

pISSN 2073-1477
eISSN 2311-8733

Экономика природопользования

ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Кристина Александровна ШУЛЬГИНА ^а,
Людмила Николаевна КУЗИНА ^б,
Женни Владимировна МИРОНОВА ^с

^а аспирантка, старший преподаватель кафедры бизнес-информатики
и моделирования бизнес-процессов, Институт управления бизнес-процессов,
Сибирский федеральный университет (СФУ),
Красноярск, Российская Федерация
sibirak888@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0659-1302>
SPIN-код: 4732-8064

^б кандидат экономических наук,
доцент кафедры бизнес-информатики и моделирования бизнес-процессов,
Институт управления бизнес-процессов,
Сибирский федеральный университет (СФУ),
Красноярск, Российская Федерация,
debi13@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4137-5549>
SPIN-код: 7249-0879

^с кандидат технических наук, профессор Российской Академии Естествознания,
доцент кафедры бизнес-информатики и моделирования бизнес-процессов,
Институт управления бизнес-процессов,
Сибирский федеральный университет (СФУ),
Красноярск, Российская Федерация
mirgenni@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1735-0683>
SPIN-код: 8804-1054

* Ответственный автор

История статьи:

Рег. № 326/2022
Получена 07.07.2022
Получена в
доработанном виде
17.08.2022
Одобрена 05.09.2022
Доступна онлайн
13.10.2022

УДК 622.7:669.2.003.13
JEL: Q32, Q55

Аннотация

Предмет. Функционирование горнодобывающих предприятий
Красноярского края.

Цели. Определение возможности применения предварительного
обогащения при отработке месторождений руд цветных металлов.

Методология. Применены общенаучные (анализ, сравнение,
обобщение) и математические методы исследования.

Результаты. Доказана ограниченная возможность
феноменологического подхода к повышению эффективности
работы горнодобывающих предприятий. Предложено использовать
универсальный физико-технологический подход, позволяющий
сократить потери металла с отходами, снизить издержки глубокого
обогащения и химико-металлургического передела, экологическую
нагрузку.

Ключевые слова:

эффективность,
предобогащение,
критерии оценки,
недропользование

Выводы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке стратегии развития отраслей, занимающихся добычей полезных ископаемых.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2022

Для цитирования: Шульгина К.А., Кузина Л.Н., Миронова Ж.В. Оценка критериев эффективности обогащения при отработке месторождений руд цветных металлов // Региональная экономика: теория и практика. – 2022. – Т. 20, № 10. – С. 1968 – 1984. <https://doi.org/10.24891/re.20.10.1968>

Введение

Развитие экономики Красноярского края во многом определяют горнодобывающие предприятия, в частности эффективность применяемой технологии. Однако возможности совершенствования технологической модели, предназначенной для отработки месторождений руд цветных металлов, основанной на обогащении, исчерпываются истощением минерально-сырьевой базы, ростом непроизводительных затрат на переработку пустой породы в отбитой горной массе, вовлечением труднообогатимых руд с субмикронными размерами ценных частиц, тесно ассоциированных с сопутствующими минералами. В результате возрастают потери металлов с отходами в виде сростков с породными минералами при недоизмельчении, со шламами – при переизмельчении. В частности, сквозные потери достигают в среднем от количества металла в балансовых запасах по молибдену, меди, никелю 25%, по кобальту – 35%, по свинцу, цинку – 45%, по вольфраму – 50%, по олову – 60%, по золоту – 40% [1–4].

Отходы горнодобывающих предприятий в хозяйственных целях практически не используются. Мелкодисперсный материал с флотореагентикой, цианидами, тяжелыми металлами частично обезвреживается и сбрасывается в хвостохранилища. Шлаки и кеки металлургического передела обычно складировуют, газы по большей части рассеивают в атмосфере. Затраты на утилизацию отходов достигают 5–15% себестоимости производства продукции и растут из-за ужесточения экологического контроля, введения Европейским союзом трансграничных «углеродных пошлин» на металлы, энергоносители [5]. Обозначенные негативные тренды сопровождаются усложнением технологий для переработки сырья и снижением эффективности производства.

