

УДК 519.876.5

ИМИТАЦИОННОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА РУДЫ И УПРАВЛЕНИЯ РУДОПОТОКОМ

**Д.Н. Маряшина, М.В. Федотов, Т.В. Девятков (Казань),
С.В. Бабак (Новосибирск)**

Введение

Горнодобывающая промышленность характеризуется высокой степенью неопределенности, которая вызвана работой в сложно прогнозируемых геологических условиях, технологическими ограничениями, особенностями осуществления логистики при подъеме и доставке руды и множеством других факторов. Неравномерность состава горных пород, постоянное изменение условий выемки и транспортировки, а также ограниченные возможности оперативного воздействия на текущую производственную ситуацию, существенно осложняют получение стабильных показателей по объёму и качеству добытой руды и планирование производства в целом.

В таких условиях имитационное моделирование может оказать существенную помощь в части поддержки принятия производственных решений [1]. Оно позволяет учитывать динамику технологических и логистических процессов, но главное – просчитывать различные сценарии развития ситуаций и оценивать их влияние задолго до их возникновения на реальном производстве.

В настоящее время на рынке представлено несколько специализированных программных продуктов, применяемых для имитационного моделирования процессов горнодобывающей отрасли. Так, например, SimMine предназначена для моделирования подземной логистики, включая планирование графиков выемки и транспортировки, анализа маршрутов с учётом ресурсных и временных ограничений [2]. Программный комплекс MineTwin представляет собой отечественное решение класса «цифровой двойник» для подземных и открытых горных работ, интегрирующее диспетчеризацию, планирование и визуализацию производственных процессов [3, 4].

Наряду с коммерческими продуктами, в научной литературе описаны разработки, направленные на имитационное моделирование различных технологических процессов горнодобывающей отрасли. В работах [5, 6] предложены модели функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов, в которых учитываются роботизация подвижного состава, а также влияние периодичности и продолжительности внеплановых простоев на производственные показатели. В работах [7–9] представлены системы для подземных и комбинированных условий добычи: моделирование горнопроходческих и очистных работ, а также оценка параметров открыто-подземной технологии с учётом вероятностных простоев и режимов эксплуатации оборудования.

В настоящей статье описывается опыт разработки специализированного программного продукта, реализованного на платформе Alina GPSS, для одного из горнодобывающих предприятий. Эта платформа является универсальным инструментом дискретно-событийного моделирования, не имеющим специализированных библиотек под задачи горной промышленности. Разработка программного продукта была выполнена с нуля по заказу предприятия и была направлена на решение прикладных задач в специфических геолого-технологических условиях.

Постановка задачи

Производственный процесс на рассматриваемом горнодобывающем предприятии представляет собой сложную систему, включающую шахтные блоки, транспортные маршруты, промежуточные склады и обоганительное производство. Одним из ключевых факторов устойчивости производственной системы является стабильность рудного потока – как по объёму, так и по качественным характеристикам. В частности, важны показатели содержания хлорида калия (KCl) и нерастворимого остатка (HO), которые подвержены значительным колебаниям даже при стабильной выемке. Это связано с неоднородностью геологического строения и вариациями пространственного распределения полезных компонентов по шахтным блокам.

Разработанная дискретно-событийная имитационная модель является инструментом поддержки принятия решений, позволяющим прогнозировать качество извлекаемой руды (KCl и HO). На основе результатов работы модели диспетчер имеет возможность управлять маршрутизацией рудных потоков с целью стабилизации показателей на входе флотационной обоганительной фабрики (ФОФ), а отдел планирования проверять реализуемость производственных планов в заданных технологических условиях. Модель охватывает процессы добычи, транспортировки и складирования и позволяет анализировать поведение всей производственной системы в динамике.

Математическая постановка задачи в обобщённом виде представлена следующим образом. Пусть:

- $B = b_i$ – множество шахтных блоков, в котором каждый блок b_i характеризуется объёмом V_i , средним содержанием хлорида калия Kcl_i и нерастворимого остатка Ho_i ;
- E – множество единиц оборудования: комбайны, конвейеры, подъёмники, бункеры, реклаймеры и др.;
- $S(t)$ – динамическое состояние системы во времени t : маршруты транспортировки, загрузка оборудования, объёмы руды на складах и т.д.;
- $U(t)$ – управляющее воздействие: расписание отработки блоков, схемы маршрутизации, графики работы оборудования;
- $Q(t), Kcl(t), Ho(t)$ – фактические параметры рудного потока на входе в ФОФ: суммарный объём, содержание KCl и HO соответственно;
- Q, Kcl, Ho – плановые значения параметров, которые необходимо обеспечить.

