

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / MINERAL PROCESSING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.15>

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ОПРОБОВАНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ РЕНТГЕНОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КРУПНОПРОЦИОННОЙ СОРТИРОВКЕ НА ОСНОВАНИИ ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Научная статья

Брагин В.И.¹, Бакшеева И.И.^{2,*}, Бурдакова Е.А.³, Вашлаев А.И.⁴

¹ORCID : 0000-0001-5487-7789;

²ORCID : 0000-0002-3838-7429;

³ORCID : 0000-0003-2167-7216;

^{1,2,3} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

³ Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярск, Российская Федерация

⁴ Полус Проект, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (irina_igorevna[at]mail.ru)

Аннотация

Отмечены актуальные проблемы оперативного опробования крупных порций руды с их последующей сортировкой, связанные с низкой представительностью результатов опробования радиометрическими методами. Предложена методика для оценки достоверности опробования на основе статистического анализа данных, полученных при kernovoprobovaniy интервалов разведочных скважин. Установлена зависимость между содержанием ценного компонента в опробуемом поверхностном слое и содержанием во внутренних слоях, которые не видны для радиометрической станции. Представлены формулы для оценки достоверности результатов радиометрического опробования в зависимости от геометрии рудного навала в транспортной емкости. Приводятся результаты реализации методики для Горевского и Обладжанского месторождений.

Ключевые слова: крупнопорционная сортировка, геостатистический анализ, радиометрический метод опробования, обогащение полезных ископаемых.

AN EVALUATION OF THE RELIABILITY OF MINED ROCK SURFACE SAMPLING IN X-RAY RADIOMETRIC LARGE-SCALE SORTING BASED ON GEOSTATISTICAL METHODS

Research article

Bragin V.I.¹, Baksheeva I.I.^{2,*}, Burdakova E.A.³, Vashlaev A.I.⁴

¹ORCID : 0000-0001-5487-7789;

²ORCID : 0000-0002-3838-7429;

³ORCID : 0000-0003-2167-7216;

^{1,2,3} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³ Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴ Polyus Project, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (irina_igorevna[at]mail.ru)

Abstract

The relevant problems of operative sampling of large portions of ore with their subsequent sorting, connected with low representativeness of sampling results by radiometric methods, are observed. A methodology for evaluating the reliability of sampling based on statistical analysis of data obtained during core sampling of exploration well intervals is suggested. The correlation between the content of the valuable component in the sampled surface layer and the content in the inner layers, which are not visible to the radiometric station, is established. Formulas for estimating reliability of radiometric sampling results depending on the geometry of the ore bulk in the transport container are presented. The results of implementing the methodology for the Gorevskoye and Oblajanskoye deposits are shown.

Keywords: large-scale sorting, geostatistical analysis, radiometric sampling method, mineral processing.

Введение

Оперативное опробование крупных порций горной массы радиометрическими методами и их последующая сортировка в транспортных емкостях является одним из элементов системы комплексного управления качеством руд горнодобывающего предприятия. Занимая важное первичное положение в общей схеме управления качеством руд, крупнопорционная сортировка позволяет при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах добиться управлением качественными и количественными характеристиками руды, поставляемой на фабрику, разделить рудный поток на технологические типы и сорта, исключить попадание пустой породы на фабрику, увеличить выпуск готовой продукции без наращивания дополнительных перерабатывающих мощностей, расширить минерально-сырьевую базу предприятия за счет вовлечения в эксплуатацию забалансовых руд [1], [2], [3].

