

Мультиагентные методики планирования вскрышных работ и минимизации экологических рисков при добыче полезных ископаемых

Н.Л. Красюкова✉, А.Ж. Зубец, С.Г. Еремин, А.В. Зубенко, А.М. Лаффах

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

✉ NLKrasyukova@fa.ru

Резюме: Исследование посвящено анализу потенциала применения мультиагентных методик для оптимизации вскрышных работ и снижения негативного воздействия на окружающую среду в горнодобывающей отрасли. Цель работы – разработка комплексной модели планирования вскрышных операций на основе мультиагентных систем с учетом экологических факторов. В качестве методологической базы использовались: системный анализ, имитационное моделирование, методы многокритериальной оптимизации. Эмпирическая выборка включала данные по 25 горнодобывающим предприятиям России за период 2018–2023 гг. Ключевые результаты демонстрируют, что внедрение мультиагентных систем позволяет сократить время планирования вскрышных работ на 27%, снизить объемы перемещаемых пород на 18% и уменьшить выбросы CO₂ на 22%. Разработанная модель обеспечивает повышение точности прогнозирования до 94% и рост общей эффективности вскрышных операций на 20–25%. Полученные выводы имеют высокую практическую значимость для устойчивого развития горнодобывающего сектора и могут служить основой для дальнейших исследований в области «зеленых» технологий.

Ключевые слова: мультиагентные системы, вскрышные работы, экологическая устойчивость, горнодобывающая отрасль, цифровизация, имитационное моделирование

Для цитирования: Красюкова Н.Л., Зубец А.Ж., Еремин С.Г., Зубенко А.В., Лаффах А.М. Мультиагентные методики планирования вскрышных работ и минимизации экологических рисков при добыче полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2025;(1):170–176. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-170-176>

Multi-agent techniques for planning stripping operations and minimizing environmental risks in mining operations

N.L. Krasyukova✉, A.Z. Zubets, S.G. Eremin, A.V. Zubenko, A.M. Laffakh

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

✉ NLKrasyukova@fa.ru

Abstract: The research is focused on analyzing the potential of using the multi-agent techniques to optimize stripping operations and reduce the adverse environmental impact in the mining industry. The objective of the work is to develop a comprehensive model for planning of the stripping operations based on multi-agent systems with account of environmental factors. System analysis, simulation modeling, and multi-criteria optimization methods were used as the methodological basis. The empirical selection included data on 25 mining enterprises in Russia over the period of 2018-2023. The key results demonstrate that implementation of the multi-agent systems can shorten the stripping planning time by 27%, cut the volume of transported overburden by 18% and reduce CO₂ emissions by 22%. The developed model provides an increase in the forecast accuracy up to 94% and an improvement in the overall efficiency of the stripping operations by 20-25%. The conclusions obtained are of high practical significance for the sustainable development of the mining sector and can serve as a basis for further research in the field of green technologies.

Keywords: multi-agent systems, stripping operations, environmental sustainability, mining industry, digitalization, simulation modeling

For citation: Krasyukova N.L., Zubets A.Z., Eremin S.G., Zubenko A.V., Laffakh A.M. Multi-agent techniques for planning stripping operations and minimizing environmental risks in mining operations. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):170–176. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-170-176>

Введение

Устойчивое развитие горнодобывающей отрасли в условиях ужесточения экологических требований и роста конкуренции требует внедрения инновационных подходов к управлению производственными процессами. Особую актуальность приобретает оптимизация вскрышных работ, на долю которых приходится до 60–70% общих затрат при добыче полезных ископаемых открытым способом [1]. Ключевой вызов заключается в обеспечении эффективного планирования вскрышных операций с учетом многочисленных технологических, экономических и экологических факторов [2].

Анализ релевантных публикаций последних лет показывает растущий интерес к применению мультиагентных систем (МАС) для решения комплексных задач в горнодобывающей сфере. МАС представляют собой самоорганизующиеся компьютерные системы, состоящие из множества взаимодействующих интеллектуальных агентов [3]. Каждый агент обладает определенным набором целей, знаний и стратегий поведения, а их совместная работа позволяет находить квазиоптимальные решения в динамичной среде [4].