Параметры $Q(t), Kcl(t), Ho(t)$ рассчитываются на основе состояния системы $S(t)$, которое формируется под действием управляющих решений $U(t)$, а также характеристик блоков B и оборудования E .

Для оценки степени достижения производственных целей вводится вектор относительных отклонений от плановых значений:

$$\vec{f}(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $f_1(t) = \left| \frac{Q(t) - \hat{Q}}{\hat{Q}} \right|$ – отклонение по объему добычи, $f_2(t) = \left| \frac{Kcl(t) - Kcl}{Kcl} \right|$ – отклонение по содержанию хлорида калия, $f_3(t) = \left| \frac{Ho(t) - Ho}{Ho} \right|$ – отклонение по нерастворимому остатку.

Таким образом, задача сводится к поиску таких управляющих воздействий $U(t)$, которые минимизируют значения отклонений $\vec{f}(t)$, при этом приоритет отдается параметру $f_1(t)$. Допустимые уровни отклонений по качеству руды $f_2(t)$ и $f_3(t)$ могут быть согласованы в рамках производственных допусков.

При этом решение должно учитывать ограничения, накладываемые на производительность оборудования, инерционность процессов загрузки и выгрузки, наличие временных интервалов простоя (например, плановые ремонты или аварийные остановки), соблюдение допустимых маршрутов транспортировки и логистических связей, а также графики сменности и рабочее время персонала.

Кроме того, модель должна обеспечивать возможность оперативного изменения конфигурации системы, параметров оборудования и режимов работы, и предоставлять необходимые показатели для анализа различных производственных сценариев в интервале от нескольких часов до нескольких недель.

Разработка модели

Для разработки модели была выбрана дискретно-событийная среда моделирования GPSS Studio [10, 11]. Модель была описана в виде иерархической структурной схемы. Всего модель содержит 3 уровня иерархии. На первом уровне укрупненно представлен технологический процесс (рис. 1), а также описаны все исходные данные. Каждый последующий уровень является дочерней схемой (частью) элементов предыдущего уровня и описывает моделируемую систему более детально.



Рис. 1. Первый уровень иерархической структурной схемы

Всего было создано 19 дочерних схем, что позволило повторить актуальную структуру и производственные параметры технологического оборудования, задействованного в добыче и транспортировке горной массы. Элементами структурной схемы являются комбайновые комплексы, конвейерные линии, распределительные устройства и накопительные бункеры, скиповые подъемные машины. В модели детально описан поверхностный участок рудника — корпуса дробления и додраблывания, склады дробленой руды и реклаймеры, конвейеры передачи руды на

флотационную обогатительную фабрику. Например, на рисунке 2 представлен корпус дробления.

