

# Как расчет погрешностей отбора проб может улучшить измерительную систему фабрики для обогащения хромовых руд

Стефан Брошо<sup>1</sup>, Филипп Вавре<sup>1</sup>, Сергей Опанасенко<sup>2</sup>  
Caspeo, SARL, ул. Авеню Клода Гиймен, 3, г. Орлеан, Франция  
НИИЦ ERG, Пр. Кабанбай Батыра, 30А, г. Нур-Султан, Казахстан  
Труды конференции WCSB9, г. Пекин, Китай, Май 2019

## АННОТАЦИЯ

Для оценки показателей производительности и составления отчета по учету металлов на фабрике для обогащения хромовых руд компании ERG выполняется множество индивидуальных измерений различных потоков. В дополнение к измерению расходов, отбираются многочисленные пробы для определения содержания, в основном оксида хрома Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Точность этих измерений является одним из основных факторов достоверности расчетных значений производительности предприятия и, что более важно, учета металлов. Постоянное улучшение измерительной системы является единственным способом улучшения производства за счет обеспечения процесса более достоверными данными. Расчет погрешностей измерения, включая погрешность отбора проб, позволяет оценить уровень достоверности каждого измерения в том виде, в котором оно выполняется сейчас, и улучшить измерительные процедуры и практики.

Из всех компонентов полной погрешности измерения, погрешность отбора проб, или, более точно, фундаментальная погрешность отбора проб, как правило является наибольшим. В соответствии с Теорией отбора проб, дисперсия этого компонента пропорциональна обратной величине массы пробы и внутренней неоднородности (И), которая оценивается на основании модели неоднородности, описывающей неоднородность руды в той мере, в которой это возможно. Такая модель может быть составлена на основе данных из различных источников включая геологическое описание месторождения, минералогические исследования или производственные данные.

Настоящая статья описывает способы использования такой информации для составления соответствующей модели и применения такой модели для расчета внутренней неоднородности каждого шага процедуры отбора проб и, как следствие, для расчета полной погрешности измерения. Тот же подход используется для изменения процедуры отбора проб с целью улучшения измерения. Подход проиллюстрирован на примере нескольких потоков.

Ключевые слова: погрешность измерения, процедура отбора проб, раскрытие минералов, хромовые руды, учет металлов

## ВВЕДЕНИЕ

Eurasian Resources Group SARL («ERG», Евразийская Группа), зарегистрированная в Люксембурге, является лидирующей многопрофильной промышленной компанией, включающей горнодобывающую, обогатительную, металлургическую, энергетическую, логистическую и маркетинговую деятельность. Сегодня ERG является крупнейшим мировым производителем феррохрома по содержанию хрома, одним из основных поставщиков железной руды, глинозема и алюминия в СНГ, и крупным производителем меди и кобальта за счет предприятий в Африке. Евразийская Группа обладает активами в 15 странах на четырех континентах, являясь одним из ведущих работодателей в отрасли. В мировых масштабах общее число сотрудников группы составляет 85 000 человек.

В Республике Казахстан компания всегда была опорой экономического роста и социального развития. Сегодня ERG представляет около одной трети горнометаллургической промышленности

страны, является основным поставщиком электричества, управляет широкой железнодорожной сетью в Центральной Азии.

АО «ТНК «Казхром» является полностью интегрированной горнометаллургической компанией, которая занимается широким спектром направлений, начиная геологоразведкой, добычей и обогащением руд, и заканчивая производством металлургической продукции с высокой добавочной стоимостью. Донской горно-обогатительный комбинат («ДГОК») является одним из предприятий АО «ТНК «Казхром». Запущенный в 1938 году, комбинат на сегодняшний день обрабатывает 3,7 млн. т в год хромовой руды, добытой на двух подземных рудниках, расположенных вблизи г. Хромтау в Актюбинской области. 70% руды поставляется на ферросплавные заводы ERG в г. Аксу и г. Актобе, которые, совместно с ДГОК и предприятием Казмарганец, формируют интегрированную производственную цепочку.

ДГОК производит два типа руд: богатые товарные руды и бедные руды. Богатые товарные руды классифицируются и напрямую направляются на пирометаллургические заводы. Бедные руды концентрируются на трех обогатительных фабриках. Мелкий концентрат обрабатывается двумя фабриками окомкования. Поэтому измерение качества руд играет ключевую роль в управлении комбинатом. Для определения производительности предприятия и снижения потерь, необходимо не только определять тип руд, извлекаемых в рудниках, и, как следствие, выбирать подходящую производственную цепочку, но и следить за качеством продукта по всему технологическому процессу. Помимо этого, улучшение измерений было предпосылкой к внедрению системы учета металлов.

Основным источником погрешности измерения как правило является отбор проб. Одним из основных компонентов погрешности отбора проб является фундаментальная погрешность отбора проб, дисперсия которой, в соответствии с Теорией отбора проб, пропорциональна обратной величине массы пробы и внутренней неоднородности материала (И). Последняя может быть оценена на основании модели неоднородности, описывающей неоднородность руды в той мере, в которой это возможно. Такая модель может быть составлена на основе данных из различных источников включая геологическое описание месторождения, минералогические исследования или производственные данные.

