

ПРОБЛЕМЫ РАЗВЕДКИ И ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЗОЛОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ

А.В. Конев¹, К.А. Шульгина², Ж.В. Миронова²,
Л.Н. Кузина², С.Ф. Богдановская²

¹ОАО «СИБЦВЕТМЕТНИИПРОЕКТ», г. Красноярск, Россия

²ВГАОУ ВПО СФУ, г. Красноярск, Россия

Основу минерально-сырьевой базы (МСБ) России составляют месторождения, как правило, в малодоступных районах, со значительными запасами преимущественно рядовых и бедных, труднообогатимых, залегающих на значительных глубинах со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями добычи. Их кондиционные части, окруженные на 50 ÷ 80 % породой и забалансовой рудой, стали пассивными на 20 ÷ 80 % вследствие изменения в 90-ых годах прошлого столетия экономических, правовых и экологических условий освоения.

Переоценка запасов с учетом мировых цен на металлы показывает, что в категорию забалансовых в ближайшей перспективе перейдет от 30 до 50 % свинцовых и оловянных, от 15 до 30 % титановых, медных и вольфрамовых руд. Доля таковых в обогащаемом сырье возросла за последние 20 - 25 лет с 15 до 40 %, а содержание цветных металлов и золота в них снизилось в 1,2 ÷ 1,5 раза, в том числе в связи с все более широким применением добычи открытым способом, дешевых массовых способов отбойки, высокопроизводительной горной техники, затрудняющих селективную выемку [1].

Снижение кондиций сопровождается увеличением доли в сырье комплексных руд с вредными примесями, мелкокрапленных, с субмикрочернистой структурой, возможности рентабельной переработки которых с применением традиционных технологий глубокого обогащения практически исчерпаны. Полезные минеральные агрегаты таких руд раскрываются селективно на отдельные фазы только измельчением до крупности - 50 + 5 мкм, где значительная часть энергии процесса расходуется не на раскалывание, а на пластическую деформацию минеральных частиц [2], ухудшающей физико-химические свойства их поверхности, на использовании которых основано обогащение флотацией, снижает эффективность работы мельниц.

Недоизмельчение таких руд приводит к потерям до 30 – 40 % полезного компонента в сростках с минералами пород в хвостах, переизмельчение – со шламами в виде наиболее мелких частиц, снижаемых заменой традиционных щековых и конусных дробилок, шаровых мельниц на селективную дезинтеграцию в инерционных дробилках, мельницах динамического самоизмельчения, газоструйных и пружинных мельницах для сверхтонкого измельчения.

Таким образом, обеднение и ухудшение качества руд стимулирует применение все более сложных схем измельчения и обогащения, новых видов оборудования и реагентов, вследствие чего растет себестоимость извлечения, опережая динамику роста рыночных цен на конечную продукцию (концентраты, металлы, их соединения), снижая конкурентоспособность и инвестиционную привлекательность, создавая сырьевой и экономический барьеры развитию горно-металлургического комплекса (ГМК).

Радикальным решением обозначенных проблем является технологическая модернизация с изменением схемы переработки руд, когда в концентрат извлекается легкообогащаемая часть полезных минералов, а нераскрытые агрегаты в виде бедного концентрата либо пром-

продукта направляются в химико-металлургический передел. Это обеспечивает комплексное использование сырья, получение металлов и химических соединений с высоким сквозным извлечением, но ведет к удорожанию товарной продукции [1].

Экономический барьер широкого применения химико-металлургических технологий устраняется снижением издержек на стадиях разведки, отбойки, транспортировки и глубокого обогащения руд, в том числе за счет применения предварительного обогащения (ПО) - механического разделения горной массы на отвальную породу, забалансовую руду и продукт с повышенной концентрацией полезных компонентов, с использованием зависимости между их содержанием и физическими свойствами частиц (кусков или порций): размера, плотности и анизотропии, плотности потока естественного (природного), отраженного (рассеянного) либо наведенного излучений (люминесценции, флуоресценции, активированного): нейтронного, гамма, рентгеновского и оптического спектров, изменений магнитных, электростатических и электромагнитных свойств [3-5].

