

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ ПОТОЧНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ОПЕРАТИВНОГО ОПРОБОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

В.З. Козин¹, А.С. Комлев¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: tails2002@inbox.ru

Аннотация: Поточные анализаторы массовой доли компонентов руд и продуктов обогащения отличаются друг от друга разной чувствительностью и пределом применимости. Кроме того, необходима их градуировка, выполняемая обычно с помощью уравнений регрессии. Показано, что чувствительность и применимость анализаторов зависят от масс точечных проб и особенностей опробуемых продуктов. Анализаторы микроточечных проб могут быть применимы только для определения больших массовых долей компонентов. Анализаторы поверхностных проб обладают ограниченной применимостью при анализе низких массовых долей, но имеют высокую чувствительность и применимость для богатых руд. Анализаторы объемных проб применимы во всех случаях. Сопоставление показаний анализаторов с результатами анализа точечных проб, отбираемых способом поперечных сечений, в общем случае неэффективно, так как асимметрия распределений массовой доли в точечных пробах и различие дисперсий приводит к изменению углового коэффициента градуировочной характеристики. Неопределенность появления «всплесков» массовой доли приводит к постоянному изменению градуировочной характеристики и необходимости постоянной корректировки работы поточного анализатора. Устойчивыми являются средние значения массовых долей как по показаниям анализатора, так и по результатам анализа точечных проб, отобранных способом поперечных сечений. Эти данные следует использовать для градуировки анализаторов.

Ключевые слова: поточные анализаторы, правильное опробование, микроточечные пробы, поверхностные пробы, объемные пробы, градуировочная характеристика, средние результаты, чувствительность анализатора, уравнение регрессии.

Благодарность: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0833-2023-0004 в соответствии с государственным заданием для Уральского государственного горного университета.

Для цитирования: Козин В. З., Комлев А. С. Сопоставление показаний поточных анализаторов с результатами оперативного опробования продуктов обогательных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 125–135. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_125.

Comparison of continuous analyzer indications with point assaying data of products at processing plants

V.Z. Kozin¹, A.S. Komlev¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: tails2002@inbox.ru

Abstract: Continuous analyzers of mass fractions of ore constituents and processing products differ in sensitivity and application ranges. Furthermore, they require calibration using regression equations, as a rule. It is shown that sensitivity and applicability of analyzers depend on masses of point samples and on peculiarities of sampled products. Micropoint sample analyzers are only usable in determination of large mass fractions of ore constituents. Surface sample analyzers possess limited applicability in the analysis of low-mass fractions but offer high sensitivity and applicability for high-grade ores. Bulk sample analyzers are applicable at all times. The comparison of indications of analyzers with the data of point cross-sectional sampling is ineffective in a general case for the asymmetry of mass fraction distributions in point samples and different dispersions result in the change of the angular coefficient of calibration. The uncertainty of 'kicks' in mass fractions leads to the continuous variation in calibrations and to the need of continual adjustment of a continuous analyzer. Stability is an attribute of average values of mass fractions both for analyzers and for point samples from cross-sectional sampling. These average values are to be used in calibration of analyzers.

Key words: continuous analyzers, correct assaying, micropoint samples, surface samples, bulk samples, calibrations, average results, analyzer sensitivity, regression equations.

Acknowledgements: The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 0833-2023-0004 in accordance with the state assignment for the Ural State Mining University.

For citation: Kozin V. Z., Komlev A. S. Comparison of continuous analyzer indications with point assaying data of products at processing plants. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(3): 125-135. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_125.

Введение

Опробование руд и продуктов обогащения на обогатительных фабриках является необходимой технологией измерения массовых долей определяемых компонентов. Это многооперационная технология, включающая отбор точечных проб и формирование объединенных проб, многостадийную подготовку и анализ проб в лаборатории. Результат опробования получается через большой промежуток времени после отбора пробы, необходимый для выполнения всех операций [1].

В настоящее время имеются варианты выполнения опробования с помощью автоматических поточных анализаторов массовой доли компонентов непосредственно в опробуемых массивах. Такие анализаторы выполняют опробование без отбора и подготовки проб, что снижает

трудоемкость и продолжительность опробования [2].

