{m}_G = \frac{\sum_{i \in I_G} m_i t_i}{\sum_{i \in I_G} t_i}$$

Таблица 2 приводит дисперсии и фундаментальные погрешности отбора (приблизительно равные удвоенному стандартному отклонению с 95% уровнем доверия) для различных проб, обработанных в рамках исследования. Масса партии (лота) предполагается очень большой в сравнении с массой пробы.

Таблица 2. Фундаментальная погрешность первичного отбора проб различных отвалов хвостов шлюзов.

Проба	Масса пробы (кг)	Доля -25 мм	Доля -2.5 мм	Доля золота в +250 мкм	Доля золота в -63 мкм	Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	FSE	Доля $I_{H_{gold}}^a$
№1	220	83%	49%	61.8%	4.8%	738	5.4%	83%
№2	209	89%	50%	0.7%	93.6%	52	1.5%	14%
№3	220	92%	44%	0%	71.8%	52	1.5%	33%
№4	242	95%	49%	6.6%	77.5%	59	1.5%	65%
№5	300	67%	21%	21.3%	18.3%	1084	6.5%	86%
№6	180	99%	65%	10.9%	74.1%	242	3.1%	96%
№7	190	99%	67%	6.4%	66.4%	294	3.1%	98%
№8	220	99%	55%	13.7%	50.0%	431	4.1%	98%
№9	200	98%	78%	17.6%	52.8%	1615	7.9%	99%
№10	240	97%	56%	15.7%	15.5%	425	4.1%	97%
№11	200	88%	68%	5.8%	73.8%	452	4.2%	90%
№12	15	100%	57%	19.3%	3.6%	1293	7.1%	99%
№13	40	81%	37%	17.3%	32.2%	9294	18.9%	96%

^aДоля первого слагаемого множителя с суммой в уравнении (2) от суммы постоянных множителей неоднородности состава ПН.

Если соотношение между крупнейшими частицами песков и крупнейшими частицами золота достаточно мало, второе слагаемое множителя с суммой в уравнении (2) становится пренебрежимо

малым и становится возможным применение упрощенной формулы к свободному золоту [3-5]. При этом, как показано в Таблице 2, это не всегда так, если доля первого слагаемого (неоднородности, принесенной частицами золота) составляет менее 95% от неоднородности состава (ИН). В некоторых ситуациях, число частиц одного семейства в пробе может быть очень малым. Как правило это касается крупнейших классов песков или крупнейших классов золота. В первом случае влияние на изменчивость содержания золота будет низким. Во втором - ситуация может быть хуже, что потребует увеличения размера пробы.

Расчет фундаментальной погрешности первичного отбора проб позволяет установить массу первичной пробы, необходимую для получения требуемого уровня достоверности. Исходя из таких параметров первичной пробы могут быть предложены различные варианты процедуры ее подготовки. В рамках настоящего исследования мы отсеяли крупные фракции песков с целью сокращения массы пробы для анализа и затем применили гравитационное обогащение. В нижеследующих разделах мы рассмотрим более традиционные процедуры пробоподготовки, основанные на дроблении и измельчении проб, и сравним их в части полной погрешности измерения.

Рассев пробы

Наблюдения показали, что в отвалах хвостов шлюзов классы крупнее 2,5 мм не содержат золота. Исключение материала +2,5 мм позволяло сократить количество пробы для последующей подготовки без формирования фундаментальной погрешности отбора проб. Разумеется, погрешности при подготовке пробы возможны, но их можно обойти путем правильного выполнения соответствующих работ.

Следуя формализму, предложенному Пьером Ги [9] для общего случая вероятностного отбора проб, процедура отсева пробы может быть рассмотрена в качестве вторичного отбора без равномерности. Предел невероятностной (неслучайной) выборки достигается для идеальной классификации при отсева, когда для частицы крупнее 2,5 мм вероятность быть отобранной равна 0, а для частиц меньшего размера такая вероятность равна 1. Такая «стадия отбора проб» характеризуется определенным свойством обладать нулевой дисперсией, но высокой систематической погрешностью, которая легко поддается управлению поскольку связывает содержание в первичной пробе и содержание в той же пробе после отсева крупных классов. Если $t_{<}$ это доля пробы, проходящая через сито 2,5 мм, и $a_{<}$ это содержание золота в такой подрешетной доле, содержание в первичной пробе рассчитывается, как $a_s = t_{<}a_{<}$ и

$$t_{<} = \sum_{i \in I_{<}} t_i$$

Где $I_{<} \subset I_F$ это подмножество индексов семейств частиц мельче 2,5 мм.