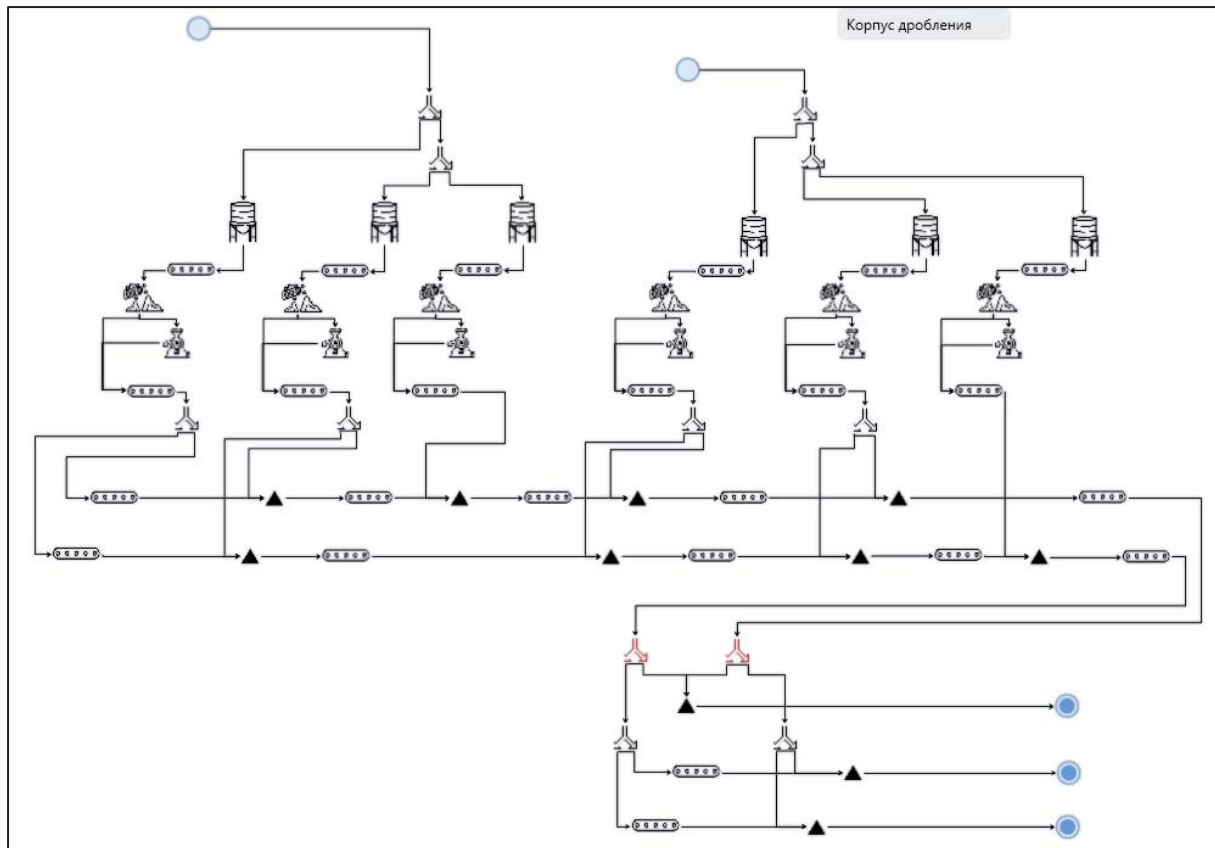


Рис. 2. Третий уровень иерархии. Дочерняя схема элемента «Корпус дробления»

Исходные данные модели строго структурированы. Часть данных о работе комбайновых комплексов автоматически импортируется из Excel-файлов, принятых на производстве. Ввод характеристик оборудования осуществляется с использованием непосредственно самой интерактивной структурной схемы и специальных диалоговых окон. Например, для конвейеров можно задать длину и скорость движения конвейерной ленты (рис. 3).

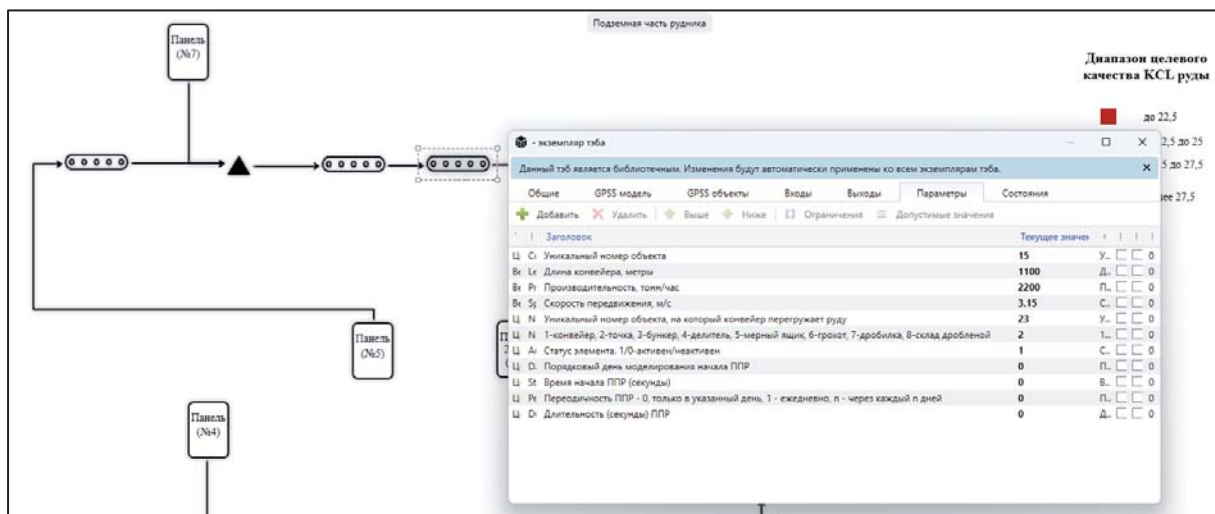


Рис. 3. Интерфейс ввода исходных данных для элемента «Конвейер»

