

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ЕГО МИГРАЦИИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ ANYLOGIC¹

В.С. Лавенков (Москва)

Требования к улучшению среды обитания человека в горнопромышленных регионах выходят на первый план в развитых горнодобывающих странах. В России эта проблема стоит особенно остро, так как большинство моногородов являются горнопромышленными центрами, а судя по статистическим данным Минприроды [1] горная отрасль формирует 84 % отходов, из которых утилизируется не более 40 %. Загрязнение окружающей среды является последствием отделения от массива и выдачи горной массы из рудников на дневную поверхность, поэтому задачей горных наук и инжиниринга является снижение такого негативного влияния еще на стадии проектирования – путем разработки экологически сбалансированных геотехнологий [2]. Имитационное моделирование при этом является инструментарием для оценки эффективности разработанных технологий и мер, направленных на снижение площади отчуждения земель, сбросов и выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Моделирование в целях изучения особенностей функционирования и выбора параметров горнотехнических систем (ГТС) является комплексной задачей ввиду исключительной сложности объекта моделирования – горнотехнической системы, представляющей собой совокупность горных конструкций, оборудования, технологических процессов горного производства во взаимодействии с вмещающим их участком недр [3]. Проведение реальных (натурных) экспериментов над горнотехнической системой с накоплением достаточного объема представительных данных весьма затруднительно из-за практической невозможности воссоздания исходных условий на одном и том же участке недр, длительности и необратимости протекающих процессов в недрах. Поэтому только моделирование, базирующееся на данных, полученных в ходе экспериментов, обеспечивает решение проблемы недостатка информации об объектах недропользования и процессах их освоения.

Функционирование ГТС можно описать движением минерально-сырьевых потоков в пределах нее во взаимосвязи с окружающей средой. Под такими потоками понимаются объемы минерального вещества независимо от структурного и агрегатного состояния, перемещаемые по коммуникационным сетям горно-обогатительного предприятия в единицу времени [3]. Для исследований особенностей движения минерально-сырьевых потоков разрабатывается и непрерывно совершенствуется по мере поступления результатов экспериментальных исследований имитационная модель [4,5], описывающая ГТС на основе установленных математических зависимостей и накопленных данных.

В работе рассматриваются два варианта ГТС (рис. 1), включающие:

– базовый сценарий, предусматривающий отработку месторождения этажно-камерной системой разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [6,7]; участка, на котором производятся усреднительные операции; обогатительной фабрики; склада товарной продукции (концентрата) и хранилища отходов переработки руд;

– альтернативный сценарий, по которому отходы производства не складываются на поверхности, а вовлекаются в систему рециклинга с последующим захоронением в подземном пространстве (на рис. 1 показано пунктирными стрелками). Диаграмма потоков и накопителей представлена на рис. 2).

¹ Исследования выполняются при поддержке РНФ (проект №14-37-00050).

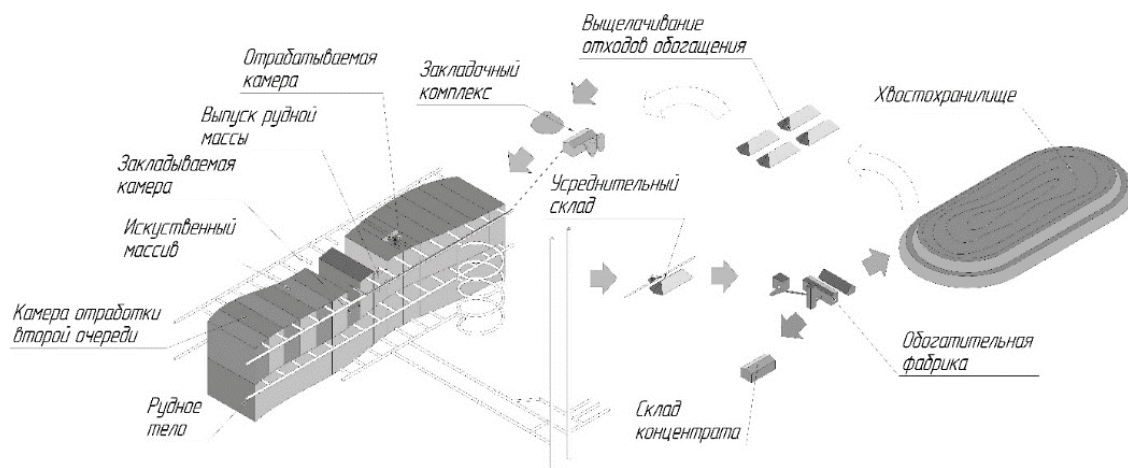


Рис. 1. Схематическое отображение движения минерально-сырьевых потоков горнотехнической системы

