



Выбор и оценка системы вскрытия при разработке крутопадающих месторождений открытым способом

К.В.Бурмистров✉, С.Е.Гавришев, В.Ю.Заляднов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия

Как цитировать эту статью: Бурмистров К.В., Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю. Выбор и оценка системы вскрытия при разработке крутопадающих месторождений открытым способом // Записки Горного института. 2025. Т. 274. № 16370. С. 95-103. [EDN KBGWYK](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16370.95-103)

Аннотация

Выбор варианта и параметров схемы вскрытия является одной из самых сложных задач при проектировании разработки крутопадающих месторождений. Принятый в проекте вариант вскрытия во многом определяет капитальные и эксплуатационные затраты на разработку месторождения и влияет на стратегию развития предприятия в целом. Наибольшее число альтернатив варианта вскрытия имеют условия освоения запасов крупных крутопадающих месторождений, отработка которых осуществляется несколько десятилетий. Существующие подходы к выбору способа и схемы вскрытия предполагают использование конкретного вида транспорта, однако вид и модель транспортного средства не учитываются в существующих классификациях способов и схем вскрытия. Необходимо развитие системного подхода к выбору вариантов вскрытия для разработки крутопадающих месторождений. Целью исследования являются обоснование параметров и разработка многофакторного критерия оценки системы вскрытия для выбора альтернативы развития горнодобывающего предприятия. В статье предлагается подход, при котором выбор карьерного транспорта, обоснование способа и схемы вскрытия будут рассматриваться в рамках системы вскрытия, что позволит комплексно решать задачи повышения эффективности разработки месторождений на различных этапах функционирования карьеров. Предлагаются уточненные определение и структура системы вскрытия. В качестве критерия оценки эффективности системы вскрытия выбран ранговый коэффициент, учитывающий целевые значения, вес входящих в расчет параметров и групп, расчет которого основан на применении комбинации многокритериальных методов анализа. Подход позволяет учитывать не только экономические показатели, но и другие факторы, что во многом определяет дальнейшее развитие предприятия. Исследование приоритетно направлено на условия разработки рудных месторождений глубокими карьерами. Установленный ранг позволяет выбрать наиболее эффективную стратегию развития горнорудных предприятий.

Ключевые слова

способ вскрытия; схема вскрытия; система вскрытия; карьерный транспорт; ранговый коэффициент; критерий оценки

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10040.

Поступила: 24.01.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 03.07.2025

Опубликована: 25.08.2025

Введение

Увеличение глубины и размера карьера в плане влечет рост затрат на добычу полезных ископаемых и приводит к необходимости совершенствования горной техники и технологии ведения горных работ. Как отмечается многими авторами, основной рост затрат на разработку карьеров с увеличением глубины и других параметров связан с затратами на транспортирование горной массы [1-3] и создание схемы вскрытия [4, 5]. Обоснование параметров эксплуатации карьерного транспорта является сложной многофакторной задачей [6, 7], а от эффективности планирования и управления транспортными комплексами зависят основные экономические показатели разработки месторождения [8-10]. При этом карьерный транспорт и схема вскрытия рассматриваются в различных системах – транспортной [11], горнотранспортной [12], логистической [13]. Адаптация к изменяющимся внешним и внутренним условиям разработки месторождений часто производится путем технического перевооружения в транспортной системе карьера, которое предусматривает изменение вида или моделей применяемых транспортных средств [14-16]. Изменения, производимые



в одной из рассматриваемых систем без учета элементов других, могут приводить к низкой эффективности преобразований на карьере.

При вскрытии месторождений используются термины «способ вскрытия» и «схема вскрытия» [17]. В теории вскрытия карьерных полей известно также понятие «система вскрытия», или «генеральная схема вскрытия» – это порядок и последовательность поэтапного создания, изменения (развития) схемы вскрытия за период существования карьера, обеспечивающие вскрытие рабочих горизонтов до рабочей глубины. В данном определении нет признаков системы, не выделены элементы и связи, на практике понятие почти не используется. Система вскрытия отличается от схемы вскрытия только тем, что учитывает все этапы отработки месторождения. Ни в одних из известных определений и характеристик вскрытия не отражен вид транспорта, определяющий величину затрат и эффективность расходования ресурсов, которым осуществляется перемещение груза. Развитие схемы вскрытия и транспортирование горной массы рассматриваются без учета взаимосвязей между ними, поэтому существующий методический подход не позволяет оценивать эффективность и устойчивость функционирования системы вскрытия.