Для упрощения взаимодействия с моделью была создана предметно-ориентированная библиотека, включающая более 20 объектов, представляющих ключевые элементы производственного процесса. Среди них – блоки шахтного поля, комбайны, бункеры, самоходные вагоны, конвейеры, дробилки, склады, реклаймеры и подъемные машины. Также реализованы и управляющие элементы для контроля планов добычи, параметров работы оборудования, рабочих смен, анимации и временных характеристик модели. Каждый объект наделен набором параметров, которые позволяют адаптировать модель под конкретные технологические условия.

Имитационное приложение

В отличие от классического подхода, при котором имитационная модель выступает лишь внутренним компонентом программного продукта, в данной разработке среда GPSS Studio была адаптирована под роль полноценного пользовательского приложения. Конечным пользователям предоставляется специализированная сборка среды, в которую встроены все необходимые элементы: структура модели, формы ввода данных и инструменты визуализации.

Работа с моделью осуществляется через интерактивную структурную схему. Пользователь может оперативно изменять параметры оборудования, конфигурацию технологических линий, а также задавать исходные данные на требуемый период моделирования. Диалоговые окна позволяют указывать технические характеристики оборудования (см. рис. 3).

Для визуального контроля за выполнением производственной программы используется специальный механизм «анимации схемы». На этапе разработки для каждого элемента схемы задаются параметры отображения в одной из четырех доступных форм: числовые значения, графики, полосы прогресса и текстовые надписи. Пример настройки для объекта «Конвейер» представлен на рисунке 4.

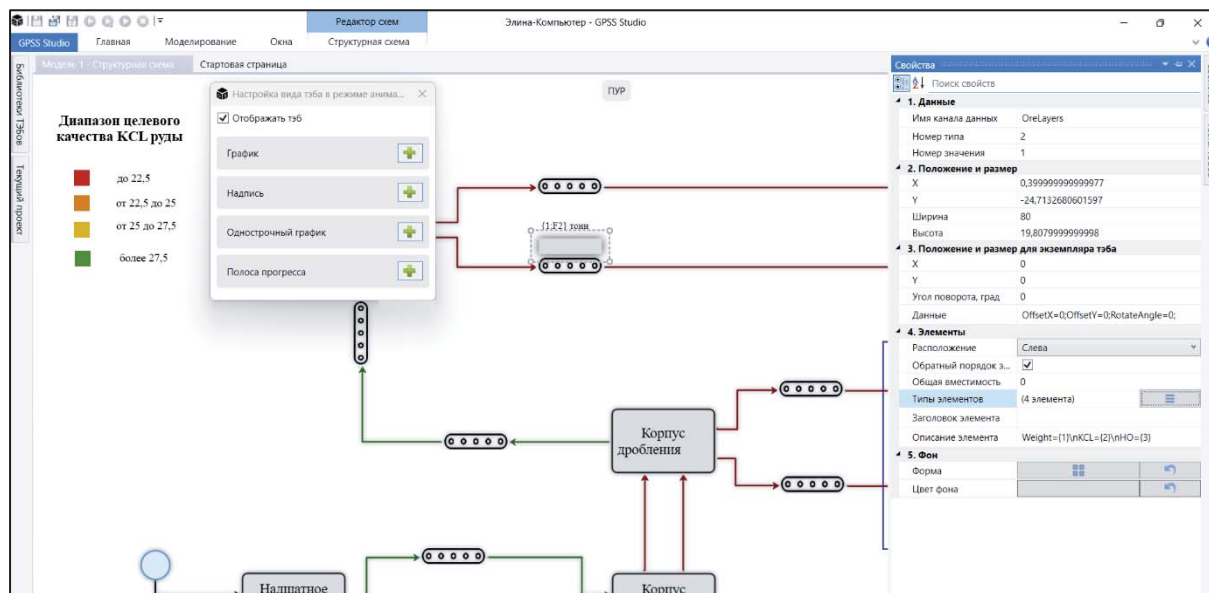


Рис. 4. Режим настройки анимации. Объект «Конвейер»

Анимация позволяет отслеживать состояние объектов в динамике – от уровня заполнения бункеров до маршрутов движения рудных потоков. В процессе анализа пользователь может исследовать по анимации ключевые участки производственной цепочки, в том числе, подземную часть рудника (рис. 5), склады дробленой руды, распределители и реклаймеры.

