

УДК 622.271:621.86/.87

УСЛОВИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*



К. Н. ТРУБЕЦКОЙ,
научный руководитель
отдела,
академик РАН



М. В. РЫЛЬНИКОВА,
заведующий отделом,
проф., д-р техн. наук,
rylnikova@mail.ru

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия



Д. Я. ВЛАДИМИРОВ,
генеральный директор,
ОАО «ВИСТ Групп»,
Москва, Россия



И. А. ПЫТАЛЕВ,
доцент, канд. техн. наук,
Магнитогорский государственный
технический университет,
Магнитогорск, Россия

Введение

Современное состояние минерально-сырьевого комплекса России характеризуется усложнением условий добычи полезных ископаемых, снижением качественных характеристик добываемого сырья, истощением крупных по запасам месторождений и смещением горного бизнеса в неосвоенные районы со сложными природно-климатическими условиями [1]. При этом, с целью восполнения сырьевой базы в отработку дополнительно вводятся техногенные скопления, эксплуатация которых осложнена изменчивостью и неоднородностью вещественного состава и физико-механических свойств, низким содержанием ценных компонентов, повышенной влажностью, вязкостью и низкими прочностными характеристиками техногенного массива, зависимостью условий ведения работ от климатического сезона [2]. Наиболее перспективным направлением компенсации негативного влияния обозначенных факторов на эффективность функционирования действующих и вновь вводимых в эксплуатацию горнодо-

Выполнен анализ развития горнотехнических систем с автоматизацией производственных процессов при открытой разработке месторождений. Показаны преимущества и перспективы внедрения горнотранспортного оборудования, работающего в автоматическом режиме без присутствия оператора в зоне ведения горных работ. Приведена экономико-математическая модель для выбора приоритетного варианта горнотехнической системы. На основе результатов моделирования показаны возможности увеличения эффективной глубины открытых горных работ за счет внедрения интеллектуальной техники на основных производственных процессах.

Ключевые слова: проектирование, открытая разработка, горнотехническая система, геотехнологические процессы, интеллектуальная система управления, роботизация.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.11

бывающих предприятий с открытым способом разработки месторождений является автоматизация и роботизация горного производства. Именно масштабное внедрение и развитие интеллектуальных геотехнологий с автоматическим управлением горной техникой без непосредственного участия человека в значительной мере способствует росту производительности оборудования, отдельных участков и карьера в целом при одновременном повышении уровня промышленной безопасности, показателей экономической эффективности и качества освоения георесурсов.

Постановка задачи

Фактически интеллектуальные геотехнологии, представленные автоматически управляемыми технологическими процессами и оборудованием, являются надежным инструментом перспективного планирования, функционирования и оперативного управления деятельностью карьера. Это влечет изменение роли человеческого фактора при ведении горных работ: полном или частичном исключении участия человека в выполнении операционных процессов и повышении интеллектуальных функций на стадии проектирования и внедрения интеллектуальных геотехнологий, принятия управленческих решений [3–5].

Следует отметить, что, несмотря на постоянную модернизацию и совершенствование применяемых в настоящее время на карьерах систем автоматизированного управления горными работами, основной причиной ограничения их эффективности является присутствие человека непосредственно в опасной зоне ведения горных работ. В связи с этим основным направлением раз-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-37-00050.

вития открытой геотехнологии и улучшения среды обитания человека в горнотехнических системах является снижение влияния человеческого фактора на реализацию процессов горных работ за счет внедрения дистанционно или автоматически управляемого горнотранспортного оборудования, адаптированного к конкретным условиям эксплуатации в карьере.