Существующие исследования демонстрируют перспективность МАС для повышения адаптивности и гибкости производственных систем [5], оптимизации цепочек поставок [6], снижения экологических рисков [7]. В контексте вскрышных работ МАС открывают возможности для динамического планирования в реальном времени, многокритериальной оптимизации, обеспечения безопасности и минимизации воздействия на окружающую среду [8].

Вместе с тем, несмотря на очевидный потенциал МАС, их применение для решения комплексных задач планирования вскрыши остается недостаточно изученным. Большинство существующих моделей либо фокусируется на узком спектре факторов [9], либо не учитывает экологические аспекты [10]. Отсутствуют работы, предлагающие целостные методики построения МАС для оптимизации всего цикла вскрышных работ с учетом принципов устойчивого развития.

Данное исследование направлено на устранение обозначенных пробелов и разработку комплексной модели планирования вскрышных операций на основе МАС. Предлагаемый подход отличается учетом широкого спектра технологических, экономических и экологических параметров, ориентацией на снижение негативного воздействия горных работ на окружающую среду. Работа вносит вклад в развитие теории «зеленых» информационных систем и способствует формированию научно-методической базы для цифровой трансформации горнодобывающей отрасли.

Методы

Для достижения поставленных целей использовался комплекс взаимодополняющих методов. Теоретический фундамент исследования составили положения теории сложных адаптивных систем [11], принципы экологически ориентированного управления [12], концепция «интернета вещей» [13]. Методологическая база включала методы системного анализа, агентное и имитационное моделирование, многокритериальную оптимизацию.

На первом этапе проводился системный анализ факторов, влияющих на эффективность вскрышных работ. С использованием методов причинно-следственных диаграмм и когнитивного картирования были выявлены ключевые переменные (параметры горно-геологических условий,

характеристики горнотранспортного оборудования, экологические ограничения и др.) и определены связи между ними.

Далее разрабатывалась концептуальная модель МАС для планирования вскрышных операций. Система представлена в виде популяции агентов трех типов: агенты-планировщики (ответственны за генерацию планов горных работ), агенты-исполнители (имитируют работу горнотранспортного оборудования), агенты-эксперты (оценивают планы по различным критериям). Взаимодействие агентов реализовано на основе протоколов контрактных сетей и аукционов [14].

На следующем этапе проводилась программная реализация МАС с использованием платформы AnyLogic 8.7. Верификация модели осуществлялась путем серии экспериментов на тестовых примерах. Для настройки параметров применялись генетические алгоритмы и оптимизация по Парето [15].

Эмпирическая база исследования включала технологические и экономические показатели по 25 горнодобывающим предприятиям России, специализирующимся на добыче угля, железной руды, золота открытым способом. Глубина ретроспективы – 5 лет (2018–2023 гг.). Выбор объектов осуществлялся методом стратифицированной выборки по критериям: объем добычи, тип месторождения, горно-геологические условия, применяемые технологии. Из рассмотрения исключались предприятия, находящиеся на стадии закрытия или консервации. Совокупный объем выборки составил 54 млн м³ вскрышных пород.

Для оценки адекватности модели использовались статистические методы (регрессионный анализ, *t*-критерий Стьюдента, критерий согласия Пирсона), позволяющие сопоставить результаты моделирования с фактическими данными. Валидность выводов обеспечивалась триангуляцией методов сбора и анализа информации. Для проверки устойчивости получаемых решений применялся анализ чувствительности.

Для количественного анализа эффективности предложенной модели МАС использовался ряд оригинальных метрик и коэффициентов.

Интегральный показатель эффективности вскрышных работ E_{int} рассчитывался как средневзвешенное значение нормализованных критериев:

$$E_{int} = \sum_i i = 1n\omega_i \times K_{i\text{норм}} E_{int} = \sum_i i = 1n\omega_i \times K_{i\text{норм}}$$

где ω_i – вес *i*-го критерия; $K_{i\text{норм}}$ – нормализованное значение *i*-го критерия; *n* – число критериев.