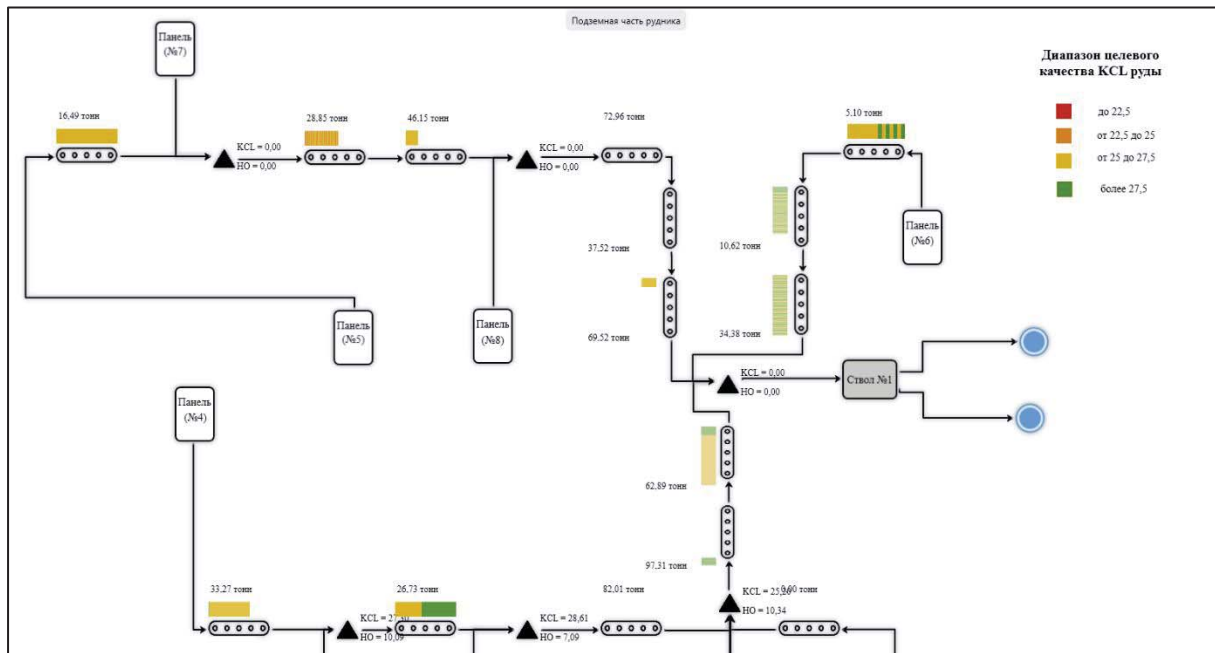


Рис. 5. Режим анимации. Подземная часть рудника

Для анализа результатов моделирования предусмотрен набор встроенных отчетных форм. На них отображаются графики изменения ключевых показателей – объемов добычи, качества руды, загрузки оборудования. Пример итоговой вкладки с агрегированной статистикой приведён на рисунке 6. Наибольший интерес представляет сводный график (выделен красной рамкой). На нём оператор может сравнить данные по руде, поднимаемой с рудника, и данные по руде, поступившей на обоганительную фабрику (с учетом управляющего воздействия), с реальными данными за моделируемый период (с рапортов ФОФ).