## **ХРОМОВЫЕ РУДЫ И ИХ ОБОГАЩЕНИЕ**

### **Хромовая руда**

Ценным минералом руд является хромшпинель  $(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)_2O_4$ , представляющая собой твердый раствор хромита  $FeCr_2O_4$ , шпинели  $MgAl_2O_4$  и магнезиохромита  $MgCr_2O_4$ . Согласно минералогических исследований, среднее содержание  $Cr_2O_3$  в хромшпинели составляло 62,22%. Доля других включающих минералов, таких, как уваровит, была достаточно мала, чтобы ими можно было пренебречь.

Зерна и агломераты хромшпинели различных размеров в основном были цементированы серпентинитом  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ . Рисунок 1 показывает пример частицы руды (Kosanova, 2011).

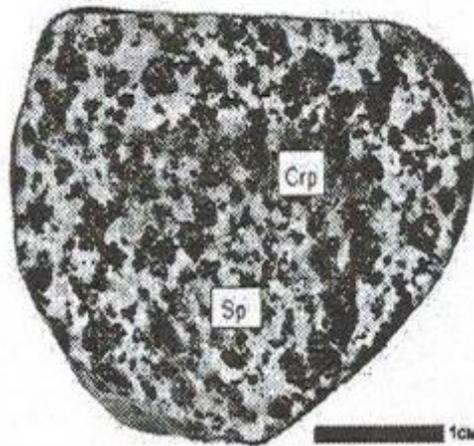


Рисунок 1. Снимок частицы руды, показывающий хромшпинелид (Crp) и серпентинит (Sp) из Kosanova, 2011.

Геологами были определены четыре типа руд: сплошные, густовкрапленные, средневкрапленные и редковкрапленные. Они соответствовали различным долям хромшпинели, а также различной крупности минеральных зерен.

Сплошные руды были близки к тому, чтобы быть чистой хромшпинелью с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в диапазоне 58-62%. Минеральные зерна были крупными, в основном крупнее 1 мм, с значительной долей зерен крупнее 5 мм.

Густовкрапленные, средневкрапленные и редковкрапленные обладали содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в диапазонах 50-58%, 38-50% и 25-38% соответственно. От типа к типу, размер зерен в них снижался, доля класса -1 мм увеличивалась, доля класса +5мм уменьшалась.

Руда с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  менее 25% считалась бедной.

Классификация руд на богатые товарные руды, бедные руды на концентрацию и отходы осуществлялась при добыче. Тем не менее, случалось разбавление бедной рудой или отходами, что необходимо учитывать при разработке процедуры отбора проб.

### **Дробление**

ДГОК включает две дробильные фабрики для отработки рядовой руды. Обе производили класс -160 мм, который затем классифицировался на 0-10 мм и 10-160 мм.

При отработке богатых товарных руд, оба продукта складировали и затем загружали в вагоны. Класс 0-10 мм также мог идти на окомкование. Отбор проб производили для каждого продукта.

При отработке бедных руд, оба продукта направляли на обогатительные фабрики для крупных и мелких классов.

### **Обогатительные фабрики**

Все обогатительные фабрики начинали с классификации дробленого материала. Крупные классы (10-160 мм) шли на обогащение в тяжелых средах в барабанных или колесных сепараторах. Мелкие классы (0-10 мм) классифицировали в 0-X мм и X-10 мм, где X составлял 1, 2, 3 мм в зависимости от нитки технологического процесса. Класс X-10 мм обрабатывали на отсадочных машинах, 0-X мм – на спиральных концентраторах. Концентрат X-10 мм классифицировали на 5 мм. Затем концентрат

5-10мм отгружали как товарную продукцию, а 0-5 мм объединяли с концентратом 0-Х мм и направляли на питание фабрик окомкования.

Большую часть проб отбирали вручную с разгрузки обезвоживающих грохотов после барабанных сепараторов и отсадочных машин. Ряд проб отбирали вручную с лент конвейеров. На одной из фабрик для обогащения мелких классов работали три автоматических пересечных пробоотборника.

### **Фабрики окомкования**

ДГОК включает две фабрики для производства окатышей. В качестве питания фабрики получают концентраты 0-5 мм, которые затем в мельницах смешивают с связующими добавками, после чего подают на фильтрацию и агломерацию. Влажные окатыши ожидаемых размеров подлежат сушке и обжигу в печи для производства товарных окатышей.

Все пробы отбирают вручную с лент конвейеров и разгрузки дисковых фильтров.

### **МОДЕЛЬ НЕОДНОРОДНОСТИ**

Базовые формулы Теории отбора проб (Gu, 1967, 1971, 1979, 1988; 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 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 (Gu, 1979, 1988; Pitard, 2009). 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 (Wavrer, 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, 2013).