Широкомасштабное внедрение автоматизированных систем управления на горнодобывающих предприятиях, несомненно, явилось важным этапом совершенствования горного производства. Но следует констатировать тот факт, что предел роста эффективности таких систем уже практически достигнут. Это объясняется тем, что все действующие на сегодняшний день горнотехнические системы изначально были спроектированы с учетом использования оборудования, управляемого исключительно человеком. На горных предприятиях России и за рубежом идут процессы качественного изменения структуры управления горнотранспортным комплексом в рамках действующей горнотехнической системы на основе внедрения автоматизированных систем управления, приоритетной целью которых является учет, контроль и оптимизация выполнения горных работ на карьерах. В основе функционирования автоматизированных систем лежит принцип единства цифровой модели предприятия (цифровая модель местности, блочная модель месторождения, алгоритм диспетчеризации горнотранспортного и вспомогательного оборудования и др.), базы атрибутивных данных, координатного поля и системы обмена данными.

Такие системы позволяют получать оперативную информацию для решения задач на любой стадии добычи полезных ископаемых [5, 6]. Поскольку в данных системах управленческую и исполнительную функцию осуществляет персонал рудника, проектирование таких систем базируется на общепринятой научно-методологической и нормативно-технической базах [7].

На взгляд авторов, дальнейшим перспективным и инновационным направлением совершенствования способов добычи полезных ископаемых является проектирование и внедрение горнотехнических систем с интеллектуальным и адаптивным управлением в программируемом режиме [8–10]. Новый тип горнотехнических систем предполагает наличие комплекса, включающего модули: регистрации состояния внешней среды; анализа и оценки ее состояния; принятия решения по выполняемым действиям; реализации технологических операций и процессов; корректировки и управления технологическим режимом горных работ. Все перечисленные модули могут осуществляться в виде единого технологического звена или представлять собой функционально связанные компоненты [11–13]. Реализация указанного направления позволит повысить эффективность функционирования предприятия, ведущего горные работы в сложных горно-геологических, горнотехнических и природно-климатических условиях, расширить интеллектуальные функции человека, сократить влияние человеческого фактора на операционном уровне, что в целом даст возможность оптимизировать параметры горнотехнической си-

Таблица 1. Требования к техническому оснащению интеллектуальных геотехнологических процессов и к их функциям

Выполняемые процессы и работы	Применяемое оборудование	Техническое оснащение оборудования	Назначение при эксплуатации
Маркшейдерские и геологоразведочные работы	Маркшейдерское и геологоразведочное оборудование	Сканирующие системы, контроллеры; электронные тахеометры; лазерные дальнометры	Передача данных в систему управления для картографирования, построения и корректировки цифровой модели месторождения
Подготовка горной массы к выемке	Буровые установки, зарядные машины	Система высокоточного позиционирования; датчики централизации штанги и угла наклона; аппаратура экспресс-анализа бурового шлама	Оптимизация параметров буровзрывных работ на основе данных, полученных при обустройстве забоя; обеспечение качества буровзрывных работ
Выемка горной массы	Экскаваторы, погрузчики	Датчики запыленности и загазованности; промышленные 3D-сканеры; датчики диагностирования возможного обрушения уступов; датчики определения положения стрелы, ковша	Выемка единичных блоков в соответствии с оптимальным порядком отработки, полученным на основе блочной модели месторождения при текущем и оперативном планировании
Транспортирование горной массы	Автомобильный транспорт	Датчики контроля положения бровок уступов, обнаружения препятствий и защиты от столкновений; устройства для выбора маршрута движения; датчики определения габарита оборудования для выполнения маневров в стесненных условиях	Выбор траектории движения и адресация автосамосвала на маршрут по критерию минимального простоя выемочного и транспортного оборудования при максимальной их производительности
Отвалообразование	Экскаваторы, бульдозеры, отвалообразователи	Датчики положения рабочих органов техники; ходовая часть для обеспечения проходимости по сложному рельефу	Высокоточное картирование месторасположения пород с определенными физико-механическими свойствами
Вспомогательные работы	Грейдеры, бульдозеры, погрузчики и др.	Датчики; 3D-сканеры забоя; радары; лазерные дальнометры; системы планирования, контроля и управления выполняемых работ	Обеспечение требуемого качества поверхности карьерных автодорог, рабочих площадок и иных элементов, используемых при эксплуатации роботизированного оборудования

стемы открытых горных работ за счет исключения влияния лимитирующего фактора – присутствия горного персонала в тяжелых и опасных условиях рабочей зоны [14–16].

