

УДК 622.2:681.5.001.63

**РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЗАЦИИ ОСВОЕНИЯ НЕДР**

**М. В. Рыльникова¹, Д. Я. Владимиров²,
И. А. Пыталев³, Т. М. Попова³**

¹ *Институт проблем комплексного освоения недр РАН,*

E-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,

Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

² *ОАО "ВИСТ Групп",*

Докучаев пер., 3, стр. 1, 107078, г. Москва, Россия

³ *Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
просп. Ленина, 38, 455000, г. Магнитогорск, Россия*

Предложено перспективное направление снижения негативного воздействия на окружающую среду при добыче полезных ископаемых открытым способом — роботизация процессов геотехнологий. Рассмотрены цели, способы и преимущества внедрения промышленных роботов. Проведен анализ развития и совершенствования горнотехнических систем, выявлены лимитирующие факторы для условий применения механизированной, автоматизированной и роботизированной техники. Выполнено сравнение конструктивных элементов горнотехнической системы при использовании механизированного и роботизированного горнотранспортного комплекса.

Экологизация горного производства, проектирование, горнотехническая система, промышленный робот, робототехническая система, карьер, осложненные условия, полнота извлечения запасов недр

В последние десятилетия наблюдается постоянное усложнение горно-геологических и горнотехнических условий разработки твердых полезных ископаемых открытым способом. Эта тенденция отражена в годовых статистических отчетах, согласно которым отношение объемов отходов, образованных при добыче, к объему самих ископаемых увеличилось на 30% [1]. Первостепенной причиной роста отходов является снижение природного качества ископаемых, что помимо ухудшения экономических показателей горнодобывающих предприятий приводит к увеличению негативного воздействия горных работ на окружающую среду. В связи с ростом совокупных объемов извлекаемой из недр горной массы в процессе добычных работ увеличиваются выбросы загрязняющих веществ как от мобильных объектов горнотранспортного комплекса, так и от эксплуатации формируемых горнотехнических сооружений: отвалов вскрышных пород, различного рода складов и хранилищ. При этом возникает необходимость изъятия дополнительных земель для размещения пород вскрыши и отходов обогащения полезных ископаемых, что приводит к росту техногенной нагрузки в районе функционирования горнотехнических систем.

Развитие геотехнологий и положительный опыт борьбы с негативным воздействием горных работ на окружающую среду позволяет минимизировать влияние горноперерабатывающего производства за счет сокращения количества загрязняющих веществ, поступающих в воздушный и водные бассейны, а также в почвы и недра Земли. Однако данный эффект зачастую нивелируется и сводится к нулю при увеличении объемов извлекаемой и перерабатываемой горной массы. В связи с этим становится актуальной задача экологизации горного производства на основе совершенствования теории проектирования горнотехнических систем на принципах экологически сбалансированного освоения недр [2] с учетом современных достижений в различных областях горной науки, техники и технологии. В качестве основополагающих принципов экологически сбалансированного освоения недр следует выделить выбор приоритетного вида и рационального сочетания применяемых геотехнологий в конкретный период функционирования горнотехнической системы, а также оптимизацию проектных решений по критерию максимизации технико-экономического, эколого-экономического и социального эффектов [3]. Повышение эффективности горного производства возможно в результате внедрения роботизированной геотехнологии как совокупности материализованных достижений в области горного дела, машиностроения, автоматизации и информатизации.

Именно роботизированную геотехнологию необходимо рассматривать как основу экологизации освоения недр, так как она обеспечивает достижение трех ключевых целей снижения экологической нагрузки в горнодобывающих регионах: 1) уменьшение выбросов от стационарных и передвижных источников загрязнения окружающей среды в ходе ведения горных работ; 2) оперативное управление объемами и качеством потоков вещества литосферы, формирующихся в различных точках пространства в пределах горнотехнической системы на осваиваемом участке недр; 3) существенное сокращение объемов извлекаемой из недр и перерабатываемой горной массы.