Технологической целью ПО является выделение в отвальный продукт полиминеральных кусков (частиц) крупностью – $300 + 1$ мм разубоживающей массы (породы и части забалансовых руд), с допустимыми потерями ϵ_x полезного компонента А с ней, экономической – снижение эксплуатационных затрат на дальнейшую переработку руды, повышение рентабельности извлечения и прибыли на $20 \div 60$ %, организационно - управленческой – создание дополнительных механизмов обеспечения устойчивого функционирования ГМК в условиях неопределенности с запасами, изменяющейся рыночной конъюнктуры на реагенты, машины и оборудование, цен на конечную продукцию, снижение зависимости от импорта [4-7].

Предварительное обогащение не нашло до настоящего времени широкого применения, несмотря на наличие комплекса разнообразных и взаимно дополняющих друг друга методов и средств, лишь частично используемых для переработки материалов крупностью $-20 + 1$ мм обогащением в тяжелых суспензиях, отсадкой, концентрированием на центробежных принципах, магнитной, электростатической и воздушной сепарацией (см. Таблица 1).

Таблица 1

Области применения методов предварительного обогащения

Класс крупности, мм	Стадия переработки руд	Известные методы переработки руд	Коэффициент обогащения K_0
- 1 + 0	Глубокое обогащение, переработка концентратов	Гравитационные и флотационные методы обогащения (мокрые методы), химико-металлургическая переработка концентратов гидро – и пирометаллургическими методами	10 ÷ 100
- 5 + 1	Предварительное обогащение	Пневмо – (воздушная), электростатическая и магнитная сепарация, центробежные и винтовые концентраторы (мокрые и сухие методы)	2 ÷ 10
- 20 + 5	Предварительное обогащение	Обогащение в тяжелых средах, отсадка, избирательное дробление – грохочение (мокрые и сухие методы)	2 ÷ 10
- 300 + 20	Предварительное обогащение	Радиометрическая кусковая сепарация (сухие методы, возможна предварительная отмывка рудной массы от глины и шламов)	2 ÷ 10
+ 300	Предварительное обогащение	Радиометрическая порционная сортировка, управление качеством руд перед обогащением (сухие методы)	1 ÷ 2

Использование водных и специальных сред принуждает размещать комплексы ПО рядом или в составе ОФ, тогда как для снижения транспортных и утилизационных затрат целесообразнее приближать их к рудникам, чему в максимальной степени соответствуют радиометрические методы сухого обогащения (РМО), в том числе наиболее универсальные из них рентгенорадиометрическая порционная сортировка и кусковая сепарация [8-13]. Применение последней для материала крупностью менее 20 мм осложняется ростом эксплуатационных затрат из-за снижения производительности, высокой единичной стоимости установок и расходов комплектующих к ним.

Всплеск интереса в 80-ых годах прошлого столетия к РМО материала крупностью -300+20 мм ограничился исследованиями вопросов выбора разделительных признаков, регистрации и обработки сигналов, лабораторным апробированием методов, укрупненными стендовыми испытаниями опытных образцов оборудования на малотоннажных пробах различных типов руд. Результаты их изложены в многочисленных научных публикациях, обобщены в методических рекомендациях ГКЗ [3, 14, 15], МинГео [16, 17] и ВИМС [18-21]. Практическая ценность названных рекомендаций ограничена, поскольку основаны они на разработанной в середине прошлого столетия Мокроусовым В.А. [22] и Пухальским Л.Ч. [23] теории контрастности, не получившей с тех пор дальнейшего развития.