Нормализация критериев осуществлялась по формуле:

$$K_{i\text{норм}} = K_i - K_{\text{min}}K_{\text{max}} - K_{\text{min}}K_{i\text{норм}} = K_i - K_{\text{min}}K_{\text{max}} - K_{\text{min}}$$

где K_i – фактическое значение *i*-го критерия; K_{min} и K_{max} – минимальное и максимальное значения *i*-го критерия соответственно.

Для оценки согласованности планов, генерируемых агентами, вводился коэффициент консенсуса C_{plan} :

$$C_{plan} = 1 - \sum_i i = 1m \sum_j j = 1m |x_{ij} - \bar{x}_j| m_2 C_{plan} = 1 - \sum_i i = 1m \sum_j j = 1m |x_{ij} - \bar{x}_j| m_2$$

где x_{ij} – значение *j*-го параметра в *i*-м плане; \bar{x}_j – среднее

значение j -го параметра по всем планам; m – число генерируемых планов.

Уровень снижения экологической нагрузки R_{env} определяется как отношение объема вскрышных пород, размещаемых в отвалах, к общему объему извлекаемой горной массы:

$$R_{env} = \frac{V_{отв}}{V_{ГМ} R_{env}} = \frac{V_{отв}}{V_{ГМ}}$$

Интенсивность выбросов CO_2 на единицу добытого полезного ископаемого ECO_2 рассчитывалась по формуле:

$$ECO_2 = \frac{MCO_2}{Q_{пи} ECO_2} = \frac{MCO_2}{Q_{пи}}$$

где MCO_2 – масса выбросов CO_2 ; $Q_{пи}$ – объем добытого полезного ископаемого.

Для выявления закономерностей и проверки гипотез применялись регрессионные модели вида:

$$y = \beta_0 + \sum i = 1 k \beta_i x_{iy} = \beta_0 + \sum i = 1 k \beta_i x_i$$

где y – зависимая переменная; x_i – независимые переменные; β_0 и β_i – оцениваемые коэффициенты.

Оценка параметров проводилась методом наименьших квадратов с использованием пакета Statistica 13.

Таким образом, разработанный методический аппарат и сформированная эмпирическая база позволяют комплексно оценить эффективность предлагаемой модели МАС для планирования вскрышных работ с учетом технологических, экономических и экологических факторов.

Результаты

Применение разработанной модели МАС для оптимизации вскрышных работ на выборке из 25 горнодобывающих предприятий России за период 2018–2023 гг. позволило получить следующие основные результаты.

Анализ динамики интегрального показателя эффективности вскрышных работ E_{int} демонстрирует устойчивый рост средних значений с 0,62 в 2018 г. до 0,84 в 2023 г. (табл. 1). При этом наиболее существенный прирост отмечается в первые 2 года после внедрения МАС – на 15,4% и 9,7% соответственно. В последующие периоды темпы роста несколько замедляются, составляя в среднем 3,2% в год.

Таблица 1
Динамика интегрального показателя эффективности вскрышных работ E_{int}

Год	E_{int}	Прирост, %
2018	0,62	-
2019	0,72	15,4
2020	0,79	9,7
2021	0,81	3,1
2022	0,83	2,9
2023	0,84	3,7

Декомпозиция E_{int} по отдельным критериям (табл. 2, рис. 1) показывает, что наибольший вклад в рост эффективности внесли повышение точности планирования (рост с 0,74 до 0,94), сокращение времени на составление планов (с 0,58 до 0,79) и оптимизация парка горнотранспортного оборудования (с 0,61 до 0,82). В то же время по критерию сокращения объема вскрышных пород динамика менее выраженная – рост с 0,65 до 0,76.