Дисперсия погрешности измерения содержания золота в первичной пробе таким образом рассчитывается на основе правила распространения погрешностей:

$$\sigma^2(a_s) = \sigma^2(t_{<}) + \sigma^2(a_{<}) \quad (3)$$

...при условии, что измерения доли $t_{<}$ и содержания золота $a_{<}$ обладают небольшой дисперсией и являются независимыми событиями. Это действительно так в случае аналитической погрешности, даже несмотря на то, что взвешивание (для определения доли) и последующая обработка (для определения содержания золота) выполняются на одном и том же подрешетном материале. Доля подрешетного материала и содержание золота оба подвержены фундаментальной погрешности отбора проб, измеренной для первичной пробы. Если предположить, что вся проба может быть проанализирована, содержание золота затем рассчитывается через соотношение измеренной массы золота к массе пробы. Поскольку в первом приближении масса пробы считается постоянной,

дисперсия содержания золота есть дисперсия массы золота в пробе. Поскольку масса золота в первичной пробе та же, что и в просеянной части первичной пробы, дисперсия фундаментальной погрешности отбора проб та же, что была посчитана на основе уравнения (2).

Принимая во внимание сокращение массы пробы на 50% после отсева, может быть выполнена альтернативная процедура, заключающаяся в дроблении первичной пробы до -2,5мм и последующего ее деления для получения вторичной пробы. В процессе дробления сокращение размеров частиц золота не представляется возможным. Поэтому предполагается, что гранулометрическое распределение частиц золота сохраняется и гранулометрическое распределение раздробленных песков размером менее 2,5 мм то же, что и для концентрата стола. В таком случае, дисперсия фундаментальной погрешности вторичного отбора проб должна добавляться к предыдущей. Поскольку она обладает тем же порядком, что и первичная, преимущество отсева очевидно.

После отсева модель неоднородности ограничивается 10 последними семействами Таблицы 1. Их доли в сокращенной пробе выражаются следующим образом:

$$t_{<i} = t_{<}t_i \quad i \in I_{<}$$

Хотя подрешетный продукт делят перед обогащением, вторичная проба формирует фундаментальную погрешность отбора проб, дисперсия которой рассчитывается по уравнению (1) с использованием новой модели неоднородности и массы подрешетного материала в качестве массы партии (лота). Для случаев, описанных здесь, при делении пополам, дисперсия обладает тем же порядком. Но при делении на 4, она значительно больше дисперсии первичного отбора. Хотя пробу делят между двумя стадиями отсева, промежуточная фундаментальная погрешность отбора проб должна быть учтена для подрешетной доли [7].

Обогащение (концентрация) пробы

После отсева и (при необходимости) разделения, пробу пропускали через концентрационный стол для обогащения золота. Содержание золота затем измеряли по каждому классу крупности для концентрата, и общее для хвостов. Концентрация не могла рассматриваться как идеальная и мелкие частицы золота попадали в хвосты стола. Поскольку концентрационный стол работал скорее в режиме максимизации извлечения, чем концентрации, только очень мелкие частицы золота, менее 63 мкм, могли попадать в хвосты, как это наблюдалось на некоторых обогатительных фабриках [12]. В отсутствие анализа на золото по каждому классу крупности, это наблюдение в данном случае использовалось как предположение. Поэтому для частиц золота крупнее 63 мкм концентрация принималась как идеальная, и в хвостах присутствовали частицы золота крупностью только -63 мкм. Еще одна группа частиц, попадавших в концентрат, это тяжелые минералы (в основном черные минералы) которые могли быть золотосодержащими. Тем не менее в подобных аллювиальных россыпях доля включенного золота очень мала в сравнении с свободным, поэтому влиянием его присутствия можно было пренебречь. Некоторые крупные частицы песков также попадали в концентрат. Для упрощения, мы рассматриваем единую среднюю плотность для всех минералов, отличных от чистого золота. Поскольку гранулометрическое распределение хвостов не измерялось, было принято, что оно идентично гранулометрическому распределению концентрата.

