

Обоснование условий применения автоматизированных систем управления открытыми горными работами строительства комплекса циклично-поточной геотехнологии в карьере с помощью имитационного моделирования

М.В. Рыльникова¹✉, А.В. Власов², М.А. Макеев³

¹ Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. академика Н.В. Мельникова, г. Москва, Российская Федерация

² АО «Карельский окатыш», г. Костомукша, Российская Федерация

³ ООО «Пиклема», г. Москва, Российская Федерация

✉ rylnikova@mail.ru

Резюме: Описанный в статье подход имитационного моделирования для оценки эффективности геотехнологий может быть применим: 1) для оценки внедрения интеллектуальных геотехнологий с цифровой трансформацией горнотехнических систем; 2) для выбора системы организации добычи и транспортировки, приоритетной логистической схемы рудника. Этот подход позволяет более обоснованно принимать решения по программе инвестирования на основе объективной количественной оценки. Имитационное моделирование должно базироваться на результатах геотехнического обоснования конструктивных параметров бортов и уступов карьера в рабочем и предельном состоянии. Переход на автоматизированные системы управления интеллектуальными геотехнологиями в программируемом режиме и своевременное включение в транспортную схему циклично-поточной технологии позволяет: 1) вывести людей из рабочей зоны карьера; 2) существенно снизить издержки при добыче руды; 3) перейти на другой уровень технологического уклада при освоении месторождений; 4) вовлечь в отработку ранее некондиционные руды. В качестве примера приведены результаты оценки внедрения новых технологий транспортирования горной массы на предприятии по добыче меди Codelco в Чили на карьере Radomiro Tomic.

Ключевые слова: циклично-поточная технология, открытая геотехнология, автоматизированная система управления, горнотехническая система, имитационное моделирование

Для цитирования: Рыльникова М.В., Власов А.В., Макеев М.А. Обоснование условий применения автоматизированных систем управления открытыми горными работами строительства комплекса циклично-поточной геотехнологии в карьере с помощью имитационного моделирования. *Горная промышленность*. 2021;(4):106–112. DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-106-112.

Justification of Conditions for Application of Automated Control Systems for Surface Mining during Construction of In Pit Crushing and Conveying System using Simulation Modeling

M.V. Rylnikova¹✉, A.V. Vlasov², M.A. Makeev³

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² 'Karelsky Okatysh' JSC, Kostomuksha, Russian Federation

³ 'Piklema' LLC, Moscow, Russian Federation

✉ rylnikova@mail.ru

Abstract: The simulation modeling approach described in the article is intended to assess the efficiency of geo-technologies and can be applied: 1) to evaluate the implementation of smart geotechnologies with digital transformation of the mining systems; 2) to select the mining and transportation management system as well as the preferred logistic scheme of the mine. This approach makes it possible to make more reasonable investment decisions based on an objective quantitative assessment. Simulation modeling should be based on the results of geotechnical justification of structural parameters of the pit walls and benches in operating and limit states. Transition to automated systems to control smart geotechnologies in programmable mode and timely inclusion of the In Pit Crushing and Conveying (IPCC) technology into the transport scheme helps to: 1) remove people from the working zones inside the open pit; 2) significantly reduce the ore mining costs; 3) advance to a higher level of technology in developing the deposits; 4) process ores that were previously considered substandard. As an example, the assessment results are provided of the implementation of new rock mass transportation technologies at the Codelco copper mine in Chile in the Radomiro Tomic open pit.

Keywords: In Pit Crushing and Conveying (IPCC) technology, open geotechnology, automated control system, mining system, simulation modeling

For citation: Rylnikova M.V., Vlasov A.V., Makeev M.A. Justification of Conditions for Application of Automated Control Systems for Surface Mining during Construction of In Pit Crushing and Conveying System using Simulation Modeling. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(4):106–112. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-106-112.

Введение

Текущий уровень развития геотехнологий позволяет обосновать условия функционирования горнодобывающего предприятия с открытым способом добычи руды принципиально нового технологического уклада. Помимо повышения эффективности горных работ за счет реализации инновационных технологий, для создания системы цифровой трансформации горного производства, предусматривающей оптимизацию режима и параметров технологических процессов, прогнозную аналитику, управление рисками промышленной и экологической безопасности, внедрение систем искусственного интеллекта и роботизированных геотехнологий, необходим комплексный подход к изменению логистической схемы рудника и технологий транспортировки горной массы с использованием циклично-поточного комплекса и/или крутонаклонных конвейеров.