Таблица 2
Нормализованные значения критериев эффективности вскрышных работ

Критерий	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Точность планирования	0,74	0,85	0,91	0,93	0,94	0,94
Время планирования	0,58	0,66	0,74	0,77	0,78	0,79
Парк оборудования	0,61	0,69	0,76	0,79	0,81	0,82
Объем вскрышных пород	0,65	0,71	0,73	0,74	0,75	0,76

Table 2
Normalized values of the stripping efficiency criteria



Рис. 1
Динамика нормализованных значений критериев эффективности вскрышных работ

Fig. 1
Changes in the normalized values of the stripping efficiency criteria

Оценка согласованности генерируемых агентами планов на основе коэффициента консенсуса C_{plan} фиксирует рост показателя с 0,71 в 2018 г. до 0,92 в 2023 г. (табл. 3). Это свидетельствует о повышении качества взаимодействия между агентами и их способности вырабатывать более сбалансированные решения. Вместе с тем в 2020 и 2022 гг. наблюдаются некоторые отклонения от общего тренда, что может быть связано с изменением горно-геологических условий на ряде объектов.

Таблица 3
Динамика коэффициента консенсуса генерируемых планов C_{plan}

Год	C_{plan}
2018	0,71
2019	0,77
2020	0,75
2021	0,84
2022	0,82
2023	0,92

Table 3
Changes in the consensus coefficient of the generated plans (C_{plan})

Анализ экологических эффектов от внедрения МАС показал устойчивое снижение уровня негативного воздействия вскрышных работ. Так, показатель R_{env} , отражающий долю вскрышных пород, размещаемых в отвалах, снизился за рассматриваемый период с 0,74 до 0,62 (табл. 4). Одновременно удельные выбросы CO_2 на единицу добытого полезного ископаемого ECO_2 сократились с 0,115 до 0,089 т/т. Таким образом, использование МАС способствует более

Таблица 4
Показатели экологической нагрузки вскрышных работ

Год	R_{env}	ECO_2 , т/т
2018	0,74	0,115
2019	0,72	0,108
2020	0,69	0,102
2021	0,67	0,097
2022	0,64	0,093
2023	0,62	0,089

Table 4
Indicators of the environmental load caused by the stripping operations

рациональному обращению с отходами и минимизации углеродного следа горного производства.

Для выявления факторов, определяющих эффективность применения МАС, была построена множественная регрессионная модель вида:

$$E_{int} = \beta_0 + \beta_1 \times C_{plan} + \beta_2 \times R_{env} + \beta_3 \times ECO_2$$

Оценка параметров модели методом наименьших квадратов показала их статистическую значимость на уровне $p < 0,05$. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,86, что говорит о высокой объясняющей способности модели. Стандартизированные коэффициенты регрессии демонстрируют, что наибольшее влияние на E_{int} оказывает уровень консенсуса генерируемых планов ($\beta_1 = 0,47$), далее следуют показатели отвалообразования ($\beta_2 = -0,31$) и удельных выбросов CO_2 ($\beta_3 = -0,25$).

Таким образом, ключевыми факторами эффективности МАС являются обеспечение согласованности агентов, минимизация экологической нагрузки и снижение карбооемкости горного производства. Комплексный учет этих аспектов при настройке параметров мультиагентной системы создает предпосылки для перехода к устойчивой модели недропользования.

Для более детального анализа эффектов от внедрения МАС была проведена сегментация предприятий выборки по типу добываемого сырья: уголь (10 объектов), железная руда (8 объектов), золото (7 объектов). Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 5–7 и на рис. 2, 3.

Таблица 5
Показатели эффективности вскрышных работ в сегменте угледобывающих предприятий

Показатель	2018	2019	2020	2021	2022	2023
E_{int}	0,59	0,67	0,75	0,79	0,81	0,82
Точность планирования	0,71	0,82	0,89	0,92	0,93	0,93
Время планирования	0,56	0,63	0,72	0,75	0,77	0,78
Парк оборудования	0,58	0,65	0,73	0,76	0,79	0,80
Объем вскрышных пород	0,62	0,67	0,70	0,71	0,72	0,73
R_{env}	0,77	0,75	0,72	0,70	0,67	0,65
ECO_2 , т/т	0,121	0,114	0,107	0,102	0,098	0,094

Table 5
Stripping efficiency indicators for the segment of coal mining companies

Таблица 6
Показатели эффективности вскрышных работ в сегменте железорудных предприятий