Если Y_c это доля массы вторичной пробы, извлеченной в концентрат, a_c и a_t – содержание золота в концентрате и в хвостах соответственно, то содержание во вторичной пробе составит $a_{<} = Y_c a_c + (1 - Y_c) a_t$. Y_c является константой относительно погрешности отбора проб, это измерение, аналитическая погрешность которого задается точностью взвешивания и является незначительной в сравнении с погрешностью отбора проб. Тогда дисперсия погрешности измерения рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma^2(a_{<}) = \left(\frac{Y_c a_c}{a_{<}}\right)^2 \sigma^2(a_c) + \left(\frac{1 - Y_c}{a_{<}} a_t\right)^2 \sigma^2(a_t) \quad (4)$$

Модель неоднородности, использованная для концентрата, ограничивается 10 последними семействами Таблицы 1, для хвостов – 5 последними семействами песков и семейством -63 мкм золота. В зависимости от количества и от мощностей лаборатории, концентрат могли делить после сушки и перед истиранием. Схожим образом хвосты отстаивали, сливали воду, затем квартовали, чтобы уменьшить количество для сушки, и далее делили перед истиранием.

Анализ концентрата и хвостов

Истирание концентрата и хвостов выполнялось до получения 100% подрешетного продукта 125 мкм. Если в надрешетном продукте сита оставалось крупное золото, тогда выполнялся пробирный анализ с рассевом (Screen fire assay - SFA): подрешетный продукт делится как обычно для получения 50 г на пробирный анализ, и, помимо этого, выполняется дополнительный пробирный анализ надрешетного продукта в том количестве, которое осталось. Если надрешетного продукта на сите не оставалось, выполнялся обыкновенный пробирный анализ. Преимущества пробирного анализа с рассевом в случае присутствия крупного золота было доказано и обсуждалось в предыдущей статье [13]. Для упрощения расчета, рассмотрим только обыкновенный пробирный анализ. Для учета того факта, что частицы золота может быть сложно измельчить, предполагалось, что все такие частицы крупнее 125 мкм в концентрате при истирании попадали в класс 63-125 мкм. Гранулометрическое распределение истертых песков соответствует классам -125 мкм для концентрата. Схожее предположение делается для хвостов, все оставшиеся частицы золота попадают в класс -63 мкм.

Модель неоднородности, использованная для продуктов истирания, ограничивается 4 последними семействами Таблицы 1. Как показано в Таблице 3, сложно получить низкие дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб (FSE) при опробовании хвостов до и после истирания. Общая фундаментальная погрешность отбора проб для материала -2,5 мм рассчитывается в соответствии с уравнением (4). Она зависит от индивидуальных погрешностей пробирного анализа концентрата и хвостов, а также от распределения золота между концентратом и хвостами, и от гранулометрического распределения золота. Это приводит к тому, что, например, низкий уровень достоверности (высокая дисперсия) пробирного анализа хвостов может обладать незначительным влиянием на общее значение фундаментальной погрешности отбора проб, как в случае с Пробой №1, или приводить к существенным последствиям, как в случае с Пробой №5. И наоборот, очевидно более высокий уровень достоверности (низкая дисперсия) пробирного анализа концентрата и хвостов в случае Пробой №2 формирует большую погрешность (в сравнении с Пробой №1).

Что касается отсева, преимущество использования концентрации в сравнении с более консервативной процедурой, основанной на измельчении и сокращении массы проб, может быть легко показано путем расчета фундаментальной погрешности отбора проб для такой процедуры.

Таблица 3. Фундаментальная погрешность отбора проб (FSE) для отбора подпроб после рассева и концентрации на примере различных отвалов хвостов шлюзов.

	Проба №1	Проба №2	Проба №5	Проба №6
Отбор проб просеянного материала				
Масса материала –2.5 мм (кг)	109	104	61.6	117
Масса для концентрации (кг)	27.1	25.9	15.4	29.3
Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	1840	21	2800	698
Отбор проб концентрата				
Масса концентрата (кг)	0.60	0.31	1.32	2.4
Масса концентрата на истирание (кг)	0.60	0.31	1	1
Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	0	0	1610	2470
Отбор проб для пробирного анализа концентрата^а				
Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	988	80	8840	4460
Отбор проб хвостов				
Масса хвостов (кг)	26.5	25.6	14.1	27.0
Масса хвостов на истирание (кг)	1	1	1	1
Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	36100	47100	52700	33600
Отбор проб для пробирного анализа хвостов^а				
Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	368000	16700	171000	92400
FSE по уравнению (4)				
Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	5710	46860	287000	31200
Полная дисперсия^б FSE				
Дисперсия ($\times 10^{-6}$)	8290	46930	291000	32200
Погрешность (95% доверия)	17.9%	42.5%	106%	35.2%

^аМасса пробы для пробирного анализа составляет 50 г.