Анализ принципиальной схемы, приведенной на рис. 1, позволяет выделить минерально-сырьевые потоки горнотехнической системы:

- рудопоток (из рудника на усреднительный склад);
- рудопоток со стабильным содержанием ценных компонентов (с усреднительного склада на фабрику);
- поток руды в процессе переработки;
- поток концентрата, содержащего ценные компоненты;
- поток отходов обогащения руд в окружающую среду;
- поток отходов, подлежащих вторичной переработке (рециклингу);
- поток отходов, подлежащих захоронению.

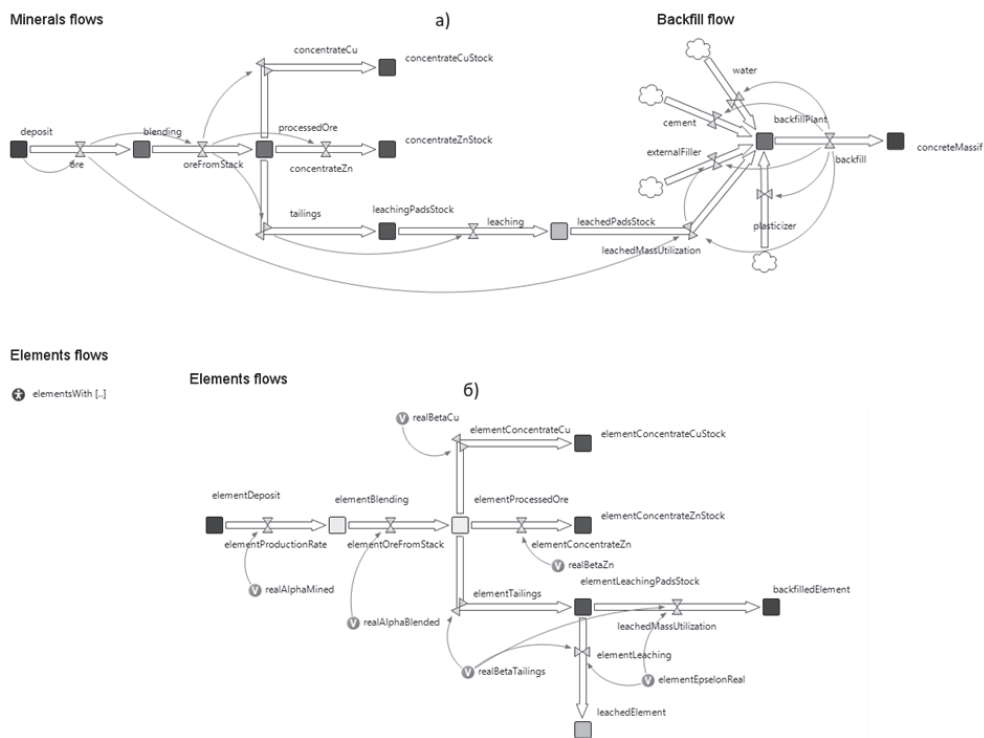


Рис. 2. Диаграмма потоков и накопителей

Диаграмма потоков и накопителей описывает: а) движение минерально-сырьевых потоков с доизвлечением ценных компонентов и утилизацией отходов в составе закладочной смеси и б) агент из популяции elementsWith, показывающий движение одного из химических элементов в минерально-сырьевом потоке.

Движение этих минерально-сырьевых потоков в имитационной модели описано в терминах системной динамики. Ключевым параметром, описывающим поведение такой системы, является производственная мощность рудника. Модель включает три этапа развития производственной мощности: набор производственной мощности, период нормального функционирования рудника и период затухания горных работ. Это поведение ГТС задавалась с табличной функцией, возвращающей математическое ожидание планируемой производственной мощности в зависимости от модельного времени. В практике допускаются колебания годовой производственной мощности в пределах 10%. Отсюда, рассчитывалось значение среднеквадратичного отклонения и генерировалось случайное значение производственной мощности согласно нормальному распределению. Данное значение присваивалось потоку ore (рис. 2). В настоящее время работа модели отражает реальную горнотехническую ситуацию. Адекватность функционирования продемонстрирована на рис. 3, а, б в сопоставлении с результатами работы Кировского рудника.

