

УДК 622.271.324.4

**ВЫБОР КОМПЛЕКСОВ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
СО СЛОЖНЫМИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ**

В. А. Соломенников, В. И. Ческидов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: cheskid@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрена проблема выбора основного погрузочно-транспортного оборудования при открытой добыче твердых полезных ископаемых. Предложена методика обоснования экскаваторно-автомобильных комплексов для разработки массивов горных пород со сложными горно-геологическими условиями залегания. На примере разреза “Кыргайский Средний” в Ерунаковском угольном районе Кузбасса с использованием алгоритма Лерча–Гроссмана показаны принципы и последовательность формирования границ эффективного применения комплексов с различными параметрами в границах карьерного поля.

Открытые горные работы, экскаваторно-автомобильные комплексы, блочные модели, алгоритм Лерча–Гроссмана, область применения

Мировой и отечественный опыт добычи минерального сырья открытым способом свидетельствует о том, что преимущественное развитие на карьерах и разрезах для горных пород получил автомобильный технологический транспорт. Он используется для транспортирования около 80 % всей общемировой перемещаемой горной массы, в том числе в США, Канаде и Южной Америке — до 85 %, Южной Африке — более 90 %, в Австралии — почти 100 %. В России и странах СНГ удельный вес карьерного автотранспорта с учетом всех горнодобывающих отраслей промышленности приблизился к 75 % и в ближайшей перспективе будет расти за счет расширения открытого способа добычи минеральных ресурсов [1].

Современные тенденции развития погрузочно-транспортного оборудования демонстрируют стремление горнодобывающих предприятий использовать более мощное оборудование при ведении открытых горных работ, что обусловлено, прежде всего, увеличением глубины разработки месторождений и, как следствие, ростом расстояний транспортирования горной массы. Что касается выемочно-погрузочных машин, то здесь, наряду с совершенствованием их конструктивного исполнения и повышением единичной мощности, прослеживается тенденция увеличения числа гидравлических экскаваторов на карьерах и разрезах. Эти тенденции также находят отражение в инвестиционной стратегии развития крупнейших угледобывающих компаний, ведущих добычу углей открытым способом [2].

Проблема обоснования экскаваторно-автомобильных комплексов имеет различные аспекты, в рамках которых могут даваться рекомендации по выбору оборудования. Множество вопросов данной тематики можно разбить на три иерархические группы, полученные решения в каждой из которых на практике очерчивают совокупность рациональных вариантов исходя из технической возможности и экономической целесообразности применения оборудования.

В практике проектирования они должны получать комплексное рассмотрение, однако их исследование ведется в более узкой постановке с изучением каждого на своем уровне. Дадим описание основных групп вопросов.

1. *Уровень эксплуатационных свойств машин*: тягово-скоростные характеристики самосвалов, рабочие параметры экскаваторов и карьерных самосвалов, надежность, ремонтпригодность и т. д. Вопросы этой группы определяют возможность применения оборудования в условиях месторождения с учетом его географического расположения, горно-геологических характеристик, климатических условий и существующей материальной базы предприятия. Ученые, исследующие данный аспект, дают рекомендации по выбору оборудования с точки зрения наилучшего соотношения технических, эксплуатационных показателей, а также устанавливают их для вновь проектируемых машин [3–5].

2. *Уровень технологического процесса*. Группе данных вопросов посвящено значительное количество работ, цель которых — определение оборудования, способного обеспечить максимально эффективное ведение процесса в заданных горнотехнических условиях. Исследователи, дающие обоснование применению оборудования, рассматривают влияние различных факторов на эффективность ведения процессов горных работ с заданным комплексом (прямая постановка вопроса), их экономичность и дают рекомендации по их значениям. Исследуются наиболее рациональная комплектация оборудования, эффективная глубина разработки и расстояние транспортирования, изменение производительности с течением времени, возможность сочетания оборудования при одновременном ведении горных работ с различными горнотехническими условиями. На основании полученных результатов ставится вопрос о разработке системы менеджмента парка основного горнотранспортного оборудования для обеспечения соответствия горных комплексов текущим горнотехническим условиям [6].