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; Brochot, Schroeder and Wavrer, 2019). В Таблице 1 приведены использованные в исследовании классы крупности и соответствующие средние размеры частиц для расчета массы.

Таблица 1. Классы крупности.

Семейство (класс крупности), мм	Минимальный размер, мм	Максимальный размер, мм	Средний размер, мм
+120	120	160	138,564
-120+100	100	120	109,545
-100+80	80	100	89,443
-80+40	40	80	56,569
-40+20	20	40	28,284
-20+16	16	20	17,889
-16+13	13	16	14,422
-13+10	10	13	11,402
-10+5	5	10	7,071
-5+3	3	5	3,873
-3+2	2	3	2,449
-2+1	1	2	1,414
-1+0,5	0,5	1	0,707
-0,5+0,16	0,16	0,5	0,283
-0,16+0,071	0,071	0,16	0,107
-0,071	0	0,071	0,036

Хотя рисунок 1 показывает относительно однородное распределение хромшпинели в серпентините, в общем случае это не так вследствие присутствия различных типов руд (сплошных, густовкрапленных, средневкрапленных и редковкрапленных) и в силу разбавления бедными рудами и отходами. Кроме этого, как показано на рисунке 2, в множестве случаев содержание хрома зависит от размера частиц.

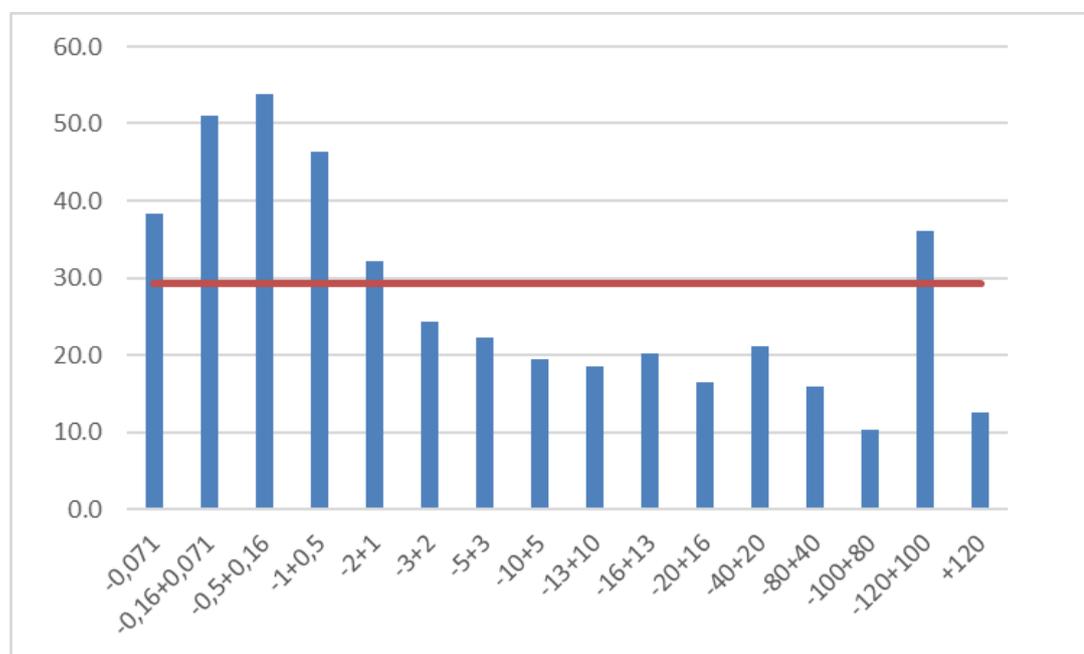


Рисунок 2. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по классам крупности. Красная линия соответствует среднему содержанию Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Все эти наблюдения работают против применения упрощенной формулы Пьера Ги для расчета относительной дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб. Поэтому для расчета такой дисперсии для измерения содержания ценного компонента  $a_L$  в партии (лоте) необходимо использовать общую формулу, задаваемую уравнением (1).

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

Где  $M_S$  это масса пробы,  $M_L$  – масса партии (лота). Семейства частиц  $N_F$ , нумеруемые индексами  $i$ , 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).

Для каждого класса крупности были рассмотрены различные виды частиц:

- Раскрытый хромшпинелид: раскрытые частицы хромшпинели, состоящие только из минерала хромшпинели с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в 62.22%;
- Раскрытый серпентинит: раскрытые частицы серпентинита, состоящие из минералов пустой породы (в основном серпентинита) без хромита (0%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ );
- Смешанные руды: смешанные частицы, состоящие из хромита и пустых минералов с долей хромита, зависящей от типа руд (сплошных, густовкрапленных, средневкрапленных и редковкрапленных).

Вместе с 16ю классами крупности получили 48 семейств частиц.