Появление новых и развитие действующих транспортных комплексов для открытых горных работ (ОГР) привели к тому, что некоторые комплексы не предусмотрены общепринятыми классификациями способов вскрытия. Например, расположение карьерных подъемников на металлических опорах [18, 19], башенных конструкциях [20, 21], размещаемых на борту карьера, создают доступ к рабочим горизонтам, но не предполагают проведение крутых траншей и не относятся к бестраншейному вскрытию. Определения способа и схемы вскрытия наиболее точно характеризуют применение одного вида транспорта в карьере. В современных условиях эффективная отработка глубокозалегающих месторождений возможна только при комбинации нескольких видов транспорта, организации в карьере перегрузочных пунктов различных конструкций и назначения. При этом способ и схема вскрытия до перегрузочного пункта и после будут отличаться. Это подводит к необходимости пересмотра обоснования структуры и функций системы вскрытия, уточнению понятия. Отсутствие системного подхода приводит к ущербу от несоответствия отдельных элементов проектирования вскрытия, который будет только возрастать с увеличением глубины ведения горных работ.

Методика оценки системы вскрытия

Под «системой вскрытия» понимается подсистема горнотехнической системы (ГТС), предназначенная для обеспечения доступа к месторождению или локальному участку, формирования и реализации грузопотоков полезного ископаемого, вскрышных пород, оборудования и материалов, состоящая из вскрывающих выработок, транспортных средств и устройств, внутрикарьерных пунктов перегрузки горной массы [22].

В работе выполнена систематизация параметров системы вскрытия, влияющих на развитие горнотехнической системы, с учетом практики эксплуатации, реконструкции системы вскрытия на действующих предприятиях и анализа исследований, посвященных вопросам эффективности карьерного транспорта, разработки оптимальных вариантов схем вскрытия, обеспечения устойчивости и эффективности развития систем. В основе систематизации лежал функциональный подход с выделением технических, технологических, экономических, социальных и экологических факторов. Предлагается двухуровневая оценка с использованием 8 групп и 23 параметров, которые обоснованы в [23] (рис. 1). Первый уровень иерархии учитывает параметры оценки системы вскрытия при взаимодействии с ГТС и внешней средой. Ко второму уровню отнесены специфические параметры функционирования системы вскрытия. Классификация параметров позволяет выполнять комплексную оценку системы вскрытия и выбирать стратегию дальнейшего развития ГТС.

Рассматриваемые параметры оцениваются качественными и количественными значениями, оказывают влияние на конечный результат и имеют отличающиеся цели. Поэтому необходима разработка комплексного критерия и метода оценки, позволяющих учитывать данные особенности.

Оценку системы вскрытия, а также выбор стратегии освоения крутопадающих месторождений предлагается производить с использованием комплексного критерия эффективности, в качестве которого выбран ранговый коэффициент, позволяющий учитывать большое число параметров, качественную и количественную величину, а также целевую функцию каждого параметра. Разработанный критерий имеет следующий вид:



$$K_{\text{эсв}} = f(x_{ij}; w_j; k_i) \rightarrow \max,$$

где x_{ij} – значение оценки i -й альтернативы по j -му критерию для всех параметров системы вскрытия; i – влияющий параметр; w_j – весовой коэффициент параметра; k_i – полезность альтернатив.

Ранжирование параметров путем определения весовых коэффициентов имеет смысл производить с использованием нечеткого метода анализа иерархий (Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) [24, 25]. Метод достаточно широко используется при решении многокритериальных задач, в том числе в горном деле [26-28].

Большое количество влияющих параметров, имеющих разные целевые значения, стремящиеся к максимально, либо минимально возможным, а также сложность оценки ряда параметров количественными значениями предопределили необходимость применения комбинированных многокритериальных нечетких методов для выбора целесообразного варианта вскрытия соответствующей стратегии развития ГТС. В ходе исследований апробированы различные методы, выбран метод MARCOS [29-31], который отвечает поставленным условиям решения задачи. Последовательность выполнения расчетов рангового коэффициента с учетом многокритериальных методов представлена на рис.2 [17].

В результате расчета по значению предлагаемого критерия устанавливается итоговый ранг для каждой рассматриваемой стратегии развития ГТС. Для стратегий, имеющих наибольшие ранги, выполняется расчет технико-экономических показателей и производится окончательный выбор.