Действительно, предварительную обогатимость руд предлагается оценивать в соответствии с принятой в работе [3] формально-абстрактной шкалой (см. Таблица 2) по величине показателя контрастности

$$M = \sum_{i=1}^n |C_{ai} - \check{C}_a| \cdot p_i \div \check{C}_a \cdot P \quad , \quad (1)$$

где i - порядковый номер, а n - число частиц (кусков или порций) в пробе руды общим весом P ; p_i и C_{ai} - соответственно вес и содержание полезного компонента А в i -ой части; \check{C}_a - среднее содержание компонента А в пробе, без исследования очевидной зависимости величины M от объема n порции руды, от вещественного и гранулометрического состава, от \check{C}_a , от формы и содержания $C_{ам}$ компонента А в природном минеральном агрегате, от структурно-текстурных характеристик, степени разубоживания R руд в пределах диапазонов их возможных изменений, от морфологии рудного тела и технологических обстоятельств разведки, отбойки и переработки руд, тогда как согласно утверждению самого Мокроусова В.А. никакой, даже самый современный обогатительный аппарат и процесс, не в состоянии обеспечить эффективное выделение концентрата или хвостов, если обработке подвергается слабоконтрастная руда, состоящая из порций, кусков (частиц), мало различающихся между собой по содержанию полезного компонента [9].

Таблица 2

Классификация руд по контрастности

Группа	Показатель контрастности М
Неконтрастные	< 0,4
Низкоконтрастные	0,4 – 0,7
Среднеконтрастные	0,7 – 1,1
Высококонтрастные	1,1– 1,5
Особоконтрастные	> 1,5

Но как раз ответа на вопрос о том, а каким образом обеспечить необходимую контрастность руд непосредственно перед сортировкой инструкции [3, 14-21] не дают. В связи, с чем

сфера их применения ограничена геологическим поиском, оценкой рудопроявлений и разведкой месторождений. Впрочем, документы не содержат также указаний и на то, каким образом показатель M взаимосвязан с типом и качеством руд, как его установление может повлиять на определение их запасов, отразиться на кондициях и экономике отработки месторождения, на эффективности выделения хвостов предварительным обогащением с приемлемыми потерями металла. Без ответов на эти вопросы проблематично технико-экономическое обоснование (ТЭО) инвестиционной привлекательности разведываемого месторождения, оценка перспектив его освоения.

Присутствие породы и забалансовой руды в отбитой горной массе обусловлено разубоживанием R , оцениваемого известным выражением [24, 25]

$$R = (C_0 - C_{ap}) / C_0 \quad , \quad (2)$$

где C_0 и C_{ap} - соответственно, средние содержания компонента A в отрабатываемых запасах и в отбитой горной массе.

С середины 80-ых годов в развитии теории и практики недропользования проявились изменения концептуального характера, рассматривающие месторождения как динамичные во времени, кластерно организованные двухфазные системы с вероятностным (стохастическим) распределением в пространстве рудного тела с балансовыми запасами весом P дифференцированных и локализованных кусков, порций, блоков и участков с балансовой рудой, перемежаемых породой и забалансовым сырьем [24-26].

В связи с чем отбитую горную массу Q условно разделяют на балансовую руду $Q_{кр}$ и породную (некондиционную) составляющую $Q_{нк}$, а величину R оценивают при этом соотношением

$$R = \frac{Q_{нк}}{Q} = \sum_{i=1}^{N_{нк}} \frac{r_i P_i}{P} = R_{гэ} + R_{гт} \quad (3)$$

где r_i – вес i – ого куска, порции, участка или блока породы и забалансовой руды, а $N_{нк}$ – их количество в рудном теле, $R_{гэ}$ - геолого – экономическое разубоживание, обусловленное природными процессами рудообразования, морфологией рудного тела, технологией его разведки и оконтуривания, методикой подсчета экономически активных запасов месторождения, $R_{гт}$ - горно - технологическое разубоживание, связанное в основном с прихватыванием вмещающих пород, прослоек, части забалансовых руд при отбойке горной массы [24, 25].