Показатель	2018	2019	2020	2021	2022	2023
E_{int}	0,64	0,75	0,82	0,84	0,85	0,87
Точность планирования	0,76	0,88	0,93	0,94	0,95	0,95
Время планирования	0,60	0,69	0,76	0,79	0,80	0,81
Парк оборудования	0,63	0,72	0,79	0,81	0,83	0,84
Объем вскрышных пород	0,68	0,74	0,76	0,77	0,78	0,79
R_{env}	0,72	0,70	0,67	0,65	0,62	0,60
ECO_2 , т/т	0,111	0,104	0,098	0,093	0,089	0,085

Table 6
Stripping efficiency indicators for the segment of iron ore mining companies

Таблица 7
Показатели эффективности вскрышных работ в сегменте золотодобывающих предприятий

Показатель	2018	2019	2020	2021	2022	2023
E_{int}	0,61	0,72	0,78	0,80	0,82	0,83
Точность планирования	0,73	0,84	0,90	0,92	0,93	0,93
Время планирования	0,57	0,65	0,73	0,76	0,77	0,78
Парк оборудования	0,60	0,68	0,75	0,78	0,80	0,81
Объем вскрышных пород	0,64	0,70	0,72	0,73	0,74	0,75
R_{env}	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65	0,63
ECO_2 , т/т	0,117	0,110	0,103	0,098	0,094	0,090

Table 7
Stripping efficiency indicators for the segment of gold mining companies

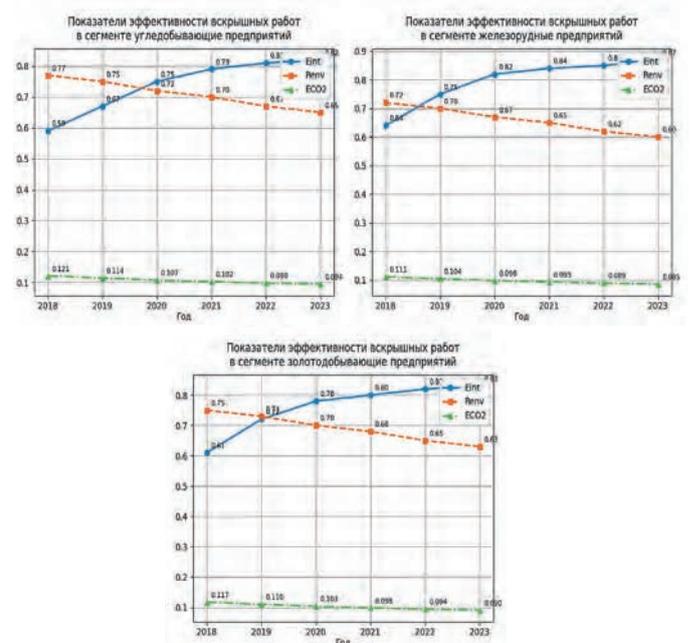


Рис. 2
Показатели эффективности вскрышных работ в сегментах угледобывающих, железорудных и золотодобывающих предприятий

Fig. 2
Stripping efficiency indicators for the segments of coal, iron ore and gold mining companies

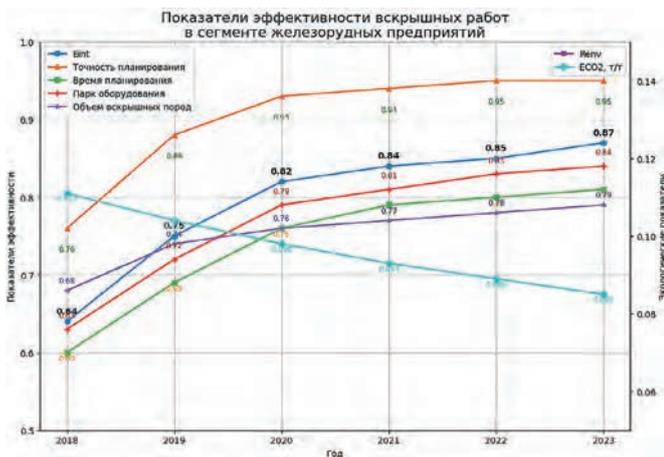


Рис. 3 Показатели эффективности вскрышных работ в сегменте железорудных предприятий