^бВключает дисперсию фундаментальной погрешности первичного отбора проб в соответствии с Таблицей 2.

ПРЕДЛОЖЕННАЯ ПРОЦЕДУРА ДЛЯ ОТБОРА ПРОБ И ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ РОССЫПНОГО ЗОЛОТА

Подводя итоги расчетов для различных типов материала хвостов шлюзов, составление обобщенной процедуры отбора проб, которую можно было бы применить независимо от гранулометрического распределения песков и, прежде всего, от гранулометрического распределения золота, представляется сложной задачей. Тем не менее, последние стадии использованной при выполнении исследования процедуры – отбора проб концентрата и хвостов на пробирный анализ – определенно требуется улучшить, чтобы снизить дисперсию компонентов фундаментальной погрешности отбора проб для измерения содержания золота в подрешетной фракции материала. Применение пробирного анализа с рассевом на меньшем сите (106 мкм или 75 мкм вместо 125 мкм) представляется абсолютно необходимым. Кроме этого, применение более эффективного концентрационного оборудования, например, центробежного концентратора, может сократить долю золота в хвостах (а значит и ее влияние на полную погрешность) и количество концентрата, что обеспечит возможность истирания всей его массы.

При определении требуемой массы первичной пробы необходимо учитывать гранулометрическое распределение песков. Его легко можно будет скорректировать, поскольку размеры и доля крупных частиц могут быть оценены визуально. Влияние содержания золота и гранулометрического распределения частиц золота сложно оценить до проведения измерений. В этой части могут быть

сделаны только предположения, основанные на известных данных по процессу формирования хвостов (шлюзов). Масса в 200 кг представляется достаточной, если до шлюза материал классифицировался на решетке и крупность материала меньше 25 мм. Если встречаются частицы крупнее 50 мм, предпочтительнее увеличить массу пробы до 500 кг. В этом случае необходимо грохочение и промежуточное деление подрешетного продукта.

Рассев на 2,5 мм представляется разумным компромиссом между максимальным размером питания, который позволит обеспечить хорошую эффективность обогащения на концентрационном столе, и сложностью рассева большого количества материала следующими мелкими ситами. Тем не менее, если доля подрешетного материала превышает 50%, рассев лучше делать на 1 мм для сокращения количества материала на концентрацию. Такая же классификация на 1 мм должна выполняться и при использовании центробежного концентратора. Класс 1-2,5 мм необходимо промыть в лотке для контроля отсутствия крупного золота. Подрешетный материал может быть разделен, но вторичная проба на концентрацию должна составлять не менее 30-60 кг. Если есть подозрение на наличие крупного золота (крупнее 500 мкм), это количество необходимо увеличить.

Поскольку в рамках исследования множество площадок было оборудовано концентрационным столом, этот вариант был предпочтительным. В таком случае оборудование должно быть настроено в большей степени на максимизацию извлечения, чем на концентрацию. Целью является минимизация числа частиц золота, уходящих в хвосты. Если количество концентрата стола слишком большое, его можно переработать повторно, что будет благоприятствовать концентрации. При этом хвосты такой доводки должны анализироваться отдельно. При концентрации необходимо пристальное наблюдение за процессом для контроля наличия крупного золота (+250 мкм) и случаев проскока мелких частиц золота в хвосты.

Первые хвосты (как и вторые в случае доводки первого концентрата) должны быть классифицированы на 1 мм и, возможно, на 500 мкм, если это существенно снизит массу для анализа. Надрешетные пески должны быть промыты в лотке для контроля отсутствия крупного золота. Подрешетный материал делится и повторно классифицируется на 500 мкм или 250 мкм с схожей отработкой надрешетных песков. Итоговый подрешетный материал подлежит сушке и делению для получения пробы в 1-2 кг на истирание до -106 мкм. Если при классификации полученного после истирания материала в надрешетном продукте есть частицы золота, требуется выполнение пробирного анализа с рассевом. Подрешетный порошок далее делится для отбора 30 г или 50 г на обыкновенный пробирный анализ.