Решением для горнодобывающих предприятий может стать применение предварительного обогащения отбитой горной массы, экономическая

эффективность применения которого не находит в полной мере отражения в применяемых в настоящее время критериях оценки его целесообразности, что затрудняет возможность практического использования данной операции на действующих предприятиях.

Материалы и методы исследования

Оценкой эффективности обогащения (E) минерального сырья занимались многие исследователи¹ [6–8]. Так, М.Д. Барский сформулировал общие требования к критериям эффективности для наиболее распространенного случая разделения в одной операции двух компонентов или групп компонентов [6]:

- значение критерия должно достигать единицы или 100% при полном разделении компонентов и равно нулю в тех случаях, когда состав продуктов обогащения не отличается от исходного, или весь исходный материал попадает в один из них;
- количественное значение критерия не должно зависеть от того, по какому продукту его рассчитывают – обогащенному или обедненному.

Указанным требованиям наиболее полно соответствует критерий Ханкока–Луикена [9], характеризующий эффективность обогатительной операции отношением технологического результата $(\gamma_x - \varepsilon_x)$ или $(\varepsilon_k - \gamma_k)$ в реальных условиях к идеальному, когда обогатительным устройством выделяется продукт в виде породы с нулевым содержанием ценного компонента или наоборот – полностью раскрытые частицы ценного компонента отделяются от породных минералов в концентрат без потерь:

$$E = (\gamma_x - \varepsilon_x) : (1 - \alpha : \beta_m)$$

или

$$E = (\varepsilon_k - \gamma_k) : (1 - \alpha : \beta_m), \quad (1)$$

где α – среднее содержание ценного компонента в исходной руде; β_m – его содержание в природном минерале; ε_k и ε_x – извлечение ценного компонента; γ_k и γ_x – выходы концентрата и хвостов обогащения соответственно.

¹ Hancock R.T. Efficiency of Classificating. *Engineering and Mining Journal*, 1920, vol. 110, pp. 237–241.

Данный критерий эффективности отражает идеальный процесс разделения, не учитывая загрязнение концентрата либо потери ценного компонента с хвостами, и, как результат, не отражает реальную эффективность обогащения. В работе Д.В. Шехирева и др. [7] был предложен дополнительный критерий, характеризующий недоизвлечение в концентрат ценного компонента при $D \rightarrow 0$ или его загрязнение неизменной по сравнению с исходной рудой фракцией при $D \rightarrow 1$ – сrostками породы с ценными минералами:

$$D = \frac{(\varepsilon - E)}{(1 - E)} . \quad (2)$$

В соответствии с данными критериями операции обогащения принято классифицировать условно по величине E как весьма эффективные ($E > 75\%$), эффективные ($25\% < E < 75\%$) и неэффективные ($E < 25\%$) [8]. Однако получение весьма эффективных показателей по существующим технологическим моделям при снижении качества минеральных ресурсов проблематично без усложнения технологического процесса. Решением может стать введение предварительного обогащения отбитой горной массы в целях выделения из нее элементарных частей – порций, кусков пустых и слабоминерализованных пород, образующихся в процессе отбойки в результате их опережающего «раскрытия» в свободном виде в классах большей крупности из-за структурно-морфологической неоднородности рудных тел по текстурным и физико-механическим свойствам, вещественному составу [9]. Дальнейшее «раскрытие» элементарных частей породы происходит в процессах рудоподготовки².

Отвальный продукт (хвосты) предварительного обогащения выделяется в объеме равном степени R разубоживания с размерностью элементарных частей более 5–10 мм. Содержание ценного компонента и его потери с хвостами (C_x) не должно превышать объема, который может быть восполнен на стадии глубокого обогащения (в идеале $C_x \rightarrow 0$ и $\varepsilon_x \rightarrow 0$), вследствие чего ценный компонент концентрируется в обогащенном продукте до содержания C_K [9]:

$$C_K = \alpha : (1 - R) , \quad (3)$$

с предельной эффективностью предварительного обогащения $E_{по}$:

$$E_{по} = R : (1 - \alpha : \beta_m) . \quad (4)$$

² Овчинникова Т.Ю. Закономерности изменения фракционного состава продуктов обогащения. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2006. 198 с.

