

# Оптимизация производственно-логистической системы угледобывающих предприятий с помощью имитационного моделирования

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-68-71>

## **АГАФОНОВ В.В.**

Доктор техн. наук, профессор  
кафедры «Геотехнологии освоения недр»  
Горного института НИТУ «МИСиС»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

## **СКРИПКА А.В.**

Канд. техн. наук, заведующий  
кафедрой горноспасательного дела и взрывобезопасности  
Санкт-Петербургского университета  
Государственной противопожарной службы МЧС РФ,  
190000, г. Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: skripka.a@igps.ru

## **ЯХЕЕВ В.В.**

Канд. техн. наук, доцент  
кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности  
Санкт-Петербургского университета  
Государственной противопожарной службы МЧС РФ,  
190000, г. Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: yakvaleri@yandex.ru

## **КАБИРОВ М.П.**

Аспирант  
кафедры «Геотехнологии освоения недр»  
Горного института НИТУ «МИСиС»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

## **ГУРКОВ А.А.**

Аспирант  
кафедры «Геотехнологии освоения недр»  
Горного института НИТУ «МИСиС»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

## **СНИГИРЕВ В.В.**

Аспирант  
кафедры «Геотехнологии освоения недр»  
Горного института НИТУ «МИСиС»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

Предложен инструментарий оптимизации производственно-логистической системы угледобывающих предприятий с использованием имитационного моделирования. Методический подход к имитационному моделированию для угледобывающих предприятий включает следующие составляющие: обоснование конкретной области использования системы имитационного моделирования, уровень ее детализации, рабочие функции и ключевые возможности, научно-методическое и информационное обеспечение. Приведены функциональная структура системы имитационного моделирования с учетом контура планирования объемов угледобычи, структурная модель потоковых данных системы имитационного моделирования и логическая схема взаимодействия элементов системы имитационного моделирования при ведении очистных работ.

**Ключевые слова:** угледобывающее предприятие, функциональная структура, технологическая система, имитационное моделирование, дискретно-событийный подход, системная динамика.

**Для цитирования:** Оптимизация производственно-логистической системы угледобывающих предприятий с помощью имитационного моделирования / В.В. Агафонов, А.В. Скрипка, В.В. Яхеев и др. // Уголь. 2022. № 5. С. 68-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-5-68-71.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Усложнение условий функционирования угледобывающих предприятий, связанных с турбулентностью мировых рынков сбыта и развивающимся мировым экономическим кризисом, предопределило формирование ряда определенных трудностей и сложностей в процессе принятия управленческих решений по повышению технико-экономической эффективности осуществления производственно-хозяйственной деятельности и поддержания должного уровня конкурентоспособности. Осуществить объективную и надежную проверку различных вариантов технологических и технических решений в обла-

сти совершенствования горного производства на основе интуитивного подхода уже невозможно без использования различных инструментов моделирования, которые позволяют перейти от эвристических решений к компьютерным имитационным моделям. При этом динамические составляющие производственной системы представляются не в виде последовательности уравнений, а в виде присущего ей поведенческого алгоритма [1, 2, 3, 4, 5]. В качестве основного преимущества имитационного моделирования в области использования аналитических технологий можно заявить возможность проследить развитие различных технологических и технических решений во временном тренде и производить их корректировку. Основными вендорами на этом рынке являются AnyLogic, Arena, FlexSim, ExtendSim, Simio и Simul8.

В свою очередь, сочетание имитационного моделирования с современными достижениями в области цифровых технологий и элементов цифровой экономики позволяет достичь весьма впечатляющих результатов. В качестве примера можно привести фрагмент жизненного цикла рудника по подземной добыче цинка «Garpenberg», где своевременно был реализован проект развития и рационализации на вышеописанной концептуальной основе (см. рисунок).

### МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

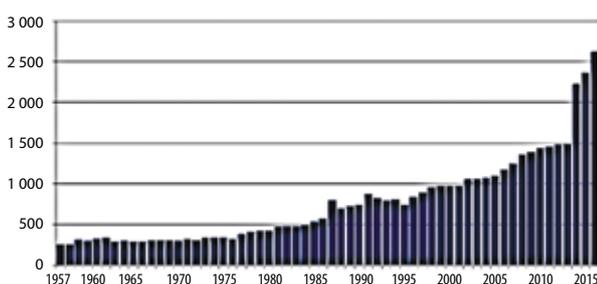
В рамках данной работы ИМ можно использовать для: прогнозирования и количественной оценки эффективности предлагаемых проектных решений в области технологий извлечения горной массы; определения граничных условий рентабельности и эффективности транспортных потоков; анализа текущих и перспективных планов

и графиков выполнения работ; выявления «узких мест» транспортно-логистических потоков; определения скрытых резервов и препятствующих факторов в производственных процессах и транспортных операциях; оценки управляющих воздействий на маршрутизацию транспортного оборудования; оценки влияния на производительность транспортного оборудования различных характеристик среды функционирования; оптимизации штатного состава парка оборудования; планирования и оптимизации закупок транспортного оборудования; оптимизации графиков смен и часов работы; оптимизации процесса технического обслуживания; разработки оптимизированных операционных КПЭ; оценки риска возникновения аварийных ситуаций и пр. [6, 7, 8].