Достижение первой цели обусловлено оптимизацией работы всего горнотранспортного оборудования, функционирующего без участия человека. Это дает возможность эксплуатировать выемочное и транспортное оборудование в оптимальных с точки зрения энергоэффективности режимах, что приводит к значительному снижению расхода топлива [4, 5]. Кроме того, благодаря наличию контрольно-измерительной аппаратуры и датчиков, отслеживающих положение как самих мобильных объектов, так и их рабочих органов, в процессе погрузки и разгрузки транспортных средств минимизируется расстояние между ковшом экскаватора и кузовом автосамосвала, а также обеспечивается оптимальный режим разгрузки транспортного средства в пункте выгрузки, что способствует снижению пыления.

Вторая цель связана с возможностью работы роботизированного выемочного оборудования с более высокой точностью в каждом добычном забое за счет автоматического управления с помощью постоянно актуализируемой геологической моделью месторождения [6]. Это позволяет осуществлять селективную выемку не только полезных ископаемых, но и вмещающих пород для дальнейшего их транспортирования и размещения в установленных местах и заданных объемах, в том числе при выполнении природоохранных мероприятий.

Третья цель достигается исключительно особенностью роботизированной геотехнологии — отказом от непосредственного участия человека в процессах горного производства. Благодаря этому, можно не только повысить их эффективность и безопасность, но и существенно снизить объемы извлекаемой и перерабатываемой горной массы путем изменения конструктивных и технологических параметров открытых горных работ [7]. Следует отметить, что функционирование роботизированного горнотранспортного оборудования возможно только при условии масштабного внедрения информационных технологий на горнодобывающем предприятии.

Информационные технологии, представленные автоматизированными системами управления горнодобывающим предприятием, являются надежным инструментом перспективного планирования и оперативного управления деятельностью карьера, что значительно снижает влияние человеческого фактора на принятие решений на операционном уровне. Однако, несмотря на постоянное совершенствование автоматизированных систем управления, внедряемых на рудниках, эффективность их использования ограничивается присутствием человека непосредственно в забое. Важным направлением развития открытой геотехнологии становится полное исключение горных рабочих из процесса добычи твердых полезных ископаемых. Применение роботизированного горнотранспортного оборудования в совокупности с автоматизированными системами управления [8] позволяет отказаться от присутствия человека в зоне ведения открытых горных работ и за счет этого оптимизировать параметры горнотехнических систем [9].

Исключение роли человека при выполнении операционных процессов обеспечивает существенный рост основных показателей эффективности работы горнодобывающих предприятий, особенно при разработке месторождений в сложных горно-геологических, горнотехнических, природно-климатических условиях, и доработку запасов за контуром карьера в стесненной и неблагоприятной геомеханической обстановке. Это возможно только при использовании на карьерах промышленных роботов [10]. Полная замена механизированного горнотранспортного оборудования на роботизированное позволит формировать роботизированную горнотехническую систему. В качестве основных преимуществ таких технологий в горном производстве следует отметить:

- отсутствие горнотехнического персонала в забое;
- наиболее эффективное использование геологической, экономической и экологической информации на месторождении с учетом ее постоянного изменения в режиме реального времени;
- оперативное управление в оптимизационном режиме работой промышленных роботов и всего горнотранспортного комплекса на основе оптимизации фактической эксплуатационной производительности при высокой точности прогнозирования ее значения;
- наиболее полное достижение паспортных характеристик роботизированного горнотранспортного оборудования в процессе его эксплуатации;
- принятие оптимальных управленческих, проектных и технологических решений для обеспечения требуемых показателей работы карьера на основе заданных и оперативно корректируемых критериев, анализа и постоянной обработки различного уровня информационных потоков без участия человека.

Роботизированная горнотехническая система базируется на автоматизированной системе управления, а она, в свою очередь, на использовании механизированного горнотранспортного оборудования [11]. При этом взаимодействие элементов управляющей и горнотехнической системы с механизированным, автоматизированным и горнотранспортными комплексами имеет существенное различие (рис. 1).

Применение роботизированного горнотранспортного оборудования предусматривает принципиальное изменение организационно-технологической структуры горнотехнической системы и ее функциональных характеристик в связи с изменением роли человека как в процессах принятия решений, так и в операционных процессах добычи полезных ископаемых. Необходимо отметить, что устойчивое состояние системы и непосредственно сам процесс перехода от одного типа системы к другому определяется в каждый момент времени конечным, достаточно малым числом ограничивающих факторов, которые следует рассматривать в качестве управляющих для каждого технологического процесса.

