

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И НАНОСТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ РУД ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЦИОНАЛЬНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ (1)

А.Н. Петин, П.В. Васильев

Белгородский государственный университет
Ул. Победы, 85, Белгород, Россия, 308015

Рассмотрены вопросы разномасштабного исследования технологических свойств руд природных и техногенных месторождений для обеспечения рационального и комплексного освоения недр. На примере раскрытия тонковкрапленных минералов изложена методика прогнозирования показателей добычи и переработки руд. Результаты используются в системе геоинформационного обеспечения управления качеством рудного сырья для оптимизации этапов отработки запасов месторождений с минимизацией экологических последствий.

Для обеспечения рационального недропользования при работе горнодобывающих предприятий требуется решение широкого круга организационных и технологических задач, связанных с необходимостью более экономичной и планомерной добычи полезных ископаемых, что в конечном счете позволяет рационально и комплексно использовать имеющиеся запасы минерального сырья [3; 5].

Улучшить контроль и управление предприятиями с перспективой развития прилегающих к ним территорий сегодня практически невозможно без привлечения мощных компьютерных технологий с моделированием процессов недропользования, в частности определения перспективных направлений ведения горных работ, оптимизации границ отработки запасов, расчета порядка вскрытия запасов и составления календарных планов, оценки экологического ущерба от недропользования и социальных последствий расширения или завершения горного производства.

Особенно важной становится задача опережающего прогнозирования воздействия технологий на окружающую среду в связи с разработкой передовых традиционных технологий и созданием перспективных нанотехнологий извлечения как полезных, так и вредных компонентов руд.

Необходимым условием рационального и комплексного освоения недр при разработке месторождений твердых полезных ископаемых является всестороннее исследование вещественного состава, структурно-текстурных особенностей и физико-механических свойств минерального сырья.

Исходя из полученных данных о строении и характеристиках добываемых горных пород и руд может быть построена наиболее полная и экономически выгодная схема извлечения полезных компонентов. Это позволяет в полной мере воспользоваться ресурсовоспроизводящими технологиями недропользования [1] и перспективными нанотехнологиями извлечения субмикронных вкраплений. В связи с этим сегодня особенно возрастает роль технологической минералогии

как источника информации для геолого-технологического картирования и управления процессами извлечения качественных минеральных продуктов с минимальными последствиями для окружающей среды [3; 5].

Известно, что при переработке железорудного сырья на дробление и измельчение расходуется 60—70% энергии. Сокращение затрат энергии может быть достигнуто за счет оптимизации тонины помола при достижении необходимой степени раскрытия минералов, когда дальнейшее увеличение количества тонких фракций усиливает процессы агрегации за счет адгезии и аутогезии.

Для управления технологическим процессом необходим полный анализ структурно-текстурных характеристик руды и определение спектров раскрытия зерен минералов во всех классах крупности материала.

Извлечение ценного компонента в концентрат и его качество зависит от распределения включений по размерам в исходной руде, определяется крупностью раскрытия минеральных сростков.

Одним из наиболее перспективных методов анализа раскрытия минералов является рентгеновская микротомография [6]. Данный метод позволяет определить трехмерное строение горной породы непосредственно в объеме, а не по срезам образца, как при электронной микроскопии. При этом отпадает необходимость в стереологической реконструкции измеренных в плоскости сечения данных.

Истинные спектры раскрытия минералов для различных имитационных сектор разрушения (случайной, межфазной и межзерновой) могут быть рассчитаны методами стохастической геометрии для всех идентифицированных минеральных фаз.

Однако пока достигнутая при микротомографии точность разрешения рудных и нерудных минералов составляет порядка нескольких микрон, тогда как многие труднообогатимые руды имеют весьма тонкую вкрапленность полезных минералов в диапазоне наноразмеров. Электронно-микроскопический автоматизированный анализ раскрытия минералов значительно увеличивает скорость и точность анализа раскрытия благодаря автоматизации измерений и компьютерной обработке результатов.

Для работы по количественному минералогическому анализу проб железистых кварцитов нами был использован электронный микроскоп FEI Quanta 3D с системой регистрации рентгеновских лучей (EDS) и программным обеспечением стереологического анализа и моделирования раскрытия минералов Minliber VD/PM. Программное обеспечение ImageScore позволило выполнить широкий набор функций по предварительной обработке изображений (рис. 1).