Для самых мелких классов, размер которых меньше размера минеральных зерен (верхняя граница класса крупности меньше или равна среднему размеру зерен), можно рассматривать только раскрытые частицы (Раскрытый хромшпинелид или Раскрытый серпентинит). Долю каждого из них рассчитывали из содержания хромита в классе. Предположение о присутствии только раскрытых частиц может привести к небольшой переоценке дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб (FSE). При этом для крупного материала влияние на FSE незначительное, а для мелкого такое предположение будут обладать незначительным влиянием на полную погрешность измерения.

Для крупнейших классов, размер которых значительно превышает размер минеральных зерен (нижняя граница класса крупности больше или равна четырехкратному среднему размеру зерен), можно рассматривать только смешанные частицы (Смешанные руды) и частицы пустой породы (Раскрытый серпентинит). Вторые представляли собой разбавляющий материал во всех классах крупности. Такое предположение может привести к переоценке дисперсии FSE, если присутствуют частицы с промежуточным содержанием хромита, и к ее недооценке, если присутствуют частицы с высоким содержанием хромита. Поэтому такое предположение представилось хорошим компромиссом.

Для промежуточных классов крупности могут быть рассмотрены все три типа частиц, но их пропорции невозможно рассчитать только из содержания хромита в классах крупности. Поэтому необходимо сделать дополнительное предположение о разделении хромшпинели на две равные части: половину в Раскрытый хромшпинелид, половину в Смешанные руды.

Средний размер зерен также зависит от типа руд. Он был оценен в 5 мм для сплошных руд и в 2 мм для остальных типов. Предположение об отсутствии раскрытия в случае, если размер частицы больше, чем четырехкратный размер зерен, было сделано, чтобы исключить недооценку и переоценку дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб.

В каждой точке отбора проб, для определения среднего гранулометрического распределения и содержания в каждом классе крупности, использовались данные прошедших генеральных опробований (точка отбора проб определялась расположением средств для отбора проб и типом опробуемого материала – действительно, некоторые средства использовались для опробования различных типов материала). Если тип руд был известен, его среднее содержание использовалось в качестве содержания в частицах Смешанных руд. Если не известен, принимался тип руд с

содержанием чуть бóльшим, чем содержание в опробуемом материале. Поскольку содержание в типе руд всегда выше, чем содержание в опробуемом материале, разница происходит от разбавления. Управление рудником пыталось минимизировать разбавление, тип руд выбирался соответственно.

## РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

В предыдущем разделе был показан процесс составления модели неоднородности, которая затем была использована для расчета дисперсии фундаментальной погрешности отбора проб (FSE). Вместе с тем, это всего лишь один из компонентов полной погрешности отбора проб. Дисперсия погрешности объединения и сегрегации (GSE), являясь пропорциональной FSE, как правило принимается равной дисперсии FSE. Вдвоем они составляют погрешность краткосрочной интеграции процессов (PIE<sub>1</sub>). Погрешность долгосрочной интеграции процессов (PIE<sub>2</sub>) не учитывалась в данной работе ввиду отсутствия данных для вариограммного анализа. Другие компоненты погрешности также не рассчитывались, и могли быть нивелированы путем применения лучших практик при отборе и подготовке проб. Относительные дисперсии погрешности объединения и сегрегации и фундаментальной погрешности отбора проб были посчитаны не только для первичного отбора проб, но также и для последующих отборов после каждого этапа измельчения в рамках процедур пробоподготовки.

### Процедуры подготовки проб

Для крупных материалов с верхней границей размеров в 300 мм или в 160 мм проводился первичный отбор для получения составной пробы в 32 кг или в 100 кг, в зависимости от ожидаемого уровня точности. Полученную пробу затем дробили до -20 мм. В силу отсутствия данных гранулометрического распределения дробленой пробы, было использовано гранулометрическое распределение для классов 0-20 мм исходной пробы. Содержание хромшпинели в каждом классе крупности в диапазоне 0-20 мм корректировалось для достижения общего содержания в материале. Модель неоднородности измельченного материала составлялась тем же способом, что и для первичного опробования. В рамках вторичного опробования отбирали 4 кг (20 кг) от первичных 32 кг (100 кг).

Вторичные пробы крупного материала или первичные пробы материала мельче 20 мм дробили до -10 мм. Три дальнейшие стадии сокращения размеров с последующим опробованием выполнялись путем дробления до -3 мм, измельчения до -500 мкм и истирания до -160 мкм. Модель неоднородности была составлена описанным выше способом для каждой такой стадии сокращения размеров.