В обогащении полезных ископаемых для поточного анализа минерального сырья используются:

- приборы, анализирующие микроточечные пробы (спектральные анализаторы на основе лазерного пробоя [3]);
- приборы, анализирующие поверхность опробуемого массива, площадь которой зависит от продолжительности анализа (оптические [4, 5] и рентгенофлуоресцентные анализаторы [6]);
- приборы, анализирующие объем опробуемого массива, величина которого зависит от продолжительности анализа (все виды активационного анализа [7], в том числе на основе линейных ускорителей электронов [8] или мощных рентгеновских трубок [9], тепловизоры, а также анализаторы массовых долей

минералов: атомно-абсорбционные [10] и магнитные [2, 11]).

Все названные приборы анализируют точечные пробы, которые физически не извлекаются из потока. Точечной пробой для них является масса материала, от которой анализатор получает сигнал, пересчитываемый в значение массовой доли определяемого компонента. Так как условия измерения в конкретной точке опробования зависят от особенностей установки анализатора и изменения гранулометрического и минерального состава, то необходимо получать градуировочные характеристики путем сопоставления показаний анализатора с результатами правильного опробования того же материала, обычно выполняемого способом поперечных сечений.

Анализаторы массовой доли в потоке материала анализируют точечные пробы, выделяемые (отбираемые) способом продольных сечений, которые сопоставляются с пробами, отбираемыми способом поперечных сечений (рис. 1).

Это означает, что сопоставляются результаты анализа двух принципиально отличающихся друг от друга точечных проб. Разные точечные пробы дадут разные оценки массовой доли. Это различие необходимо учитывать при любых

работах, связанных с поточными анализаторами.

Методы

Случайные погрешности поточных анализаторов зависят от метода измерения и условий применения анализаторов. Метод измерения определяет массу точечной пробы, которая может изменяться в большом диапазоне, а условия применения предопределяют как чувствительность прибора, так и погрешность, не связанную с определяемой массовой долей. Эта погрешность определяется влиянием гранулометрического состава, состояния поверхности слоя продукта, а также местом размещения прибора над опробуемым массивом. Перечисленные особенности использования поточных анализаторов непосредственно на опробуемых массивах не позволяют определить систематические и случайные погрешности результата путем обработки показаний самого прибора. Использование стандартных образцов руд и концентратов, применяемых в процедуре анализа подготовленных лабораторных проб, для поточных анализаторов невозможно. В результате на практике приходится сопоставлять показания поточных анализаторов с текущими резуль-

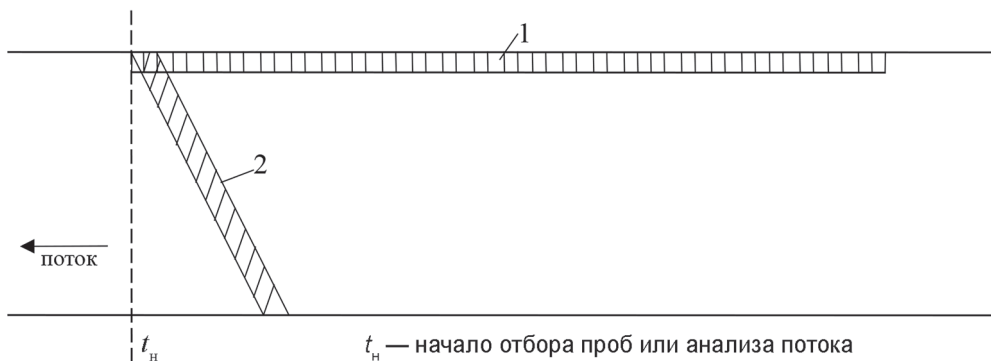


Рис. 1. Различие сопоставляемых точечных проб, анализируемых поточными анализаторами 1, и отбираемых способом поперечных сечений 2

Fig. 1. The difference between the compared point samples analyzed by flow analyzers 1 and those taken by the cross-section method 2

татами опробования. В таких условиях прямое сравнение отдельных точечных проб невозможно, так как случайные погрешности определения массовой доли достаточно велики. Поэтому приходится прибегать к получению серии парных определений массовой доли и нахождению теоретической линии регрессии. Эта линия регрессии применяется в качестве градуировочной характеристики. Коэффициенты линии регрессии зависят от числа парных определений, а также от нормальности распределений массовой доли в процессе получения градуировочной характеристики.

Сопоставление результатов анализа различных по способу отбора и по массе точечных проб существенно усложняет градуировку, вплоть до невозможности ее выполнения, особенно в условиях приближения измеряемой массовой доли к пределу чувствительности анализатора.