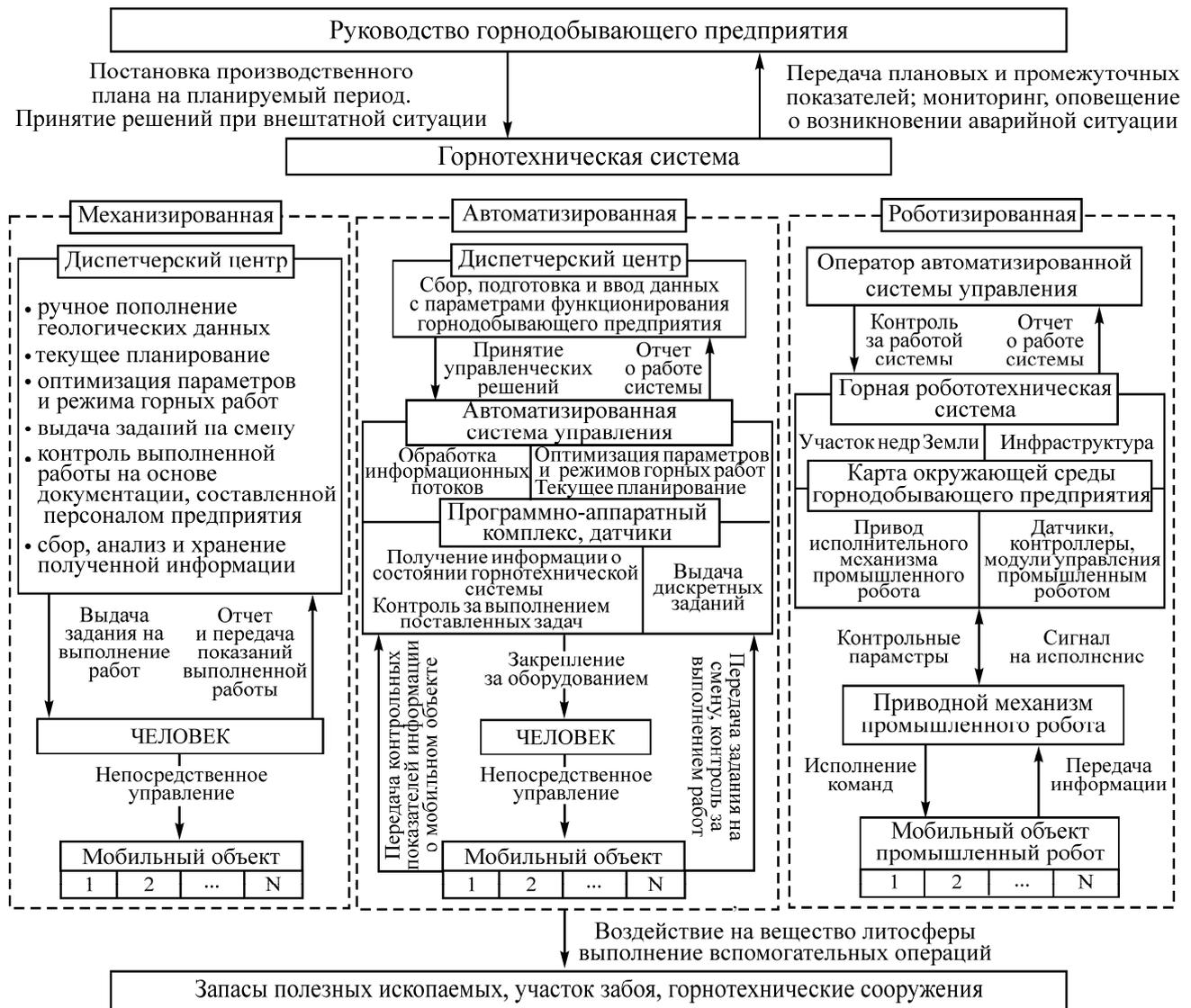


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия управляющей и горнотехнической системы при применении механизированного, автоматизированного и роботизированного горнотранспортных комплексов

Согласно закону лимитирующего фактора, сформулированного в середине XIX в. Ю. Либихом, для системы наиболее значим тот фактор, который более всего отклоняется от оптимального значения. Образным представлением этого закона является “бочка Либиха”: при наполнении бочки водой она начинает переливаться через наименьшую по высоте доску в бочке и длина остальных досок уже не имеет значения [12].