### Химический анализ

Итоговая проба на анализ массой 0,2 г отбиралась от 100 г, истертых до -160 мкм, путем вычерпывания. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> измерялось титрованием. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в таком случае является функцией:

- Веса пробы (г):  $g_1$
- Объем использованного раствора для титрования (см<sup>3</sup>):  $V_1$
- Веса стандартного образца (г):  $g_2$
- Содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в стандартном образце (%):  $C_{SS}$
- Объем раствора для титрования, использованного для стандартного образца (см<sup>3</sup>):  $V_2$

Содержание хрома затем рассчитывалось по следующей формуле

$$X = C_{SS} \frac{g_2 V_1}{V_2 g_1} \quad (2)$$

Дисперсия относительной погрешности содержания хрома это сумма дисперсий относительных погрешностей измерений массы и объема (независимые события), а также точности стандартного образца:

$$\sigma^2(X) = \sigma^2(V_1) + \sigma^2(V_2) + \sigma^2(g_1) + \sigma^2(g_2) + \sigma^2(C_{SS}) \quad (3)$$

Учитывая различные источники погрешности для весов, использованных для взвешивания пробы, и для бюретки, использованной для объема раствора для титрования, возможно рассчитать аналитическую погрешность (АЕ) для различных содержаний хрома (см. рисунок 3).

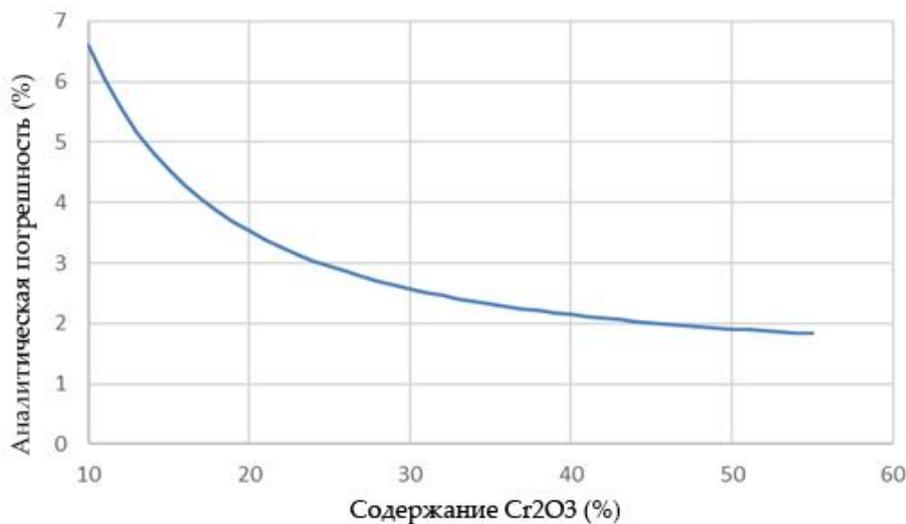


Рисунок 3. Аналитическая погрешность при измерении титрованием зависит от содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Бюджет неопределенности

Бюджет неопределенности представляет собой перечень всех источников неопределенности с расчетными значениями дисперсии соответствующих компонентов погрешности. В нашем случае рассматривали следующие компоненты:

- фундаментальную погрешность отбора проб (FSE) для первичной пробы;
- погрешность объединения и сегрегации (GSE) для первичной пробы;
- FSE отбора проб в рамках пробоподготовки: после сокращения до -20 мм, -10 мм, -3 мм, -500 мкм и -160 мкм, если такие сокращения выполнялись;
- GSE отбора проб в рамках этих же этапов пробоподготовки;
- аналитическую погрешность (АЕ).

Погрешности, связанные с ошибками выполнения и в целом неправильными процедурами отбора проб на химический анализ, невозможно было посчитать и потому они не были учтены в этом перечне.

GSE принималась равной FSE для каждого этапа отбора проб.

Погрешность была посчитана как  $1,96$  x стандартное отклонение (с учетом доверительной вероятности в 95% при нормальном распределении), которое само по себе рассчитывается как корень квадратный из дисперсии. Бюджет неопределенности показывает такую погрешность для каждого этапа или каждого компонента полной погрешности. Распределение дисперсий различных этапов отбора проб также дает хорошее представление о качестве процедур.

Такие бюджеты неопределенности были составлены для измерения содержания влаги, измерения содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и расчетной массы металла. Настоящая статья ограничится представлением бюджета неопределенности измерений содержания хрома.

## ПРИМЕНЕНИЕ К ДВУМ ПРОДУКТАМ

Хотя в рамках работы бюджеты неопределенности были составлены для большинства точек отбора проб, настоящая статья представит только два случая, соответствующих ключевым продуктам:

- для богатой товарной руды;
- для мелких хвостов одного из циклов гравитационного обогащения.

### Отбор проб богатой руды

Один из рудников ДГОК выдавал богатую руду, которая затем подлежала грохочению на 160 мм и 10 мм. Фракция 10-160 мм содержала 46% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Она относилась к типу густовкрапленных руд и обладала разбавлением, оцененным в 15%. Первичную пробу в 100 кг отбирали для контроля содержания до ее отгрузки в качестве богатой товарной руды. Погрешность такого первичного отбора пробы (ограниченная фундаментальной погрешностью отбора проб FSE и погрешностью объединения и сегрегации GSE) была посчитана на уровне 11,2%. Пробу затем 5 раз измельчали (до -20 мм, -10 мм, -3 мм, -0,5 мм, -0,16 мм) с отбором подпроб между каждой стадией измельчения. Полная погрешность отбора таких подпроб была посчитана на уровне 1,61%. В завершении, аналитическая погрешность (AE) составила 2,02%. Полная погрешность измерения содержания хрома в таком случае составила 11,5%. Подробный бюджет неопределенности этого измерения представлен в Таблице 2.