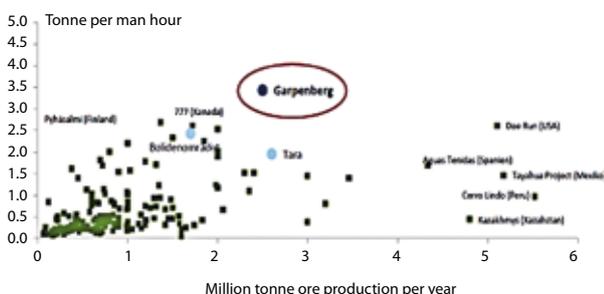
**Уровень детализации ИМ** определяется следующими составляющими: схемы маршрутизации (позволяющие определить точные расстояния) транспортировки горной массы с использованием самоходной техники, конвейерного и электровозного транспорта; потребности в единицах транспортной техники в зависимости от производительности угледобывающего предприятия; пункты перегрузки горной массы в виде схематических обозначений, но содержащих основные их характеристики; основные характеристики и параметры каждой единицы техники; влияние достижимых скоростей транспортирования горной массы; работа скиповых подъемов (скорость, грузоподъемность); перемещение горной массы с помощью транспортной и погрузочной техники; параметры работы основного оборудования шахты.

**Параметры производительности оборудования** включают потери рабочего времени (отдельные виды простоев, связанные с организацией труда и производства; снижение производительности, связанное с особенностями технологии; снижение производительности, связан-

Динамика добычи по годам, млн т.



Ранжирование по производительности:



Фрагмент жизненного цикла рудника по подземной добыче цинка «Garpenberg»

- Рудник «Garpenberg» характеризуется как «оцифрованный рудник» с высокой степенью автоматизации и самая производительная в мире шахта по подземной добыче цинка.
- В 2011-2014 годах на руднике «Garpenberg» реализован проект развития и рационализации стоимостью 3,9 млрд шведских крон (около 500 млн. долларов), что дало в 2016 году операционную прибыль 2,1 млрд крон.
- Направления инвестирования – увеличение добычи с 1,5 до 2,66 млн т, углубление автоматизации технологических процессов, сокращение затрат на добычу и переработку руды.
- Добыча ведется сразу на нескольких горизонтах на глубине от 500 до 1250 м.
- Применяется обратная закладка отработанных выработок смесью из «хвостов» и цемента.
- Численность – 460 чел. Плюс 150 чел. подрядчиков.

ное с мелкими неисправностями, не приводящее к остановке; любые потери рабочего времени длительностью до получаса); взаимовлияние всех элементов технологической цепи, которые должны быть описаны логическими связями и зависимостями; различные варианты размещения/распределения оборудования по участкам; описание работы участков; ввод и замена оборудования.

Для модели могут быть взяты статистические данные в той систематизации, которая принята при учете затрат труда и производительности оборудования на аналогичных предприятиях; организация работы транспорта; информация по рабочим циклам машин (время транспортирования, время погрузочно-перегрузочных операций, время разгрузки, время сбора, образования очереди и ожидания); влияние отказов на производительность; частота и продолжительность зависания и появления негабаритного материала на пунктах погрузки/разгрузки; скорость движения нагруженного и ненагруженного транспорта; параметры производственной программы и объемы добываемой горной массы; все основные погрузочно-разгрузочные операции; отсутствие проезда по выработке (ремонт выработки, ремонт различных коммуникаций) и пр.

**Рабочие функции и ключевые возможности СИМ** заключаются в следующих составляющих: ИМ должно отображать и учитывать при расчете только существенные стороны работы угледобывающего предприятия; содержать достаточную информацию о производственной системе в рамках гипотез, подходов, принятых при построении модели; рассчитывать требуемую производительность оборудования для достижения текущей/планируемой производительности угледобывающего предприятия с учетом КПЭ работы парка техники (КИО, КТГ и т.д.), определять оптимальное количество техники, ее характеристики и загрузки; прогнозировать сценарии развития событий, связанных с различными факторами (поломки, непредвиденные простои, аварии, отсутствие персонала и т.д.); планировать и составлять расписания работы транспортного оборудования; отрабатывать сценарии отказа технических средств (оборудования, техники) и влияния плановых остановок на работу угледобывающего предприятия; отображать движение горнодобывающей техники на трехмерной схеме, включая перемещение от мест стоянки до забоя и от забоя до скипового подъема; производить оценку эффективности инвестиций в развитие производства; определять наиболее эффективные комбинации ресурсов и процессов, учитывая бюджеты, производительность оборудования, ограничения на рабочий день (рабочие смены, расписание работы оборудования и т.д.), действий по снижению количества материальных ресурсов; прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации заданных способов и форм воздействия на объект; рассчитывать объемы добычи существующим и перспективным парком оборудования; проводить расчет расстояния и маршрутов транспортировки по существующей транспортной схеме; отображать/визуализировать работу забоев, движение транспорта, заполненность промежуточных (перегрузочных) бункеров, движение поездов и пр.