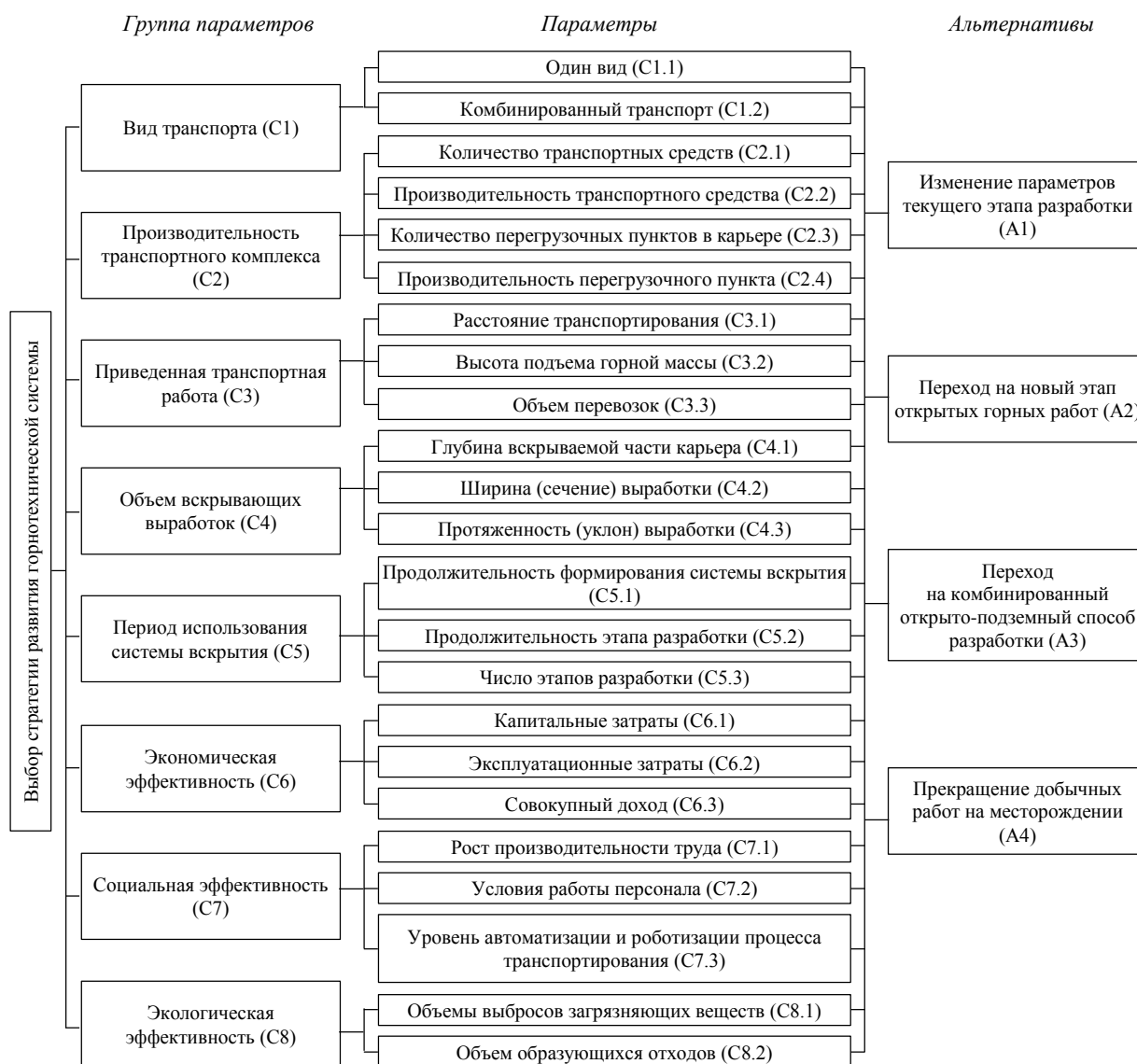


Рис.1. Параметры оценки системы вскрытия и альтернативы стратегии развития ГТС

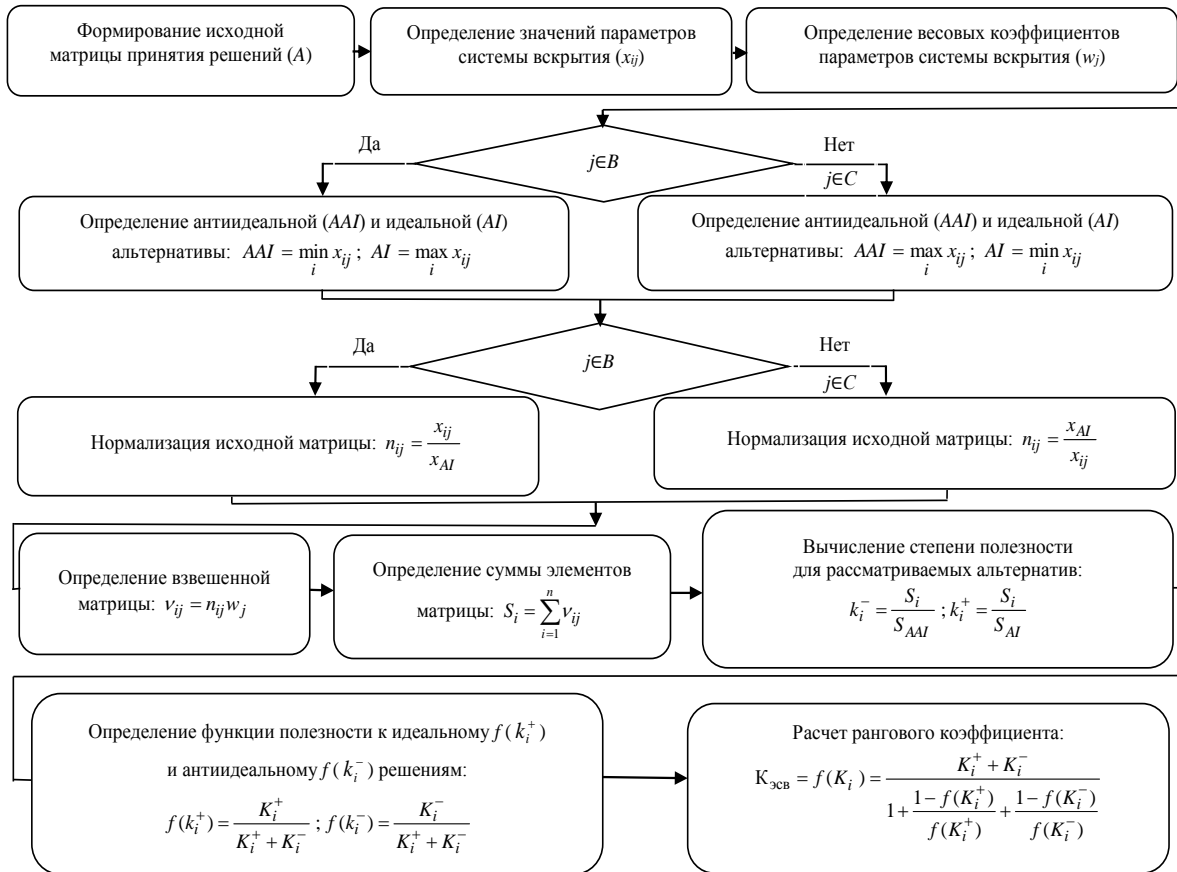


Рис.2. Блок-схема расчета рангового коэффициента
B – критерии максимизации; C – критерии минимизации

Обсуждение результатов

Основными элементами системы вскрытия при существующем подходе выступают только вскрывающие выработки, определенным образом размещаемые в пространстве карьера. Параметры вскрывающих выработок определяются параметрами карьерного транспорта, однако такой элемент, как карьерный транспорт, отсутствует в существующих определениях и классификациях вскрытия. Эффективность функционирования горнотехнической системы на глубоких карьерах определяется затратами на вскрышные работы и транспортирование горной массы, которые в значительной степени взаимосвязаны (рис.3).

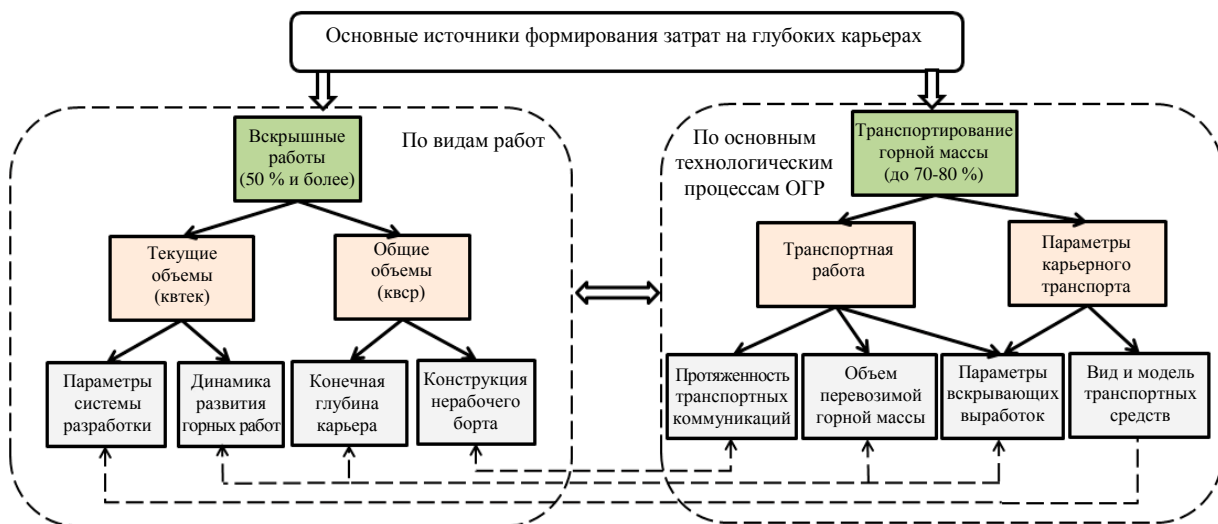


Рис.3. Основные виды затрат, определяющие эффективность открытого способа разработки на глубоких карьерах



Основными источниками затрат по технологическим процессам являются расходы на карьерный транспорт, на долю которого приходится до 70 %, а по видам работ – расходы на вскрышные работы, составляющие 50 % и более, в зависимости от среднего эксплуатационного коэффициента вскрыши и принятого режима горных работ. При этом от 30 до 50 % вскрышных работ, по данным [22], приходится на создание схемы вскрытия. Наибольшие значения характерны для глубоких карьеров, которые формируются при разработке крутопадающих залежей. Система вскрытия, объединяющая вскрышающие выработки и карьерный транспорт, является наиболее затратной подсистемой ГТС. Поэтому решения, принятые при проектировании системы вскрытия, значительно повлияют на устойчивость функционирования горнотехнической системы в целом.