Анализ мировой практики открытой разработки

Анализ мировой практики открытой разработки месторождений свидетельствует, что в настоящее время вполне реален перевод карьеров на полностью автономный режим эксплуатации с применением интеллектуальных роботизированных геотехнологий без присутствия людей в опасной зоне ведения горных работ [1–6]. В табл. 1 приведены примеры применения подобных технологий на передовых карьерах мира. И это далеко не полный перечень накопленного опыта перевода карьеров на интеллектуальные геотехнологии. Вывод операторов из опасной зоны ведения открытых горных работ сейчас возможен практически на всех технологических процессах горного про-

изводства. Управление погрузочными машинами, зарядчиками и бульдозерами может быть осуществлено либо дистанционно, либо в программируемом режиме управления. Автосамосвалы и буровые станки могут управляться также дистанционно или автоматически автономно. Разработаны и эффективно применяются средства контроля и управления состоянием массива с помощью высокоточных лазеров, георадаров, квадрокоптеров, дронов и иной беспилотной техники [7; 8]. Исключение человека непосредственно из опасной зоны ведения горных работ позволяет значительно повысить промышленную и экологическую безопасность производства и на этой основе принципиально пересмотреть подходы к проектированию устойчивого развития горнотехнических систем и обоснованию параметров горных работ.

В частности, это возможно обеспечить за счет:

- уменьшения ширины транспортных берм в карьере, разрезе и на отвале. Современные системы автоматического управления движением автотранспорта могут с высокой точностью отслеживать сближение самосвалов, траекторию их движения, контролировать скорость и в превентивном режиме автономного управления предотвращать возможные столкновения. Следует отметить, что действующие нормы и правила безопасности в части обоснования параметров автодорог, разработанные исходя из условий управления транспортом человеком, не учитывают современных возможностей интеллектуальных систем управления транспортным комплексом и средствами, работающими исключительно в автономном режиме;
- увеличения угла заложения уступов и результирующего угла наклона бортов в предельном положении, повы-

Таблица 1
Действующие интеллектуальные рудники, работающие в автономном режиме

Table 1
Active smart mines operating in autonomous mode

Год	Компания	Карьер	Страна	Производитель	Модель	Количество техники
2008	Codelco	Gabriela	Chili	Komatsu	930E-AT	17
2008	Rio Tinto	West Angelas	Australia	Komatsu	930E-AT	5
2012	Rio Tinto	Yandicoogina	Australia	Komatsu	930E-AT	22
2012	Rio Tinto	Hope Downs	Australia	Komatsu	930E-AT	19
2012	Fortescue	Solomon	Australia	Caterpillar	793F	54
2013	Rio Tinto	Nammuldi	Australia	Komatsu	930E-AT	30
2018	Canadian Natural Resources Lmtd	Jackpine	Canada	Caterpillar	797	3
2018	Imperial Oil	Kearl oil sands mine	Canada	Caterpillar	797F	7
2019	Vale	Brucutu mine	Brazil	Caterpillar	793 F	13
2019	Vale	Carajás Mine	Brazil	Caterpillar	793 F	2
2019	СУЭК	Черногорский	РФ	БелАЗ	75131R	2
2020	Гранит	Ситницкое	Беларусь	БелАЗ	758R8	2

шения высоты рабочих уступов. При отсутствии людей в опасной зоне ведения горных работ возможно рассмотреть проектное снижение коэффициента запаса устойчивости уступов и участков борта карьера, так как риск падения отдельных кусков и вывалов горных пород становится менее критичным, поскольку не связан с возможным травмированием людей;

– повышения угла рабочего борта карьера за счет изменения ширины рабочих площадок при подъезде автосамосвала к экскаватору в режиме высокоточного автономного управления.