3. *Уровень общих технологических решений* отображает возможность достижения производственных показателей с использованием рассматриваемых комплексов в рамках основных вопросов технологии ведения горных работ. Применение экскаваторно-автомобильных комплексов обусловлено принятыми решениями: схемы вскрытия, режима ведения горных работ, порядка отработки и т. д. Ученые исследуют возможность обеспечения производственной мощности, стабильного выполнения календарного плана комплексом оборудования при наличии ряда ограничивающих факторов. Так, в [7, 8] рассматриваются показатели маневренности и стабильности, которые устанавливают верхнюю границу единичной мощности оборудования для заданного уровня производственной мощности предприятия; в практике проектирования обязательно проводятся проверочные расчеты по возможности обеспечения необходимого темпа углубки и скорости подвигания фронта горных работ, а также по транспортному фактору, что устанавливают требования к минимальной мощности оборудования.

В таблице кратко приведена характеристика каждой группы вопросов.

Анализируя ранее проведенные исследования, можно сделать вывод о недостаточной изученности последней группы вопросов. Так, в настоящее время имеется значительное количество работ, в которых рассматривается с точки зрения экономической целесообразности вопрос о взаимосвязи исследуемых факторов эффективности применения и принимаемого оборудования в рамках первых двух уровней. Успешный результат исследований выражается в возможности ученых на основании исследований давать рекомендации как в прямой постановке вопроса обоснования оборудования (какое оборудование эффективно при рассматриваемых условиях), так и в обратной (при каких условиях данное оборудование будет эффективно). На уровне общих технологических решений конкретных рекомендаций не дается, а определяется только диапазон возможных вариантов без их дифференциации. При этом не создается обратной связи (обратной постановки вопроса), где учитывается влияние обосновываемого оборудования на другие решения.

Характеристика вопросов обоснования экскаваторно-автомобильных комплексов

Группа вопросов	Эксплуатационные свойства машин	Технологический процесс	Общие технологические решения
Исходные данные	Горно-техническая характеристика месторождения: крепость пород; глубина залегания полезных ископаемых; климатические условия; географическое положение объекта; существующая материальная база	Конкретные горнотехнические условия при заданной технологии ведения работ	Режим ведения горных работ: темп углубки, скорость подвигания фронта горных работ; порядок ведения горных работ; горно-геометрическая характеристика карьерного поля; схема вскрытия карьера; календарный план горных работ
Показатели эффективности	Энерговооруженность, металлоемкость, надежность и др.	Уровень производительности, величина технологических простоев	Концентрация ведения горных работ; грузооборот (минимальная единичная мощность оборудования); маневренность комплекса
Стратегия обоснования оборудования	Определяется оборудование с наилучшими техническими характеристиками и минимальной стоимостью	Определяется оборудование, которое наиболее эффективно и экономично для выполнения производственного процесса при заданных горнотехнических условиях	Определяется оборудование, обеспечивающее выполнение производственной программы и технологической организации ведения работ
Основная постановка вопроса: прямая обратная	Какое оборудование имеет наилучшие технические показатели для данного месторождения? Для каких месторождений оборудование с данными техническими показателями наиболее приемлемо?	При каком оборудовании наиболее эффективно ведение технологических процессов в заданных горнотехнических условиях? При каких горнотехнических условиях использование данного оборудования в технологическом процессе наиболее приемлемо?	Какое оборудование должно использоваться при принятом порядке отработки, режиме горных работ и схеме вскрытия? Какой порядок отработки, режим горных работ и схема вскрытия наиболее эффективны для заданного комплекса?

Таким образом, у инженера нет достаточного инструментария, позволяющего ему объективно обосновать выбор оборудования совместно с такими вопросами, как вскрытие, порядок отработки, календарный план работ. При сложных горнотехнических условиях, где наблюдается значительная динамика показателей и факторов, определяющих эффективность работы комплекса, отсутствие необходимых методик делает проблему выбора оборудования весьма трудозатратной, так как это требует проработки очень большого количества вариантов проектных решений.