Таблица 2. Бюджет неопределенности измерения содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в богатой руде.

Компонент погрешности	Погрешность	Распределение (доля от полной погрешности измерения)
<b>Погрешность первичного отбора проб</b>		
FSE	7.9 %	47.5 %
GSE	7.9 %	47.5 %
<b>ИТОГО</b>	<b>11.2 %</b>	<b>94.9 %</b>
<b>Пробоподготовка: погрешность этапов 2 - 6</b>		
FSE 2	0.63 %	0.31 %
GSE 2	0.63 %	0.31 %
FSE 3	0.87 %	0.59 %
GSE 3	0.87 %	0.59 %
FSE 4	0.24 %	0.04 %
GSE 4	0.24 %	0.04 %
FSE 5	0.04 %	0.001 %
GSE 5	0.04 %	0.001 %
FSE 6	0.25 %	0.05 %
GSE 6	0.25 %	0.05 %
<b>ИТОГО</b>	<b>1.61 %</b>	<b>1.97 %</b>
<b>Аналитическая погрешность</b>		
AE	2.02 %	3.11 %
<b>Полная погрешность измерения</b>		
ME	11.5 %	100 %

Распределение дисперсий (Таблица 2 и рисунок 4) показало значительный вклад первичного отбора проб в полную погрешность измерения (94,9%), в то время, как все последующие этапы пробоподготовки давали всего лишь 2,0%, а аналитическая погрешность – 3,1%. Очевидно наличие значительной диспропорции между отбором первичной и всех остальных проб.

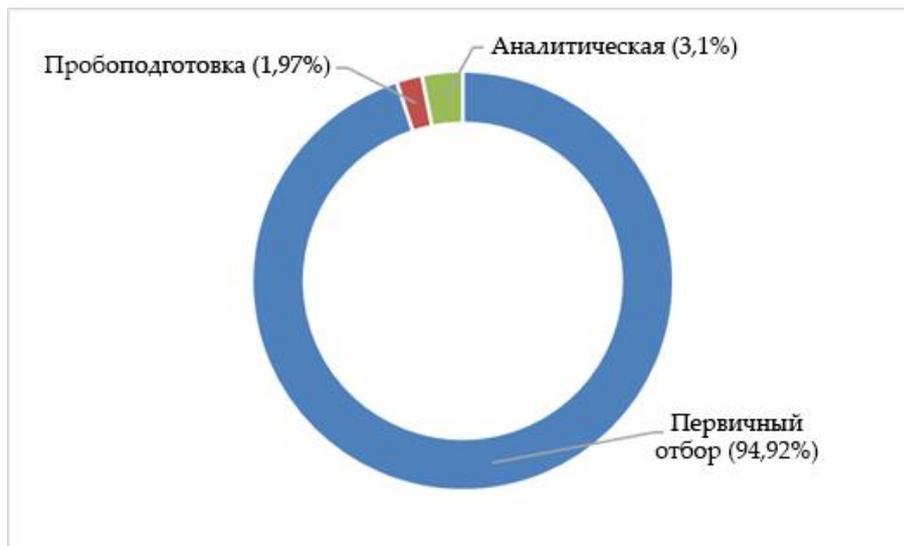


Рисунок 4. Распределение дисперсий погрешностей первичного отбора, пробоподготовки и аналитической погрешности для богатой руды.

Общее правило заключается в том, чтобы обеспечить снижение вклада погрешностей этапов в полную погрешность измерения по мере продвижения по процедуре, чтобы вклад каждой следующей стадии составлял половину от вклада предыдущей. Рисунок 5 показывает, что это правило не соблюдалось для этапов пробоподготовки (2-6). Для сокращения полной погрешности измерения содержания хрома и балансировки в смысле описанного выше правила процедуры отбора проб, возможно отбирать пробу большей массы, сократить число этапов пробоподготовки с корректировкой размеров измельчения и масс промежуточных проб.