Параметр R характеризует горно-технологическое разубоживание ($R_{\text{гт}}$) вмещающими породами и геолого-экономическое разубоживание ($R_{\text{гэ}}$) пустой и слабоминерализованной породой из контура рудного тела залежи³: $R = R_{\text{гт}} + R_{\text{гэ}}$. Величина R достигает, например, для золотосодержащих руд 70–90%, а коэффициент их предварительного обогащения лежит в диапазоне 5–10. Такая степень концентрирования наблюдалась в отдельных операциях разделения с использованием рентгенорадиометрических сепараторов⁴.

Из-за несовершенства технологий и технических средств $E_{\text{по}}$ снижается в реальных условиях вследствие потерь ценного компонента с кусками слабоминерализованной породы до величины, определяемой выражением:

$$E_{\text{по}} = (R - \varepsilon_x) : (1 - \alpha : \beta_m) \quad (5)$$

Попытки чрезмерно концентрировать ценный компонент без соответствующей рудоподготовки в одной операции приводят к его потерям с хвостами предварительного обогащения в виде сrostков с породой и к снижению сквозного извлечения ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{по}} \cdot \varepsilon_{\text{зо}} \cdot \varepsilon_{\text{хм}} \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{по}}$ – извлечение на стадии предварительного обогащения; $\varepsilon_{\text{зо}}$ – извлечение на стадии глубокого обогащения; $\varepsilon_{\text{хм}}$ – извлечение на химико-металлургическом переделе.

При глубоком обогащении гравитацией и флотацией содержание частиц ценного минерала в хвостах и концентрате приближается к нулю и β_m соответственно, а эффективность $E_{\text{зо}} \rightarrow 100\%$. Из сопоставления второго уравнения в (1) и соотношения (3) следует, что предварительное обогащение повышает эффективность обогащения в $K_{\text{пг}}$ раз:

$$K_{\text{пг}} = (1 - \alpha : \beta_m) : [1 - \alpha : (1 - R) : \beta_m] \quad (7)$$

³ Батугина Н.С., Джемакулова И.Д., Ткач С.М. Новые аспекты оценки разубоживания руд при разработке месторождений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2006. № 5. С. 229–233. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-otsenki-razubozhivaniya-rud-pri-razrabotke-mestorozhdeniy/viewer>; Конев А.В., Шульгина К.А., Миронова Ж.В. и др. К вопросу разубоживания и потерь полезных компонентов при отработке месторождений руд цветных металлов и золота. В кн.: Цветные металлы и минералы – 2015. Сборник докладов VII Международного Конгресса. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. С. 58–65.

⁴ Федоров Ю.О., Федоров А.Ю., Корнев О.В. и др. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации золотосодержащих и других типов руд // Золотодобывающая промышленность. 2004. № 4. С. 16–19.

Для принятия решения о применении предварительного обогащения в настоящее время используется феноменологический (геостатистический) подход, разработанный В.А. Мокроусовым [10]. Автор эмпирически установил коррелируемость обогатимости крупнокусковых урановых руд по их естественной радиоактивности с показателем контрастности (M), определяемым выражением:

$$M = \sum_{i=1}^N |C_i - \alpha| \cdot p_i : (\alpha \cdot P) , \quad (8)$$

где N – количество элементарных частей в пробе (порции) руды весом P ; C_i и p_i – содержание ценного компонента и вес i -ой части пробы соответственно.

На основании этого В.А. Мокроусов предложил оценивать E значением M по шкале, отградуированной в пределах $0 < M < 2$ реперными величинами, представленными в *табл. 1*.

Позднее В.А. Мокроусов распространил эмпирически установленную зависимость от контрастности для частного случая представления на обогатимость нерадиоактивных руд [11], а следовавшая такому подходу Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (Государственная комиссия) – вообще на все твердые металлические и неметаллические полезные ископаемые при разведке недр⁵.

В результате данные, получаемые согласно рекомендациям Государственной комиссии, зависят от того, где, как и при каких обстоятельствах производился отбор проб по весу, числу и крупности кусков, по содержанию ценного компонента, как планировались и проводились эксперименты, то есть полученные результаты в нестандартизованных условиях являются во многом субъективными и случайными характеристиками.