Технология обогатительных фабрик отличается тем, что опорное (сравниваемое) значение массовой доли возможно получить независимым путем через уравнение баланса. Относительные случайные погрешности опробования концентратов невелики, влияние случайных погрешностей опробования хвостов на результаты расчета уравнений незначительно, поэтому такой вариант получения опорного значения массовой доли может оказаться приемлемым. При этом для устранения влияния инерционности самого процесса обогащения необходимо определять сдвиг времени (запаздывание) между снятием показаний анализатора и выполнением опробования концентрата и хвостов. Погрешность расчета массовой доли в руде по балансу масс может быть необходима при опробовании крупнокусковых руд, от которых отбор точечных проб почти невозможен.

Оценка различия сопоставляемых проб возможна путем введения попра-

вок в показания анализатора с учетом неустраняемых случайных погрешностей. Поправка может быть установлена только при снижении случайной погрешности сопоставляемых результатов опробования. Это снижение достигается за счет использования при сравнении средних результатов опробования.

Результаты

Микроточечные пробы

Спектральные анализаторы на потоках анализируют пробы, аналогичные отбираемым способом продольных сечений. Вследствие краткости активирующего пробку импульса точечная проба имеет предельно малую массу, определяемую размерами активного луча — в диаметре несколько микрометров и глубиной внедрения в доли миллиметра [12]. Число точечных проб определяется скоростью выполнения отдельных анализов (например, 10 анализов в секунду) и может составить 432 000 проб за двенадцатичасовую смену.

При спектральном анализе точечные пробы представляют собой микропорции руды, сжигаемые лучом лазера. Погрешность такого анализа P_α связана с числом n_T анализируемых микропорций формулой

$$P_\alpha = \frac{2V_k}{\sqrt{n_T}}. \quad (1)$$

Здесь V_k — покусковой коэффициент вариации:

$$V_k = \sqrt{\frac{\rho_m \cdot \beta_m}{\rho_n \cdot \alpha}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где ρ_m — плотность минерала; ρ_n — плотность породы; β_m — массовая доля определяемого компонента в минерале; α — то же в руде.

Следовательно

$$P_\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_m \cdot \beta_m}{\rho_n \cdot \alpha}} \cdot \frac{1}{n_T} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

При непрерывной работе в течение смены спектральный анализатор выполнит $n_T = 432\ 000$ измерений (анализ каждые 0,1 с).

При $P_\alpha = 100\%$, получена формула для определения чувствительности по массовой доле α_c :

$$\alpha_c = 4 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_n} \cdot \frac{\beta_m}{n_T} \quad (4)$$

Для золота $\rho_m = 18\ 000$ кг/м³; $\beta_m = 106$ г/т; $\rho_n = 3000$ кг/м³.

В результате

$$\alpha_c = 4 \cdot \frac{18000}{3000} \cdot \frac{10^6}{0,432 \cdot 10^6} = 56 \text{ г/т.}$$

Если $\alpha = 100$ г/т, то погрешность спектрального анализатора за смену по формуле (3) составит величину 74,8%.

Или после определения α_c :

$$P_\alpha = 100 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_c}{\alpha}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{56}{100}} = 74,8\% \quad (5)$$

При $P_n = 10\%$ предел применимости анализатора составит

$$\alpha_n = \alpha_c \cdot \frac{P_c^2}{P_n^2} = 56 \cdot \frac{10000}{100} = 5600 \text{ г/т.} \quad (6)$$

Аналогичный расчет для медной руды приводит к пределу применимости $\alpha_n = 4,38\%$ при $P_n = 1\%$.

Поверхностные пробы

Рентгенофлуоресцентные анализаторы на потоках анализируют пробы, аналогичные отбираемым способом продольных сечений. Вследствие малой глубины анализа проба имеет небольшую толщину, а вследствие большой продолжительности анализа — большую длину [13]. Точечная проба имеет массу 0,1 — 1,0 кг, но число точечных проб ограничено — 720 в смену.

Чувствительность анализатора связана с массой определяемого элемента в анализируемой пробе. По причине дис-

кретности частей опробуемого массива (кусков) фундаментальная погрешность опробования связывает массу пробы опробуемого материала со случайной погрешностью, [14]:

$$q = \frac{g \cdot f \cdot \rho_m \cdot \beta_m \cdot d_{\max}^3 \cdot 10^4}{\alpha \cdot P^2} \quad (7)$$

Здесь q — масса пробы; α — массовая доля; P — относительная случайная погрешность; $d_{\max} = d_{95}$ — максимальный размер кусков; β_m — массовая доля определяемого элемента в минерале; ρ_m — плотность минерала; f — коэффициент формы кусков; g — коэффициент кривизны гранулометрической характеристики.