Условия и перспективы роботизации геотехнологических процессов

В результате анализа взаимодействия элементов горнотехнических систем для условий применения механизированной, автоматизированной и роботизированной геотехнологии выявлены лимитирующие факторы. Так, при применении механизированного оборудования ими являются технические возможности оборудования при обязательном присутствии персонала в зоне ведения работ по добыче и транспортированию горной массы. В горнотехнических системах с автоматизированным оборудованием человек выступает в роли оператора горнотранспортного оборудования, поскольку порядок выемки горной массы и маршруты движения задаются автоматизированной системой управления горнодобывающего предприятия. Использование интеллектуального оборудования с адаптивной системой управления позволяет исключить непосредственное воздействие человека на породный массив, оставив за ним функции дополнительного анализа, контроля и корректировки режима работы техники. В этой ситуации лимитирующими факторами являются программируемая система и инфраструктура карьера, обеспечивающая функционирование интеллектуальной техники [9]. Использование ее при ведении горных работ способно компенсировать действие осложняющих факторов геологического, геомеханического, горнотехнического и природно-климатического характера.

С учетом специфики открытых горных работ определены условия применения роботизированных геотехнологий на карьерах (табл. 1).

С учетом представленных в табл. 1 требований и условий применения интеллектуального оборудования в геотехнологических процессах открытых горных работ все горнотехнические системы по степени роботизации разделены на три вида – с единичной, основной и полной роботизацией процессов (табл. 2).

Развитие горнотехнических систем возможно за счет постепенной роботизации горнодобывающего предприятия, оснащенного системой автоматизированного управления с плавным переходом от единичной степени роботизации к полной.

Уже сегодня внедрение горнотехнических систем с интеллектуальным адаптивным управлением единичными процессами востребовано практикой на этапе доработки балансовых запасов месторождений, поскольку это позволяет обеспечить повышение полноты, безопасности и комплексности освоения месторождения [7]. Характерным примером роботизации выемочного и транспортного оборудования может быть его эксплуатация на нижних горизонтах карьера, где возможна организация работы следующим образом: доставка горной массы на опасном участке автосамосвалом осуществляется в автоматическом режиме до определенного горизонта сопряжения, а затем управление автосамосвалом передается водителю [6]. Роботизированное обо-

рудование способно обеспечить также выемку и транспортирование горной массы до рудоспусков, концентрационных горизонтов, площадок перегрузок на железнодорожный, конвейерный или иной вид транспорта.

Математическая постановка задачи параметров применения роботизированных геотехнологий

Эффективность функционирования горнотехнической системы с интеллектуальным адаптивным управлением W следует рассматривать как функцию от условий, параметров и факторов, оказывающих на нее влияние:

$$W = f(a_i, Y_j, x_k) \quad (1)$$

где a_i – условия функционирования системы (технико-экономические показатели, объемы добычи полезных ископаемых и вскрышных пород); Y_j – факторы, ограничивающие применение системы и оказывающие косвенное влияние на ее работу (природно-климатические, геологические, горнотехнические, метеорологические условия, радиационный фон, сейсмическая активность и др.); x_k – параметры функционирования системы (коэффициенты запаса прочности, устойчивости и др.).

При этом задача поиска области определения функции сформулирована следующим образом: при заданных условиях функционирования системы a_i с учетом факторов Y_j найти такие значения x_k , которые обращали бы в максимум показатель эффективности W .

При отработке законтурных запасов глубоких карьеров рациональные параметры функционирования системы x_k должны обеспечить максимальное извлечение полезных ископаемых карьером заданной глубины. В этом случае ограничивающими факторами, оказывающими существенное влияние на параметры горнотехнической системы при отработке запасов месторождения интеллектуальной горнотранспортной техникой, являются минимальные размеры рабочей зоны, определяемые на основании технических характеристик применяемого оборудования и учитывающих точность систем позиционирования мобильных объектов и его рабочих органов.