Использование в целях отбора проб ГОСТ 14180-80 некорректно ввиду того, что он изначально разработан под задачи химического анализа и контроля процессов в технологической модели глубокого обогащения сырья с выделением в концентрат гравитацией и флотацией частиц ценного компонента с использованием их физико-механических и физико-химических свойств⁶. Представительность проб обеспечивается

⁵Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых. М., 1993. 26 с.

⁶ГОСТ 14180-80. Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги.

при этом отбором относительно небольших объемов усредненного по содержанию ценного компонента материала и повышением равномерности распределения его частиц в процессе пробоподготовки дезинтеграцией. Предварительное обогащение же основано на использовании фактора неоднородности распределения ценного компонента в залежи и в отбитой горной массе с выделением из нее порций, кусков пустой и слабоминерализованной породы по физико-механическим свойствам и вещественному составу. При этом эксперименты проводятся на тоннажных и крупнокусковых пробах; повторение их в лабораторных условиях осложняется и затрудняется трудоемкостью.

Таким образом, параметром контрастности оценивается количественно стохастичность распределения свойств и состава массива рудного тела месторождения, то есть используется средневзвешенное относительное отклонение содержаний ценного компонента C_i в элементарных частях извлеченной из него пробы от среднего значения α (8).

Показатель контрастности связывает структурно-морфологические и геостатистические характеристики залежи с обогатимостью руды и выделением из нее части пустой и слабоминерализованной породы. Следовательно, степень коррелируемости E и M зависит в общем случае от ряда природных и производственных факторов, влияние которых учитывается в рамках феноменологического подхода, предложенного В.А. Мокроусовым, и в рекомендациях Государственной комиссии лишь частично. Возможности последних не расширили разработанные позднее стандарты^{7, 8} по изучению радиометрической обогатимости руд методами крупнопорционной сортировки и кусковой сепарации, также нуждающихся, по мнению ряда специалистов, в совершенствовании [12, 13].

Сложившаяся на основе феноменологического подхода практика внедрения предварительного обогащения свелась фактически к попыткам эмпирического применения различных типов сепараторов, что увеличило затраты недропользователей на опытно-промышленные испытания, не приводящие к положительным результатам. На наш взгляд, более правомерно будет использование физико-технического подхода при

URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200024529?ysclid=l804r7wrpr585423027>

⁷ СТО РосГео 08-009-98. Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Радиометрические методы обогащения. М.: РосГео, 1998, 74 с.

⁸ Оценка радиометрической обогатимости руд методами крупнопорционной сортировки и кусковой сепарации при разведке месторождений твердых полезных ископаемых.

URL: https://vims-geo.ru/documents/322/metodicheskiye_rekomendatsii_131.pdf

обосновании возможности использования предварительного обогащения в соответствии со следующими принципами:

- изучение природы контрастности сырья, ее зависимости от структурно-морфологических особенностей распределения рудной минерализации, физико-механических свойств и вещественного состава в условиях естественного залегания;
- управление качеством отбитой горной массы с учетом закономерностей изменения ее характеристик в процессах отбойки и добычи, разработка специфической технологии подготовки сырья к сортировке средствами дезинтеграции и грохочения;
- выбор оптимального комплекса операций и технических средств предварительного обогащения в целях выделения рентабельного объема хвостов с допустимыми потерями ценного компонента.

Согласно выражениям (4), (5) и (8), E связано через показатель разубоживания R с контрастностью отбитой горной массы. Установив с учетом этого аналитическую зависимость E от M , преобразуем выражение (8):

$$M = \sum_{i=1}^{n(C_i < C_n)} |C_i - \alpha| \cdot p_i : (\alpha \cdot P) + \sum_{i=k}^{n(C_i \geq C_n)} |C_i - \alpha| \cdot p_i : (\alpha \cdot P) , \quad (9)$$

где C_n – выбранный порог разделения элементарных частей пробы по содержанию ценного компонента; $n(C_i < C_n)$ и $n(C_i \geq C_n)$ – количество порций, кусков пробы с содержанием компонента, меньшим или большим C_n соответственно.