Таким образом, в результате перехода на интеллектуальные технологии в карьере без участия операторов в опасных зонах ведения горных работ может быть значительно снижен как текущий коэффициент вскрыши, так и в целом объем вскрышных пород, извлекаемых из контура карьера и размещаемых во внешних отвалах [9; 10]. Это позволит существенно сократить платежи горных предприятий за размещение отходов, уменьшить количество изымаемых под отвалы земель и улучшить состояние окружающей среды в горнопромышленных регионах. Кроме того, данные решения значительно сократят издержки предприятий, повысят рентабельность горных предприятий и за счет этого позволят вовлечь в эксплуатацию ранее некондиционные руды – забалансовые запасы.

Циклично-поточная технология

В настоящее время на ряде крупных карьеров России по добыче железных руд (Карельский Окамыш, Михайловский ГОК), золотоносных (Светлинский), цветных и полиметаллических многокомпонентных руд (Сибайский) наметился переход с цикличной на циклично-поточную технологию (ЦПТ). При переходе на ЦПТ в границах карьера размещаются мощные дробильно-перегрузочные пункты с дальнейшей транспортировкой горной массы на поверхность конвейерным транспортом. Доставка горной массы до дробильного комплекса осуществляется автомобильным транспортом по наиболее коротким карьерным маршрутам, что существенно улучшает условия эксплуатации автотранспорта в карьере и снижает издержки производства [11–14]. ЦПТ создает все предпосылки к автоматизации всей логистической системы карьера, так как оборудование поточной части (конвейеры и дробильные машины) уже работают преимущественно в автономном режиме управления из диспетчерского пункта. Сокращение общей протяженности автомобильных дорог, увеличение объема стационарных участков дорог с повышенным качеством дорожного покрытия, фиксированные точки разгрузки автосамосвалов значительно упрощают условия ввода и содержания беспилотного автономного автотранспорта.

Широкое внедрение систем диспетчеризации, автоматизации и цифровизации горного производства позволяют иметь наиболее полную и точную информацию о грузопотоках в карьерах, оптимизировать их перемещение и тем самым эффективно управлять объемами и качеством извлекаемой рудной массы. Создание алгоритмов, позволяющих в программном режиме управлять потоками горной массы и транспорта, имеет значительный потенциал. Внедрение беспилотных самосвалов позволит работать всей транспортной цепочке циклично-поточной геотехнологии в автоматическом режиме – от забоя с обуриванием и взрыванием пород с учетом точного геологического описания качества руды в массиве, последующей точечной погрузкой взорванной горной массы экскаватором,

доставкой самосвалами рудной массы заданного качества в определенный пункт для дробления, первичной переработки, сепарации и вплоть до размещения на складе обогатительной фабрики или во временном рудном отвале. Разработанные и оптимизируемые программные комплексы позволят оптимизировать режимы развития горных работ в карьере, управлять скоростным режимом движения транспортных средств, перераспределять самосвалы по экскаваторным забоям с учетом качества добываемых руд, определять оптимальный маршрут движения, технологические схемы переработки.

Переход на ЦПТ изменяет структуру грузооборота автотранспорта в части увеличения доли перемещения груженых автосамосвалов на спуск. Здесь имеет место значительный потенциал увеличения доли рекуперации энергии.

Оценка эффективности внедрения новых технологий в большинстве случаев производится на основе опыта внедрения подобных проектов на схожих по горнотехническим условиям месторождениях с применением средних оценок возможностей роста производственной мощности предприятия и снижения эксплуатационных затрат. Следует отметить, что данная оценка по методу аналогий не учитывает взаимосвязи технологических процессов и пределов и статистических показателей работы техники на конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях разработки месторождений. Это может привести к недостижению планируемых показателей.

Наиболее рациональным способом оценки реального эффекта от внедрения интеллектуальных технологий с цифровизацией горнотехнических систем, как описания совокупности технологических процессов, горных работ и оборудования во вмещающем участке недр, при переходе карьера на технологии ЦПТ является применение имитационного моделирования и цифровых моделей горнотехнических систем. Цифровая модель горнотехнической системы включает в себя цифровое описание в виде 3D-моделей свойств, структуры и состояния массива горных пород на осваиваемом участке недр, изменения качества извлекаемых полезных ископаемых по площади и глубине месторождения, характеристики схемы и параметров вскрытия и подготовки запасов в динамике развития горных работ на месторождении, статистические параметры работы техники в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях техногенного изменения участка недр в ходе ведения горных работ (показатели производительности горного оборудования, коэффициенты технической готовности техники, коэффициенты использования оборудования, скоростей движения транспорта, продолжительности циклов погрузочно-разгрузочных операций и пр.), а также цифровое описание динамики горнотехнических условий (длины транспортных маршрутов, высоты подъема и спуска горной массы, ширины транспортных берм и рабочих площадок, количества поворотов, мест встречных разъездов и т.д.). Данные параметры используются для создания цифровой модели горнотехнической системы для обеспечения возможности оптимизации показателей ее функционирования с оперативным управлением горнотранспортным комплексом в ходе освоения месторождения. Такая цифровая модель обеспечивает возможность оперативной оценки выполнимости производственного плана по объемам, качеству и себестоимости добычи рудной массы заданного качества исходя из наличия текущих ресурсов и их доступности.