Согласно результатам опробования доля кондиционных порций, участков и блоков составляет в объеме рудного тела для алмазосодержащих месторождений менее 1 %, для золотосодержащих – 10 ÷ 25 %, для других цветных металлов – до 50 %. Тогда как величина $R_{гэ}$ варьируется соответственно для месторождений полиметаллических руд в пределах 0,30 ÷ 0,50, для редкоземельных, редкометальных и золотосодержащих руд - 0,50 ÷ 0,90, для алмазосодержащих - 0,90 ÷ 0,98 [4, 5, 24, 25, 27] (Таблица 3).

Таблица 3

Доля кондиционной руды в различных месторождениях

Тип руды (месторождения)	Доля кондиционной руды, % отн.	Содержание полезного компонента в рудах, % масс.	Кларковое содержание полезного компонента, % масс.
Алмазосодержащие руды	1 ÷ 2	$10^{-7} \div 10^{-6}$	
Золотосодержащие руды	10 ÷ 25	$10^{-5} \div 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Редкоземельные руды	20 ÷ 30	$10^{-4} \div 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3} \div 8 \cdot 10^{-4}$
Редкометальные руды	30 ÷ 35	$10^{-3} \div 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-7}$

Урансодержащие руды	35 ÷ 50	10 ⁻² ÷ 10 ⁻¹	3·10 ⁻⁴ ÷ 8·10 ⁻⁴
Полиметаллические руды	30 ÷ 50	10 ⁻¹ ÷ 10	1·10 ⁻² ÷ 1·10 ⁻³
Нефелиновые, бокситовые, флюоритовые и другие руды	50 ÷ 80	10 ÷ 50	

Практика и численные оценки показывают, что экономическая эффективность применения ПО в решающей степени определяется снижением как раз геолого – экономического $R_{гэ}$, в меньшей степени - горно-технологического разубоживания $R_{гт}$ [26]. Независимо от различий их природы величина R определяет в первом приближении теоретический предел кратности предварительного обогащения [4, 5]

$$K_{по} = C_{ак}/C_{ап} \approx Q/Q_{кр} = 1 / 1 - R \quad , \quad (4)$$

($C_{ак}$ – содержание полезного компонента A в концентрате ПО), составляющего для алмазосодержащих руд 30 ÷ 50, для золотосодержащих - 5 ÷ 10, понижаясь до 2 ÷ 3 для полиметаллических руд.

С использованием известных в теории обогащения выражений для выхода γ_x и извлечения ε_x компонента A в хвосты ПО

$$\gamma_x = (C_{ак} - C_{ап}) / (C_{ак} - C_{ах}) \quad , \quad (5)$$

$$\varepsilon_x = \gamma_x \cdot C_{ах} / C_{ап} \quad , \quad (6)$$

где $C_{ах}$ – содержание полезного компонента A в хвостах ПО, получим следующее уравнение для $K_{по}$

$$K_{по} = (1 - \varepsilon_x) / (1 - \gamma_x) = \varepsilon_k / \gamma_k \quad , \quad (7)$$

в котором ε_k и γ_k – извлечение металла и выход концентрата ПО соответственно.

Согласно выражению (7) кратность ПО тем выше, чем больше выход хвостов и чем меньше извлечение в них компонента A . При выходе хвостов в пределах величины разубоживания R отбитой горной массы

$$K_{по} = (1 - \varepsilon_x) / (1 - R) \quad . \quad (8)$$

Потери металла при отработке месторождений нормируются требованиями ГКЗ, контролируются надзорными органами. Сверхнормативные потери чреватые для недропользователя штрафами и санкциями, вплоть до отзыва лицензии. Поэтому минимальность потерь ε_x полезного компонента с хвостами ПО является одним из основных условий целесообразности внедрения ПО при отработке месторождений полезных ископаемых.

Таким образом, на стадии оценки и разведки месторождения необходимо устанавливать формы и степень геолого-экономического разубоживания, свойства руд, могущих повлиять на показатели ПО: распределение горной массы по величине M в рудном теле, взаимосвязь M с морфологическими и структурно-текстурными характеристиками руд, распределения форм и размера минеральных агрегатов с полезным компонентом, степень их ассоциации с породообразующими элементами и вмещающими породами и т.д.