Сортировка добытой рудной массы осуществляется рентгенофлуоресцентным методом на основе рудоконтролирующих станций (РКС), как правило, совмещенных с весовой, что позволяет иметь полную информацию о качестве руды и количестве полезного компонента в ней. Рентгенофлуоресцентный метод основан на возбуждении и регистрации характеристического рентгеновского излучения элементов. Его можно использовать для определения

почти всех элементов в руде, в этом смысле он не имеет физических ограничений и является универсальным. Вместе с тем он обладает и присущим ему недостатком. Глубинность, то есть проникающая способность излучений мала и составляет доли миллиметра. Опробование транспортных емкостей фактически осуществляется по поверхностному слою, находящейся в ней руды. Поэтому соответствие содержаний определяемого компонента по поверхностному слою фактическим данным по объему – это принципиальный вопрос, который до настоящего времени не решен. Низкая представительность опробования неизбежно приведет к снижению эффективности сортировки и дополнительным потерям ценного компонента.

В существующей практике при внедрении крупнопорционной сортировки проводят исследования по изучению неравномерности распределения полезного компонента в транспортных емкостях в соответствии с методическими рекомендациями [4], [5], [6], [7], по результатам которых оценивают представительность опробования поверхностного слоя и делают заключения о возможности и эффективности сортировки [8]. В целях проверки достоверности сортировки проводят опробование транспортных емкостей путем прямого отбора из них проб на пробирный анализ, причем количество опробуемых самосвалов может составлять более 2-х тысяч [9]. Мероприятия по контролю за процессом отличаются большой трудоемкостью, при этом не всегда дают однозначный ответ об эффективности. Так, при наличии пространственной изменчивости вещественного состава руд, проведенные исследования на рудах текущей добычи не будут представительны для руд нижележащих горизонтов, отбор проб с которых нельзя осуществить для целей крупнопорционной сортировки.

Цель данной работы состояла в том, чтобы разработать методику оценки достоверности определения полезного компонента в объеме горной массы по данным поверхностного опробования слоя руды, который «виден» для радиометрической станции. В основе методики лежит статистический анализ данных, полученных при керновом опробовании интервалов разведочных скважин.

Модель и методика расчетов

Провести оценку представительности поверхностного опробования возможно на основе статистического анализа результатов опробования керновых интервалов разведочных скважин. Установим статистическую взаимосвязь между распределением ценного компонента в опробуемом поверхностном слое и распределением во внутренних слоях, которые не видны для радиометрической станции. На ее основе, получив информацию о поверхностном слое, можно оценить ошибку прогноза распределения полезного компонента в слое расположенном на любом расстоянии от поверхности вглубь кузова. Очевидно, что чем глубже от поверхности опробования находится интересующий нас слой, тем слабее взаимосвязь между распределением ценного компонента в нем с распределением в опробуемом слое, и, следовательно, тем выше ошибка прогноза. С другой стороны, чем сильнее эта взаимосвязь сама по себе, тем точнее будет представительность опробования и, соответственно, тем выше технологические показатели и эффективность сортировки в транспортных емкостях. Найти эту взаимосвязь наиболее приближенным к реальным условиям методом и при этом с минимальными затратами можно по характеру распределения полезного компонента в керновых пробах разведочных скважин [10], [11].

Распределение содержаний ценного компонента в смежных керновых пробах, очевидно, носит неслучайный характер. Сходство содержаний в точках, расположенных на некотором расстоянии будет тем выше, чем меньше расстояние между ними. Количественно описать меру сходства в зависимости от расстояния между точками позволяет корреляционный анализ. Формула для расчета коэффициента корреляции представляется в виде:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где – коэффициент корреляции; средние значения выборок формула (2)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ и } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

В качестве переменной X рассмотрим ряд керновых интервалов опробования x_1, x_2, \dots, x_{n-1} , а в качестве переменной Y – этот же ряд, смещенный на одну позицию, то есть x_2, x_3, \dots, x_n . Тогда приведенная формула (1) для расчета коэффициента корреляции примет вид формула (3):

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+1} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - \bar{x}_2)^2}}, \quad (3)$$

где – формула (4) средние значения ряда интервалов опробования без последнего и первого элемента соответственно.

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} x_i \text{ и } \bar{x}_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} \quad (4)$$

Полученная величина r_1 есть коэффициент пространственной автокорреляции первого порядка, так как он определяет зависимость между соседними элементами одного ряда.