Важно отметить, что переход на циклично-поточную технологию может внести изменения в работу мобильной и стационарной техники на определённом этапе развития горных работ и технологическом процессе добычи и переработки рудной массы. Например, применение удаленной диагностики и прогнозирования выхода из строя узлов автосамосвала повышает коэффициент их технической готовности. Цифровое моделирование позволяет провести имитацию работы всего горнотранспортного комплекса, включая оборудование поточной технологии. При увеличении коэффициента технической готовности автосамосвалов обеспечивается рост общей производительности горного предприятия при снижении эксплуатационных затрат на транспортирование горной массы с учетом изменения горнотехнических условий в ходе разработки месторождения. Появляется возможность в режиме реального времени оценить все сопутствующие эффекты. Это позволяет принять наиболее рациональные проектные решения о своевременном внедрении ЦПТ на основе объективных факторов работы всей технологической цепочки производства.

Оценка эффективности применения инновационных геотехнологий на основе имитационного моделирования

Методология оценки эффективности применения инновационных геотехнологий с цифровой трансформацией горнотехнических систем основана на сборе базовой информации о свойствах и состоянии массива горных пород на осваиваемом участке недр, получении сведений о применяемых технологиях вскрытия, подготовки и извлечения запасов месторождения, оценки возможностей внедрения новых технологий, в том числе с работой оборудования в автономном программируемом режиме, определении ключевых технологий, как основы для последующего внедрения, оценки доли интеллектуальных технологий в технологической схеме горного предприятия и определении перспектив ее роста, моделирование плана развития горных работ, включая длительную перспективу, с оценкой технико-экономических показателей (рис. 1).

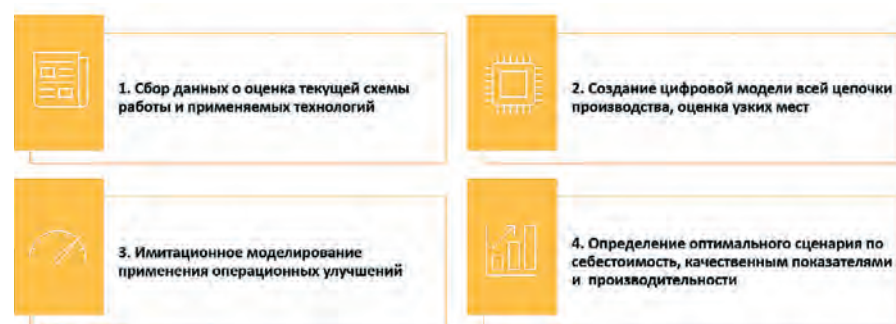


Рис. 1
Этапы имитационного моделирования для оценки эффективности геотехнологий

Fig. 1
Stages of simulation modeling to assess the effectiveness of geotechnologies

Таким образом, создание системы имитационного моделирования на основе формирования цифровых моделей горнотехнической системы позволяет на этапах ее проектирования и эксплуатации решить комплекс задач оптимизации, мониторинга и оперативного управления

горным предприятием с минимизацией рисков при эксплуатации месторождения [15].

Комплекс решаемых на этапе проектирования горнотехнической системы задач включает:

- оценку и оптимизацию проектируемых решений при формировании горнотехнической системы для выполнения заданных производственных и экономических показателей;
- обеспечение условий подготовки планов развития горных работ на год, три года и перспективу, вплоть до завершения жизненного цикла эксплуатации месторождения;
- оценку и определение оптимального выбора количества и состава парка технологического оборудования;
- анализ рисков при реализации технологических решений и разработку компенсирующих мероприятий на случай развития неблагоприятных событий.