Так, в условиях использования только механизированного горнотранспортного оборудования, в том числе управляемого автоматизированными системами, основным лимитирующим фактором становится человек. Для обеспечения безопасности и экологичности горного производства в данном случае все конструктивные и технологические параметры определяются с учетом присутствия персонала в рабочей зоне оборудования и в забое. Для роботизированного горнотранспортного оборудования основным лимитирующим фактором является типоразмер и характеристики роботов, степень точности позиционирования и совершенства конструкции, а также программного обеспечения, которые зависят от оснащенности мобильных объектов соответствующими датчиками и системами автоматизированного управления.

В случае применения механизированных комплексов при выполнении технологических процессов горных работ человеком компенсация возможных отклонений от оптимальных значений происходит благодаря различным коэффициентам запаса, призванным снизить риски недостижимости оптимальных параметров элементов горнотехнической конструкции и системы в целом. Данные коэффициенты регламентируются Федеральными нормами и правилами, которые устанавливают граничные значения конструктивных параметров с учетом безопасного размещения оборудования при нахождении персонала в зоне ведения горных работ. Для роботизированной техники их применение при проектировании необязательно, достаточно лишь обеспечить безопасное расположение оператора, контролирующего процесс добычи и транспортирования горной массы [13]. Однако при этом следует минимизировать возможный ущерб, связанный с неблагоприятным событием при реализации риска возникновения внештатной ситуации.

При проектировании и внедрении роботизированной горнотехнической системы все лимитирующие факторы связаны с особенностями работы промышленных роботов, которые представлены комплексом горнотранспортного оборудования и отдельными мобильными объектами. В отличие от механизированной геотехнологии, где эксплуатационные показатели работы оборудования изменяются в широком диапазоне и зависят от физического и психологического состояния конкретного оператора, в случае применения роботизированного горнотранспортного оборудования отклонение от заданных значений контролируемых параметров минимально. Техническое оснащение роботизированного оборудования определяется основными системами, осуществляющими контроль за техническим состоянием комплекса, обнаружением препятствий, управлением процессом движения и функционированием мобильного объекта в “экстремальных условиях”. При ведении горных работ в суровых природно-климатических условиях лимитирующим факторами также является температура, а именно диапазон ее возможного изменения, в котором гарантируется надежная работа не только агрегатов и систем роботизированного оборудования, но и всего технического оснащения комплекса, представленного различными датчиками температуры, атмосферного давления, запыленности, радиационного фона и др.

От типа роботизированного технологического оборудования, которое будет задействовано в процессах подготовки пород к выемке, экскавации, транспортирования и отвалообразования, зависят конструктивные параметры карьера. Поскольку при проектировании горнотехнической системы и выборе параметров ее элементов габаритные паспортные характеристики горнотранспортного оборудования становятся определяющими, внедрение роботизированной техники позволит существенно повысить эффективность ведения горных работ за счет уменьшения главных параметров карьера при обеспечении заданной производительности и увеличении полноты освоения запасов недр [14].

При проектировании карьеров и обосновании параметров рабочей площадки с учетом условий безопасного размещения горного оборудования критерием эффективности служит максимальное использование технологического пространства. При механизированной геотехнологии рабочая площадка содержит такие элементы, как полоса безопасности и ширина призмы возможного обрушения, которые необходимы для безопасности операционного персонала. В случае применения роботизированного горнотранспортного оборудования, оснащенного комплексом мониторинговых систем, данные элементы могут быть значительно уменьшены в размерах или полностью исключены из-за отсутствия необходимости выполнения возложенных