Стоит отметить еще одну проблему обоснования экскаваторно-автомобильных комплексов при выборе оборудования на уровне основных технологических решений — использование методик нижестоящих уровней. В практике проектирования обоснование проводится на усредненные горнотехнические условия, постоянные во времени по своей структуре. Под структурой понимается соотношение объемов работ с различными горнотехническими условиями. Усреднение последних во времени осуществляется экстраполяцией данных, полученных на расчетный период, структуры — средневзвешенно по объемам работ, входящим в усредняемый объем. Важно отметить, что если на месторождении календарный план горных работ, схема вскрытия являются факторами, определяющими эффективность использования оборудования и, наоборот, если их экономическая целесообразность зависит от принятого типа оборудования, то стандартные подходы к обоснованию экскаваторно-автомобильных комплексов могут давать неверное представление, так как невозможно учитывать в полной мере влияние динамики изменения горнотехнических условий отрабатываемого месторождения, которая в значительной степени может определяться проектными решениями. В таком случае требуется разработка новых подходов к обоснованию экскаваторно-автомобильных комплексов, позволяющих проводить поиск оптимальных решений на исходных данных, формируемых этими решениями.

В настоящей работе рассмотрен один из возможных подходов к обоснованию экскаваторно-автомобильных комплексов, позволяющий установить зависимость эффективности применения оборудования от намечаемого порядка отработки в изменчивых горнотехнических условиях как в прямой постановке вопроса, так и в обратной. Выбор порядка отработки — первая задача при ведении горно-геометрического анализа месторождения, результаты которого формируют дальнейшие проектные решения. Предлагаемая методика обоснования экскаваторно-автомобильных комплексов дает возможность уже на раннем этапе определять варианты оборудования исходя из перспектив экономической эффективности его применения.

Наш подход основан на прямой аналогии с задачами календарного планирования и поиска конечных контуров карьера, решаемых на блочных моделях месторождения, т. е. используется так называемый дискретный метод отображения информации. В настоящее время он входит практически во все специализированные программные комплексы горной промышленности. Его суть заключается в разделении месторождения на элементарные объемы, каждый из которых фиксируется в условной системе координат порядковым номером. При таком подходе возможно применение удобных табличных способов представления фиксируемых показателей различных методов поиска оптимальных решений задач, большинство из которых в своей постановке приобретают комбинаторный характер, что расширяет возможности исследования влияния основных технологических решений на эффективность конкретных экскаваторно-автомобильных комплексов. Означенная в данной статье проблема рассматривается в пределах указанных ранее ограничений и сводится к задачам поиска конечного контура карьера. Достоверное обоснование экскаваторно-автомобильного комплекса может стать доступно только при решении вопроса календарного планирования, где комплексно учитываются все технологические решения, полученные ранее в проектных проработках с помощью методик дискретной оптимизации на моделях месторождений. Предлагаемая методика относится только к одному из этапов проектных проработок, но позволяет продемонстрировать наличие зависимости между эффективностью применения оборудования и выбором направления отработки, что напрямую влияет на календарный план.

Рассмотрим задачу обоснования экскаваторно-автомобильного комплекса для участка недр “Кыргайский Средний” Ерунаковского угольного района Кузбасса. Участок большей частью располагается в бывшей пойме р. Кыргай с отметками рельефа от +248 до +350 м (абс.). Месторождение имеет сложное строение, к отработке принят 41 пласт. Балансовые запасы угля участка марок Д, ДГ составляют 50 686 тыс. т, средний коэффициент вскрыши — 5,3 м³/т, проектная мощность разреза, согласно техническому заданию, — 3 000 тыс. т угля в год. Освоение мощности запланировано на третий год эксплуатации, срок службы разреза 19 лет, в стабильном периоде 16 лет. Планируемая отработка участка характеризуется весьма интенсивными темпами понижения горных работ, локально — до 30 м/год, что усложняет процесс адаптации принятого парка погрузочно-транспортного оборудования под текущие условия его эксплуатации. В качестве критерия для оценки возможных вариантов экскаваторно-автомобильных комплексов принят размер эксплуатационных затрат на выполнение вскрышных работ.