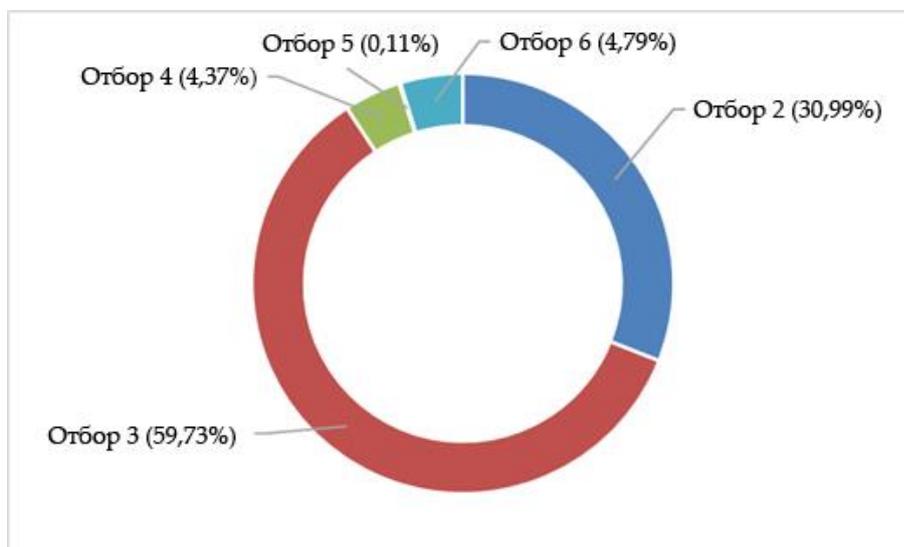


Рисунок 5. Распределение дисперсий компонентов полной погрешности отбора проб, соответствующих 2-6 этапам пробоподготовки для богатой руды.

#### Отбор проб хвостов гравитационного обогащения.

Одна из фабрик ДГОК обрабатывала бедные руды 0-10 мм путем гравитационного обогащения и производила хвосты 2-10 мм, пробы которых отбирали для оценки потерь хрома. Этот поток содержал 10,0% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Первичная проба на содержание составляла 12,5 кг. Погрешность такого отбора (ограниченная фундаментальной погрешностью отбора проб FSE и погрешностью объединения и сегрегации GSE) составила 4,6%. Пробу затем измельчали 4 раза (до -10 мм, -3 мм, -0,5 мм, -0,16 мм) с отбором подпроб между каждой стадией измельчения. Полная погрешность отбора таких подпроб была посчитана на уровне 4,4%. Аналитическая погрешность (AE) составила

3,3%. Полная погрешность измерения содержания хрома в таком случае составила 7,1%. Подробный бюджет неопределенности этого измерения представлен в Таблице 3.

Таблица 3. Бюджет неопределенности измерения содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в хвостах 2-10 мм.

Компонент погрешности	Погрешность	Распределение (доля от полной погрешности измерения)
<b>Погрешность первичного отбора проб</b>		
FSE	3.3 %	20.8 %
GSE	3.3 %	20.8 %
<b>ИТОГО</b>	<b>4.6 %</b>	<b>41.6 %</b>
<b>Пробоподготовка: погрешность этапов 2 - 5</b>		
FSE 2	2.61 %	13.6 %
GSE 2	2.61 %	13.6 %
FSE 3	0.84 %	1.39 %
GSE 3	0.84 %	1.39 %
FSE 4	0.19 %	0.07 %
GSE 4	0.19 %	0.07 %
FSE 5	1.35 %	3.6 %
GSE 5	1.35 %	3.6 %
<b>ИТОГО</b>	<b>4.33 %</b>	<b>37.2 %</b>
<b>Аналитическая погрешность</b>		
AE	3.28 %	21.3 %
<b>Полная погрешность измерения</b>		
ME	7.1 %	100 %

Распределение дисперсий (Таблица 3 и рисунок 6) показало относительно хороший баланс между погрешностью первичного отбора (41,6%) и погрешностью пробоподготовки (37,2%). Следуя основному правилу, описанному выше, аналитическая погрешность вносила вклад в размере 21,3%.

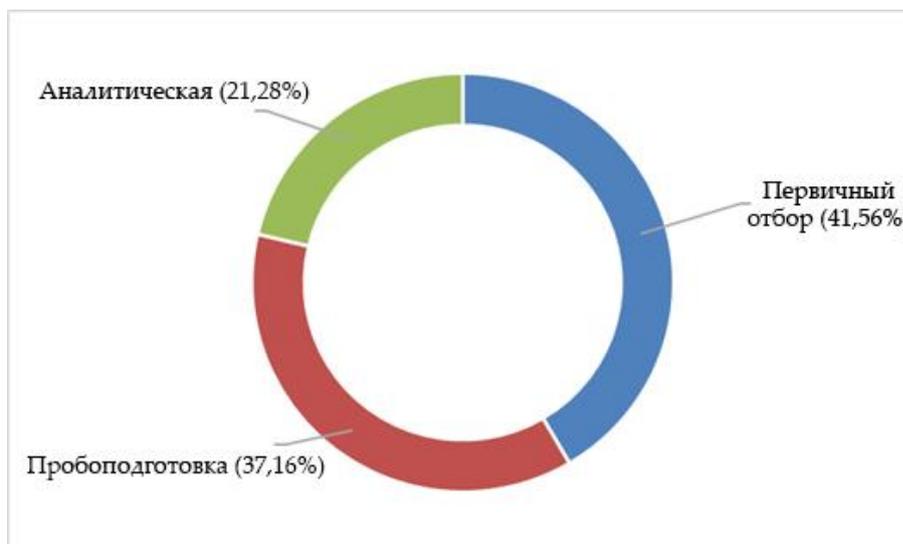


Рисунок 6. Распределение дисперсий погрешностей первичного отбора, пробоподготовки и аналитической погрешности для хвостов 2-10 мм.