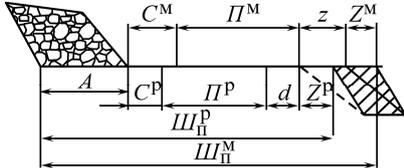
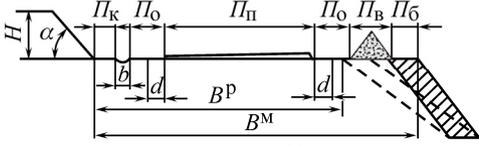
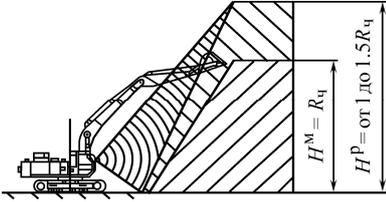
на них функций. В части технологических параметров работы комплекса оборудования происходит также упрощение схемы постановки автосамосвала под погрузку за счет того, что роботизированный автосамосвал останавливается в месте, соответствующем наименьшему радиусу поворота экскаватора-робота. Продолжительность цикла экскавации сокращается и фактическая производительность горного оборудования приближается к паспортным значениям.

При определении угла откоса борта карьера и высоты рабочего уступа в качестве основных факторов выступают характеристики разрабатываемых руд и пород и глубина карьера. Согласно [13], максимальный рабочий уступ не должен превышать 80° при работе одноковшовых и роторных экскаваторов, драглайнов или угла естественного откоса этих пород при работе многоковшовых цепных экскаваторов с нижним черпанием. При разработке месторождения с применением роботизированного добычного оборудования данный параметр можно скорректировать в сторону увеличения, поскольку отсутствуют риски, связанные с присутствием людей в опасной рабочей зоне, и техническое оснащение эксплуатируемых мобильных объектов позволяет непрерывно осуществлять мониторинг массива и заблаговременно прогнозировать появление зон опасных деформаций и обрушение уступа.

При проектировании открытых горных работ предполагается обеспечить устойчивость борта карьера на заданный срок его эксплуатации. В соответствии с рекомендациями [15], значение коэффициента запаса устойчивости варьирует: в нерабочем борту при сроке стояния 10 лет — 1.2–1.5, на рабочем борту 1.1–1.2. Кроме того, необходимо учитывать его влияние на состояние подрабатываемой земной поверхности в пределах призмы возможного обрушения массива, поскольку, чем ниже значение коэффициента запаса устойчивости, тем большие по размерам горизонтальные деформации проявляются в массиве. На основании практических рекомендаций и данных, представленных в [15], при определении предельных параметров уступов карьеров со сроком стояния более 5 лет коэффициент запаса устойчивости должен составлять не менее 1.3, так как в этом случае наиболее напряженная поверхность скольжения практически полностью располагается в зоне влияния процессов выветривания, разуплотнения пород и буровзрывных работ. Использование роботизированной геотехнологии при полном отсутствии персонала в зоне ведения горных работ дает возможность проводить отработку запасов в минимальные сроки. Это позволяет при выборе величины углубки карьера в период его доработки руководствоваться значением, обеспечивающим нормативный срок стояния уступов, формируемых в процессе освоения запасов, в соответствии с продолжительностью их доработки. Следовательно, коэффициент запаса устойчивости борта необходимо приблизить к минимально допустимому значению с учетом периода ведения добычных работ на дорабатываемом участке. Дополнительным аргументом минимизации коэффициента является и то, что на практике он превышает на 10–25 % значение, рассчитанное по нормативу решением плоской задачи [16, 17].

При внедрении роботизированного горнотранспортного оборудования определение параметров элементов системы разработки осуществляется с учетом возможностей снижения до минимального значения показателей, обеспечивающих безопасность и экологичность ведения горных работ. Таким образом, в качестве ограничений в первую очередь необходимо рассматривать коэффициент запаса устойчивости уступов и бортов карьера в целом, в том числе при увеличении его глубины, а также дополнительном объеме полезных ископаемых, который может быть извлечен при реализации проектируемой роботизированной горнотехнической системы с учетом изменения конструктивных параметров за счет исключения людей в рабочих зонах оборудования и забоях (таблица).