Система уравнений, определяющих эффективность ведения открытых горных работ с применением роботизированного горнотранспортного оборудования, может быть представлена в следующем общем виде:

$$\begin{cases} W(Z^p, h_k, M) \rightarrow \max, \text{ если} \\ Z^p = C_{уд}^p + E_n K^p \rightarrow \min; \\ h_k = \frac{MK_{гр}}{\text{ctg}\beta_b + \text{ctg}\beta_n} + \frac{M - D_p^{\min}}{2} \text{tg}\beta \rightarrow \max; \\ M \rightarrow \max; \\ D \geq D^T; \\ \tau_b, \tau_n \leq \tau^{\text{пред}}, \end{cases} \quad (2)$$

где Z^p – удельные приведенные затраты на добычу полезных ископаемых с применением роботизированного оборудования, руб./м³; h_k – глубина карьера, м; M – средняя мощность залежи по-

Таблица 2. Классификация горнотехнических систем с интеллектуальным управлением по степени роботизации геотехнологических процессов

Степень роботизации	Применяемое оборудование	Основные функции	Источники формирования информационных потоков
Единичная	Буровые установки, экскаваторы, погрузчики, автосамосвалы, отвальное оборудование	Выполнение отдельных процессов открытых горных работ	GPS-датчики, дистанционная выдача задания оператором горнотранспортного оборудования, аппаратно-программный комплекс диспетчерского центра, контроллеры
Частичная	Горнотранспортное оборудование, диспетчерский аппарат управления основными процессами	Выполнение буровых и погрузочных процессов и транспортных перевозок	Навигационные, бортовые и автоматические системы управления
Полная	Комплекс роботизированного горнотранспортного оборудования	Выполнение всех процессов открытых горных работ	Навигационные и бортовые системы, программный комплекс автоматического управления производственными процессами

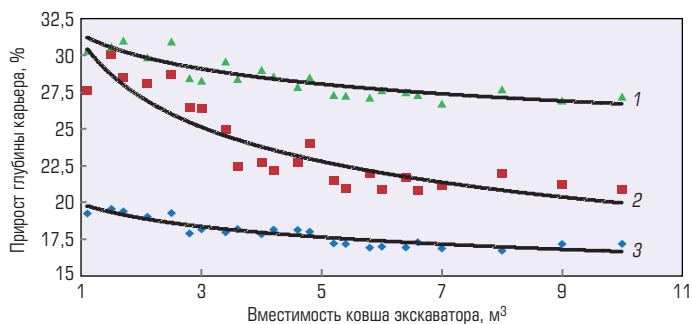
Таблица 3. Требования к конструктивным параметрам карьера при использовании механизированной и роботизированной горнотехнической системы

Параметры карьера	Горнотехническая система		Схема к расчету параметров
	механизированная	роботизированная	
Ширина рабочей площадки	Определяется в соответствии с ФНП и с учетом норм технологического проектирования; минимальное значение ширины рабочих площадок составляет: в мягких породах – 25–30 м, в скальных – 40–60 м	Определяется в зависимости от габаритных размеров применяемого роботизированного оборудования	<p>C – гарантийное расстояние до нижней бровки уступа, м; $Ш_p$ – ширина проезжей части, м; z – берма безопасности, м; Z – призма возможного обрушения, м; A – ширина заходки экскаватора, м; $Ш_m, Ш_{рс}$ – ширина рабочей площадки при механизированной и роботизированной технике соответственно, м</p>
Ширина транспортной бермы	Определяется суммой величин ширины кювета, транспортной полосы, полосы безопасности (не менее 1 м), призмы возможного обрушения и резервной бермы безопасности	Из конструкции исключаются элементы безопасности; ширина транспортной бермы складывается из ширины проезжей части и допуска, связанного с неточностью систем позиционирования	<p>H_y – высота уступа α – угол откоса уступа, град; $Ш_m, Ш'_{рс}$ – ширина транспортной бермы при механизированной и роботизированной технике, м; $Ш_o$ – ширина обочины, м; $Ш_n$ – уширение дороги с учетом компенсации неточности систем позиционирования, м</p>
Высота уступа	При работе экскаваторов типа «прямая» и «обратная» лопата, драглайнов, многоковшовых и роторных экскаваторов – высота или глубина черпания экскаватора	Зависит от времени отработки уступа, типа пород и характеристик применяемого оборудования; при постановке уступа в предельное состояние не требуется проведения специальных мероприятий по предупреждению обрушений и образования нависей	<p>H^m, H^p – высота уступа при механизированной и роботизированной технике соответственно, м; R_q – высота черпания экскаватора, м</p>
Угол откоса уступа	При работе одноковшовых и роторных экскаваторов, драглайна – 80°; при работе многоковшовых цепных экскаваторов с нижним черпанием – угол естественного откоса пород		