Весь период разработки крупных, т.е. разрабатываемых в течение нескольких десятилетий, месторождений можно разделить на этапы уточнения запасов, вовлекаемых в отработку, пересмотра контуров карьера, изменения применяемых техники и технологии производства работ и т.д. Соответственно поэтапно развивается и схема вскрытия. Функция отдельных выработок сформированной схемы вскрытия может меняться по мере перехода на новые этапы открытых горных работ и изменения способа разработки месторождения. Например, вскрышающие выработки начального этапа на новом этапе могут использоваться как вспомогательные, при переходе на подземный способ разработки – для передвижения автосамосвалов подземного рудника, либо, как предложено в [17], для подъема на поверхность и спуска на перегрузочный пункт горной массы, оборудования и материалов. Функциональные возможности системы вскрытия отличаются на каждом отдельном этапе. Потому необходимо осуществлять проектирование системы вскрытия с использованием уточненного определения данного термина, учитывать вскрышающие выработки, транспортные коммуникации, перегрузочные пункты, средства транспорта, транспортные конструкции, а также конкретизировать функции отдельных элементов на каждом этапе функционирования горнотехнической системы; для этого расширено понятие системы вскрытия.

Система вскрытия связана с другими подсистемами горнотехнической системы как прямыми, так и обратными связями, при этом некоторые элементы могут входить в состав сразу нескольких подсистем ГТС (рис.4) [17].

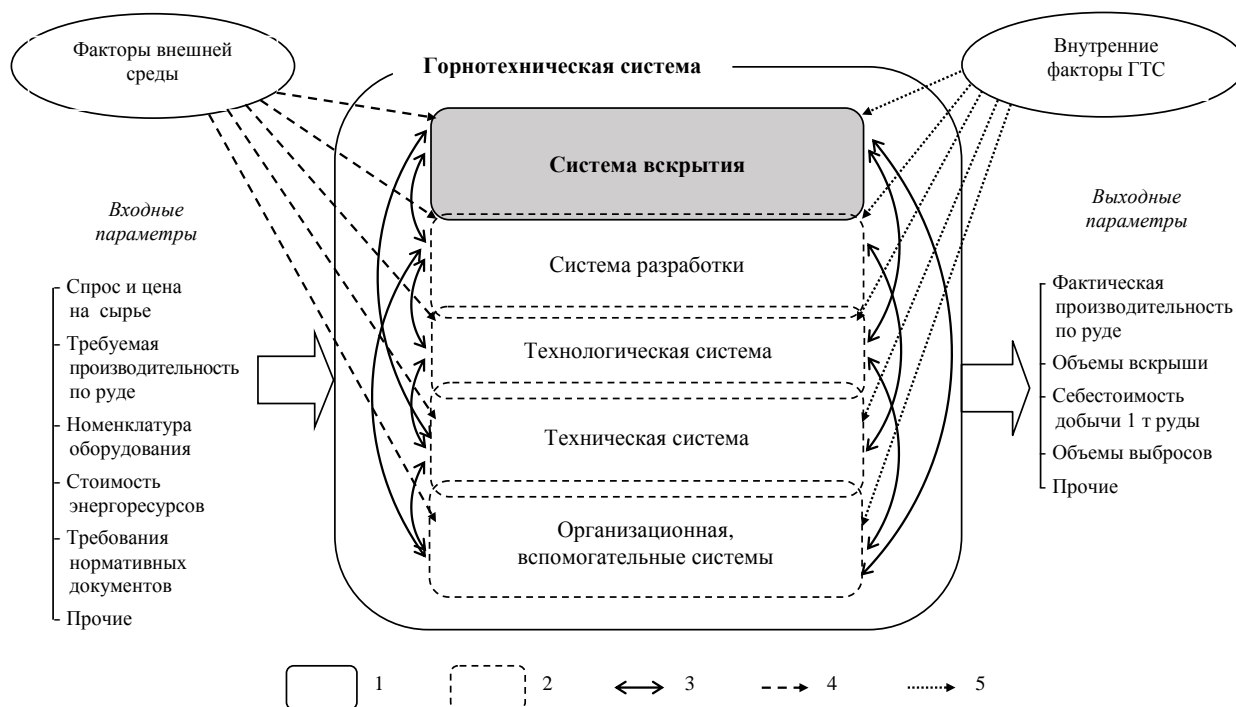


Рис.4. Подсистема вскрытия в структуре ГТС

1 – контур ГТС; 2 – системы ГТС; 3 – связи между системами;
4 – воздействие внешней среды на системы ГТС; 5 – влияние внутренних факторов на системы ГТС