Если обозначить числитель формулы, характеризующий свойства опробуемого массива, буквой M , то формула (7) принимает вид:

$$q = \frac{M}{\alpha \cdot P^2} \quad (8)$$

Из формулы следует, что чувствительность зависит при прочих равных условиях от массы пробы и массовой доли.

Отсюда при заданной погрешности точечных проб P и массе точечной пробы q можно найти чувствительность рентгенофлуоресцентного анализатора.

Пример для золотосодержащей руды приведен ниже. Необходимые сведения для расчета величины M : $g = 0,25$; $f = 0,2$; $\rho_m = 18\ 000$ кг/м³; $\beta_m = 100\%$, $d_{\max} = 1$ мм (золотины).

$$M = g \cdot f \cdot \rho_m \cdot \beta_m \cdot d_{\max}^3 \cdot 10^4 = 0,25 \cdot 0,2 \cdot 18000 \cdot 100 (1 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 10^4 = 9$$

Если $q = 1$ кг, то чувствительность α_c при $P_c = 100\%$ составит

$$\alpha_c = \frac{M}{q \cdot P_c^2} = \frac{9}{1 \cdot 100^2} = 9 \cdot 10^{-4} \% \text{ или } 9 \text{ г/т.}$$

Если задана допустимая погрешность 10%, то предел применимости рентгенофлуоресцентного анализатора составит

$$\alpha_n = \frac{M}{q \cdot P_n^2} = \frac{9}{1 \cdot 10^2} = 9 \cdot 10^{-2} \%$$

или 900 г/т.

Пример для медьсодержащей руды показан ниже.

Необходимые для расчета величины M сведения: $g = 0,25$; $f = 0,4$; $\rho_m = 4100 \text{ кг/м}^3$; $\beta_m = 34,6\%$; $d_{\max} = 0,8 \text{ мм}$; $q = 0,1 \text{ кг}$. Чувствительность $\alpha_q = 0,0072\%$. Применимость при $P_n = 1\%$. $\alpha_n = 0,72\%$.

Объемные пробы

Анализаторы объемных проб на потоках анализируют пробы, аналогичные отбираемым способом продольных сечений. Вследствие большой глубины анализа пробы могут распространяться на всю толщину потока и при активации материала по всей ширине потока прибором могут анализироваться точечные пробы, соответствующие пробе, отобранной способом поперечных сечений. Точечная проба может иметь большую массу, в несколько раз больше массы точечной пробы, отбираемой механическим пробоотборником. Число точечных проб ограничено продолжительностью анализа.

При анализе объемных проб масса точечной пробы q_t составит

$$q_t = Q \cdot p \cdot \tau \quad (9)$$

Здесь Q — производительность потока; p — доля потока, выделяемая чувствительным полем анализатора; τ — продолжительность анализа.

Чувствительность объемного анализа определяется при помощи формулы (8), но масса пробы рассчитывается по формуле (9), тогда чувствительность α_q при $P_q = 100\%$:

$$\alpha_q = \frac{M}{q_t \cdot P_q^2}, \quad (10)$$

а применимость

$$\alpha_n = \frac{M}{q_t \cdot P_n^2}. \quad (11)$$

Искажение градуировочной характеристики

Различие сопоставляемых проб приводит к искажению поля корреляции результатов анализа проб, отбираемых способом поперечных сечений, и результатов, показываемых анализаторами.

Точечные пробы, отбираемые за короткий промежуток времени, обладают большей дисперсией, чем сопоставляемые с ними показания анализатора.

Точечная проба, отбираемая способом поперечных сечений, рассчитывается по формуле

$$q = \frac{Q \cdot b}{\vartheta}. \quad (12)$$

Здесь Q — производительность; b — ширина щели пробоотборника; ϑ — скорость пересечения потока.

Если $Q = 100 \text{ т/ч}$, $\vartheta = 0,5 \text{ м/с}$, а $b = 3d_{\max} = 120 \text{ мм}$ при $d_{\max} = 40 \text{ мм}$, то масса точечной пробы составит 6,7 кг. В такой пробе содержится 87 кусков (с учетом коэффициента формы $f = 0,4$).