Согласно рекомендациям [8], для выполнения предполагаемого годового объема вскрышных работ (26,5 млн м³/год) следует использовать экскаватор-мехлопату типа ЭКГ-10. Однако необходимо иметь в виду, что в процессе отработки залежи ожидается значительная динамика изменения его горнотехнических условий, которые окажут существенное влияние на производительность и стоимость ведения горных работ. Рассмотрим эффективность работы экскаватора ЭКГ-10 совместно с автосамосвалами: БелАЗ-7555 (55 т), БелАЗ-7557 (90 т), БелАЗ-7513 (130 т). В контексте рекомендаций о рациональном интервале соотношений вместимости кузова самосвала и емкости ковша экскаватора (4–6 ковшей) наиболее оптимальным является БелАЗ-7557. На рис. 1 приведены данные о сравнительной себестоимости ведения работ при различных расстояниях транспортирования вскрышных пород комплекса: экскаватор ЭКГ-10 – самосвал БелАЗ-7555.

Проследим изменение эффективности работы самосвалов в составе комплексов по породам II–IV категории по трудности экскавации. Исходя из расчетных стоимостных показателей эксплуатации рассматриваемых комплексов, могут быть выделены зоны их эффективного применения в зависимости от грузоподъемности транспортных средств (рис. 1в).

Зона 1 — применение БелАЗ-7557 дает экономию в сравнении с БелАЗ-7555 за счет лучших технико-экономических показателей.

Зона 2 — применение БелАЗ-7513 несет убыток из-за низкой производительности самосвала.

Зона 3 — применение БелАЗ-7555 приносит прибыль в сравнении с двумя другими вариантами за счет более низкой капиталоемкости в сравнении с БелАЗ-7557 и лучшего использования рабочего времени относительно БелАЗ-7513.

Зона 4 — применение БелАЗ-7513 наиболее эффективно благодаря оптимальному сочетанию параметров экскаватора и автосамосвала.

Зона 5 — применение БелАЗ-7557 убыточно из-за его высокой капиталоемкости.

Рассмотрены два возможных подхода к формированию экскаваторно-автомобильных комплексов: принять один тип самосвала и отработать залежь без привязки к направлению ведения горных работ и принять два или несколько типов самосвалов в одновременной работе.

Очевидно, что во втором случае, по условиям наиболее производительного использования автосамосвалов, необходимо выделение зон их эффективной эксплуатации. В связи с тем что разделение по комплексам целевых объемов горных работ не всегда возможно технологически, область рационального применения комплекса устанавливается в пределах зоны, работа в которой экономически обоснована без привлечения альтернативного комплекса, но с учетом технологических требований по объему и последовательности извлечения обрабатываемых горных пород. Такой подход гарантирует, что использование комплекса будет вестись в наиболее благоприятных условиях и приносить положительный экономический эффект.