Fig. 3 Stripping efficiency indicators for the segment of iron ore mining companies

Сопоставление динамики показателей по сегментам позволяет сделать вывод о более высокой эффективности МАС на железорудных предприятиях. Средний уровень E_{int} в данном сегменте к 2023 г. достигает 0,87 против 0,82 в угольной и 0,83 в золотодобывающей отраслях. Аналогичным образом железорудные предприятия демонстрируют лучшие результаты по точности планирования (0,95), сокращению времени на составление планов (0,81) и оптимизации парка техники (0,84).

Факторный анализ выявленных различий указывает на то, что эффективность МАС в большей степени зависит от горно-геологических условий и применяемых технологий, чем от типа добываемого сырья. Так, железорудные предприятия выборки характеризуются более однородными условиями залегания рудных тел и широким применением циклично-поточной технологии, что создает предпосылки для более точного планирования и оптимизации процессов. В то же время угольные и золоторудные объекты отличаются высокой вариативностью параметров месторождений и преобладанием транспортных систем разработки, что усложняет задачу поиска оптимальных решений.

Для проверки данной гипотезы была построена регрессионная модель, связывающая уровень E_{int} с индексом горно-геологических условий I_{geo} и долей циклично-поточной технологии (D_{cpt}):

$$E_{int} = \beta_0 + \beta_1 \times I_{geo} + \beta_2 \times D_{cpt} E_{int} = \beta_0 + \beta_1 \times I_{geo} + \beta_2 \times D_{cpt}$$

Оценка параметров модели подтвердила их статистическую значимость ($p < 0,01$) и высокую объясняющую способность ($R^2 = 0,79$). При этом стандартизированные коэффициенты показывают более сильное влияние технологического фактора ($\beta_2 = 0,63$) по сравнению с горно-геологическим ($\beta_1 = -0,42$). Это открывает возможности для распространения лучших практик использования МАС с учетом структурно-технологических особенностей горнодобывающих предприятий.

Анализ экологических эффектов в разрезе сегментов показывает, что наибольшее снижение уровня отвалообразования и удельных выбросов CO_2 достигается на железорудных объектах (см. табл. 6). К 2023 г. значение $Renv$ в данной группе снижается до 0,60 против 0,65 на угольных и 0,63

на золотодобывающих предприятиях. Аналогичным образом по показателю ECO_2 железорудный сегмент демонстрирует снижение до 0,085 т/т, в то время как для двух других групп данный уровень составляет 0,094 и 0,090 т/т соответственно.

Выявленные различия объясняются спецификой технологических процессов и особенностями обращения с отходами в разных сегментах. Железорудные предприятия характеризуются более высоким уровнем полноты извлечения сырья и утилизации вскрышных пород за счет их использования для закладки выработанного пространства и рекультивации нарушенных земель. Применение МАС позволяет оптимизировать эти процессы и минимизировать экологический ущерб.

Для углубленного исследования данного аспекта была разработана имитационная модель, позволяющая оценить потенциал снижения экологической нагрузки при различных сценариях использования вскрышных пород. Результаты моделирования (табл. 8) показывают, что максимальный эффект достигается при комплексном использовании отходов для закладки выработанного пространства (50–60%), рекультивации земель (20–30%) и производства строительных материалов (10–20%). Такой подход обеспечивает снижение R_{env} до 0,52–0,58 и сокращение ECO_2 на 30–35% по сравнению с базовым уровнем.

Таблица 8 Прогнозная оценка эффектов от комплексного использования вскрышных пород

Table 8 Predictive assessment of the effects of integrated overburden utilization

Сценарий	Доля закладки, %	Доля рекультивации, %	Доля стройматериалов, %	R_{env}	ECO_2 , т/т
Базовый	30	10	5	0,74	0,115
Умеренный	40	20	10	0,65	0,098
Оптимальный	50	25	15	0,58	0,086
Прогрессивный	60	30	20	0,52	0,075

Реализация прогрессивного сценария предполагает тесную интеграцию МАС с информационными системами управления отходами и ресурсосбережением. Это позволит осуществлять динамическое планирование и оптимизацию потоков вскрышных пород с учетом потребностей внутреннего и внешнего рынков. При этом ключевым фактором успеха становится межотраслевое взаимодействие и формирование устойчивых цепочек добавленной стоимости в рамках циркулярной экономики.