Точечная проба, анализируемая рентгенофлуоресцентным анализатором в течение 5 мин, будет представлена примерно 900 кусками. Это означает, что покусковая дисперсия в первом случае снизится в 87 раз, а во втором — в 900 раз.

Различие в массе анализируемых проб, таким образом, приведет к тому, что показания анализатора будут усредненными на интервале в пять минут, а в точечных пробах, отобранных способом поперечных сечений, дисперсия массовых долей будет значительно больше.

На рис. 2 и 3 показаны распределения массовой доли меди в руде по показаниям анализатора (рис. 2), и по резуль-

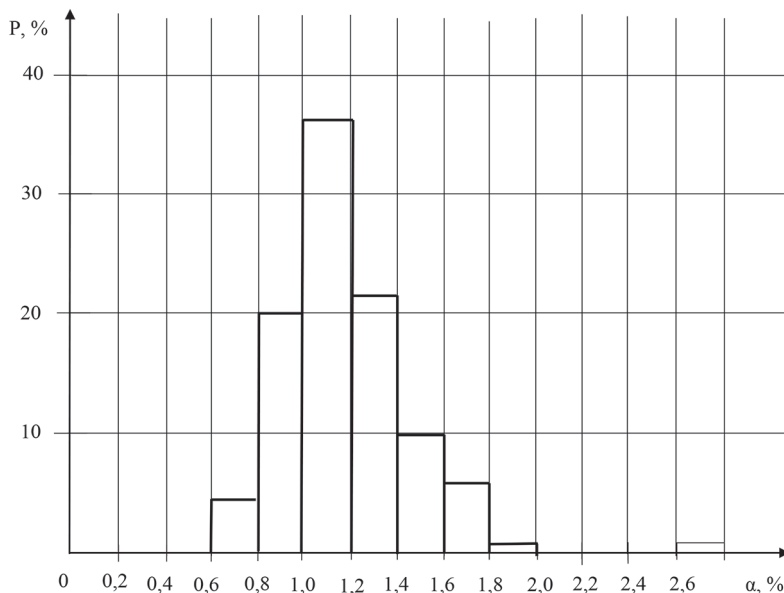


Рис. 2. Распределение массовой доли меди в руде по показаниям анализатора

Fig. 2. Distribution of the mass fraction of copper in the ore according to the analyzer readings

татам анализа точечных проб (рис. 3). Среднее значение массовой доли в обоих случаях одинаковое, а среднее квадратичное отклонение результатов анализа точечных проб в два раза больше.

Несовпадение показаний анализатора с результатами анализа точечных проб приводит к снижению коэффициента кор-

реляции. Угловым коэффициентом линейного уравнения регрессии $\alpha_{ан} = a_1 \cdot \alpha_{тп}$ равен

$$a_1 = r_{\alpha_{ан}/\alpha_{тп}} \cdot \frac{S_{ан}}{S_{тп}}. \quad (13)$$

Увеличение $S_{тп}$ и снижение $r_{\alpha_{ан}/\alpha_{тп}}$ приводит к снижению коэффициента a_1

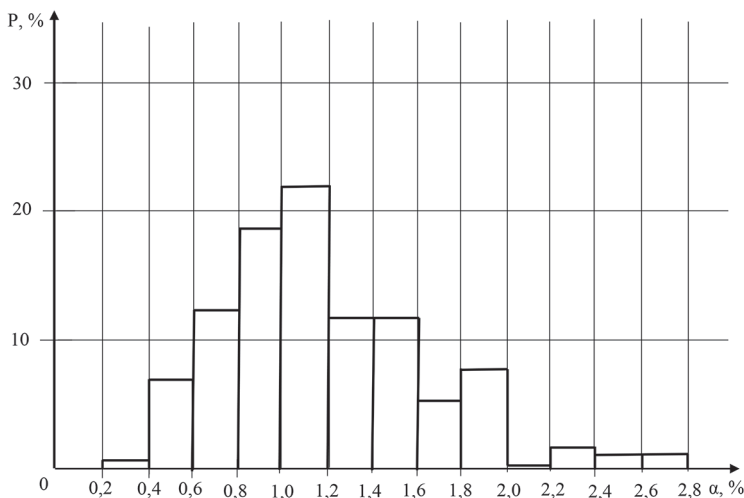


Рис. 3. Распределение массовой доли меди в точечных пробах руды

Fig. 3. Distribution of the mass fraction of copper in spot ore samples

и, как следствие, к неправильной градуировке анализатора по результатам анализа точечных проб.