На этапе эксплуатации месторождения, планирования и управления производством с помощью цифровой модели решается следующий комплекс задач:

- оценка и пересчет производственных и технико-экономических показателей при изменении технических характеристик применяемого оборудования, горно-геологических условий освоения месторождения, эксплуатационных факторов, логистической схемы и маршрутов движения транспортных средств, технологической схемы производства или других исходных данных;
- расчет эксплуатационных расходов и ключевых показателей работы как части смоделированного производственного плана;
- определение ключевых операционных и производственных показателей в результате проведения анализа сценариев развития горных работ;
- оценка потенциальных рисков и перспектив развития производства на этапах планового периода.

В качестве примера рассмотрим результаты оценки внедрения новых технологий транспортирования горной массы, основанных на сочетании автомобильного и конвейерного транспорта на одном из крупнейших предприятий по добыче меди в Чили в компании Codelco на карьере Radomiro Tomic.

В рамках решения поставленной задачи была оценена перспектива внедрения крутонаклонной конвейерной системы (НАС) и циклично-поточной технологии с применением стационарного наклонного конвейера. На основе имитационного моделирования проведено сравнение показателей использования наклонного и крутонаклонного конвейерного транспорта с применяемой на карьере автотранспортной схемой перемещения горной массы исключительно автосамосвалами (рис. 2).

По результатам имитационного моделирования оценены технико-экономические показатели при внедрении циклично-поточной технологии с наклонными конвейерами, размещенными на нерабочем борту карьера (рис. 2, в), и два варианта строительства крутонаклонной конвейерной линии (рис. 2, б) в сравнении с применяемой на карьере схемой транспортирования горной массы карьерными самосвалами (рис. 2, а).

Результаты моделирования определили наибольшую эффективность реализации проекта с внедрением циклич-

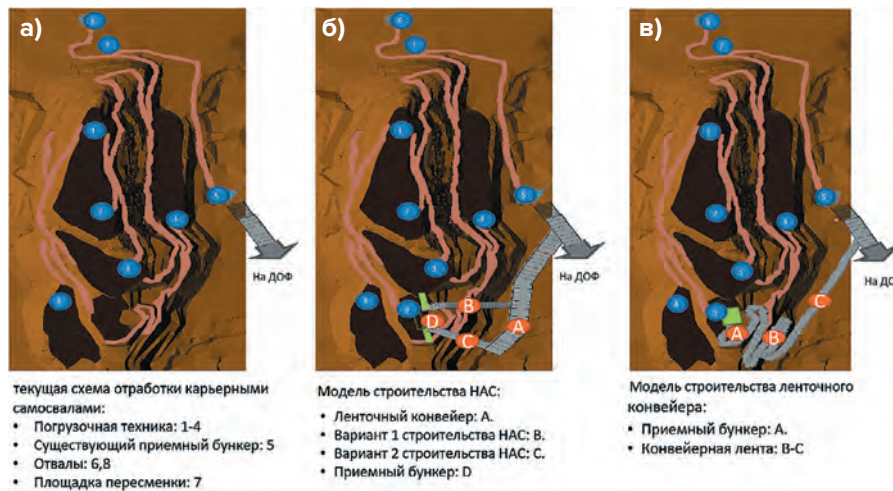


Рис. 2
 Отображение при моделировании текущей схемы транспортирования горной массы при различных вариантах строительства конвейеров

Fig. 2
 Simulation display of the current rock mass transportation scheme for different options of the conveyor design