**Модель угледобывающего предприятия** выполняется в реальном масштабе (одна элементарная единица измерения должна равняться одному метру на местности), и направление координат должно совпадать с координатами данных по геологии, модель должна быть предоставлена в формате 3D (все объекты, нанесенные на план, должны иметь координаты X, Y, Z); в модели должны быть нанесены (или предоставлена таблица с координатами): действующие забои, действующие аккумулярующие бункеры, гаражи (места пересменки операторов ПДМ), места погрузки в вагонетки, перегрузки в скипы и выдачи горной массы на поверхность (для забоев берется координата в центре забоя или в начале выработок на определенную дату), должны быть указаны пути движения ПДМ от места стоянки до забоя и от забоя до аккумуляющих бункеров; должны быть указаны места перегрузки горной массы (промежуточные пункты); должно быть указано плечо откатки электровозного транспорта от места погрузки до опрокидывателя; все планы горных работ должны быть выполнены в одних координатах; должна быть представлена схема организации движения и пр.

**Технологические данные включают** информацию о технологических особенностях работы угледобывающего предприятия (используемая техника, виды работ); значение номинальной (скорректированной паспортной) производительности оборудования; характеристики имеющейся техники (тип, марка, количество, график ремонтов); правила и нормативы определения чистого рабочего времени оборудования, за вычетом обслуживания, запланированных и незапланированных простоев; информация о том, какая ПДМ в каком забое работает и куда разгружается на выбранную дату; затраты на топливо, стоимость оборудования, стоимость обслуживания оборудования за час; схемы маршрутов движения ВШТ; информацию о скиповом подъеме, высоте ствола, времени движения, грузоподъемности; информацию о сменах (число, длительность) и пр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая имитационная модель с достаточной степенью объективности и надежности позволяет оптимизировать функциональную структуру парка погрузочно-доставочных машин и транспортного оборудования и выбирать и обосновывать оптимальный план перемещения горной массы. Результаты моделирования указывают на то, что существуют потенциальные возможности для снижения эксплуатационных расходов на доставку горной массы и повышения надежности транспортных операций благодаря итерационному пересчету и анализу всех возможных маршрутов при выходе транспортного оборудования из строя и трудностях в перегрузках, а также оптимизации производственных процессов. Модель формирует симуляционные варианты схем доставки горной массы с расчетом объемов транспортных грузопотоков по логистическим маршрутам и объемы затрат на необходимое оборудование и технику. Сопоставление данных показателей позволяет выбрать оптимальный логистический вариант.

## Список литературы

1. Зиновьев В.В. Имитационные модули для синтеза моделей горнопроходческих работ / Сборник материалов конференции «ИММОД-2015»: Екатеринбург, 2015. С. 127-132.
2. Кузнецов И.С. Оценка производительности при добыче угля открытым способом на имитационной модели / Материалы инновационного конвента «Кузбасс: образование, наука, инновации – 2016». Кемерово, 2016. С. 32-34.
3. Стародубов А.Н. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщ / Материалы всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «ИММОД-2019». Екатеринбург, 2019. С. 540-547.
4. Имитационное моделирование в логистике и транспорте. [Электронный ресурс]. URL: <https://glonassgps.com/imitacionnoe-modelirovanie-v-logistike> (дата обращения: 15.04.2022).
5. Маликов Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6: учебное пособие. Уфа: Издательство БГПУ, 2013. 296 с.
6. Ли Е.К., Донг-Хван К., Вон Г.Х. Моделирование системной динамики для будущего развития информационных технологий: в сфере образования, здравоохранения и системы умного труда в Корее / Доклад 29-й Международной конференции Общества системной динамики 2011. 8 с.
7. Новыш Б.В., Юрча И.А. Анализ инновационной деятельности регионов с помощью технологий имитационного моделирования // Проблемы управления (Минск). 2020. № 4. С. 21-29.
8. Тихонова Н.В., Минкова Е.С. Имитационное моделирование с Anylogic в логистике // Транспорт и сервис. 2016. № 4. С. 32-41.