Действительно, преобразуем выражение (1) в предположении $n \rightarrow \infty$, с учетом того, что отбитая масса руды объемом Q включает кондиционную часть $Q_{кр}$ с числом кусков N_k и некондиционную составляющую $Q_{нс}$, содержащую породу и забалансовую руду, к виду

$$M = \sum_{i=1}^{N_K} |C_{aiK} - \check{C}_a| \cdot p_{iK} \div \check{C}_a \cdot P + \sum_{i=1}^n |C_{aiII} - \check{C}_a| \cdot p_{iII} \div \check{C}_a \cdot P \quad (9)$$

Принимая во внимание, что

$$C_{aiII} \approx 0, \text{ а } \sum_{i=1}^n p_{aiII} \div P = R \quad (10)$$

получим

$$M = \sum_{i=1}^{N_K} |C_{aiK} - \check{C}_a| \cdot p_{iK} \div \check{C}_a \cdot P + R \quad (11)$$

Учитывая соотношения (3), а также то, что

$$\check{C}_a = \sum_{i=1}^{N_K} C_{aiK} \cdot p_{iK} \div P + \sum_{N_K+1}^n C_{aiII} \cdot p_{iII} \div P \quad (12)$$

найдем, что

$$M = R(T) + R, \quad (13)$$

где

$$R(T) = [m(C_{ai} > \check{C}_a) - m(C_{ai} < \check{C}_a)] + [\gamma(C_{ai} < \check{C}_a) - \gamma(C_{ai} \geq \check{C}_a)] \quad (14)$$

$m(C_{ai} \geq \check{C}_a)$ и $m(C_{ai} < \check{C}_a)$ - относительные доли веса полезного компонента А, а $\gamma(C_{ai} \geq \check{C}_a)$ и $\gamma(C_{ai} < \check{C}_a)$ - относительные доли веса горной массы в блоках руды с содержанием компонента А большим или меньшим его среднего содержания \check{C}_a соответственно в запасах.

Согласно определению R [24, 25], выражениям (13) и (14) величина М является интегральной характеристикой природных свойств руд конкретного месторождения с оконтуренными (утвержденными) запасами, значение которой зависит от типа, структурно-текстурных характеристик руд, обстоятельств и технологии разведки, морфологии и геостатистического моделирования рудного тела.

Нижний предел изменений $M \rightarrow 0$ определяется степенью разубоживания $R \rightarrow 0$ при условии $R(T) \approx 0$, то есть если

$$\gamma(C_{ai} < \check{C}_a) \approx \gamma(C_{ai} \geq \check{C}_a) \quad , \quad (15)$$

$$m(C_{ai} \geq \check{C}_a) \approx m(C_{ai} < \check{C}_a) \quad . \quad (16)$$

Очевидно, что последнее условие выполняется для месторождений полиметаллических мелковкрапленных руд с относительно невысоким разубоживанием (см. Таблица 3), с достаточно равномерным распределением компонента А в объеме рудного тела, когда балансовые запасы сырья и полезного компонента А сосредоточены в блоках с $C_{ai} < \check{C}_a$ и $C_{ai} \geq \check{C}_a$ соответственно в примерно равных долях.

Величина М достигает максимальных значений ($M \rightarrow 2$) для жильных месторождений золотосодержащих, редкометалльных и редкоземельных руд с высоким разубоживанием $R \rightarrow 1$ (см. Таблица 2), где основная часть запасов сырья представлена блоками с $C_{ai} < \check{C}_a$, тогда как компонент А сосредоточен преимущественно в блоках с $C_{ai} \geq \check{C}_a$, при этом $R(T) \rightarrow 1$.