Система вскрытия характеризуется числом и назначением элементов, параметрами связей между ними и продолжительностью функционирования элементов в неизменном виде. Основной функцией системы вскрытия является создание и поддержание транспортной связи между объектами на поверхности и горизонтами карьера для формирования устойчивого грузопотока на различных этапах разработки месторождения. Устойчивый грузопоток – это поток грузов, перемещаемый транспортными средствами по вскрывающим выработкам, транспортным коммуникациям и конструкциям, обеспечивающий проектные показатели горнотехнической системы по объемам и качеству потока груза.

В [17] были проанализированы структура, способ и схемы вскрытия, а также имеющиеся определения. Результаты анализа, а также предлагаемая структура системы вскрытия представлены в табл.1. Оранжевая область включает элементы и параметры, которые следуют из определения, желтая – включенные через косвенные признаки.

Таблица 1

Составы способа, схемы и системы вскрытия

Вид и тип транспорта	Тип вскрывающей выработки или конструкции	Параметры выработок или конструкций (ширина, угол наклона) вскрывающей выработки или конструкции	Форма трассы	Диапазон пользования транспорта по глубине карьера	Тип перегрузочного пункта	Глубина расположения перегрузочного пункта	Планируемый период использования	Назначение выработок (конструкций)
Способ вскрытия								
Схема вскрытия								
Система вскрытия								

Предложенное определение системы вскрытия отображает параметры, которые могут использоваться как классификационные признаки при описании системы:

- средства транспорта – вид и модель применяемого средства, диапазон использования по глубине карьера;
- вскрывающие выработки – тип, назначение, ширина, угол наклона, форма трассы, расположение выработок, транспортных устройств на бортах карьера;
- перегрузочные пункты – тип, количество, глубина расположения.

Система вскрытия проектируется детально на текущий этап разработки и укрупненно на весь предполагаемый период разработки месторождения. За время функционирования карьера система вскрытия может претерпевать изменения. Отдельные параметры элементов системы могут изменяться в течение текущего этапа разработки, более глобальные происходят при переходе на другие этап или способ разработки [32]. Система вскрытия изменяется в соответствии с выбранной стратегией развития ГТС (табл.2). Также альтернативной стратегией развития ГТС являются прекращение добычи руды на месторождении и дальнейшее использование сформированных пространств в качестве техногенных георесурсов [33-35].

Таблица 2

Виды изменений системы вскрытия и их особенности

Виды стратегий развития ГТС	Особенности производимых изменений	Изменяемые параметры системы вскрытия
Изменение параметров текущего этапа разработки	Изменения не предполагают корректировку конечных контуров карьера	Модель транспорта, параметры вскрывающих выработок и перегрузочных пунктов
Переход на новый этап открытых горных работ	Параметры системы вскрытия проектируются с учетом нового контура карьера	Вид, модель транспорта, схема вскрытия, параметры вскрывающих выработок, перегрузочных пунктов
Переход на новый способ разработки	Производится совмещение параметров системы вскрытия карьера и подземного рудника	Вид, модель транспорта, схема вскрытия, вид и параметры вскрывающих выработок, параметры перегрузочных пунктов



Изменения системы вскрытия могут происходить следующим образом:

- В течение этапа разработки изменения чаще всего вызваны техническим перевооружением в связи с приобретением автосамосвалов других моделей. Для новых моделей транспортных средств могут пересматриваться ширина и угол наклона выработок. Для комбинированных видов транспорта может изменяться диапазон использования каждого вида по глубине, вплоть до полного отказа от одного из видов транспорта. В ходе изменений не пересматриваются контуры карьера.

- При переходе на новый этап открытого способа разработки изменяется конечный контур карьера и существенно преобразовывается система вскрытия. При этом схема вскрытия может полностью измениться, либо отдельные элементы старой схемы на новом этапе используются как вспомогательные. Изменяться могут такие параметры системы вскрытия, как вид транспорта и модель транспортных средств, параметры вскрывающих выработок и перегрузочных пунктов.