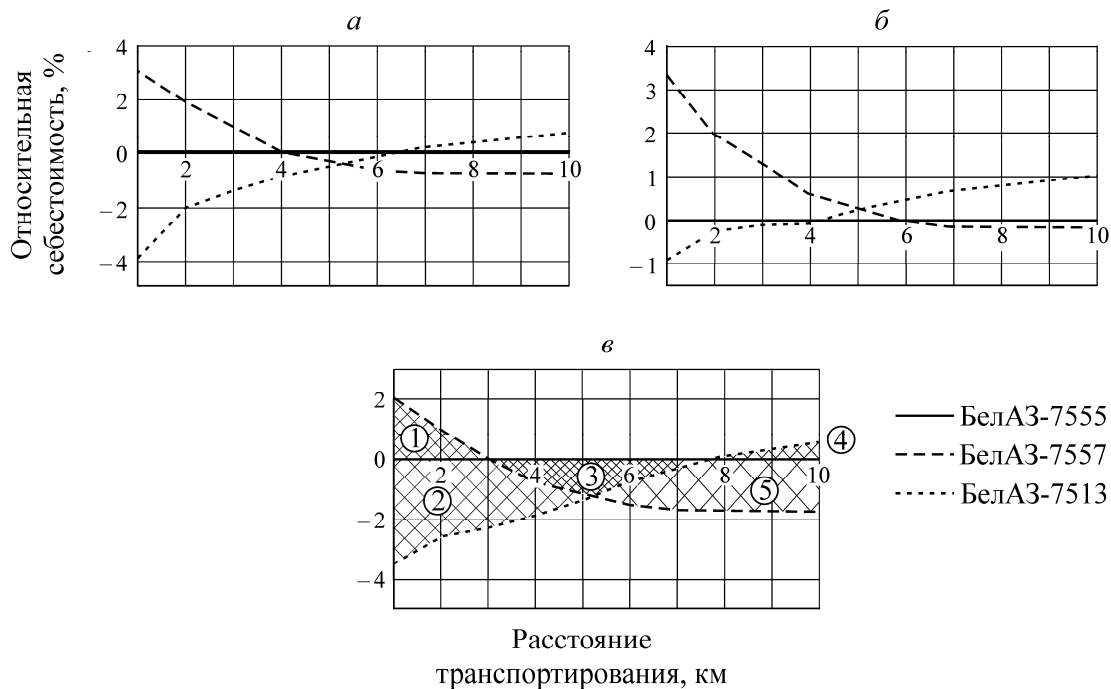


Рис. 1. Сравнительная себестоимость комплексов: *a* — породы категории II; *б* — III; *в* — IV

Проанализируем изменение горнотехнических условий на поле разреза (рассматриваются влияние категории пород по трудности экскавации и расстояние транспортирования). Описание параметров разреза проведено посредством двумерной блочной модели, отстроенной на характерной разведочной линии 3 (рис. 2).