При исследовании представительных проб выемочного блока Стойленского месторождения определялись количественные параметры микроструктуры, в частности объемной доли минералов и величины удельной поверхности срастания железосодержащих минералов с минералами пустой породы в аншлифах. Часть материала проб подвергалась дроблению, измельчению, и после отсева на узкие классы крупности изготавливались брикеты. Анализ раскрытия проводился по методике MLA JKTech [7].

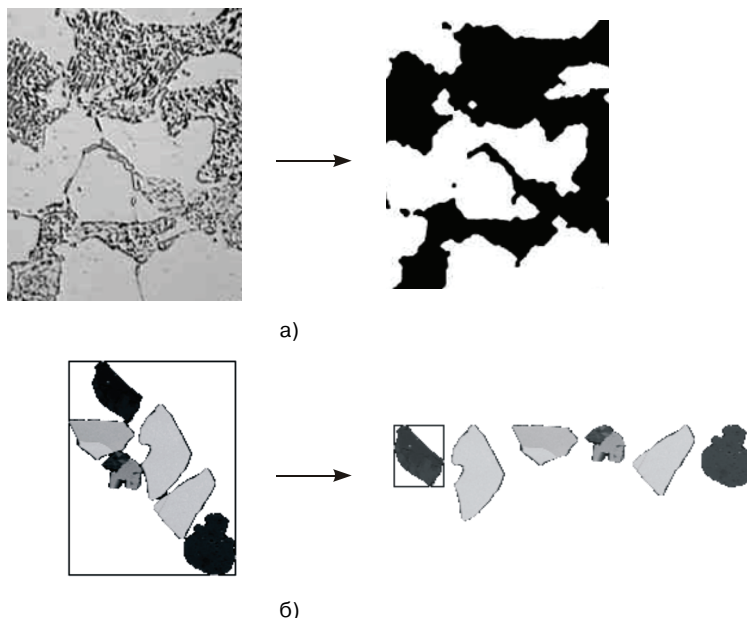


Рис. 1. Обработка изображении микроструктуры магнетитового кварцита методами математической морфологии:

а) сегментация; б) деагломерация

Было установлено, что часть технологически вредных кремнийсодержащих минералов представлена тонкой вкрапленностью силикатов и кварца в рудной фазе, поэтому при существующей технологии дробления и измельчения не могут быть раскрыты полностью и остаются в виде сростков, переходящих в конечный продукт. В результате даже при сверхтонком помоле руды некоторая доля раскрытых силикатных частиц неизбежно захватывается при магнитной сепарации в концентрат, а не удаляется в хвосты. Повышенное содержание кремния существенно ухудшает металлургическое качество готовой продукции и не должно превышать установленные пределы.

При установленном с помощью микроструктурных исследований спектре раскрываемости руды L_k по каждой k -й минеральной фазе и заданной селективной функции разделения $\varepsilon_k(v, g)$ фракций частиц по физическим свойствам (включая вещественную сепарационную характеристику для каждого минерала руды), прогнозирование средних технологических показателей выполняется по следующим формулам:

$$\bar{\gamma}_k = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \gamma_{ij}(v, g) \varepsilon_{ij}(v, g);$$

$$\bar{\beta}_k = \bar{\gamma}_k^{-1} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \gamma_{ij}(v, g) \beta_{ij}(v, g) \varepsilon_{ij}(v, g);$$

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{\gamma}_k \bar{\beta}_k / \bar{\beta}_{\text{исх}},$$

где $\bar{\beta}_{\text{исх}} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \gamma_{ij}(v, g) \beta_{ij}(v, g) \varepsilon_{ij}(v, g)$.

Приведенные формулы дают возможность прогнозировать основные показатели (ожидаемый выход продукта γ_k , качество β_k и извлечение ε_k) для всего технологического процесса добычи и рудоподготовки — от вскрытия месторождения до получения концентрата. При определении конечных показателей по извлекаемому металлу выполняется перерасчет измеряемого объемного минерального состава фракций на химический состав. Полученные результаты исследований были использованы для построения многомасштабной модели раскрытия эксплуатационного блока (рис. 2).