- При переходе на подземный способ разработки создается новая схема вскрытия подземного рудника, предполагающая проходку новых выработок и организацию работы по ним транспорта подземного рудника. При этом схема вскрытия карьера может использоваться в неизменном виде, может частично изменяться для целей подземного рудника, либо может вообще демонтироваться или не использоваться. В таком случае изменяются вид транспорта, модель транспортных средств, форма трассы, параметры выработок и транспортных устройств, количество пунктов выдачи горной массы из карьера. При переходе на открыто-подземный способ разработки трудоемкость изменения системы вскрытия во многом определяется тем, какую функцию будет выполнять существующая система вскрытия карьера для дальнейшей эксплуатации подземного рудника.

Выбор стратегии развития горнотехнической системы на планируемый этап разработки сопровождается изменением системы вскрытия. Описанный подход к комплексной оценке системы вскрытия позволяет определять эффективность рассматриваемых стратегий развития горнотехнической системы с учетом особенностей каждого этапа разработки.

Подход апробирован на условиях одного из железорудных предприятий Уральского региона [17]. Оценены четыре стратегии развития ГТС: А1 – изменение параметров текущего этапа; А2 – переход на новый этап ОГР; А3 – переход на открыто-подземный способ и А4 – прекращение функционирования горнодобывающего предприятия. По результатам расчетов установлено, что наивысший ранг имеет стратегия А3 (значение рангового коэффициента 0,5908), второй ранг – стратегия А2 (0,5757), третий ранг – А4 (0,5647), наименьший ранг – А1 (0,4226). Стратегия А3 определена в качестве альтернативы развития ГТС. Для выбранного варианта рассчитана величина совокупного дисконтированного дохода, которая составила более 1,6 млрд руб. Экономический эффект выбранной стратегии развития достигается за счет перехода к освоению законтурных запасов месторождения, вовлечения в отработку дополнительных объемов руды по сравнению с другими стратегиями, сокращения капитальных затрат на строительство подземного рудника и эксплуатационных затрат на доставку руды при поэтапном формировании системы вскрытия.

Заключение

Влияние внешних и внутренних факторов на функционирование горнодобывающего предприятия ведет к необходимости изменения видов и типов применяемого карьерного транспорта и пересмотру схемы вскрытия. При этом карьерный транспорт и схема вскрытия рассматриваются в структуре различных систем: транспортной, горнотранспортной, логистической. Существующее определение системы вскрытия фактически дублирует понятие схемы вскрытия и не используется в проектировании и выполнении исследований. Предлагается уточнение существующей терминологической базы и применение системного подхода к обоснованию структуры, параметров и функций системы вскрытия. Такой подход позволяет рассматривать комплексно выбор вида и типа карьерного транспорта с учетом параметров вскрывающих выработок и конструкций, необходимых для функционирования карьера, конструировать оптимальную структуру системы вскрытия, позволяющую минимизировать затраты на разработку месторождения. Наибольшие затраты в системе вскрытия характерны для разработки глубоких крутопадающих месторождений. Ввиду продолжительных сроков освоения месторождений разработка производится этапами с последующим переходом на подземный способ добычи. В период перехода с одного этапа на другой или смены способа разработки наиболее сложным является изменение системы вскрытия карьера. Рассмотрены возможные варианты преобразований системы вскрытия, производимых в период изменения