Рис. 6. Вкладка с итоговой статистикой

Проанализировать, какие именно управляющие воздействия позволяют довести объём и качество руды до целевых значений, возможно с помощью автоматически формируемых отчетов в Excel. Первый отчёт предназначен для оператора поверхностного участка: он содержит расчёт сценариев перераспределения рудных потоков между рудником и складами на прогнозный интервал (рис. 7).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Время наступления сценария	Качество руды, которая будет поднята	Вес руды, которая будет поднята	Тип сценария	Объем шахтования с бедного склада	Объем шихтования с богатого склада	Объем руды с рудника, направленной на ФОФ	Объем руды с рудника, направленной на бедный склад	Объем руды с рудника, направленной на богатый склад	Процент на ФОФ	Процент на склады
1											
2	0:00:00	29,2	1560	71	620,408163	0	979,5918367	0	580,4081633	62,79%	37,21%
3	1:00:00	28,406	300	72	705,3	594,7	300	0	0	100,00%	0,00%
4	2:00:00	27,273	1560	72	12,98	27,02	1560	0	0	100,00%	0,00%
5	3:00:00	27,175	1620	71	0	64	1536	84	0	94,81%	5,19%
6	4:00:00	27,2	1560	71	0	51,6129032	1548,387097	11,61290323	0	99,26%	0,74%
7	5:00:00	27,221	1620	71	0	41,0522897	1558,94771	61,0522897	0	96,23%	3,77%
8	6:00:00	27,175	1560	71	0	64	1536	24	0	98,46%	1,54%
9	7:00:00	27,178	1560	71	0	62,5240231	1537,475977	22,52402306	0	98,56%	1,44%
10	8:00:00	0	0	11	800	800	0	0	0	0,00%	0,00%
11	9:00:00	0	0	11	800	800	0	0	0	0,00%	0,00%
12	10:00:00	0	0	11	800	800	0	0	0	0,00%	0,00%
13	11:00:00	0	0	11	800	800	0	0	0	0,00%	0,00%
14	12:00:00	27,199	1740	71	0	52,1122219	1547,887778	192,1122219	0	88,96%	11,04%
15	13:00:00	27,222	1560	71	0	40,545809	1559,454191	0,545808967	0	99,97%	0,03%
16	14:00:00	27,114	1740	71	0	93,4086629	1506,591337	233,4086629	0	86,59%	13,41%
17	15:00:00	27,186	1200	72	177,2	222,8	1200	0	0	100,00%	0,00%
18	16:00:00	27,165	660	72	455,15	484,85	660	0	0	100,00%	0,00%
19	17:00:00	27,222	660	72	461,42	478,58	660	0	0	100,00%	0,00%
20	18:00:00	27,069	1620	71	0	114,391829	1485,608171	134,3918292	0	91,70%	8,30%
21	19:00:00	27,096	1560	71	0	101,872659	1498,127341	61,87265918	0	96,03%	3,97%
22	20:00:00	27,081	1620	71	0	108,853681	1491,146319	128,8536813	0	92,05%	7,95%
23	21:00:00	27,06	1560	71	0	118,518519	1481,481481	78,51851852	0	94,97%	5,03%
24	22:00:00	27,071	1620	71	0	113,471663	1486,528337	133,4716631	0	91,76%	8,24%
25	23:00:00	27,058	1620	71	0	119,432449	1480,567551	139,4324491	0	91,39%	8,61%

Рис. 7. Отчета оператора ПУР

Второй отчёт отображает суммарные показатели добычи и качества руды в конце моделируемого периода, что позволяет сравнить запланированные и полученные в модели параметры подачи руды на ФОФ в динамике.

Разработанное приложение послужило основой для проведения прикладных имитационных исследований, направленных на оценку устойчивости производственного процесса и эффективности управления рудными потоками.

Имитационное исследование

Приложение позволяет проводить различные имитационные исследования. В рамках такого исследования, пользователь формирует и анализирует широкий спектр сценариев функционирования производственной системы. Гибкая архитектура интерфейса и широкий набор параметров модели исключают необходимость ручной настройки отдельных вариантов. Сценарии формируются посредством последовательной настройки входных данных и параметров системы планирования.

В рамках текущего этапа разработки были проработаны следующие ключевые сценарии:

- проверка выполнимости производственной программы. Модель позволяет оценить, возможно ли достижение заданных производственных показателей в условиях текущего обеспечения ресурсами (оборудование, рабочее расписание и т.д.);
- анализ влияния «возмущающих факторов». В этом сценарии исследуется чувствительность производственного процесса к различным отклонениям – от изменения графика смен до выхода из строя оборудования. По результатам

моделирования можно установить факторы, оказывающие решающее влияние на невыполнимость планов, и наметить направления корректирующих действий;

- сценарии управления качеством. Отрабатываются варианты перенаправления потоков с целью стабилизации содержания хлорида калия и нерастворимого остатка на входе ФОФ. Модель позволяет выявить оптимальные маршруты подачи сырья, включая использование складов и изменение графика отработки блоков;

- временное включение/исключение оборудования или участков. Оцениваются последствия отключения отдельных комбайнов, подъемников, линий транспортировки и т.д., в том числе при ремонте или реконструкции. Такой подход позволяет заблаговременно оценить влияние технологических ограничений на выполнение производственной программы и качество сырья.