Рисунок 7 показывает, что правило не выполнялось для отбора проб в рамках 2-5 этапов пробоподготовки. Для балансировки процедуры число стадий сокращения возможно уменьшить с корректировкой размеров измельчения и масс промежуточных проб, в особенности для последней стадии.

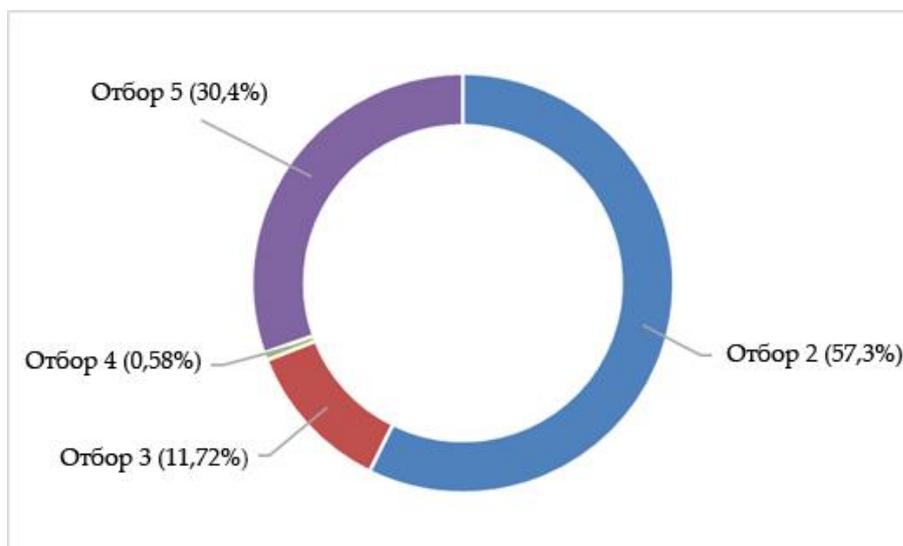


Рисунок 7. Распределение дисперсий компонентов полной погрешности отбора проб, соответствующих 2-5 этапам пробоподготовки для хвостов 2-10 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет полной погрешности измерения и составление бюджетов неопределенности является ключевым шагом процесса улучшения измерительной системы металлургического предприятия. Такая работа позволит выявить слабые места измерительной системы и сфокусироваться на улучшениях в тех из них, где это наиболее выгодно. Зная полные погрешности измерений, используемых для расчета ключевых показателей предприятия, становится возможным отличить действительно плохую производительность от эффекта, вызванного погрешностью измерения. В общем случае, улучшение измерительной системы ведет к улучшению производственных показателей.

Расчет погрешности отбора проб, которая является основным компонентом полной погрешности измерения, требует составления модели неоднородности для различных типов обрабатываемых материалов. Как было показано в настоящей статье, вся информация, использованная для составления таких моделей, уже была на руках у предприятия. Недостающую информацию заменили разумные предположения, проверить правильность которых возможно с помощью анализа чувствительности. Основной целью была оценка различных компонентов полной погрешности измерения и адаптация процедур отбора проб для достижения необходимого уровня точности.

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](mailto: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](mailto:sales@procsim.ru)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Brochot, S**, 2013. Application of sampling theory to optimal design of size distribution measurement procedures, in *Proceedings of the Sixth World Conference on Sampling and Blending* (ed: J Beniscelli, J Felipe Costa, O Domínguez, S Duggan, K Esbensen, G Lyman, B Sanfurgo), pp 129-140 (Gecamin: Santiago de Chile).

**Gy, P**, 1967. *L'échantillonnage des minerais en vrac. Tome 1 – Théorie générale*. Mémoires du BRGM, N°56 (Paris).

**Gy, P**, 1971. *L'échantillonnage des minerais en vrac. Tome 2 – Théorie générale, erreurs opératoires, compléments*. Mémoires du BRGM, N°67 (Paris).

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

**Gy, P**, 1988. *Hétérogénéité, Echantillonnage, Homogénéisation, Ensemble cohérent de théories* (Masson: Paris).

**Kosanova, G T**, 2011. The texture and the structure of chromite ores of Donskoy GOK, in *The papers of the 4th youth research to practice conference "The youth - the future of the company". November 17-18, 2011*, pp 165-177 (in Russian).

**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 thesis, Aalborg University, Denmark.

**Wavrer, Ph, Botané, P and Brochot, S**, 2013. Sampling protocol design for characterization of plastics from small WEEE, in *Proceedings of the Sixth World Conference on Sampling and Blending* (ed: J Beniscelli, J Felipe Costa, O Domínguez, S Duggan, K Esbensen, G Lyman, B Sanfurgo), pp 143-152 (Gecamin: Santiago de Chile).