Обоснование конструктивных параметров элементов системы открытой разработки при использовании механизированной и роботизированной горнотехнической системы

Параметры системы разработки	Требования к обоснованию параметров горнотехнической системы		Схема к расчету параметров
	механизированная	роботизированная	
Ширина рабочей площадки	<p>Определяется в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности и с учетом норм технологического проектирования; минимальное значение ширины рабочих площадок составляет в мягких породах 25–30 м, в скальных 40–60 м</p>	<p>Определяется в зависимости от габаритных размеров применяемого роботизированного оборудования</p>	 <p>$Ш_П^M, Ш_П^P$ — ширина рабочей площадки при механизированной и роботизированной технике, м; $П_П^M, П_П^P$ — ширина проезжей части при механизированной и роботизированной технике, м; A — ширина заходки экскаватора, м; C^M, C^P — гарантийное расстояние до нижней бровки уступа при механизированной и роботизированной технике, м; z — берма безопасности, м; Z^M, Z^P — призма возможного обрушения при механизированной и роботизированной технике, м</p>
Ширина транспортной бермы	<p>Определяется суммой ширины кювета, транспортной полосы, полосы безопасности (не менее 1 м), призмы возможного обрушения и резервной бермы безопасности</p>	<p>Из конструкции исключаются элементы безопасности; ширина транспортной бермы складывается из ширины проезжей части и допуска, связанного с неточностью систем позиционирования</p>	 <p>α — угол откоса уступа, град; H — высота уступа, м; $П_к$ — ширина закуветной полки, м; b — ширина водоперепускной канавки, м; $П_о$ — ширина обочины, м; $П_п$ — ширина проезжей части, м; $П_в$ — ширина предохранительного вала, м; $П_б$ — ширина призмы возможного обрушения, м; d — величина охраняемого пространства, м; B^M, B^P — ширина транспортной бермы при механизированной и роботизированной технике, м</p>
Высота уступа	<p>При разработке экскаваторами типа “прямая” и “обратная” лопата, драглайнами, многоковшовыми и роторными экскаваторами — высоте или глубине черпания экскаватора; при выполнении работ вручную на рыхлых и неустойчивых породах 3 м, рыхлых устойчивых 6 м</p>	<p>Зависит от времени эксплуатации уступа, типа пород и характеристик применяемого оборудования; при постановке уступа в предельное состояние значительно упрощаются специальные мероприятия по предупреждению обрушений и образованию навесей, поскольку роботизированная техника оснащена необходимым оборудованием и системами, анализирующими состояние массива и обеспечивающими ее вывод из опасной зоны заблаговременно до обрушения</p>	 <p>H — высота уступа, м; $R_ч$ — радиус черпания экскаватора, м</p>
Угол откоса уступа	<p>При работе одноковшовых и роторных экскаваторов, драглайна — 80°; при работе многоковшовых цепных экскаваторов с нижним черпанием и разработке вручную рыхлых и сыпучих пород — угол естественного откоса этих пород</p>	<p>Зависит от времени эксплуатации уступа, типа пород и характеристик применяемого оборудования; при постановке уступа в предельное состояние значительно упрощаются специальные мероприятия по предупреждению обрушений и образованию навесей, поскольку роботизированная техника оснащена необходимым оборудованием и системами, анализирующими состояние массива и обеспечивающими ее вывод из опасной зоны заблаговременно до обрушения</p>	<p>H — высота уступа, м; $R_ч$ — радиус черпания экскаватора, м</p>

Экологически сбалансированное освоение недр при открытой добыче твердых полезных ископаемых зависит от точности определения как предельных параметров карьера, так и его отдельных элементов. Параметры карьера условно следует разделить на две группы: конструктивные и технологические. Для расчета конструктивных параметров широко применяются интегрированные системы проектирования и оптимизации контура карьера на основе принятого экономического критерия с учетом морфологических и геологических особенностей залегания полезных ископаемых. При этом при проектировании горнотехнической системы экологический эффект, как правило, выражается в экономических показателях. Задача оптимизации конечных контуров карьера выполняется на основании алгоритма Лерча–Гроссмана и “плавающего конуса”.

При использовании роботизированного горнотранспортного оборудования оптимизационной задачей является выбор конечных параметров карьера, которые позволяют получить наибольший экономический и экологический эффект. Главное преимущество применяемого алгоритма — возможность оптимизации параметров роботизированной горнотехнической системы с помощью экономического критерия, оценивающего в том числе и экологические показатели с учетом всех технологических ограничений, обусловленных особенностями эксплуатации применяемого оборудования.