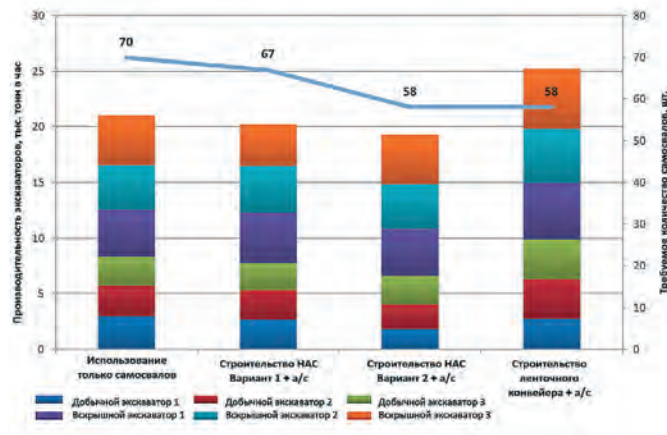


Рис. 3
 Результаты моделирования и сравнения вариантов

Fig. 3
 Modeling results and comparison of options

Таблица 2
 Сравнительные расчеты моделирования различных вариантов внедрения

Table 2
 Comparative modeling calculations of different implementation options

Параметр	Использование только самосвалов	Строительство НАС Вариант 1 + а/с	Строительство НАС Вариант 2 + а/с	Строительство ленточного конвейера + а/с
Количество самосвалов, шт	70	67	58	58
Производительность добычного экскаватора 1, тыс. т/ч	3,015	2,701	1,813	2,781
Производительность добычного экскаватора 2, тыс. т/ч	2,766	2,624	2,206	3,534
Производительность добычного экскаватора 3, тыс. т/ч	2,538	2,446	2,555	3,534
Производительность вскрышного экскаватора 1, тыс. т/ч	4,255	4,532	4,255	5,158
Производительность вскрышного экскаватора 2, тыс. т/ч	4,002	4,179	4,007	4,858
Производительность вскрышного экскаватора 3, тыс. т/ч	4,443	3,712	4,443	5,385
Общая производительность, тыс. т/ч	21,019	20,194	19,279	25,250
Ср. время цикла, мин	56	56	49	44
Ср. коэф. использования	78%	69%	72%	77%

но-поточной технологии с помощью традиционного ленточного конвейера как с точки зрения максимума производительности погрузочно-доставочной техники, так и по фактору наибольшей общей производительности горнотранспортного комплекса карьера в целом (рис. 3).

Анализ результатов моделирования, приведенных на гистограмме на рис. 3, свидетельствует, что при строительстве ленточного конвейера на нерабочем борту карьера требуется минимальное количество карьерных самосвалов (58 единиц), при этом производительность погрузочной техники превышает другие варианты на 20%.

В табл. 2 приведены результаты расчета технико-экономических показателей сравниваемых вариантов развития погрузочно-транспортного комплекса карьера. Анализ данных таблицы свидетельствует, что при увеличении производительности за счет сокращения времени цикла самосвалов до 44 мин сохраняется коэффициент использования парка техники.

Сравнение по результатам моделирования экономических показателей функционирования рудника выявило возможность сокращения количества эксплуатируемых самосвалов на 12 ед. с получением дополнительной экономии себестоимости транспортировки горной массы на 11% (рис. 4).

Оценка по данным математического моделирования результатов реализации различных геотехнологий позволяет обоснованно выбрать приоритетный вариант развития горных работ в карьере. Так, в приведенном примере внедрение новых технологий на медном месторождении позволило определить предпочтительность с точки зрения достижения наилучших технико-экономических показате-

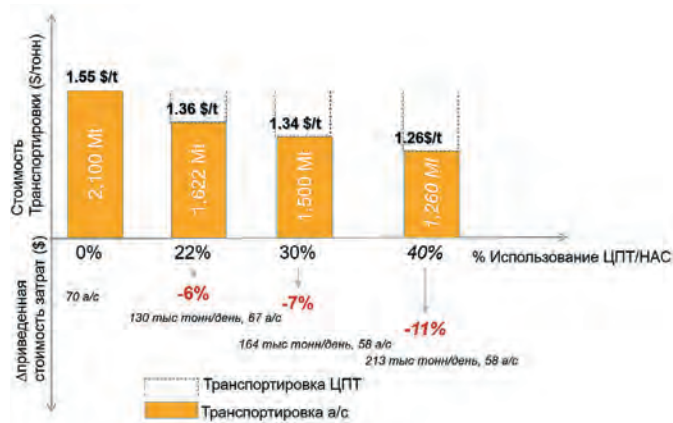


Рис. 4
Сравнение технико-экономических характеристик по вариантам

Fig. 4
Comparison of technical and economic characteristics of the options

телей до принятия решения о внедрении циклично-поточной геотехнологии на основе сочетания автомобильного транспорта на рабочих горизонтах с перегрузкой рудной массы в комплекс дробления руды, размещенный на нерабочем борту карьера, и последующим транспортированием дробленой руды, в зависимости от ее качества, на обоганительную фабрику или временный рудный склад.