Концентрат (второй в случае доводки первого) необходимо классифицировать на 500 мкм. Надрешетный продукт требуется промыть в лотке для контроля отсутствия крупного золота или золотосодержащих минералов. При их наличии, продукт лотка следует взвесить и выполнить анализ. Подрешетный продукт -500 мкм следует высушить и, если его масса превышает 4 кг, разделить. После чего направить на истирание до -106 мкм для пробирного анализа с рассевом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка содержания золота в бедных россыпях или в хвостах их обогащения на шлюзах требует отбора множества объемных проб. Поскольку такие пробы невозможно отработать в полном объеме путем измельчения, для сокращения количества материала на итоговый анализ необходимо использовать стадии концентрации (классификации или гравитационной концентрации).

Целью измерений, выполненных в рамках настоящего исследования, было обоснование разработки новых россыпей или переработки хвостов уже отработанных участков. Полученные характеристики материалов были использованы для построения моделей неоднородности с целью расчета компонентов дисперсии полной фундаментальной погрешности отбора проб. Результаты

апостериори показали относительно низкую точность оценки общего содержания золота. С точки зрения фактических условий труда на предприятиях, такой уровень точности представлялся удовлетворительным и доводка, выполненная после исследования, дала ожидаемое извлечение золота. Тем не менее, с учетом результатов настоящего исследования, была предложена улучшенная процедура отбора проб. Теперь она должна быть проверена с целью количественной оценки дисперсии полной погрешности измерения по новой процедуре.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. J.M. West, How to Mine and Prospect for Placer Gold. Information Circular 8517, US Bureau of Mines, Washington (1971).
2. G. Beaudoin, "Gold Test on the Toson Terrace Placer, Zaamar Goldfield of Mongolia", World Placer Journal. 1, 1–9 (2000). http://www.mine.mn/WPJ1_1_1-9_placer_test.pdf
3. P. Gy, L'échantillonnage des minerais en vrac. Tome 1 – Théorie générale. Mémoires du BRGM, N°56, Paris (1967).
4. P. Gy, L'échantillonnage des minerais en vrac. Tome 2 – Théorie générale, erreurs opératoires, compléments. Mémoires du BRGM, N°67, Paris (1971).
5. F.F. Pitard, Pierre Gy's Theory of Sampling and C.O. Ingamells' Poisson Process Approach, pathways to representative sampling and appropriate industrial standards. Doctoral thesis, Aalborg University, Denmark (2009).
6. S. Brochot, "Sampling for grinding pilot plant test: the effect of size distribution variability", in Proceedings of the Sampling2012 Conference, AusIMM, Perth, Western Australia, Australia, 27–28 August, pp. 127–134 (2012).
7. S. Brochot, "Application of sampling theory to optimal design of size distribution measurement procedures", in Proceedings of the Sixth World Conference on Sampling and Blending, Ed by J. Beniscelli, J. Felipe Costa, O. Domínguez, S. Duggan, K. Esbensen, G. Lyman, B. Sanfurgo. Gecamin, Santiago de Chile, pp. 129–140 (2013).
8. P. Gy, Sampling of Particulate Materials, Theory and Practice. Elsevier, Amsterdam (1979).
9. P. Gy, Hétérogénéité, Echantillonnage, Homogénéisation, Ensemble cohérent de théories. Masson, Paris (1988).
10. F.F. Pitard and D. Stevens, "The development of a solution to the sample preparation of coarse gold samples", in Proceedings Fifth World Conference on Sampling and Blending, Ed by M. Alfaro, E. Magri, F. Pitard. Gecamin, Santiago de Chile, pp. 331–344 (2011).
11. Ph. Wavrer, P. Botane and S. Brochot, "Sampling protocol design for characterization of plastics from small WEEE", in Proceedings of the Sixth World Conference on Sampling and Blending, Ed by J. Beniscelli,
12. J. Felipe Costa, O. Domínguez, S. Duggan, K. Esbensen, G. Lyman, B. Sanfurgo. Gecamin, Santiago de Chile, pp. 143–152 (2013).
13. G. Wardell-Johnson, A. Bax, W.P. Staunton, J. McGrath and J.J. Eksteen, "A Decade of Gravity Gold Recovery", in Proceedings of the World gold Conference, AusIMM, Brisbane, Queensland, Australia, 26–29 September, pp. 225–232 (2013).
14. S. Brochot, "Standard Fire Assay or Screen Fire Assay? Application of the overall measurement error approach to choose the most appropriate method", in Proceedings of the Sampling2012 Conference. AusIMM, Perth, Western Australia, Australia, pp. 135–142 (2012).