Обсуждение результатов

Поточные анализаторы массовой доли анализируют пробы, принципиально отличающиеся от точечных проб, отбираемых способом поперечных сечений.

Чувствительность и предел применимости анализаторов зависит от числа анализируемых микропорций на интервале сопоставления показаний анализатора и результатов опробования. При этом даже на интервале времени, равном продолжительности смены, предел чувствительности анализаторов на золотосодержащей руде составляет десятки граммов на тонну, а обеспечение погрешности анализа до 10% относительных возможно только при массовых долях более 0,5%. Погрешности до 1% относительного возможны исключительно на массовых долях более 10%.

При анализе поверхностных и объемных проб анализируются значительно большие массы, чем при оперативном опробовании, а распределение массы анализируемой пробы вдоль потока на интервале времени измерения приводит к снижению погрешности пробы, связанной с продольной неоднородностью опробуемого потока. Это повышает чувствительность и снижает случайную погрешность, вызываемую фундаментальной погрешностью опробования [15]. Анализ распределенной вдоль потока пробы эквивалентен сокращению способом линейки, разработанным специально для очень бедных продуктов, в частности содержащих благородные металлы [1]. Такие анализаторы обладают высокой чувствительностью и приемлемым пределом применимости. Показания анализаторов характеризуются отсутствием «всплесков» массовой доли, в то время как отобранные в этих же условиях

точечные пробы характеризуются большей дисперсией и наличием «всплесков» массовой доли. При правильном опробовании и правильной градуировке анализатора результаты опробования $\alpha_{по}$ и $\alpha_{ан}$ должны быть равны.

Вследствие появления «всплесков», т.е. больших отклонений $\alpha_{по}$ и $\alpha_{ан}$, коэффициент a_1 теоретической линии регрессии отклоняется от единицы (чаще всего в меньшую сторону), и теоретическая линия регрессии становится непригодной для градуировки [16, 17]. Поэтому способ построения поля корреляции и градуировки по теоретической линии регрессии или какой-либо другой способ использования точечных проб, отбираемых способом поперечных сечений, для градуировки поточных анализаторов будет недостоверным.

Для градуировки поточных анализаторов следует использовать только усредненные на большом числе измерений результаты опробования [18, 19], что уже было декларировано в работе [20]. При этом нет необходимости в использовании факторных экспериментов.

Выводы

1. Сопоставление результатов анализа точечных проб, отобранных способом поперечных сечений, с показаниями автоматических поточных анализаторов с целью оценки качества опробования недопустимо, так как сопоставляемые данные являются результатами анализа несопоставимых по условиям отбора проб. Поточные анализаторы анализируют опробуемый массив, проходящий за интервал опробования перед окном анализатора, превосходящий по массе опробуемый массив, соответствующий точечной пробе, отобранной способом поперечных сечений.

2. Асимметрия распределений массовой доли в точечных пробах приводит к появлению точечных проб, отбираемых

способом поперечных сечений, значительно отличающихся по массовой доле от результатов, показываемых анализаторами, т. е. к появлению «всплесков» массовой доли. На бедных по массовой доле продуктах преобладают отличия в большую сторону, а на богатых продуктах — в меньшую. В обоих случаях это приводит к снижению коэффициента корреляции между результатами опробования и показаниями анализатора.

В общем случае градуировка анализатора по теоретической линии регрессии неэффективна.