Для получения коэффициента более высокого порядка следует сдвинуть ряд керновых интервалов на соответствующее число позиций. Формула для расчета коэффициента пространственной автокорреляции k -ого порядка представляется в виде:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_{2k-1})(x_{i+k} - \bar{x}_{2k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_{2k-1})^2 \sum_{i=1}^{n-k} (x_{i+k} - \bar{x}_{2k})^2}} \quad (5)$$

где – формула (6) средние значения ряда интервалов опробования без k последних и k первых элементов соответственно.

$$\overline{x_{2k-1}} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i, \overline{x_{2k}} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i \quad (6)$$

Для удобства расчетов в формуле (5) возможно использовать какое-либо одно среднее значение ряда ввиду незначительного различия между ними.

Зная среднюю длину kernового интервала, строим автокорреляционную функцию $f(z)$, показывающую зависимость коэффициента корреляции от расстояния между точками опробования. Эта функция будет служить мерой соответствия распределения металла в опробуемом радиометрическим методом поверхностном слое транспортной емкости и слое находящимся на определенной глубине от поверхности. Для перехода от послойного сравнения погрешностей к объемному, нужно выполнить усредняющее интегрирование. Проинтегрировав автокорреляционную функцию по высоте рудного навала в кузове автосамосвала и вычислив среднее значение, получим r_m —степень соответствия поверхностного слоя всему объему руды.

$$r_m = \frac{1}{z^*} \int_0^{z^*} f(z) dz \quad (7)$$

где z^* – расстояние от поверхности до дна кузова.

Формула (7) применима, если соблюдается условие постоянства высоты рудного навала по всей поверхности транспортной емкости – вагонетки, кузова самосвала. Если геометрия рудного навала имеет другую структуру, например коническую или форму полусферы, то расстояние от поверхности до дна будет существенно меняться, обычно достигая максимума в центре и минимума по периметру кузова. В этом случае предлагается использовать формулу (8), по которой для нахождения среднего значения функции $f(z)$ проводится ее интегрирование по всему объему рудной массы.

$$r_m = V^{-1} \iiint_V f(z) dV = V^{-1} \iiint_V f(z) dx dy dz \quad (8)$$

Результаты реализации методики и обсуждение

Предложенная методика реализовалась на основе данных kernового опробования двух месторождений: Горевское свинцово-цинковые месторождение и Обладжанское месторождение фосфоритов. Форма рудного навала в кузове самосвала аппроксимировалась параллелепипедом, высота которого принималась равной двум метрам. На рис. 1 и 2 представлены автокорреляционные функции месторождений.

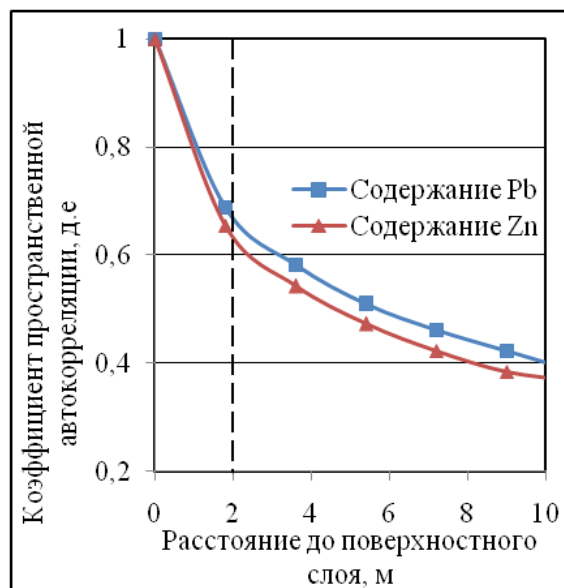


Рисунок 1 - Автокорреляционные функции Горевского месторождения
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.15.1>