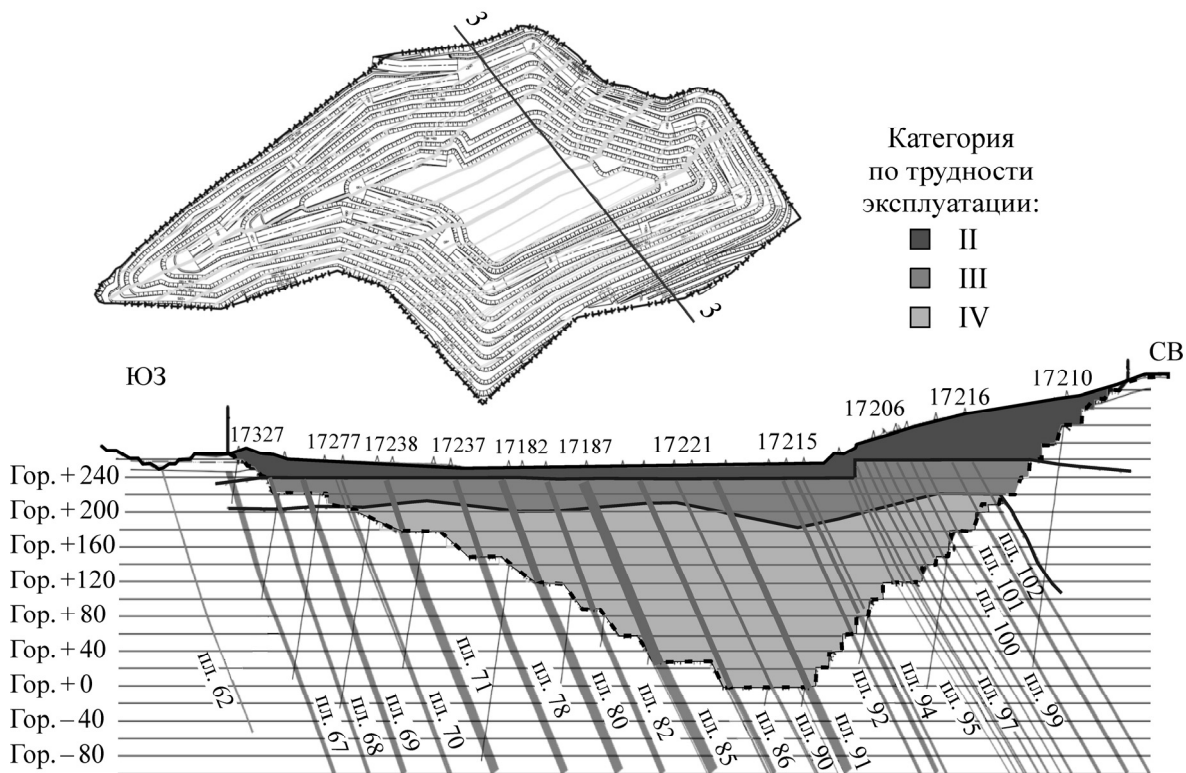


Рис. 2. Блочная модель разреза “Кыргайский Средний”

В модели приведен объем вскрышных пород на заданном горизонте, а также по каждому блоку. Расстояние транспортирования вскрышных пород по каждому блоку определялось аналитически суммированием внутрикарьерного участка трассы и условно постоянного пути движения автосамосвалов от въездной траншеи до отвала. Категория вскрышных пород по блокам задана в соответствии с исходными геологическими материалами [9].

Распределение объемов вскрышных пород по трудности их экскавации и расстоянию транспортирования приведены соответственно на рис. 3.

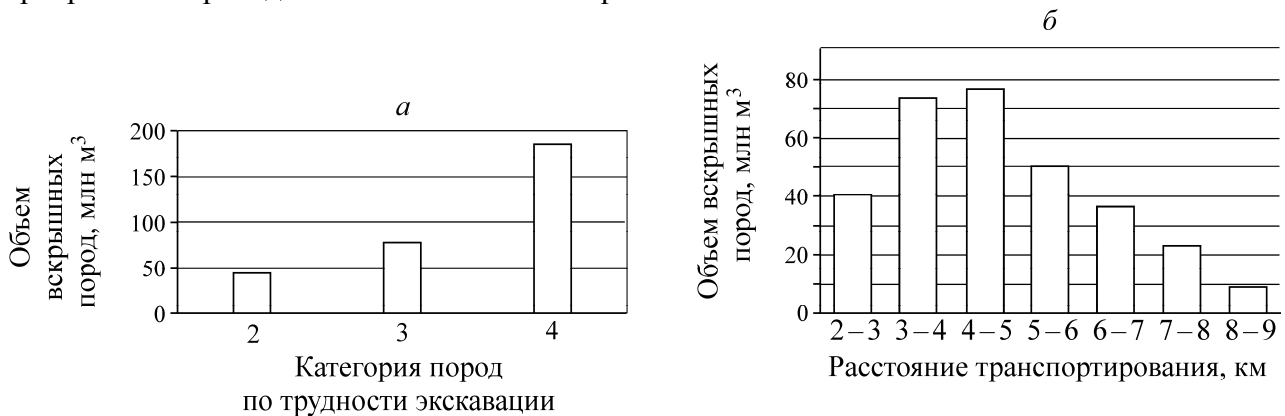


Рис. 3. Распределение объемов вскрышных пород: *a* — по трудности экскавации; *б* — по расстоянию транспортирования

Экономический эффект по вариантам рассматриваемых комплексов определяется суммой затрат на отработку каждого блока. Проведенный анализ показал, что необходимые условия для БелАЗ-7513 на участке отсутствуют из-за низкой рентабельности на первом этапе отработки залежи, разница между вариантами с самосвалами БелАЗ-7555 и БелАЗ-7557 незначительна. Улучшение экономических показателей комплекса возможно за счет использования комбинации БелАЗ-7557 и БелАЗ-7513. Для данного варианта первоначально необходимо назначить описанную ранее область применения оборудования, чтобы определить направление ведения работ, которое минимизирует затраты от работы БелАЗ-7513 в первоначальном периоде.