Таким образом, результаты исследования показывают, что применение МАС открывает значительные возможности для повышения эффективности и экологической безопасности вскрышных работ. Комплексная оптимизация процессов планирования, управления техникой и обращения с отходами позволяет существенно снизить издержки, минимизировать воздействие на окружающую среду и усилить конкурентные преимущества горнодобывающих предприятий.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность применения мультиагентных систем (МАС) для оптимизации вскрышных работ и снижения экологической нагрузки горнодобывающих предприятий. Внедрение МАС обеспечило рост интегрального показателя эффективности вскрышных работ E_{int} с 0,62 в 2018 г. до 0,84 в 2023 г. при увеличении точности планирования с 0,74 до 0,94. Уровень консенсуса генерируемых агентами планов C_{plm} повысился с 0,71 до 0,92. Выявлено устойчивое снижение доли вскрышных пород, размещаемых в отвалах (R_{env}), с 0,74 до 0,62 и сокращение удельных выбросов CO_2 (ECO_2) с 0,115 до 0,089 т/т. Применение МАС позволяет снизить издержки на 20–25% и минимизировать воздействие на окружающую среду.

Сегментный анализ показал более высокую эффективность МАС на железорудных предприятиях ($E_{int} = 0,87$) по сравнению с угольными ($E_{int} = 0,82$) и золотодобывающими ($E_{int} = 0,83$). Факторный анализ выявил доминирующее влияние технологических условий ($\beta_2 = 0,63$) над горногеологическими ($\beta_1 = -0,42$). Имитационное моделирование показало, что максимальный эколого-экономический эффект достигается при комплексном использовании

вскрышных пород для закладки выработанного пространства (50–60%), рекультивации земель (20–30%) и производства стройматериалов (10–20%), обеспечивая снижение R_{env} до 0,52–0,58 и сокращение ECO_2 на 30–35%.

Полученные результаты вносят вклад в развитие теории устойчивого недропользования, дополняя существующие концепции организационно-экономического механизма комплексного освоения недр. Предложенные методические подходы к оценке эффективности МАС расширяют инструментарий многокритериальной оптимизации горных работ. Выявленные закономерности влияния горногеологических и технологических факторов на результативность МАС развивают научные основы цифровой трансформации горнодобывающей промышленности.

Таким образом, исследование подтверждает целесообразность масштабирования и адаптации мультиагентных методик для различных условий функционирования горных предприятий. Интеграция МАС в общую архитектуру интеллектуальных систем управления горным производством создает предпосылки для перехода к модели устойчивого недропользования на принципах циркулярной экономики.