В рамках установленной величины производственной мощности горного предприятия в модели рассчитываются объемы и качество всех минерально-сырьевых потоков с учетом специфики изменения состояния геологических запасов (учитывалось падение содержания меди по глубине рудной залежи). Показатели изменения качественных характеристик добываемой руды задавались в модели значением математического ожидания содержания i-го химического элемента в 1 т рудной массы, а также значением среднеквадратичного отклонения. Многие работы отмечают падение содержания ценных компонентов в рудах в процессе эксплуатации месторождений, что было учтено при моделировании [8–11].

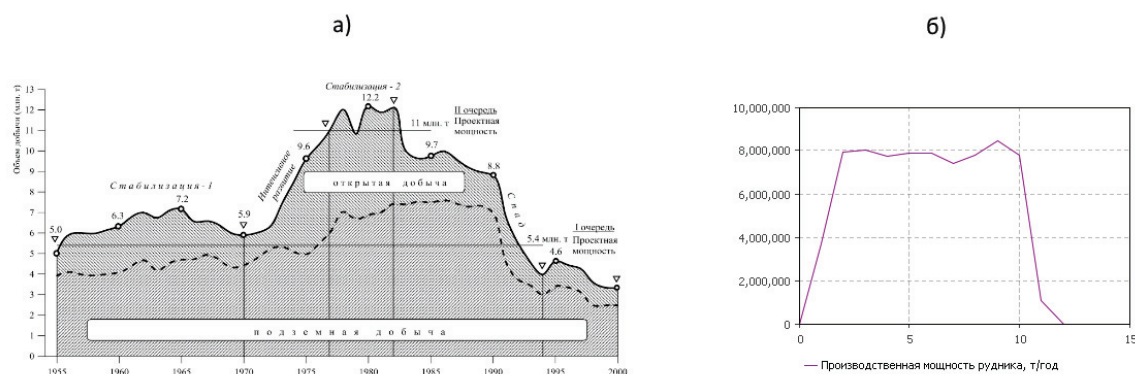


Рис. 1. Динамика изменения производственной мощности ГТС: а) опубликованные данные по Кировскому руднику [12]; б) имитационная модель при сроке работы рудника 12 лет

На рис. 2-а представлены результаты моделирования динамики изменения содержания меди в руде. Данный параметр задавался коэффициентом падения содержания на каждый 1 м глубины залегания запасов и пересчитывался на модельное время через коэффициент годового понижения горных работ. Для сопоставимого анализа на рис. 4-б приведены статистические данные о реальной горнотехнической ситуации на действующих рудниках в Австралии.

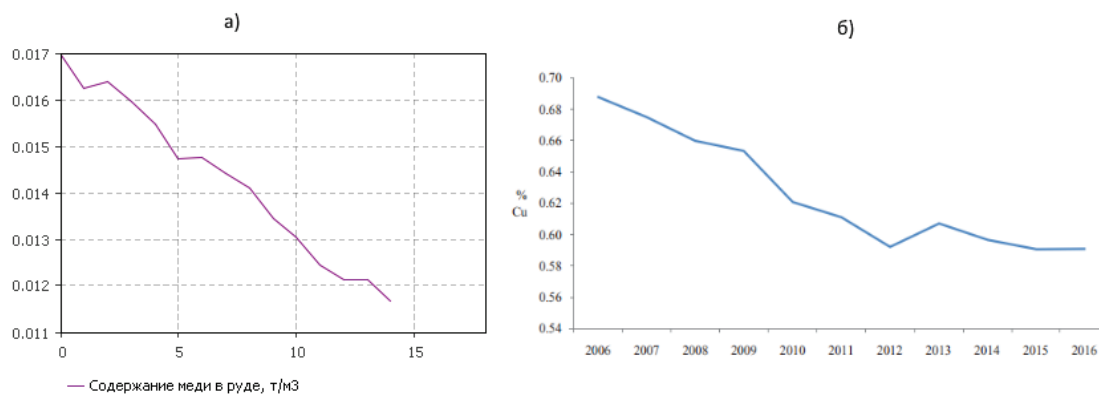


Рис. 2. Динамика изменения содержания меди: а) в модели; б) полученная в результате анализа горно-геологических условий эксплуатации 60 горных предприятий Австралии, добывающих медьсодержащие руды [13]