В результате преобразования уравнения (9) получим соотношение:

$$M = [\gamma(C_i < C_n) - \varepsilon(C_i < C_n)] + [\gamma(C_i \geq C_n) - \varepsilon(C_i \geq C_n)] , \quad (10)$$

где $\gamma(C_i < C_n)$ и $\gamma(C_i \geq C_n)$ – выходы; $\varepsilon(C_i < C_n)$ и $\varepsilon(C_i \geq C_n)$ – извлечения ценного компонента из исходной пробы в обедненную и обогащенную фракции соответственно.

Учитывая второй постулат М.Д. Барского и уравнение (1), получим следующие выражения для M и E :

$$M = 2E(1 - \alpha : \beta_M) ,$$

$$E = M : 2(1 - \alpha : \beta_m) . \quad (11)$$

Коэффициент 2 в уравнении (11) введем в выражение (8), преобразовав его к виду:

$$M = \sum_{i=1}^N |C_i - \alpha| \cdot p_i : (2\alpha \cdot P) , \quad (12)$$

Такая корректировка уравнения (8) не изменяет сущности введенного В.А. Мокроусовым понятия контрастности и означает лишь равенство оценки M по частям пробы с содержанием C_i ценного компонента в руде α .

Величина M при этом изменяется в пределах $0 < M < 1$ (табл. 1) и соответствует первому постулату М.Д. Барского как общая характеристика операций обогащения:

$$M = E(1 - \alpha : \beta_m) ,$$

$$E = M : (1 - \alpha : \beta_m) . \quad (13)$$

Соотношения (13) получены при условии сортировки порций (кусков) по величине C_i в них, оцениваемой блоком возбуждения-детектирования (сенсором) с идеальной селективностью или с «нулевой» погрешностью. В реальных аппаратах C_i оценивается с «ненулевой» погрешностью, а порции и куски с одинаковым содержанием C_i сортируются в обогащенный или обедненный продукты вероятностным образом с частотой, описываемой функцией F , нормируемой условием $0 < F < 1$. По физическому смыслу F характеризует операцию разделения и способность аппарата с выбранным сенсором, признаком и порогом сортировать элементарные части конкретной руды на обогащенный и обедненный продукты.

Преобразуя выражение (9) с введением в него функции F , получим общее выражение для обогатимости E различных видов твердых полезных ископаемых с применением любых технических средств и признаков разделения в операциях обогащения:

$$E = M \cdot T \cdot F , \quad (14)$$

$$T = 1 : (1 - \alpha : \beta_m) , \quad (15)$$

Анализ выражений (14) и (15) показывает, что эффективность процессов предварительного обогащения определяется усредненными значениями величин M , T и F , их изменчивостью в реальных производственных условиях. Для сырья с содержанием ценных компонентов на уровне 10^{-5} – $10^{-1}\%$ параметр $\alpha:\beta_m \ll 1$, величина $T \approx 1$, а E зависит только от M и F . При $F \rightarrow 1$ уравнение (14) преобразуется без большой погрешности к соотношению прямой коррелируемости, установленной В.А. Мокроусовым при радиометрическом обогащении руд с содержанием урана в них обычно менее 1%:

$$E \approx M. \quad (16)$$

Тесная коррелируемость E и M обусловлена тем, что $F \rightarrow 1$ в силу физической природы жесткого радиоактивного излучения, слабее зависящего от структуры, свойств, крупности, состава и формы кусков, чем рентгеновские, оптические или иные виды применяемых излучений. Условие $F \rightarrow 1$ является общим критерием выбора для конкретной руды метода и средства ее сортировки, режимов работы сенсора. Применение оборудования с $F \ll 1$ снижает эффективность предварительного обогащения даже высококонтрастных руд ($M \rightarrow 1$).

В табл. 1 представлены значения M , полученные увеличением в два раза граничных значений эффективности E (1). Сопоставление их с данными, приведенными в табл. 1, объясняет происхождение реперных значений M , выбранных В.А. Мокроусовым для своей шкалы радиометрической обогатимости руд.