Сопоставляя данные выводы, предложенную в работе [3] шкалу классификации руд по контрастности М (см. Таблица 2), сведения о геолого-экономическом разубоживании $R_{гэ}$ разных типов руд (см. Таблица 3), а также используя предложенную авторами методику оценки

экономической эффективности $\mathcal{E}_{\text{по}}$ применения ПО [6, 7] получим, что показатель контрастности руд M коррелирует прямо пропорционально с показателями их разубоживания $R_{\text{гз}}$ и эффективности $\mathcal{E}_{\text{по}}$ предварительного обогащения, тогда как последние – между собой (Таблица 4).

Таблица 4

Взаимосвязь контрастности M и экономической эффективности ПО руд

№/ № п/ п	Группа руд	Показатель контрастности M	Тип руды (месторождения)	Доля кондиционной руды, % отн.	$R_{\text{гз}}$, % отн.	$\mathcal{E}_{\text{по}}$, % отн.
1	Неконтрастные	$< 0,4$	Нефелиновые, бокситовые, флюоритовые и другие руды	$50 \div 80$	$20 \div 50$	13
2	Низкоконтрастные	$0,4 \div 0,7$	Полиметаллические руды	$30 \div 50$	$50 \div 70$	34
3	Среднеконтрастные	$0,7 \div 1,1$	Урансодержащие, редкометалльные руды	$20 \div 40$	$60 \div 80$	44
4	Высококонтрастные	$1,1 \div 1,5$	Редкоземельные, золотосодержащие руды	$10 \div 30$	$70 \div 90$	56
5	Особоконтрастные	$> 1,5$	Алмазосодержащие руды	$1 \div 2$	$95 \div 98$	83

Величину $\mathcal{E}_{\text{по}}$ оценивали принимая относительные затраты на переработку руд в общей стоимости товарной продукции $\xi_{\text{п}} \approx 0,50$, извлечение ϵ_{x} полезного компонента A в хвосты ПО менее 5 %, а выход хвостов γ_{x} при сортировке равным усредненному значению разубоживания руд $R_{\text{гз}}$ (см. Таблица 3).

Таким образом, технологическая целесообразность и экономическая эффективность ПО оценивается в первом приближении уже на стадии поиска и геологической разведки месторождения, с использованием сведений о вещественном и гранулометрическом составах руд, значениях M и R , что оказывает обратное влияние на ход предварительной и детальной разведки, на определение объема запасов, включаемых в государственный баланс, на разработку ТЭО кондиций, в конечном счете, ранжирует по инвестиционной привлекательности и перспективности отработки.

Однако действующие на сегодня методические руководства, декларируя целью ПО улучшение технико–экономических показателей добычи и переработки руд путем удаления из отбитой массы породы и некондиционных руд, с вредными примесями, стабилизации либо разделения руд на бедные, рядовые и богатые, не указывают конкретных путей достижения этих целей, правил разработки технологических регламентов для проектирования ФПО (см. п. 1.3 [3]), без чего нельзя потенциальные возможности преобразовать в технологический результат – обеспечить выход хвостов ПО $\gamma_{\text{x}} \geq R$ и $\epsilon_{\text{x}} \leq 5$ % отн.

ГКЗ предлагает оценивать контрастность руд, физические признаки их разделения, прогнозные показатели РМО в ходе предварительной разведки месторождения с использованием результатов опробования, геофизических и лабораторных исследований вещественного и гранулометрического составов, структурно-текстурных характеристик, строения рудных тел, соотношения богатых, рядовых и убогих руд, породных участков (см. п. 2 [3]), но опять же без конкретных указаний на то, как разрабатывать кондиции, вести отбойку, дробление и грохочение, выбирать схемы аппаратов, режимы работы оборудования многозвенной и многофакторной технологии ПО, без чего невозможно проектирование ФПО.

Предписываемый ГКЗ порядок технологических исследований (см. п. 2.3 в [3]) противоречив и трудно реализуем. Требуемые для ТЭО инвестиций и проектирования ФПО исходные данные предлагается получать путем строительства опытно – промышленного предприятия (ОПП) на месторождении с объемом добычи около миллиона тонн селективной выемкой руд разного качества, с затратами, сопоставимыми со стоимостью ФПО [4, 5].