Для решения задачи адекватного отражения в модели объемов и качества минерально-сырьевых потоков в горнотехнических системах стабильность качества добываемых руд по аналогии с реальным производством достигалась через процесс усреднения рудной массы. Математически данный процесс характеризуется значением коэффициента усреднения [11,14], который равен отношению среднеквадратичного отклонения содержания компонентов в руде после и до процесса усреднения. Сравнение динамики изменения содержания химических элементов в рудопотоке, поступающем с рудника и рудопотоке с усреднительного склада представлено на рис. 3. Используя данные параметры рассчитывались значения потоков химических элементов, поступающих и выходящих из накопителя elementBlending.

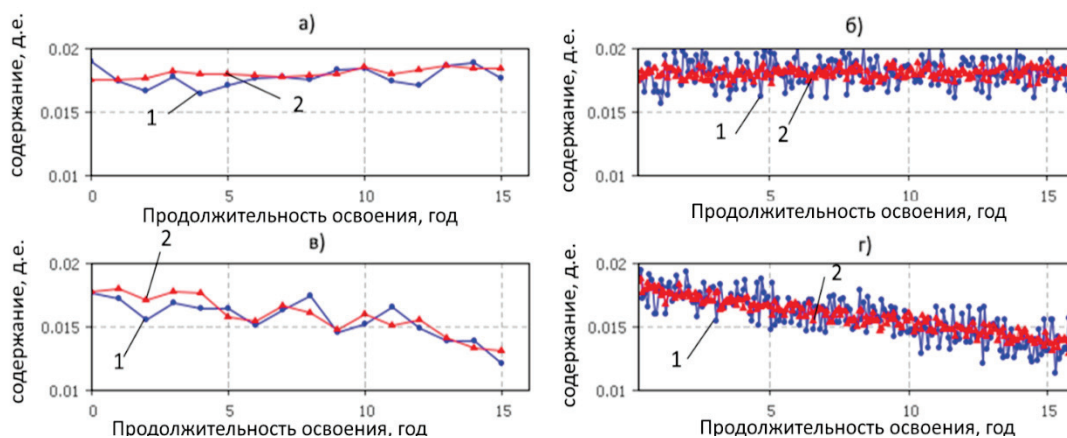


Рис. 3. Результаты моделирования процесса управления качеством рудопотока: а) среднее содержание приведенного металла в годовых объемах руды, д.е.; б) то же в месячных объемах руды, д.е.; в) и г) то же, соответственно, при снижении содержания приведенного металла с глубиной в среднегодовом и среднемесечном объеме. Условные обозначения: 1 – в рудопотоке; 2 – со склада.

По аналогии рассчитывались объемы и качество выпускаемой продукции (концентратов металлов), а также отходов производства, включая анализ и выбор направлений их рециклинга и утилизации в соответствии с разрабатываемыми технологиями [15–17].

Одной из главных задач моделирования являлся выбор рациональных параметров хранилищ отходов производства, путем расчета максимально допустимой площади складирования на поверхности в зависимости от квоты на выброс ценного компонента (рис. 6). Исходя из определенного значения площади земельного отвода по результатам

моделирования даются рекомендации о параметрах отвалов и хранилищ отходов обогащения, сроках их заполнения. Оценивается объем отходов, требующих захоронения в подземном пространстве.