Относительно эксплуатационных характеристик роботизированного горнотранспортного оборудования стоит отметить не только слаженность работы выемочного и транспортного оборудования, но и возможность максимальной реализации тяговых характеристик роботов-автосамосвалов. Поскольку в роботизированной горнотехнической системе автосамосвал перемещается без человека, продольный уклон следует определять исключительно тяговыми характеристиками автосамосвала, качеством дорожного покрытия, а также глубиной и климатическими особенностями местоположения карьера. При этом продольный уклон может варьировать от 100 до 240 ‰, что позволяет существенно снизить коэффициент вскрыши [18].

В результате моделирования роботизированной горнотехнической системы с карьерными автодорогами, имеющими продольный уклон 170 и 240 ‰, установлено, что переход от механизированной к роботизированной технике позволяет сократить объемы выемки горной массы не менее чем на 25 % при организации съездов с продольным уклоном 170 ‰ и практически в 2 раза при продольном уклоне трассы 240 ‰ (рис. 2, 3). Существенное уменьшение ширины транспортной бермы достигается за счет исключения из конструкции карьерной автодороги предохранительного вала, а также сокращения до минимальных значений ширины проезжей части, обочины и полосы безопасности при применении систем позиционирования мобильного объекта и отсутствии людей в зоне ведения горных работ.

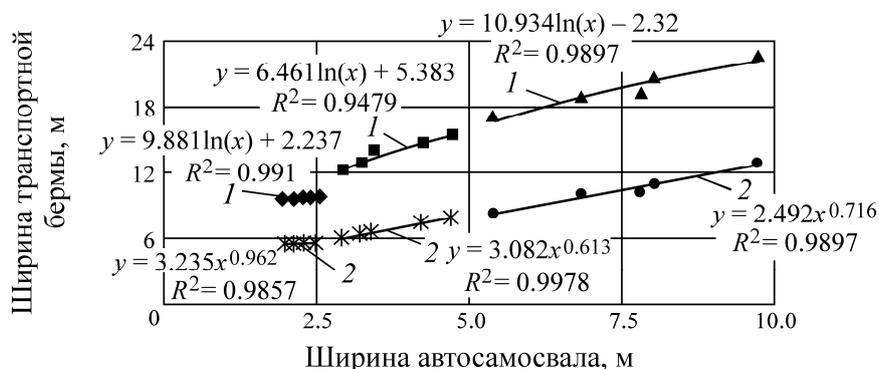


Рис. 2. Изменение ширины транспортной бермы в зависимости от типоразмера механизированного (1) и роботизированного (2) автосамосвала

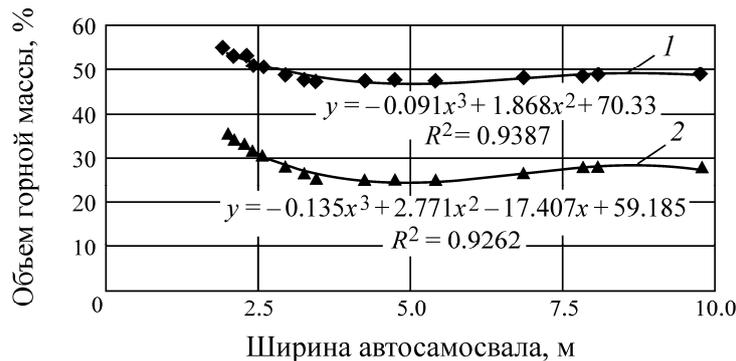


Рис. 3. Изменение объемов выемки горной массы при проходке въездной траншеи с продольным уклоном автодороги 240 ‰ (1) и 170 ‰ (2) при использовании роботов-автосамосвалов относительно объемов траншеи для механизированных автосамосвалов