Заключение

Описанный подход может быть применим как для оценки внедрения интеллектуальных геотехнологий с цифровой трансформацией горнотехнических систем, так и для выбора системы организации добычи и транспортировки, приоритетной логистической схемы рудника, позволяя более обоснованно принимать решения по программе инвестирования на основе объективной количественной оценки.

Безусловно, имитационное моделирование в качестве граничных условий должно базироваться на результатах геотехнического обоснования конструктивных параметров бортов и уступов карьера в рабочем и предельном состоянии, обеспечивая промышленную безопасность ведения горных работ и базовые лицензионные и заданные социально-экономические показатели освоения месторождения. Переход на автоматизированные системы управления интеллектуальными геотехнологиями в программируемом режиме с выводом людей из рабочей зоны карьера, своевременное включение в транспортную схему циклично-поточной технологии позволяет существенно снизить издержки при добыче руды, перейти на другой уровень технологического уклада при освоении месторождений и вовлечь в отработку ранее некондиционные руды.

Список литературы

1. Анистратов К.Ю. (ред.) *Открытые горные работы – XXI век*. М.: ООО «Система максимум»; 2019.
2. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(4):24–39.
3. Gvishiani A., Dobrovolsky M., Rybkina A. Big Data and FAIR Data for Data Science. In: Roberts F.S., Sheremet I.A. (eds) *Resilience in the Digital Age. Lecture Notes in Computer Science*. Springer; 2021. Vol. 12660. Chapter 6. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70370-7_6.
4. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р. (ред.) *Горное дело: терминологический словарь*. 5-е изд. М.: Горная книга; 2016. 635 с.
5. Клебанов Д.А. Прогнозная аналитика в горнодобывающей отрасли. Перспективные направления исследований. В: *Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Магнитогорск, 22–26 мая 2017 г.* Магнитогорск: МГТУ; 2017. С. 44–45.
6. Faz-Mendoza A., Gamboa-Rosales N.K., Medina-Rodriguez C.E., etc. Intelligent processes in the context of Mining 4.0: Trends, research challenges and opportunities. In: *Conference: 2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA), Sakheer, Bahrain, 8–9 November, 2020*. <https://doi.org/10.1109/DASA51403.2020.9317095>
7. Trubetskoy K., Rylnikova M., Esina E. Ensuring the environmental and industrial safety in solid mineral deposit surface mining. *E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium*. 2017;21:02008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102008>
8. Батаев А.В., Клебанов Д.А. Резервы повышения операционной эффективности горнодобывающих компаний: ремонты оборудования. *Горная промышленность*. 2013;(5):47–49. Режим доступа: <https://mining-media.ru/article/anonsy/5234-rezervy-povysheniya-operatsionnoj-effektivnosti-gornodobyvayushchikh-kompanij-remonty-oborudovaniya>
9. Rylnikova M., Radchenko D., Klebanov D. Intelligent Mining Engineering Systems in the Structure of Industry 4.0. *E3S Web of Conferences*. 2017;21:01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101032>
10. Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Федотенко В.С., Есина Е.Н. Применение интеллектуальных систем и технологий при открытой разработке угольных месторождений с высокими вскрышными уступами. *Горный журнал*. 2018;(1):32–36. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.01.05>
11. Власов А.В., Шадрунов А.Г., Кливер С.Я., Лукьянов Ю.А. К обоснованию условий перехода на циклично-поточную геотехнологию в глубоких карьерах. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(4):428–440.
12. Бахтурин В.Г., Кармаев Г.Д., Берсенева В.А. Вопросы применения циклично-поточной технологии на карьерах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(3):62–71.
13. Рыльникова М.В., Струков К.И., Бергер Р.В., Есина Е.Н. Обоснование развития логистической системы Светлинского карьера с учетом перспектив перехода на комбинированную геотехнологию. *Горная промышленность*. 2019;(6):106–111. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-6-148-106-111>
14. Коломников С.С. Разработка и адаптация методов и средств интенсификации циклично-поточной технологии открытой разработки сложно-структурных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(2):313–321.
15. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С. Метод определения состояния технологических дорог карьера при управлении взаимодействием роботизированных элементов горнотранспортного комплекса. *Горный журнал*. 2018;(1):78–82. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.01.14>