Для каждого сценария пользователь может задать период моделирования (от суток до 1 месяца), а также определить уровень детализации, вплоть до секундных интервалов. Благодаря наглядности интерфейса и доступу к расширенным формам отчётности, пользователь получает возможность не только выявить причины отклонений от плана, но и оценить эффект от предлагаемых корректировок.

Корректность сценариев и реализуемость прогнозов подтверждена сравнением результатов моделирования с историческими производственными данными, что подтверждает практическую применимость модели в реальных условиях.

Заключение

Проведённая работа показала высокий потенциал использования имитационного моделирования для решения задач прогнозирования качества руды, управления потоками сырья и оценки выполнимости производственных планов. Разработанная имитационная модель воспроизводит с заданной точностью ключевые элементы производственного процесса, учитывает особенности технологических и логистических операций.

Продукт разрабатывался под технологические процессы конкретного предприятия, но может быть адаптирован для работы в схожих производственных условиях предприятий отрасли. Модель может быть расширена за счёт подключения внешних источников данных, более глубокой интеграции в технологические процессы предприятия и детализации внутренних алгоритмов работы оборудования и других систем предприятия.

Полученные результаты подтверждают возможность применения модели как в рамках текущих задач предприятия, так и при масштабировании на аналогичные производственные системы.

Литература

1. **Козлова О.Ю.** Опыт применения и перспективы развития имитационного моделирования в горном деле // Уголь. 2022. №5. С. 42-45.
2. SimMine – The Specialist Mining Simulation and Optimisation Software: сайт. – Режим доступа: <https://simmine.com/> (дата обращения: 26.08.2025).
3. MineTwin от Амальгама: сайт. – Режим доступа: <https://mine-twin.ru/> (дата обращения: 26.08.2025).
4. **Малыханов А.А., Черненко М.Е.** Использование гибкой архитектуры инструмента ИМ MineTwin для решения задач флюоритового рудника // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18-20 октября 2023 года. – Казань: Издательство АН РТ, 2023. – С. 150-154.

5. **Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Николаев П.И.** Имитационное моделирование функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса с роботизированными автосамосвалами // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18-20 октября 2023 года. – Казань: Издательство АН РТ, 2023. – С. 341-350.
6. **Кузнецов И.С., Зиновьев В.В., Стародубов А.Н., Николаев П.И.** Исследование влияния внеплановых простоев горных машин на эффективность работы экскаваторно-автомобильного комплекса методом имитационного моделирования // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023 года. – Казань: Издательство АН РТ, 2023. – С. 384-390.
7. **Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Береснев М.В., Майоров А.Е.** Система имитационного моделирования горнопроходческих работ // Уголь. 2016. № 2(1079). – С. 20-24. DOI 10.18796/0041-5790-2016-2-20-24.
8. **Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Кадочигова А.Н., Каплун А.В.** Система имитационного моделирования очистных горных работ // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18-20 октября 2023 года. – Казань: Издательство АН РТ, 2023. – С. 509-515.
9. **Кузнецов И.С., Зиновьев В.В., Николаев П.И., Кузнецова А.В.** Специализированная компьютерная система имитационного моделирования для исследования параметров открыто-подземной геотехнологии // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021) : Труды конференции (электронное издание), Санкт-Петербург, 20-22 октября 2021 года / Редакторы Плотников А.М., Долматов М.А., Смирнова Е.П.. – Санкт-Петербург: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2021. С. 243-249.
10. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учеб. Пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов; под общ. ред. В.В. Девяткова. — М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 283 с.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2022660098 Российская Федерация. GPSS World Core: № 2022619474: заявл. 25.05.2022: опубл. 30.05.2022 / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов, Ш. Д. Хайбуллин; правообладатель ООО «Элина – Компьютер».