ВЫВОДЫ

Внедрение роботизированной геотехнологии дает возможность снизить объемы извлекаемой горной массы по сравнению с использованием механизированного оборудования, эксплуатируемого совместно с автоматизированными системами управления. В первую очередь это обусловлено отсутствием операционного персонала в рабочей зоне горнотранспортного оборудования и забое, что позволяет довести значения конструктивных параметров до максимально допустимых без дополнительного экологического и промышленного риска. Обеспечение технологических параметров достигается благодаря соответствующей автоматизированной системе управления, учитывающей пространственное положение и состояние не только роботизированного горнотранспортного оборудования, но и всех его рабочих органов, а также элементов горнотехнических конструкций в пределах рабочей зоны, что существенно снижает энергоемкость процессов и, как следствие, количество выбросов загрязняющих веществ. В результате на этапе проектирования горнотехнической системы можно будет определять параметры необходимых элементов системы разработки, которые обеспечат наилучшие экономические и экологические показатели открытых горных работ, что значительно повысит эффективность работы горнодобывающего предприятия за счет сокращения размеров карьера, роста его производственной мощности, уменьшения коэффициента вскрыши и площадей изъятия земель, занятых под горнотехнические сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Официальная статистика:** Окружающая среда [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/# (дата обращения 27.08.2016).
2. **Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н.** Новые подходы к проектированию ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения рудных месторождений // ФТПРПИ. — 2011. — № 3. — С. 58–66.
3. **Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В.** Развитие теории проектирования и реализация идей комплексного освоения недр // ГИАБ. — 2008. — № 4. — С. 20–41.
4. **Трубецкой К. Н., Пыталев И. А., Рыльников А. Г.** Автоматизированные системы управления качеством рудопотоков на карьерах // Маркшейдерский вестник. — 2013. — № 6. — С. 5–10.

5. **Chadwick J.** Where's the operator? *International Mining*, 2012, No. 1. — P. 74–87.
6. **Gu Q., Lu C., Guo J., and Jing S.** Dynamic management system of ore blending in an open pit mine based on GIS/GPS/GPRS, *Mining Science and Technology*, 2010, No. 1. — P. 132–137.
7. **Grad P. S.** Running with Robotics, *Autonomous Mining*, 2010, No. 1. — P. 37–40.
8. **Трубецкой К. Н.** Перспективы применения роботизированной техники // ГИАБ. Труды науч. симп. “Неделя горняка-2013”. Отд. вып. — 2013. — № 1. — С. 354–363.
9. **Трубецкой К. Н., Владимиров Д. Я., Пыталев И. А., Попова Т. М.** Роботизированные горнотехнические системы при открытой разработке месторождений полезных ископаемых // *Горн. журн.* — 2016. — № 5. — С. 21–27.
10. **Владимиров Д. Я.** Интеллектуальный карьер: эволюция или революция? // ГИАБ. — 2015. — № 9601. — С. 77–82.
11. **Danko G., Knowles J., and Tiwari R.** Robot-human control interactions in mining operations, *Annual Meeting: Got Mining – Preprints*. Salt Lake City, United States, 2005. — P. 211–221.
12. **Мусабеков Ю. С.** Юстус Либих (1803–1873). — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 216 с.
13. **Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности при ведении горных работ и переработке полезных ископаемых”.** Сер. 03. Вып. 78. — М.: ЗАО “НТЦ ПБ”, 2015. — 276 с.
14. **Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Корнеев С. А.** Систематизация и типизация горнотехнических систем комбинированной геотехнологии // ГИАБ. — 2009. — № 11. — С. 194–205.
15. **Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах (утв. Госгортехнадзор РФ от 16 марта 1998 г.).** — СПб., 1998. — 147 с.
16. **Кузнецова Т. С.** Обоснование параметров карьеров при комбинированной разработке крутопадающих месторождений: дис. ... канд. техн. наук. — Магнитогорск, 2003. — 178 с.
17. **Nuric A., Nuric S., Kricak L., Husagic R.** Numerical methods in analysis of slope stability, *Science and Engineering Investigations*, 2013, Vol. 2, No. 14. — P. 42–48.
18. **Справочник.** Открытые горные работы / К. Н. Трубецкой, М. Г. Потапов, К. Е. Веницкий, Н. Н. Мельников и др. — М.: Горное бюро, 1994. — 590 с.

Поступила в редакцию 11/1 2016