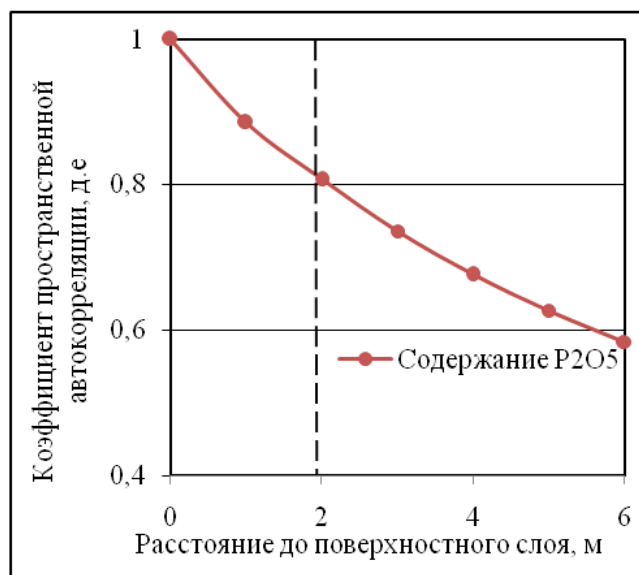


Рисунок 2 - Автокорреляционные функции Обладжанского месторождения
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.15.2>

Вертикальные пунктирные линии на отметке 2 метра соответствуют дну кузова. Коэффициенты автокорреляции для этой отметки по содержанию *Pb* и *Zn* равны соответственно 0,69 и 0,64 для Горевского месторождения и 0,8 для Обладжанского. Автокорреляционные функции на этом отрезке могут быть с высокой точностью аппроксимированы прямыми. Вычислив r_m по формуле (4) получим, что степень соответствия поверхностного слоя валовому объему кузова будет для *Pb* и *Zn* 0,85 и 0,82 соответственно для Горевского месторождения и 0,9 для Обладжанского месторождения.

Высокий коэффициент корреляции для Обладжанского месторождения говорит об эффективности процесса крупнопорционной сортировки. Значения коэффициентов для Горевского месторождения можно считать пограничными, что на практике потребует проведения усреднительных процедур при погрузке руды в транспортную емкость либо более тщательного контроля традиционными методами.

Заключение

В данной работе предложена новая методика для оценки достоверности опробования на основе статистического анализа данных, полученных при керновом опробовании интервалов разведочных скважин. Для Обладжанского и Горевского месторождений при помощи функции автокорреляции определены зависимости между содержанием ценного компонента в опробуемом поверхностном слое и внутренних слоях, удаленных на определенное расстояние от поверхности. Представлены формулы для оценки достоверности результатов радиометрического опробования в зависимости от геометрии рудного навала в транспортной емкости и рассчитаны соответствующие коэффициенты корреляции.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Остапенко П.Е. Технологическая оценка минерального сырья. Методы исследования / П.Е. Остапенко. — М.: Недра, 1990.
2. Кобзев А.В. Радиометрические методы обогащения золотосодержащих руд: задачи и актуальные проблемы / А.В. Кобзев // Золото и технологии. — 2012. — 4.
3. Коган Д.И. Область применения и перспективы рентгенорадиометрической сепарации на месторождениях золота / Д.И. Коган, Ю.О. Федоров // Золотодобыча. — 2006. — 85.
4. Стандарт Российского геологического общества. Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Радиометрические методы обогащения / СТО РосГео 08-009-98. — М.: РосГео, 1998.
5. Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых / Государственная комиссия по запасам полезных

ископаемых (ГКЗ) Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации. — М., 1993.