3. Градуировку поточных анализаторов следует проводить только по средним значениям массовой доли, полученным по результатам текущего опробования на большом массиве данных. При этом изменяется только угловой коэффициент уравнения a_1 . Свободный член уравнения всегда равен нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козин В. З. Опробование минерального сырья. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. — 316 с.
2. Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я., Ганбаатар В., Дэлгэрбат Л. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. — М.: ИД «Руда и металлы», 2013. — 508 с.
3. Глазатов А. Н., Молодцев М. С., Казаков А. М., Бразюлис Л. А. Совершенствование методики и системы контроля балансовых продуктов на обогатительной фабрике АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. — 2020. — № 12. — С. 88–93. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.13.
4. Варламова С. А., Затонский А. В., Федосеева К. А. Исследование чувствительности к осевещению метода бликового распознавания пен калийных флотационных машин // Обогащение руд. — 2021. — № 6. — С. 29–33. DOI: 10.17580/or.2021.06.05.
5. Морозов В. В., Хурэлчулуун И., Дэлгэрбат Л. Управление процессами дробления и грохочения с использованием визиометрического анализа руды // Цветные металлы. — 2021. — № 7. — С. 17–23. DOI: 10.17580/tsm.2021.07.01.
6. Морозов В. В., Столяров В. Ф., Коновалов Н. М. Повышение эффективности управления флотацией с использованием поточных анализаторов состава пульпы // Обогащение руд. — 2003. — № 4. — С. 33–36.
7. Кудрявцев В. Ю., Галасс Т. Ю., Степанова И. С., Дробышев А. А. Технический контроль как инструмент повышения конкурентности продукции комбината // Горный журнал. — 2022. — № 6. — С. 49–53. DOI: 10.17580/gzh.2022.06.05.
8. Соколов А. Д., Демский М. И. Промышленная установка ГАА «Au-изомер» // Золотодобыча. — 2021. — № 12 (277). — С. 23–25.
9. Ревенко А. Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. — Новосибирск: Наука, 1994. — 264 с.
10. Топчаев В. П., Федин Г. В. Системы и средства контроля и управления технологическими агрегатами в процессах обогащения // Цветные металлы. — 2005. — № 10. — С. 77–79.
11. Улитенко К. Я. Некоторые аспекты интеллектуального управления производительностью и качеством при обогащении железных руд // Обогащение руд. — 2006. — № 6. — С. 33–37.
12. Dominy S. C., Platten J. M., Glass H. J., Purevgerel S., Cuffley B. W. Determination of gold particle characteristics for sampling protocol optimisation // Minerals. 2021, vol. 11, pp. 1109–1155. DOI: 10.3390/min 11101109.
13. Szaloki I., Racz G., Germany A. Fundamental parameter model for quantification of total reflection X-Ray fluorescence analysis // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2019, vol. 156, pp. 33–41.
14. Козин В. З., Комлев А. С. Об использовании формулы Ричардса-Чечотта для определения массы представительной пробы. Обогащение руд. — 2016. — № 3, с. 47–57. DOI: 10.17580/or.2016.03.08.
15. Dube J.-S., Esbensen K. H. Revisiting Pierre Gy's formula (TOS) — A return to size-density classes for applications to contaminated soils, coated particular aggregated and mixed material systems // Analytica Chimica Acta. 2022, vol. 1193, no. 6, article 339227. DOI: 10.1016/j.aca.2021.339227.

16. *Chong-Chong Qi* Big data management in the mining industry // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2020, vol. 27, no 2, pp. 131–139. DOI: 10.1007/s12613-019-1937-z.
17. Бурдонов А. Е., Новиков Ю. В., Лукьянов Н. Д. Применение аппарата регрессионного анализа для обработки результатов, полученных при переработке руд методом центробежной концентрации // Цветные металлы. — № 5. — 2024. — С. 15–22. DOI: 10.17580/tsm.2024.05.01.
18. Темербекова Б. М. Применение методики выявления систематической погрешности интегральных измерений технологических параметров в сложных технологических процессах и производствах // Цветные металлы. — 2022. — № 5. — С. 79–86. DOI: 10.17580/tsm.2022.05.11.
19. Козин В. З., Комлев А. С. Балансы металлов на обогатительных фабриках // Обогащение руд. — 2023. — № 2. — С. 9–16. DOI: 10.17580/or.2023.02.02.
20. Гальдянов А. В. Организация градуировочных исследований средств непрерывного контроля качества руды на конвейерных магистральных обогатительных фабрик / Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр. — Екатеринбург: ИГД УРО РАН, 2003. — С. 125–143. **ПЛАТ**