лезного ископаемого, м; D^T – минимальная ширина рабочей площадки при использовании роботизированной системы, м; $\tau^{пред}$, τ_b, τ_n – результирующие предельные и действующие касательные напряжения со стороны всисячего и лежащего боков залежи, МПа.

Эффективное освоение месторождений полезных ископаемых зависит от точности определения предельных параметров как карьера в целом, так и его отдельных элементов, особенно на этапе доработки запасов. Конструктивные параметры в процессе освоения запасов месторождения зависят от применяемой технологии и типоразмера горнотранспортного оборудования. При вне-

дрении роботизированного оборудования величина конструктивных параметров карьера может быть изменена в сторону увеличения или уменьшения за счет исключения присутствия персонала непосредственно в забое; исключить или сократить размеры таких элементов системы разработки, как ширина полосы безопасности, ширина рабочей площадки, ширина транспортной бермы и ряд других. О возможностях существенного изменения конструктивных параметров карьера при внедрении интеллектуальных геотехнологий и оборудования свидетельствуют данные **табл. 3**.



Увеличение глубины карьера при использовании интеллектуального горнотранспортного оборудования:

1 – мощная залежь; 2, 3 – залежь средней и малой мощности соответственно

Анализ результатов моделирования

С целью выявления возможности увеличения предельной глубины карьера при использовании роботизированной техники было выполнено моделирование конструктивных параметров карьера с использованием интегрированных систем на основании следующих исходных данных: доработка запасов нижних горизонтов карьера для залежей малой (15–20 м) и средней (15–30 м) мощ-

ности, а также мощных (более 30 м); высота уступа от 10 до 15 м; нерабочий угол уступа от 70 до 85°; вместимость ковша роботизированного выемочного оборудования от 1 до 11 м³; руководящий уклон транспортной траншеи от 100 до 170 ‰; ширина роботов-автосамосвалов от 2,5 до 5 м.

В результате моделирования установлено, что при использовании роботизированного выемочного и транспортного оборудования одинакового типоразмера с механизированным достигается увеличение предельной глубины карьера в зависимости от мощности отрабатываемой залежи и вместимости ковша экскаватора в среднем на 23,5 % (см. рисунок).

Заключение

Проектирование и внедрение горнотехнических систем с интеллектуальным адаптивным управлением при отсутствии операционного персонала в рабочей зоне позволяет улучшить конструктивные параметры карьера, существенно повысить уровень промышленной безопасности горного производства и обеспечить рост эффективности функционирования горнодобывающего предприятия в целом.

Библиографический список

См. англ. блок. [DX](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 60–64
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.11

Provisions and prospects for introduction of robotic geotechnologies in open pit mining

Information about authors

- K. N. Trubetskoy**¹, Chief Scientific Officer, Academician of the Russian Academy of Sciences
- M. V. Rylnikova**¹, Head of Department, Professor, Doctor of Engineering Sciences, rylnikova@mail.ru
- D. Ya. Vladimirov**², Chief Executive Officer
- I. A. Pytalev**³, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

¹ Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
² VIST Group, Moscow, Russia
³ Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract

The article presents the analysis of the current state of the open pit mining and points at the prospects for the development with introduction of robotic geotechnologies based on the intelligent control of mining and transportation equipment. The bases of the proposed approach is the robotization of open pit mining processes with a view to excluding presence of personnel in work areas.