6. Технологическая оценка минерального сырья: справочник в 10 томах. — М.: Недра, 1990-1995.
7. Барский Л.А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых / Л.А. Барский, В.З. Козин. — М.: Недра, 1978. — 476 с.
8. Ревнивцев В.И. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке / В.И. Ревнивцев, В.И. Азбель, Е.Г. Баранов и др. — М.: Недра, 1987.
9. Федоров Ю.О. Управление качеством руд — это реальность / Ю.О. Федоров, И.Н. Щеглов, Г.И. Жуков // Золотодобыча. — 2014. — 7(188).
10. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон. — М.: МИР, 1968.
11. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд / М. Давид. — Л.: Недра, 1980.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ostapenko P.E. Tehnologicheskaja ocenka mineral'nogo syr'ja. Metody issledovaniya [Technological Evaluation of Mineral Resources. Research methods] / P.E. Ostapenko. — М.: Nedra, 1990. [in Russian]
2. Kobzev A.V. Radiometricheskie metody obogashheniya zolotosoderzhashhih rud: zadachi i aktual'nye problemy [Radiometric Methods for Beneficiation of Gold-Bearing Ores: Challenges and Current Issues] / A.V. Kobzev // Zoloto i tehnologii [Gold and Technology]. — 2012. — 4. [in Russian]
3. Kogan D.I. Oblast' primeneniya i perspektivy rentgenoradiometricheskoj separacii na mestorozhdenijah zolota [Applications and Prospects of X-ray Radiometric Separation in Gold Fields] / D.I. Kogan, Ju.O. Fedorov // Zolotodobycha [Goldmining]. — 2006. — 85. [in Russian]
4. Standart Rossijskogo geologicheskogo obshhestva. Tverdye negorjuchie poleznye iskopaemye. Tehnologicheskie metody issledovaniya mineral'nogo syr'ja. Radiometricheskie metody obogashheniya [Standard of the Russian Geological Society. Solid Non-flammable Mineral Resources. Technological Methods of Investigating Mineral Raw Materials. Radiometric Enrichment Methods] / STO RosGeo 08-009-98. — М.: RosGeo, 1998. [in Russian]
5. Trebovaniya k izucheniju radiometricheskoj obogatimosti mineral'nogo syr'ja pri razvedke mestorozhdenij metallicheskih i nemetallicheskih poleznyh iskopaemyh [Requirements for the Study of the Radiometric Enrichment of Mineral Resources in the Exploration of Metallic and Non-Metallic Mineral Deposits] / Gosudarstvennaja komissija po zapasam poleznyh iskopaemyh (GKZ) Ministerstva ohrany okruzhajushhej sredy i prirodnyh resursov Rossijskoj Federacii [State Commission on Mineral Reserves (GKZ) of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation]. — М., 1993. [in Russian]
6. Tehnologicheskaja ocenka mineral'nogo syr'ja: spravochnik v 10 tomah [Technological evaluation of minerals: Handbook in 10 volumes]. — М.: Nedra, 1990-1995. [in Russian]
7. Barskij L.A. Sistemnyj analiz v obogashhenii poleznyh iskopaemyh [Systems Analysis in Mineral Processing] / L.A. Barskij, V.Z. Kozin. — М.: Nedra, 1978. — 476 p. [in Russian]
8. Revnivcev V.I. Podgotovka mineral'nogo syr'ja k obogashheniju i pererabotke [Preparation of Mineral Raw Materials for Concentration and Processing] / V.I. Revnivcev, V.I. Azbel', E.G. Baranov et al. — М.: Nedra, 1987. [in Russian]
9. Fedorov Ju.O. Upravlenie kachestvom rud — jeto real'nost' [Ore Quality Management is a Reality] / Ju.O. Fedorov, I.N. Shhegllov, G.I. Zhukov // Zolotodobycha [Goldmining]. — 2014. — 7(188). [in Russian]
10. Materon Zh. Osnovy prikladnoj geostatistiki [Fundamentals of Applied Geostatistics] / Zh. Materon. — М.: MIR, 1968. [in Russian]
11. David M. Geostatisticheskie metody pri ocenke zapasov rud [Geostatistical Methods in Ore Reserve Estimation] / M. David. — Л.: Nedra, 1980. [in Russian]