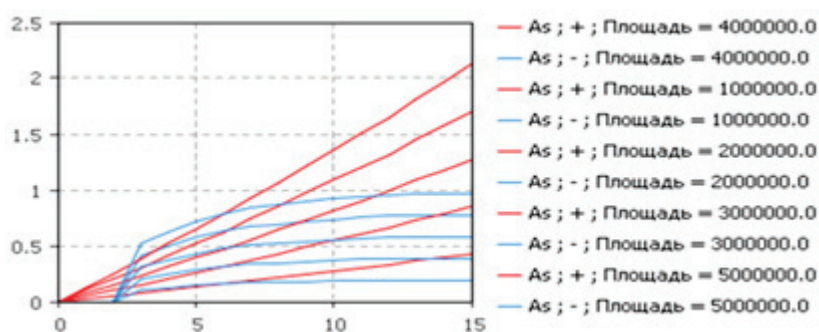


Рис. 6. Пример расчета вариантов складирования отходов обогащения руд на ограниченной площади земельного отвода, рассчитанные исходя из квоты на сброс мышьяка (красным – без вовлечения отходов в систему рециклинга; синим – при рециклинге отходов с последующим захоронением в подземном пространстве)

Сравнение результатов работы имитационной модели с параметрами реально существующих горных предприятий позволяет говорить об адекватности представленной модели ГТС и допустимыми расхождениями между модельными расчетами, проектными решениями и реальными условиями разработки месторождений.

Выводы

1. Имитационное моделирование позволяет на стадии проектирования обосновать рекомендации по структуре горнотехнических систем (горных предприятий), функционирование которых обеспечит минимальное воздействие производств на окружающую среду.

2. Моделирование является действенным инструментом для оценки вариантов технологий утилизации отходов, разрабатываемых для условий конкретных месторождений.

3. Моделирование позволяет дать обоснованный прогноз уровня воздействия на окружающую среду и оценить пути снижения воздействия горных технологий.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации в 2012 году (проект)». М., 2013. 450 с.
2. **Рыльникова М.В., Радченко Д.Н.** Создание в России научного центра по изучению экологически сбалансированного цикла комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 2014. № 12. С. 4–7.
3. **Атрушкевич А.В. и др.** Горное дело. Терминологический словарь. 5-е изд. / под ред. Трубецкого К.Н., Каплунова Д.Р. М.: Горная книга, 2016. 635 с.
4. Радченко Д.Н., Лавенков В.С. Создание и апробация имитационной модели экологически сбалансированного цикла комплексного освоения рудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S36. С. 3–25.
5. **Радченко Д.Н.** Выбор средств и методов моделирования для изучения параметров экологически сбалансированного цикла комплексного освоения рудных месторождений //

- Материалы 13-й Международной школы молодых ученых и специалистов Проблемы освоения недр в 21 веке глазами молодых. М., 2016. С. 236–240.
6. **Квитка В.В. и др.** Опыт применения дробилок кид в технологии приготовления твердеющих закладочных смесей // Обогащение руд. 2013. № 3 (345). С. 3–5.
 7. **Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н.** Выработанные пространства недр: принципы многофункционального использования в полном цикле комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. Издательский дом «Руда и металлы» (Москва), 2016. № 5. С. 28–33.
 8. **Пешков А.М.** Обоснование требований к качеству руд и техногенного сырья при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений Урала: канд. техн. наук: 25.00.21. М.: ИПКОН РАН, 2014. 160 с.
 9. **Petersen J.** Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores - a brief overview // Hydrometallurgy. Elsevier B.V., 2016. Т. 165. С. 206–212.
 10. **Казахмыс Г.** Медь – ключевое направление. Казахмыс ПЛС Годовой отчет и финансовая отчетность за 2013 год. Лондон, 2013. 180 с.
 11. **Каплунов Д.Р., Манилов И.А.** Стабилизация качества руды при подземной добыче. М.: Недра, 1983. 236 с.
 12. **Каменев Е.А.** Жизненные циклы рудников ОАО «Апатит» // Формирование основ современной стратегии природопользования в евро-арктическом регионе. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2005. С. 130–137.
 13. PSAC. Industry Overview [Электронный ресурс]. 2016. С. 72–102.
 14. **Ломоносов Г.Г.** Горная квалиметрия: Учебное пособие. 2-е изд. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. 201 с.
 15. **Радченко Д.Н. и др.** Совместная утилизация отходов обогащения при комплексном освоении месторождений многокомпонентных руд // Горный журнал. 2016. № 12. С. 87–93.
 16. **Рыльникова М.В. и др.** Опытно-промышленная апробация технологии выщелачивания отходов переработки медно-колчеданных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 2. С. 293–301.
 17. **Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А.** Обоснование параметров и режима выщелачивания сырья техногенных образований, сопутствующих разработке медно-колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 3. С. 340–350.