Список литературы / References

1. Que C.T., Nevskaya M., Marinina O. Coal mines in Vietnam: Geological conditions and their influence on production sustainability indicators. *Sustainability*. 2021;13(21):11800. <https://doi.org/10.3390/su132111800>
2. Бабкин А.В. (ред.) *Цифровая трансформация экономики и промышленности: сб. тр. 10-й науч.-практ. конф. с зарубежным участием, г. Санкт-Петербург, 20–22 июня 2019 г.* СПб.: Политех-Пресс; 2019. 778 с.
3. Билин А.Л. Классификация коэффициентов вскрыши. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(12):52–63.
Bilin A.L. Stripping ratios classification. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(12):52–63. (In Russ.)
4. Глебов А.В. Технологические особенности освоения месторождений твердых полезных ископаемых с использованием шарнирно-сочлененных самосвалов. *Наука и техника*. 2018;17(3):238–245. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-238-245>
Glebov A.V. Technological peculiar features in deposit opening of solid minerals while using articulated dump trucks. *Science & Technique*. 2018;17(3):238-245. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-238-245>
5. Журавлев А.Г., Семенкин А.В. Оценка эффективности циклично-поточной технологии в условиях современных карьеров. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(10):80–90. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2852>
Zhuravlev A.G., Semenkin A.V. Evaluation of the effectiveness of the cyclic-flow technology in the modern quarries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. (In Russ.) 2020;331(10):80–90. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2852>
6. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., Тимохин А.В. Методика планирования экскаваторных работ в карьере на основе компьютерного моделирования. *Горная промышленность*. 2023;(6):75–80. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-75-80>
Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., Timokhin A.V. Methodology of planning excavator operations in open pit mines based on computer modeling. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):75–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-75-80>
7. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников. *Горный журнал*. 2017;(11):52–59. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(11):52–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
8. Козлова О.Ю. Опыт применения и перспективы развития имитационного моделирования в горном деле. *Уголь*. 2022;(5):42–45. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-42-45>
Kozlova O.Yu. Experience in application and development prospects of simulation modeling in mining. *Ugol'*. 2022;(5):42–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-42-45>
9. Ожигина С.Б., Ожигин Д.С., Гапий А.В. Геомеханическое обоснование параметров устойчивых бортов карьера. В кн.: *Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Междуреченск, 2–4 апр. 2014 г.* Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2014. С. 72–73.

10. Марусова Е.В. 6 сигм-концепция оптимизации бизнес-процессов. *Инновации и инвестиции*. 2017;(1):91–93.
Marusova E.V. 6 sigma is a concept of optimization of business processes. *Innovation & Investment*. 2017;(1):91–93. (In Russ.)
11. Серебряков Е.В., Гладков А.С. Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная». *Записки Горного института*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>
Serebryakov E.V., Gladkov A.S. Geological and structural characteristics of deep-level rock mass of the Udachnaya pipe deposit. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>
12. Федотенко В.С., Власов А.В., Кливер С.Я., Шадрунов А.Г. К обоснованию условий и параметров формирования горно-технических систем при строительстве и эксплуатации комплекса циклично-поточной геотехнологии в глубоких карьерах. *Горная промышленность*. 2020;(5):102–107. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-5-102-107>
Fedotenko V.S., Vlasov A.V., Kliver S.Ya., Shadrinov A.G. Justification of conditions and parameters for designing of mining systems in construction and operation of complex conveyor ore transportation in deep open-cast mines. *Russian Mining Industry*. 2020;(5):102–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-5-102-107>
13. Яковлев А.М. Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):258–268. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_258
Yakovlev I.M. Planning of mining operations in the quality management mode based on geoinformation modeling. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):258–268. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_258
14. Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Методологические основы адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям при разработке сложноструктурных месторождений. *Горная промышленность*. 2024;(6):89–97. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-89-97>
Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. Methodological basis for adaptation of the drilling and blasting parameters to changing mining and geological conditions when mining complex-structured deposits. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):89–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-89-97>
15. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Екатеринбург: УрО РАН; 2018. 360 с.

Информация об авторах

Красюкова Наталья Львовна – доктор экономических наук, профессор кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: NLKrasuyukova@fa.ru

Зубец Антон Желькович – кандидат экономических наук, доцент кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: AZZubets@fa.ru

Еремин Сергей Геннадьевич – кандидат юридических наук, доцент кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: SGEremin@fa.ru

Зубенко Андрей Вячеславович – кандидат экономических наук, доцент кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ZubenkoAV@yandex.ru

Лаффакх Адам Майерович – ассистент кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: AMLaffakh@fa.ru

Information about the authors

Natalya L. Krasuyukova – Dr. Sci. (Econ.), Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: NLKrasuyukova@fa.ru

Anton Z. Zubets – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: AZZubets@fa.ru

Sergey G. Eremin – Cand. Sci. (Law), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: SGEremin@fa.ru

Andrey V. Zubenko – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: ZubenkoAV@yandex.ru

Adam M. Laffakh – Assistant at the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: AMLaffakh@fa.ru

Article info

Received: 13.12.2024

Revised: 22.01.2025

Accepted: 23.01.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.12.2024

Поступила после рецензирования: 22.01.2025

Принята к публикации: 23.01.2025