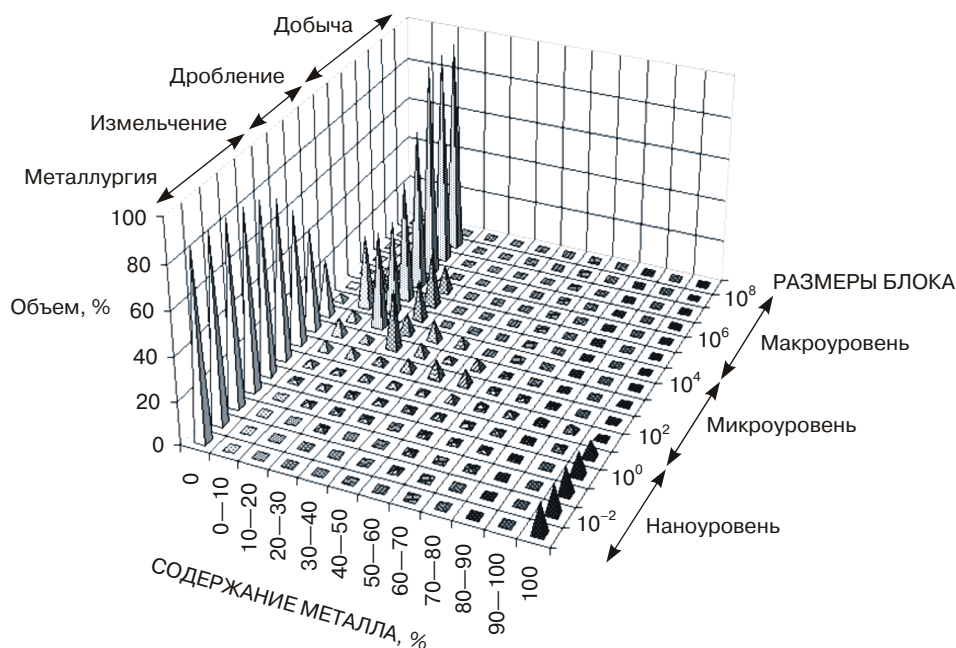


Рис. 2. Спектр раскрытия магнетитовой фазы в диапазоне масштабов от макро до наноуровня

Одним из ключевых элементов общей стратегии рационального недропользования является поиск оптимальной последовательности выемки запасов с учетом требований правил охраны недр.

Оценка стоимости земель входит в число обязательных параметров для расчета оптимальных контуров отработки запасов наряду с производительностью по сырой руде и концентрату, качеством продукции и удельными затратами на извлечение тонны металла.

Таким образом, задача поиска наиболее рациональной стратегии недропользования для построенной геолого-технологической блочной модели месторождения состоит в отыскании такой последовательности выемки блоков, которая максимизирует чистый дисконтированный доход при заданном наборе ограничений: производительность комбината по готовой продукции; объем извлечения металла в заданный период времени; ограничения на смешивание типов руд; ограничения, связанные со складированием руды и отвалами пород; ограничения по логистике; экологические допуски и налоговые сборы.

На выходе программы оптимизации для каждого «вложенного» карьера рассчитывается экономическое бортовое содержание для полезного компонента; поток денежных средств; количество горной массы в контуре карьера; количество разных типов руд с учетом разубоживания; потеря и бортового содержания; количество извлекаемого полезного компонента после переработки руды; оценка *NPV*; время работы карьера. Эти данные используются для дальнейшего проектирования контуров развития карьера, краткосрочного и перспективного планирования выемки руды.

Основные положения рассмотренной методики прогнозирования и контроля процессов добычи и переработки руд реализованы в программном обеспечении Geoblock, развиваемом в качестве интегрированной горно-геологической системы рационального недропользования [2]. Многомасштабный подход к рациональному недропользованию включает в себя следующие этапы оценки объемно-качественных характеристик:

- исследование вещественного состава, структурно-текстурных характеристик и физико-механических свойств руд для анализа степени раскрытия минеральных фаз в пробах детальной и эксплуатационной разведок; формирование базы данных опробования;

- моделирование структуры и текстуры руд и процесса разрушения (случайное, межфазное, интеркристаллитное); определение потенциальной раскрываемости сортов руд и минеральных фаз;

- построение прогнозной компьютерной геолого-технологической модели месторождения; анализ сложности строения выемочных блоков;

- построение геолого-маркшейдерской и геолого-технологической моделей месторождения по данным технологических испытаний; сопоставление с данными прогноза;

- оптимизация конфигурации карьерного поля или шахты для этапов выемки запасов в течение планируемого срока жизни предприятия; учет последствий для экологии;

- оценка интегральной стоимости извлечения запасов месторождения по совокупности показателей вещественного состава и параметров системы разработки с учетом потерь и разубоживания.