Поиск искомой области проводится с помощью алгоритма Лерча–Гроссмана. Впервые указанный алгоритм описан в 1965 г. [10], но реальную значимость приобрел с развитием компьютерного моделирования. В настоящее время он является промышленным стандартом в программном обеспечении открытых горных работ для построения конечных контуров карьеров. Наряду с указанным алгоритмом существует ряд иных методик, позволяющих выполнять данное построение, но он отличается от прочих тем, что способен находить действительно оптимальные решения границ отработки при заданных экономических показателях. Недостатком алгоритма можно назвать неопределенность расчетного времени поиска решения — известно только, что он выполняется за конечное число итераций. В настоящей работе используется упрощенная двумерная модель, поэтому вопрос расчетного времени не был актуальным.

Определенный оптимальный предельный контур карьера на блочной модели месторождения, представленной совокупностью объемов вскрышных пород, характеризуемых положением в пространстве и стоимостью их отработки, приведен на рис. 4 (значениям минус и плюс на модели соответствуют положительный и отрицательный экономический эффект отработки блоков).

-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-2	+9	-2	+8	-2	-2	-2	+10	-2
-3	-3	-3	+17	-3	-3	-3	-3	-3

Рис. 4. Конечный контур разреза на блочной модели

Как видим в указанном примере, алгоритм позволяет находить области работы комплексов оборудования, приносящие положительный экономический эффект, даже когда на первоначальных этапах работы ведутся с отрицательными показателями.

В результате проведенных расчетов получены границы, оконтуривающие оптимальную область применения самосвалов БелАЗ-7513 в комплексе с ЭКГ-10, в пределах которых обеспечивается положительный экономический эффект в меняющихся горнотехнических условиях (рис. 5). Ведение работ в данной зоне на первоначальном периоде позволит улучшить технико-экономические показатели комплекса, формируемого смешанным типом самосвалов.

В рассматриваемом примере условием наиболее эффективного использования комбинации автосамосвалов на разрезе является поиск проектных решений с углубкой со стороны восточного борта (перспективно пласт 91), смещение на запад требует снижения доли самосвалов БелАЗ 7513. Подобный анализ возможно провести и для пары БелАЗ 7557 и БелАЗ 7555. Получаемая при этом информация позволит рассматривать проблему выбора направления отработки залежи с точки зрения его влияния на выбор погрузочно-транспортных комплексов.

Наличие зависимости между экономической эффективностью применяемого оборудования и направлением отработки месторождения показывает необходимость исследования их взаимного влияния и разработки новых методик обоснования экскаваторно-автомобильных комплексов.