В силу вышеизложенного реализация горно-металлургических проектов с применением ПО для освоения месторождений золота, редких и редкоземельных металлов, урана, как объектов повышенного промышленного и инвестиционного интереса (см. Таблицы 3 и 4), связана с геологическими, научными, организационными и технологическими рисками, усугубляемых политикой государства, пытающегося вовлечь частные инвестиции в геологоразведку отменой отчислений на воспроизводство МСБ, введением налога на добычу полезных ископаемых, вынуждающего инвесторов приобретать права на использование недр на ранних стадиях геологического изучения, в условиях неопределенности с запасами и качеством руд, с затратами на доразведку, на строительство добычных и перерабатывающих мощностей. Государство требует учитывать также при подсчете запасов не только принятые в международной практике категории А и В, но также прогнозные запасы P1, P2.

Таким образом, несмотря на очевидную актуальность и востребованность ПО, на наличие разнообразных, практически не конкурирующих между собой, взаимно дополняющих друг друга методов и средств ПО (см. Таблица 1), заметного прогресса их комплексного применения в промышленных масштабах нет из-за несовершенства теоретических и методических основ, инструментария НИР, правил разработки технологических регламентов, ТЭО кондиций и инвестиций, что препятствует технологическому перевооружению ГМК строительством ФПО, переходу к более экономичной трехстадийной схеме переработки руд цветных металлов и золота: предобогащение, глубокое обогащение и химико-металлургическая переработка концентратов [1, 4, 5].

Научно-технологические проблемы внедрения ПО в значительной мере разрешаются применением средств математического моделирования месторождений, процессов отбойки, дробления и грохочения, крупнотоннажной сортировки и кусковой сепарации руд, с использованием разрабатываемых авторами настоящей статьи моделей, алгоритмов и программных средств, оценки технологических показателей с использованием данных геологической разведки, правил и критериев выбора оптимальной комбинации методов и средств, режимов работы многозвенной технологии ПО [4-7, 28], используя эмпирические (натурные) методы исследования только в тех случаях и объемах, когда получить нужные сведения расчетными способами или из имеющейся практики не представляется возможным.

Полученные на данный момент результаты показывают, что физика процессов рудоподготовки и ПО в целом при всей их кажущейся простоте в действительности не менее сложна, чем отработанная столетиями физико-химическая основа глубокого обогащения. Приемлемые и устойчивые во времени технологические показатели ПО можно достичь только учетом и контролем зависимости показателя M от вариаций вещественного и гранулометрического состава руд, среднего содержания \check{C}_a полезного компонента, структурно-текстурных характеристик перерабатываемых руд, исследуемых на стадии разведки.

Литература

1. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России. Вестник ОГГГН РАН, № 4 (6), 1998, 17 с.
2. Ходаков Г.С. Физика измельчения // М.: Наука, 1972, 308 с.

3. Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых // Москва, ГКЗ, 1993, 26 с.
4. Конев А.В., Шульгина К.А., Миронова Ж.В. Проблемы переработки руд цветных металлов и золота с предварительным обогащением. – Сб. научн. статей Пятого международного конгресса «Цветные металлы – 2013». – Красноярск: Версо, 2013, с. 78-82.
5. 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, С-Петербург, 2013, т. 205, с. 179-184.
6. Конев А.В., Шульгина К.А., Миронова Ж.В. Повышение конкурентноспособности отечественной цветной металлургии с использованием предварительного обогащения. – Сб. научн. статей Пятого международного конгресса «Цветные металлы – 2013». – Красноярск: Версо, 2013, с. 675-679.
7. Штреслер К.А., Миронова Ж.В., Конев А.В., Киселева С.П. Повышение инвестиционного потенциала месторождений руд цветных металлов и золота предварительным обогащением. – Записки горного института, С-Петербург, 2013, т. 205, с. 280-284.
8. Татарников А.П. Ядернофизические методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Атомиздат, 1974.
9. Мокроусов В.А. / В.А. Мокроусов, В.А. Лилиев // Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М.: Недра, 1979, 187 с.
10. Ревнивцев В.И. / В.И. Ревнивцев, Т.Г. Рыбакова, Е.П. Леман // Рентгенорадиометрическое обогащение комплексных руд цветных и редких металлов // М.: Недра, 1990, 120 с.
11. Федоров Ю.О./ Ю.О. Федоров, О.В. Коренев, В.А. Короткевич, В.П. Цой, М.Ю. Федоров, П.И. Ковалев, И.У. Кацер // Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации (РРС) золотосодержащих и других типов руд // Золотодобывающая промышленность, 2004, № 4, с.16-19.
12. Федоров Ю.О./ Ю.О. Федоров, И.У. Кацер, О.В. Коренев и др.// Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия высших учебных заведений. Горный журнал (Уральское горное обозрение), 2005, № 5, с. 21-37.
13. Портнов В.С./ В.С. Портнов, А.К. Турсунбаева, А.Д. Маусымбаева, С.А. Ефименко// Опробование медных руд месторождений Казахстана рентгенорадиометрическим методом. Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2009, Том 2, стр. 345-358.
14. Сборник нормативно-методических документов по геолого-экономической оценке месторождений полезных ископаемых/ Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых Министерства природных ресурсов Российской Федерации. – М., 1998. – 319 с.
15. Требования к геофизическому опробованию при подсчете запасов месторождений металлов и нерудного сырья / ГКЗ СССР. – М., 1989.
16. Методические указания по прогнозной оценке радиометрической обогатимости урановых руд при буровой разведке месторождения / Мингео СССР. – М., 1975.
17. Методические указания по оценке радиометрической обогатимости урановых руд при геологической разведке месторождений горными выработками / Мингео СССР. – М., 1976.
18. Изучение гранулометрического состава и контрастности полезных ископаемых для оценки возможности обогащения их с помощью радиометрических методов: методические рекомендации / ВИМС. – М., 1978.
19. Оценка обогатимости руд нейтронно-абсорбционным методом при разведке месторождений// Методические рекомендации/ ВИМС. – 1980. - № 8.
20. Оценка обогатимости руд индукционным радиорезонансным методом сепарации // Методические рекомендации/ ВИМС. – 1980. - № 11.

21. Оценка обогатимости руд гамма-флюоресцентным (рентгенорадиометрическим) методом // Методические рекомендации/ ВИМС. – 1981. - № 17.
22. Мокроусов В.А. Контрастность руд, её определение и использование при оценке обогатимости // Минеральное сырье. М., 1960, Вып. 1, с. 316-319.
23. Пухальский Л.Ч. Теория контрастности урановых руд. М.: Госатомиздат, 1963, 176 с.
24. Батугина Н.С. Новые аспекты оценки разубоживания руд при разработке месторождений / Н.С. Батугина, И.Д. Джемакулова, С.М. Ткач // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: Сб. научн. тр. / Красноярск, 2006, Вып. 4, с. 168-177.
25. Ткач С.М. Анализ развития и вывод общей формулы коэффициента разубоживания руд / С.М. Ткач, Н.С. Батугина, И.Д. Джемакулова // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Тр. Междунар. Науч. Практич. Конф. / г. Якутск, 14-17 июня 2005 г. – Т. 3 – Якутск, 2005. – с. 223-225.
26. Ткач С.М., Батугина Н.С., Баракаева И.Д. Условия компенсации неблагоприятных изменений управляемых и неуправляемых факторов внешней и внутренней среды при разработке рудных месторождений / Современные технологии освоения минеральных ресурсов, Сборник научных трудов под ред. д.т.н. Кислякова В.Е., вып. 5, Красноярск, СФУ, 2007, с. 296-302.
27. Батугин С.А. Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений / С.А. Батугин, Е.Д. Черный – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1998. – 344 с.
28. Литвинцев Э.Г. Вероятностный метод расчета ожидаемых показателей радиометрической сепарации // Обогащение руд, 1984, № 1, с. 38-40.