Структура месторождения (рудные тела, однородные области минерализации и поля минеральных фаз) моделируются на основе построения комплексных блочно-каркасных моделей, реализуемых в программном обеспечении Geoblock. Основным методом построения многоуровневых каркасных 3D моделей месторождения в программе принят подход на основе расчета диаграммы Вороного по исходным точкам данных опробования [2]. Общая схема системы взаимодействия методов анализа, моделирования и управления процессами добычи для решения задачи рационального недропользования представлена на рис. 3.

При расчете геопоказателей в узлах регулярной блочной модели применяется интерполяция по методу ближайших соседей и метод геостатистики кригинг.



Рис. 3. Схема методики реализации разномасштабного рационального недропользования

Основанная на всесторонних исследованиях состава и строения руд многоуровневая геоинформационная технология включает моделирование и контроль наиболее влияющих на горно-обогатительные технологии факторов. Дальнейшее развитие методики моделирования рационального недропользования предполагает учет всего спектра геологических и технологических параметров в схеме оптимизации извлечения запасов, включая обеспечение требований по рекультивации нарушенных земель.

ПРИМЕЧАНИЕ

- (1) Исследования по данной работе проводились в рамках выполнения гранта по госконтракту № 02.552.11.7017.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Воробьёв А.Е.* Научные основы ресурсовоспроизводящих технологий недропользования // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. — 2007. — № 2. — С. 7—19.
- [2] *Васильев П.В., Ледоукс Х.* Применение 3D триангуляции Делоне и диаграммы Вороного в ГИС недропользования // VIII международная конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии», Воронежский государственный университет, 2008. — Т. 1. — С. 101—110.
- [3] *Ларичкин Ф.Д., Николаев А.И., Александров А.А.* Особенности и закономерности вещественного состава минерального сырья и комплексного его использования // Цветная металлургия. — 2004. — № 10. — С. 33—39.
- [4] *Петин А.Н., Яницкий Е.Б.* Геоинформационные технологии как инструмент создания и анализа геоэкологических данных горнодобывающих комплексов Курской магнитной аномалии (КМА) // Вестник Российского Университета Дружбы Народов. Серия Инженерные исследования. — 2007. — № 2. — С. 113—117.
- [5] *Пирогов Б.И.* Технологическая минералогия полезных ископаемых как основа оценки их комплексности // 2-й всероссийский семинар по технологической минералогии «Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья». — Петрозаводск, 2007. — С. 6—16.
- [6] *Тихонов О.Н.* Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. — М.:Недра, 1984.
- [7] *Якушина О.Я.* Рентгеновская вычислительная микротомография: возможности метода при исследовании минерального сырья // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. — 2004. — № 4. — С. 21—34.
- [8] *Burrows Debra, Fandrich Rolf and Gu Ying.* Automated Mineralogy for Ore Characterisation and Plant Optimisation. Automated Mineralogy. Brisbane. Australia. 2007. — pp. 38—43.

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL AND NANOSTRUCTURAL ORE PROPERTIES IN PROBLEM SOLVING OF COMPLETE MINERAL RESERVE UTILISATION

A.N. Petin, P.V. Vassiliev

Belgorod State University
Pobeda str., 85, Belgorod, Russia, 308015

The necessity of technological properties exploration for complete utilization of mineral reserves from natural and technogenic deposits is emphasized. Applied micro and nanostructural investigations of rocks on the base of mineral liberation prediction improve control of mining and mineral processing of ores with complex structures and composition. Results could be used in GIS with geotechnical and geometallurgical mapping to accomplish mining optimization of complex mineral resources with minimisation of environmental consequences.



Петин А.Н., декан геолого-географического факультета БелГУ, кандидат географических наук, профессор. Руководитель межотраслевой научно-исследовательской лабораторией экодиагностики и мониторинга окружающей среды (ИГРАН и БелГУ), член Экспертной комиссии государственной экологической экспертизы Росприроднадзора по Белгородской области, член Объединенного совета по фундаментальным географическим проблемам при Международной ассоциации академий наук (МАН). Автор 278 научных работ, в том числе 15 книг, брошюр и учебных пособий

Васильев П.В., руководитель научно-исследовательской лаборатории геоинформационных технологий БелГУ, кандидат технических наук, доцент факультета компьютерных наук и телекоммуникаций. Специалист в области моделирования месторождений полезных ископаемых, прогнозирования качества минерального сырья, визуализации горно-геологических данных; член Российского минералогического общества; координатор международного проекта по разработке открытой геоинформационной системы для решения задач недропользования Geoblock. Автор более 70 публикаций