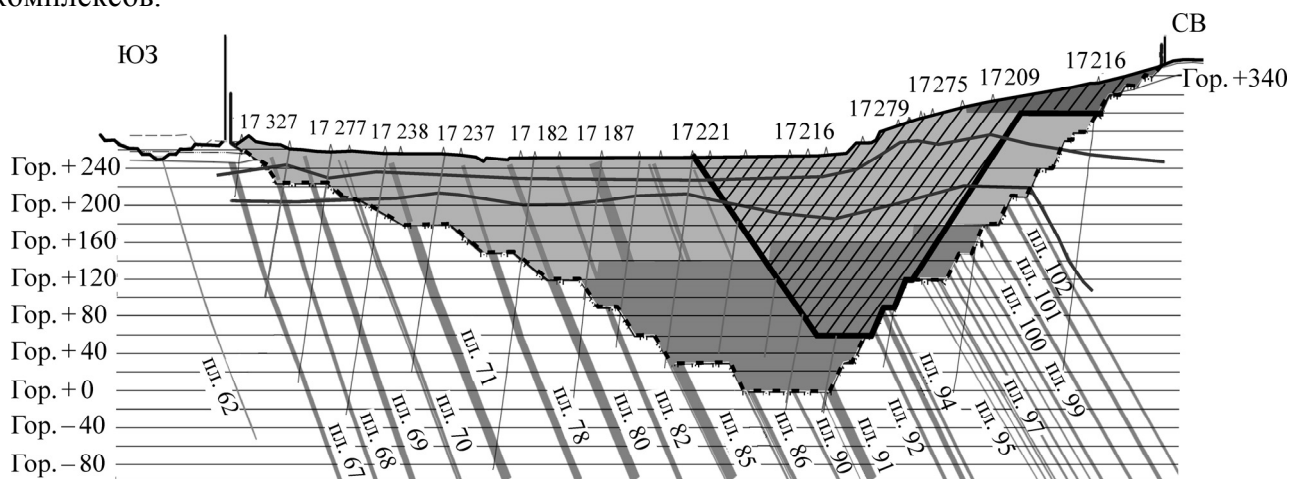


Рис. 5. Область эффективного применения экскаваторно-автомобильных комплексов на разрезе “Кыргызский Средний”: ■ — БелАЗ 7513; □ — БелАЗ 7557; — граница максимально эффективной области работы БелАЗ 7513; ▨ — максимально эффективная область работы БелАЗ 7513; - - - техническая граница карьера

ВЫВОДЫ

Предложена методика обоснования экскаваторно-автомобильных комплексов при открытой добыче минерального сырья, обеспечивающая возможность:

- определения рациональной области их применения в сложных горно-геологических условиях месторождений твердых полезных ископаемых;
- формирования границ эффективной работы комплексов в условиях постоянно изменяющихся горнотехнических условий карьеров и разрезов.

Использование методики позволит более объективно решать вопросы выбора наиболее эффективных погрузочно-транспортных комплексов для конкретных горно-геологических условий месторождения или его участка, оптимального планирования развития горных работ, снижения инвестиционных вложений на формирование парка горнотранспортного оборудования и эксплуатационных затрат на выемку и перемещение вскрышных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мариев П. Л., Кулешов А. А., Егоров А. Н., Зырянов И. В.** Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы. — СПб.: Наука, 2004.
2. **Щадов М. И., Ефимов В. Н.** Оценка технического состояния горно-транспортного оборудования и его техническое перевооружение как основа эффективности развития открытой угледобычи Кузбасса // Горн. оборудование и электромеханика. — 2008. — № 7.
3. **Молотилов С. Г., Ческидов В. И., Норри В. К.** Методические основы планирования производительности выемочно-погрузочных машин на карьерах с автомобильным транспортом. Ч. I // ФТПРПИ. — 2008. — № 4.
4. **Молотилов С. Г., Норри В. К., Ческидов В. И., Ботвинник А. А.** Методика определения производительности выемочно-погрузочных машин на карьерах с автомобильным транспортом. Ч. II. Метод расчета технической производительности // ФТПРПИ. — 2009. — № 1.
5. **Молотилов С. Г., Ческидов В. И., Норри В. К., Ботвинник А. А., Ильбульдин Д. Х.** Методические основы планирования производительности выемочно-погрузочных машин на карьерах с автомобильным транспортом. Ч. III. Методика определения эксплуатационной производительности // ФТПРПИ. — 2010. — № 1.
6. **Щадов М. И., Анистратов К. Ю., Федоров А.В.** Метод формирования структуры парка карьерной техники на действующем предприятии // Горн. пром-сть. — 2009. — № 5.
7. **Кулешов А. А.** Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров. — М.: Недра, 1980.
8. **Кулешов А. А.** Проектирование и эксплуатация карьерного автотранспорта: справочник. Ч. 2. — СПб.: СПГИ, 1995.
9. **Земскова Н. А.** Отчет по результатам геологоразведочных работ на участке недр Кыргайский Средний Северо-Талдинского и Талдинского каменноугольных месторождений (Геологическое строение и подсчет запасов каменного угля по состоянию на 01.01.2013 г.). — Новокузнецк: ООО “ГеоБур-Сервис”, 2013.
10. **Lerchs H., Grossmann I. F.** Optimum design of open-pit mines, transactions, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1965, Vol. LXVIII.

Поступила в редакцию 21/IX 2015