Today most domestic open pit mines are equipped and run the hardware/software communication and other-kind infrastructure that ensures introduction of the intelligent mining and transportation equipment in all open pit mining activities at the earliest possible dates. The introduction of the robotic geotechnologies may require re-designing of an open pit mine toward minimization of its parameters (working area width, haulage berm width etc.).

The proposed approach will appreciably enhance an open pit mine efficiency, expand application of surface mining and increase the open pit mine design capacity at the simultaneous compliance with the requirements of ecological and industrial safety.

The study has been supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 14-37-00050.

Keywords: design, open pit mining, mining technical system, geotechnology, intelligent control, robotization.

References

1. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. Methodology for estimating promising development paradigm for mineral mining and processing industry. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015. No. 2. pp. 177–187.

2. Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Viktorov S. D., Radchenko D. N. et al. Development of theoretical basis of design and safe functioning of mining-technical systems, based on combined physical-technical and physical-chemical geotechnologies of mastering of natural and technogenic deposits of solid minerals. *Problems of minerageny of Russia : collection of articles*. Moscow : Geofizicheskij tsentr Rossijskoy akademii nauk, 2012. pp. 457–469.

3. Bogdanov A. A., Sychkov V. B., Zhidenko I. T., Kutlubayev I. M. Creating and investigation of robotic system with interactive control. *Reshetnevskije chtenija*. 2012. Vol. 1, No. 16. pp. 230–231.

4. Klebanov A. F. Information systems of mining and basic ways of development of open-cast mining automation. *Gornaya promyshlennost*. 2015. No. 2. p. 93.

5. Abroskin A. S. Application of modern systems of automation at open-cast mining. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2015. Vol. 326, No. 12. pp. 122–130.

6. Trubetskoy K. N., Pytalev I. A., Rylnikov A. G. Automated control systems for quality of ore streams on pits. *Marksheyderskij vestnik*. 2013. No. 6. pp. 9–14.

7. Kaplunov D. R. Theory basis of designing of subsoil mastering: formation and development. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 7. pp. 49–51.

8. Vladimirov D. Ya. Intelligent open pit mine: evolution or revolution? *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten*. 2015. Special issue No. 45-1. Open-cast mining in the XXI century-1. pp. 77–82.

9. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014. Vol. 13, Iss. 3. pp. 941–962.

10. Brown C. Autonomous Vehicle Technology in Mining. *Autonomous Mining*. 2012. No. 1. pp. 30–32.

11. Rylnikova M. V., Vladimirov D. Ya., Pytalev I. A., Popova T. M. Robotic Geotechnologies as Way of Improving Efficiency and Ecologization of Mineral Resource Management. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017. No. 1. pp. 92–101.

12. Thompson R., Hahn S., Pastor S. Development of mine haul road surfacing condition monitoring through digital image processing. *Mining Engineering*. 2015. Vol. 67, No. 9. pp. 34–45.

13. Green J. J., Hlophle K., Dickens J., Teleka R., Price M. Mining robotic sensors. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2012. Vol. 1, Iss. 4. pp. 8–15.

14. Rylnikova M. V., Vladimirov D. Ya., Pytalev I. A., Popova T. M. The principles of combination of the mechanized equipment and industrial robots in case of ecologically balanced development of fields by the open method. *Marksheyderskij vestnik*. 2016. No. 6. pp. 6–11.

15. Kaplan A. V., Vasilets V. N., Lapaev V. N. Peculiarities of design of high-productive mining-technical systems of open pits. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*. 2014. No. 2. pp. 36–38.

16. Baláz V., Vagaš M., Marcinko P., Putala J. The Proposal of Structure for Workplaces with Palletizing Robot. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 7, No. 7. pp. 435–439.