## Original Paper

UDC 622.013.3 © V.V. Agafonov, A.V. Skripka, V.V. Yakheev, M.P. Kabirov, A.A. Gurkov, V.V. Snigirev, 2022  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 5, pp. 68-71  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-68-71>

## Title

### OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION AND LOGISTICS SYSTEM OF UNDERGROUND MINES USING SIMULATION MODELING

## Authors

Agafonov V.V.<sup>1</sup>, Skripka A.V.<sup>2</sup>, Yakheev V. V.<sup>2</sup>, Kabirov M.P.<sup>1</sup>, Gurkov A.A.<sup>1</sup>, Snigirev V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology "MISIS" (NITU "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

<sup>2</sup> Safety Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

## Authors Information

**Agafonov V.V.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of "Geotechnologies of Subsurface Development" Mining Institute, e-mail: [msmu-prpm@yandex.ru](mailto:msmu-prpm@yandex.ru)

**Skripka A.V.**, PhD (Engineering), Head of the Department of Mine Rescue and Explosion, e-mail: [skripka.a@igps.ru](mailto:skripka.a@igps.ru)

**Yakheev V.V.**, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Mine Rescue and Explosion, e-mail: [yakvaleri@yandex.ru](mailto:yakvaleri@yandex.ru)

**Kabirov M.P.**, Postgraduate student of the Department of "Geotechnologies of Subsoil Development" Mining Institute, e-mail: [msmu-prpm@yandex.ru](mailto:msmu-prpm@yandex.ru)

**Gurkov A.A.**, Postgraduate student of the Department of "Geotechnologies of Subsoil Development" Mining Institute, e-mail: [msmu-prpm@yandex.ru](mailto:msmu-prpm@yandex.ru)

**Snigirev V.V.**, Postgraduate student of the Department of "Geotechnologies of Subsoil Development" Mining Institute, e-mail: [msmu-prpm@yandex.ru](mailto:msmu-prpm@yandex.ru)

## Abstract

A tool for optimizing the production and logistics system of underground mines using simulation modeling is proposed. The methodological approach to simulation modeling for mines of mining enterprises includes the following components: justification of a specific area of use of the simulation modeling system, the level of its detail, operational functions and key capabilities, scientific, methodological and information support. The functional structure of the simulation system is given, taking into account the contour of planning ore production volumes at mines, the structural model of the simulation data flow system and the logical scheme of interaction of the elements of the simulation system when performing cleaning operations.

## Keywords

Mining enterprise, Functional structure, Technological system, Simulation modeling, Discrete-event approach, System dynamics.

## Reference

1. Sinoviev V.V. Simulation modules for the synthesis of models of mining works. Proceedings of the conference "IMMOD-2015". Ekaterinburg, 2015, pp. 127-132. (In Russ.)

2. Kuznetsov I.S. & Zinoviev V.V. Assessment of productivity in open-cut coal mining on the simulation model. Proceedings of the Innovation Convention "Kuzbass: Education, Science, Innovation - 2016". Kemerovo, 2016, P. 32-34. (In Russ.)

3. Starodubov A.N. Application of simulation modeling to study the modes of coal release of the underlying strata. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry "IMMOD-2019". Yekaterinburg, 2019, P. 540-547. (In Russ.)

4. Simulation modeling in logistics and transport. [Electronic resource]. Available at: <https://glonassgps.com/imitacionnoe-modelirovanie-v-logistike> (accessed 15.04.2022).

5. Malikov R.F. Seminar on simulation modeling of complex systems in AnyLogic 6 environment: tutorial. Ufa, BSPU Publ., 2013, 296 p. (In Russ.)

6. Lee E.K., Dong-Hwan K. & Won G.H. Modeling System Dynamics for Future Development of Information Technology: in Education, Healthcare and Smart Labor System in Korea. Paper of the 29th International Conference of the Society for System Dynamics 2011, 8 p.

7. Novysh B.V. & Yurcha I.A. Analysis of regional innovation activities using simulation modelling techniques. *Problemy upravleniya* (Minsk), 2020, (4), pp. 21-29. (In Russ.)

8. Tikhonova N.V. & Minkova E.S. Simulation Modeling with Anylogic in Logistics. *Transport i Servis*, 2016, (4), pp. 32-41. (In Russ.)

## For citation

Agafonov V.V., Skripka A.V., Yakheev V.V., Kabirov M.P., Gurkov A.A. & Snigirev V.V. Optimization of the production and logistics system of underground mines using simulation modeling. *Ugol'*, 2022, (5), pp. 68-71. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-5-68-71](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-68-71).

## Paper info

Received February 11, 2022

Reviewed February 28, 2022

Accepted April 21, 2022