REFERENCES

- Kozin V. Z. *Oprobovanie mineral'nogo syr'ya* [Testing of mineral raw materials], Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 2011, 316 p.
- Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. Ya., Ganbaatar V., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Development and application of automated control systems for mineral processing], Moscow, ID «Ruda i metally», 2013, 508 p.
- Glazatov A. N., Molodtsev M. S., Kazakov A. M., Brazulis L. A. Improvement of the methodology and control system of balance products at the processing plant of JSC Kola MMC. *Tsvetnye Metally*. 2020, no. 12, pp. 88–93. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.13.
- Varlamova S. A., Zatonsky A. V., Fedoseeva K. A. Investigation of the sensitivity to illumination of the method of glare recognition of potassium foam flotation machines. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 6, pp. 29–33. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.06.05.
- Morozov V. V., Khurelchuluun I., Dalgerbat L. Control of crushing and screening processes using visiomeric ore analysis. *Tsvetnye Metally*. 2021, no. 7, pp. 17–23. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2021.07.01.
- Morozov V. V., Stolyarov V. F., Kononov N. M. Improving the efficiency of flotation management using in-line pulp composition analyzers. *Obogashchenie Rud*. 2003, no. 4, pp. 33–36. [In Russ].
- Kudryavtsev V. Yu., Galass T. Yu., Stepanova I. S., Drobyshch A. A. Technical control as a tool to increase the competitiveness of the plant's products. *Gornyy Zhurnal*. 2022, no. 6, pp. 49–53. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.06.05.
- Sokolov A. D., Demsky M. I. Industrial installation of the GAA «Au-isomer». *Zolotodobicha*. 2021, no. 12 (277), pp. 23–25. [In Russ].
- Revenko A. G. *Rentgenospektral'nyy fluoretsentnyy analiz prirodnykh materialov* [X-ray spectral fluorescence analysis of natural materials], Novosibirsk, Nauka, 1994, 264 p.
- Topchaev V. P., Fedin G. V. Systems and means of control and management of technological units in enrichment processes. *Tsvetnye Metally*. 2005, no. 10, pp. 77–79. [In Russ].
- Ulitenko K. Ya. Some aspects of intelligent performance and quality management in iron ore processing. *Obogashchenie Rud*. 2006, no. 6, pp. 33–37. [In Russ].
- Dominy S. C., Platten J. M., Glass H. J., Purevgerel S., Cuffley B. W. Determination of gold particle characteristics for sampling protocol optimisation. *Minerals*. 2021, vol. 11, pp. 1109–1155. DOI: 10.3390/min11101109.
- Szaloki I., Racz G., Germany A. Fundamental parameter model for quantification of total reflection X-Ray fluorescence analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2019, vol. 156, pp. 33–41.
- Kozin V. Z., Komlev A. S. On the use of the Richards-Chechott formula to determine the mass of a representative sample. *Obogashchenie Rud*. 2016, no. 3, c. 47–57. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2016.03.08.
- Dube J.-S., Esbensen K. H. Revisiting Pierre Gy's formula (TOS) – A return to size-density classes for applications to contaminated soils, coated particular aggregated and mixed material systems. *Analitica Chimica Acta*. 2022, vol. 1193, no. 6, article 339227. DOI: 10.1016/j.aca.2021.339227.

16. Chong-Chong Qi Big data management in the mining industry. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020, vol. 27, no 2, pp. 131 – 139. DOI: 10.1007/s12613-019-1937-z.
17. Burdonov A. E., Novikov Yu. V., Lukyanov N. D. Application of the regression analysis apparatus for processing the results obtained during ore processing by the centrifugal concentration method. *Tsvetnye Metally*, no. 5. 2024, pp. 15 – 22. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2024.05.01.
18. Temerbekova B. M. Application of the methodology for identifying the systematic error of integral measurements of technological parameters in complex technological processes and industries. *Tsvetnye Metally*. 2022, no. 5, pp. 79 – 86. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2022.05.11.
19. Kozin V. Z., Komlev A. S. Metal balances at concentrating plants. *Obogashchenie Rud*. 2023, no. 2, pp. 9 – 16. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2023.02.02.
20. Galyanov A. V. Organization of calibration studies of means of continuous ore quality control on conveyor lines of processing plants. *Geotekhnologicheskie problemy kompleksnogo osvoeniya nedr* [Mining and technological problems of integrated development of mineral resources], Ekaterinburg, IGD URO RAN, 2003, pp. 125 – 143. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Козин Владимир Зиновьевич*¹ – д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой,
декан горно-механического факультета,
e-mail: gmf.dek@ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7184-919X,

*Комлев Алексей Сергеевич*¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: tails2002@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2484-2726,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Комлев А.С., e-mail: tails2002@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.Z. Kozin*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, Dean of Mining and Mechanics
Faculty, e-mail: gmf.dek@ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7184-919X,

*A.S. Komlev*¹, Cand. Sci. (Eng.),
e-mail: tails2002@inbox.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2484-2726,

¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: A.S. Komlev, e-mail: tails2002@inbox.ru.

Получена редакцией 16.07.2024; получена после рецензии 26.11.2024; принята к печати 10.02.2025.

Received by the editors 16.07.2024; received after the review 26.11.2024; accepted for printing 10.02.2025.