References

1. Anistratov K.Yu. (ed.) *Surface mining in the 21 Century*. Moscow: Sistema maksimum; 2019. (In Russ.)
2. Kaplunov D. R., Rylnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for the sustainability of mining systems in the context of the introduction of a new technological structure. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2020;(4):24–39. (In Russ.)
3. Gvishiani A., Dobrovolsky M., Rybkina A. Big Data and FAIR Data for Data Science. In: Roberts F.S., Sheremet I.A. (eds) *Resilience in the Digital Age. Lecture Notes in Computer Science*. Springer; 2021. Vol. 12660. Chapter 6. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70370-7_6.
4. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R. (eds) *Mining: Terminological Dictionary*. 5th ed. Moscow: Gornaya kniga; 2016. 635 p. (In Russ.)
5. Klebanov D.A. Predictive Analytics in the Mining Industry. Perspective Areas of Research. In: *A combined mining system: resource conservation and energy efficiency: Proceedings of the 9th International Scientific and Research Conference, Magnitogorsk, May 22-26, 2017*, Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2017, pp. 44–45. (In Russ.)
6. Faz-Mendoza A., Gamboa-Rosales N.K., Medina-Rodriguez C.E., etc. Intelligent processes in the context of Mining 4.0: Trends, research challenges and opportunities. In: *Conference: 2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA), Sakheer, Bahrain, 8–9 November, 2020*. <https://doi.org/10.1109/DASA51403.2020.9317095>
7. Trubetskoy K., Rylnikova M., Esina E. Ensuring the environmental and industrial safety in solid mineral deposit surface mining. *E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium*. 2017;21:02008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102008>
8. Bataev A.V., Klebanov D.A. Reserves for enhancing the operation efficiency of mining companies: equipment repairs. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2013;(5):47–49. (In Russ.) Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/anonsy/5234-rezervy-povysheniya-operatsionnoj-effektivnosti-gornodobyvayushchikh-kompanij-remonty-oborudovaniya>
9. Rylnikova M., Radchenko D., Klebanov D. Intelligent Mining Engineering Systems in the Structure of Industry 4.0. *E3S Web of Conferences*. 2017;21:01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101032>
10. Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Fedotenko V.S., Esina E.N. Intelligent systems and technology in open pit coal mining with high overburden benches. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(1):32–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.01.05>
11. Vlasov A.V., Shadrinov A.G., Kliver S.Ya., Lukyanov Yu.A. The rationale for the transition to cyclic-flow technology in deep open PITs. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2020;(4):428–440. (In Russ.)
12. Bakhturin V.G., Karmaev G.D., Bersenev V.A. Issues of In Pit Crushing and Conveying System in Open Pits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011;(3):62–71. (In Russ.)
13. Rylnikova M.V., Strukov K.I., Berger R.V., Esina E.N. Justification of logistical system development at svetlinskiy open-pit mine with account for potential transition to combined open cast and underground mining methods. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2019;(6):106–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-6-148-106-111>
14. Kolomnikov S.S. Development and Adaptation of Methods and Means to Intensify Pit Crushing and Conveying Systems in Surface Mining of Structurally Complex Deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2006;(2):313–321. (In Russ.)
15. Temkin I.O., Klebanov D.A., Deryabin S.A., Konov I.S. Haul road condition determination under controlled interaction of robotic elements in open pit mining and transport system. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(1):78–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.01.14>

Информация об авторах

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теории проектирования освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: rylnikova@mail.ru

Власов Антон Владимирович – руководитель проекта Циклично-поточной технологии, АО «Карельский окатыш», г. Костомукша, Российская Федерация

Макеев Михаил Андреевич – управляющий директор, ООО «Пиклема», г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.07.2021

Поступила после рецензирования: 23.07.2021

Принята к публикации: 26.07.2021

Information about the authors

Marina V. Rylnikova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: rylnikova@mail.ru

Anton V. Vlasov – Project manager of the In Pit Crushing and Conveying System, 'Karelsky Okatysh' JSC, Kostomuksha, Russian Federation

Mikhail A. Makeev – Managing Director, 'Piklema' LLC, Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 07.07.2021

Revised: 23.07.2021

Accepted: 26.07.2021