Таким образом, очевидно, что применение феноменологического подхода ограничивается случаями обогащения радиоактивных руд, сырья с низким содержанием ценного компонента при условии использования сортировочных устройств с $F \rightarrow 1$.

Результаты

В общем случае эффективность предварительного обогащения определяется вариативностью факторов M , T и F в процессах добычи, транспортировки и подготовки руды к сортировке. При этом определяющей является сильная зависимость контрастности M от стохастического распределения ценного компонента в элементарных частях руды и их крупности, среднего содержания в порциях, менее значимая – от структурно-текстурных характеристик, плотности и прочности рудных и породных агрегатов руды и т.д. Для руд со средним и высоким содержанием

ценного компонента (свинца, цинка, хрома, марганца, железа и т.д.) зависимость E от M , T и F становится сопоставимой. Достижение максимальных значений E при этом зависит от того, как действуют эти факторы, разно- или однонаправлено, а также от возможностей учета их изменений путем использования технологии предварительного обогащения.

Величина F не только определяется конструкцией и характеристиками сенсора обогатительного аппарата, но и стохастически зависит от следующих особенностей рудного материала и условий его сортировки:

- от наличия влаги, пыли, шлама, глины на элементарных частях руды;
- от статистической погрешности регистрации сигналов, достоверности измерения их величин с учетом состава рассеянного первичного излучения и приборного фона, взаимных наложений сигналов от сопутствующих химических элементов руды;
- от изменчивости структуры, физико-механических свойств и вещественного состава, абсорбционной способности руды, проявлений дифракционных эффектов на природных минералах в рентгенорадиометрических методах;
- от вариативности форм-фактора с изменениями крупности и формы кусков руды, расстояния между ними и сенсором, со стохастичностью распределения частиц ценного компонента на поверхности и внутри кусков и т.д.

Соответственно, эффективность предварительного обогащения определяется условиями возбуждения, регистрации и обработки сигналов, минимизирующих влияние указанных факторов на достоверность оценки C_i и, соответственно, на селективность разделения рудопотока на обогащенный и обедненный продукты.

Анализ выражений (14) и (15) указывает на ряд обстоятельств, отличающих процессы предварительного и глубокого обогащения. Во втором случае из-за нахождения ценного компонента в виде мономинерала в потоке пульповидного материала с крупностью частиц менее 1–2 мм можно принять $M \approx const$. Эффективность обогащения E определяется при этом усредненным значением и вариативностью параметра T питания обогатительной фабрики с изменением α . Обогащаемость E повышают при этом увеличением α , а также усреднением руд с высокой изменчивостью состава, стадийным доизмельчением и классификацией материала по крупности в тех операциях, где α достигает значений более 5–10%. При этом, чем ниже контрастность материала и селективность F

выбранного обогащательного оборудования, флотореагентов и т.д., тем больше перечисток потребуется для получения товарного концентрата.

Выводы

Эффективность работы установок предварительного обогащения определяется в первую очередь зависимостью контрастности M от свойств и состава отбитой горной массы, во вторую – качеством ее подготовки к сортировке и лишь в третью – условиями сортировки потока на обогащенный и обедненный продукты.

Оценка эффективности предварительного обогащения, основанная на феноменологическом подходе, не обеспечивают разработку эффективных промышленных технологий переработки руд цветных металлов с параметрами, близкими к теоретически возможным. Это обусловлено низкой достоверностью тестовых оценок эффективности (E) предварительного обогащения на единичных пробах руды конкретного месторождения, высокой вариативностью контрастности (M) руд. Повышение достоверности оценки неоднократным повторением эксперимента осложняется повышением трудоемкости работ с крупнотоннажными пробами, что увеличивает затраты на отработку месторождений.

Таблица 1

Сравнение параметров градуировки шкалы контрастности руд

Table 1

Comparison of calibration parameters of the ore contrast scale

Группа руд	Показатель контрастности по формуле (8)	Показатель контрастности по формуле (12)	Взаимосвязь контрастности с эффективностью обогащения
Неконтрастная	<0,4	<0,2	<0,5 ($E < 25\%$)
Низкоконтрастная	0,4–0,7	0,2–0,35	0,5–1 ($E = 25–50\%$)
Среднеконтрастная	0,7–1,1	0,35–0,55	1–1,5 ($E = 50–75\%$)
Высококонтрастная	1,1–1,5	0,55–0,75	> 1,5 ($E > 75\%$)
Особоконтрастная	>1,5	>0,75	–

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. Чантурия В.А. Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Горный журнал. 2007. № 2. С. 2–9. URL: <https://rudmet.ru/journal/738/article/10320/>
2. Robben C., Wotruba H. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining – Past, Present and Future. *Minerals*, 2019, vol. 9, iss. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/min9090523>
3. Lixia Li, Genzhuang Li, Huaizhe Li et al. Bench-scale Insight into the Amenability of Case Barren Copper Ores towards XRF-based Bulk Sorting. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 121, pp. 129–136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.023>
4. Mikysek P., Trojek T., Mészárosóvá N. et al. X-ray Fluorescence Mapping as a First-Hand Tool in Disseminated Ore Assessment: Sandstone-hosted U–Zr Mineralization. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 141. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105840>
5. Терещенко С.В., Шубаева Д.Н. Повышение качественных показателей рудопотока с использованием методов предконцентрации: теория и практика // Горный журнал. 2020. № 9. С. 60–65. URL: <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.08>
6. Барский М.Д. Оптимизация процессов разделения зернистых материалов. М.: Недра, 1978. 168 с.
7. Шехирев Д.В., Думов А.М., Стрижко В.С. Феноменологический смысл эффективности разделения по Ханкоку–Луйкену и дополнительный критерий эффективности // Обогащение руд. 2010. № 2. С. 31–35. URL: <https://www.rudmet.com/journal/25/article/2041/>
8. Зверевич В.В., Перов В.А. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1971. 216 с.
9. Конев А.В., Киселева С.П., Штреслер К.А., Миронова Ж.В. Проблемы отработки месторождений руд цветных металлов и золота с предварительным обогащением // Записки горного института. 2013. Т. 205. С. 179–184. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-otrabotki-mestorozhdeniy-rud-tsvetnyh-metallov-i-zolota-s-predvaritelny-m-obogascheniem/viewer>

10. Мокроусов В.А., Гольбек Г.Р., Архипов О.А. Теоретические основы радиометрического обогащения радиоактивных руд. М.: Недра, 1968. 172 с.
11. Мокроусов В.А., Лилеев В.А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М.: Недра, 1979. 192 с.
12. Романчук А.И., Жарков В.В., Богомолов В.А. Отбор и подготовка проб при проведении исследований по крупнокусковой радиометрической сепарации руд золота // Разведка и охрана недр. 2013. № 9. С. 10–14.
13. Кобзев А.С., Алушкин И.В., Ольховский А.М. и др. Результаты полупромышленных испытаний предварительного обогащения золотосодержащих руд месторождения Коневинское методом фотометрической сепарации // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 10–14.
URL: <https://rudmet.ru/journal/1292/article/21989/>

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

pISSN 2073-1477
eISSN 2311-8733

Environmental Economics

ASSESSMENT OF THE BENEFICIATION EFFICIENCY CRITERIA WHEN NONFERROUS METAL ORES MINING

Kristina A. SHUL'GINA ^a,
Lyudmila N. KUZINA ^{b,*},
Zhenni V. MIRONOVA ^c

^a Siberian Federal University (SibFU),
Krasnoyarsk, Russian Federation
sibirak888@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0659-1302>

^b Siberian Federal University (SibFU),
Krasnoyarsk, Russian Federation
debi13@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4137-5549>

^c Siberian Federal University (SibFU),
Krasnoyarsk, Russian Federation
mirgenni@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1735-0683>

* Corresponding author

Article history:

Article No. 326/2022
Received 7 July 2022
Received in revised
form 17 August 2022
Accepted 5 Sept 2022
Available online
13 October 2022

JEL classification:
Q32, Q55

Keywords: efficiency,
pre-processing,
evaluation criteria,
subsoil use

Abstract

Subject. This article discusses the functioning of mining enterprises of the Krasnoyarsk Krai.

Objectives. The article aims to determine the possibilities of applying beneficiation when developing nonferrous metal ores deposits.

Methods. For the study, we used analysis, comparison, generalization, and the mathematical methods.

Results. The article proves the limitations of the possibility of a phenomenological approach to improving the efficiency of mining enterprises. The article proposes to use a universal physical and technological approach that allows to reduce metal losses with waste and reduce the costs of advanced beneficiation and chemical and metallurgical extraction, as well as the environmental burden.

Relevance. The results of the study can be used when developing a strategy for the development of industries engaged in the extraction of minerals.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2022

Please cite this article as: Shul'gina K.A., Kuzina L.N., Mironova Zh.V. Assessment of the Beneficiation Efficiency Criteria When Nonferrous Metal Ores Mining. *Regional Economics: Theory and Practice*, 2020, vol. 20, iss. 10, pp. 1968–1984.
<https://doi.org/10.24891/re.20.10.1968>

References

1. Chanturiya V.A. [Prospects of stable development of Russian mining industry]. *Gornyi Zhurnal*, 2007, no. 2, pp. 2–9.
URL: <https://rudmet.ru/journal/738/article/10320/> (In Russ.)
2. Robben C., Wotruba H. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining – Past, Present and Future. *Minerals*, 2019, vol. 9, iss. 9.
URL: <https://doi.org/10.3390/min9090523>
3. Lixia Li, Genzhuang Li, Huaizhe Li et al. Bench-scale Insight into the Amenability of Case Barren Copper Ores towards XRF-based Bulk Sorting. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 121, pp. 129–136.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.023>
4. Mikysek P., Trojek T., Mészárosóvá N. et al. X-ray Fluorescence Mapping as a First-Hand Tool in Disseminated Ore Assessment: Sandstone-hosted U–Zr Mineralization. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 141.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105840>
5. Tereshchenko S.V., Shibaeva D.N. [Ore quality improvement by pre-concentration: Theory and practice]. *Gornyi Zhurnal*, 2020, no. 9, pp. 60–65. (In Russ.) URL: <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.08>
6. Barskii M.D. *Optimizatsiya protsessov razdeleniya zernistyykh materialov* [Optimization of granular material separation processes]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 168 p.
7. Shekhirev D.V., Dumov A.M., Strizhko V.S. [Phenomenological sense of separation efficiency by Hancock-Luiken, and additional criterion of efficiency]. *Obogashchenie Rud*, 2010, no. 2, pp. 31–35.
URL: <https://www.rudmet.com/journal/25/article/2041/> (In Russ.)
8. Zverevich V.V., Perov V.A. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Basics of mineral processing]. Moscow, Nedra Publ., 1971, 216 p.
9. Konev A.V., Kiseleva S.P., Shtresler K.A., Mironova Zh.V. [Problems of mining of non-ferrous metals and gold deposits with pre-enrichment]. *Zapiski gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2013, vol. 205, pp. 179–184. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-otrabotki-mestorozhdeniy-rud-tsvetnykh-metallov-i-zolota-s-predvaritelnyim-obogascheniem/viewer> (In Russ.)

10. Mokrousov V.A., Gol'bek G.R., Arkhipov O.A. *Teoreticheskie osnovy radiometricheskogo obogashcheniya radioaktivnykh rud* [Theoretical foundations of radiometric enrichment of radioactive ores]. Moscow, Nedra Publ., 1968, 172 p.
11. Mokrousov V.A., Lileev V.A. *Radiometricheskoe obogashchenie neradioaktivnykh rud* [Radiometric enrichment of non-radioactive ores]. Moscow, Nedra Publ., 1979, 192 p.
12. Romanchuk A.I., Zharkov V.V., Bogomolov V.A. [Sampling and sample preparation when research on gold ores radiometric separation]. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2013, no. 9, pp. 10–14. (In Russ.)
13. Kobzev A.S., Alushkin I.V., Ol'khovskii A.M. [The results of pilot-scale testing of the Konevinskoe deposit gold-bearing ore preliminary beneficiation by photometric sorting]. *Obogashchenie Rud*, 2014, no. 2, pp. 10–14.
URL: <https://rudmet.ru/journal/1292/article/21989/> (In Russ.)

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.