стратегии развития ГТС. Для оценки эффективности системы вскрытия предложен ранговый коэффициент, расчет которого основан на применении комбинации многокритериальных методов анализа Fuzzy AHP и MARCOS. Выполнен расчет для одного из железорудных предприятий Уральского региона, который позволил определить предпочтительный вариант развития стратегии ГТС – переход на комбинированный способ разработки, предполагающий формирование совместной схемы вскрытия карьера и подземного рудника.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Paricheh M., Osanloo M.* Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties // 6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries, 5-7 October 2016, Istanbul, Turkey. Istanbul: AGRO ARGE Danışmanlık San. ve Tic. A.Ş., 2016. № CAMI2016-34.
2. *Teplicka K., Hurna S.* Optimizing internal transport in terms of technical parameters in a mining company // Acta logistica. 2023. Vol. 10. Iss. 1. P. 95-103. DOI: [10.22306/al.v10i1.360](https://doi.org/10.22306/al.v10i1.360)
3. *Яковлев В.Л., Берсенева В.А., Глебов А.В. и др.* Выбор схем циклично-поточной технологии на глубоких карьерах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 5. С. 98-104. DOI: [10.15372/FTPRP120190511](https://doi.org/10.15372/FTPRP120190511)
4. *Глебов И.А.* Обзор схем вскрытия глубоких горизонтов алмазородных карьеров в фокусе технологии доработки запасов тоннельными съездами // Проблемы недропользования. 2020. № 2. С. 61-72. DOI: [10.25635/2313-1586.2020.02.061](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.061)
5. *Акишев А.Н., Лель Ю.И., Глебов И.А.* Инновационная технология вскрытия и разработки глубоких кимберлитовых карьеров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 3. С. 111-123. DOI: [10.25635/IM.2019.87.37803](https://doi.org/10.25635/IM.2019.87.37803)
6. *Samimi Namin F., Ghasemzadeh H., Aghajari A.M.* A comprehensive approach to selecting mine transportation system using AHP and FUZZY-TOPSIS // Decision Making and Analysis. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 23-39. DOI: [10.55976/dma.12023117323-39](https://doi.org/10.55976/dma.12023117323-39)
7. *Shi Qiang Liu, Zhaoyun Lin, Debiao Li et al.* Recent Research Agendas in Mining Equipment Management: A Review // Mining. 2022. Vol. 2. Iss. 4. P. 769-790. DOI: [10.3390/mining2040043](https://doi.org/10.3390/mining2040043)
8. *Dongzhi Gao, Ronggang Han, Tengting Li et al.* Experimental Study on Energy Consumption and Emissions of Heavy-Duty Hybrid Dump Truck // SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility. 2024. Vol. 6. Iss. 4. P. 2359-2365. DOI: [10.4271/2023-01-7014](https://doi.org/10.4271/2023-01-7014)
9. *Kanyepe J.* Transport management practices and performance of diamond mining companies in Zimbabwe // Cogent Business & Management. 2023. Vol. 10. Iss. 2. № 2216429. DOI: [10.1080/23311975.2023.2216429](https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2216429)
10. *Al Habib N., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H.* Short-term planning of open pit mines with Semi-Mobile IPCC: a shovel allocation model // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2023. Vol. 38. Iss. 3. P. 236-266. DOI: [10.1080/17480930.2023.2262823](https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2262823)
11. *Яковлев В.Л., Яковлев В.А.* Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 118-126. DOI: [10.21440/0536-1028-2018-6-118-126](https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-6-118-126)
12. *Дриженко А.Ю.* Развитие теории карьерных горнотранспортных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 10. С. 134-142.
13. *Осинцев Н.А.* Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 5 (96). С. 105-114. DOI: [10.30932/1992-3252-2021-19-5-13](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-13)
14. *Malli T., Mizrak Ozfirat P., Yetkin M.E., Ozfirat M.K.* Truck Selection with the Fuzzy-WSM Method in Transportation Systems of Open Pit Mines // Tehnički vjesnik. 2021. Vol. 28. № 1. P. 58-64. DOI: [10.17559/TV-20190910100025](https://doi.org/10.17559/TV-20190910100025)
15. *Nehring M., Knights P.F., Kizil M.S., Hay E.* A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 2. P. 205-214. DOI: [10.1016/j.ijmst.2017.12.026](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.026)
16. *Shi Qiang Liu, Zhaoyun Lin, Debiao Li et al.* Recent Research Agendas in Mining Equipment Management: A Review // Mining. 2022. Vol. 2. Iss. 4. P. 769-790. DOI: [10.3390/mining2040043](https://doi.org/10.3390/mining2040043)
17. *Бурмистров К.В.* Геотехнологические решения по формированию системы вскрытия глубоких горизонтов карьеров. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова, 2023. 297 с.
18. *Шеико Е.Е., Пестриков О.В.* Обоснование зависимости величины необходимого прижимного усилия на круто-наклонном конвейере с прижимной лентой от его длины и угла наклона // Горный журнал. 2021. № 5. С. 83-87. DOI: [10.17580/gzh.2021.05.10](https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.10)
19. *Babii K., Chetveryk M., Perehudov V. et al.* Features of using equipment for in-pit crushing and conveying technology on the open pit walls with complex structure // Mining of Mineral Deposits. 2022. Vol. 16. Iss. 4. P. 96-102. DOI: [10.33271/mining16.04.096](https://doi.org/10.33271/mining16.04.096)
20. *Minkin A., Börsting P., Becker N.* Pipe Conveying the next Stage: A new Technology for Steep Incline High Capacity Open Pit Conveying // bulk solids handling. 2016. Vol. 36. № 2. P. 16-23.
21. *Чендырев М.А.* Оценка конструктивных параметров наклонных карьерных подъемников // Проблемы недропользования. 2020. № 2. С. 37-49. DOI: [10.25635/2313-1586.2020.02.037](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.037)
22. *Бурмистров К.В.* Разработка геотехнологических решений по сохранению устойчивости функционирования горнорудных предприятий путем поэтапного вскрытия запасов глубоких горизонтов при открытой и комбинированной отработке крутопадающих месторождений: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, 2022. 35 с.
23. *Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N.* Sustainable Open Pit Mining and Technical Systems: Concept, Principles, and Indicators // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 3. № 1101. DOI: [10.3390/su13031101](https://doi.org/10.3390/su13031101)
24. *Saaty T.L.* Decision making with the analytic hierarchy process // Services Sciences. 2008. Vol. 1. № 1. P. 83-98. DOI: [10.1504/IJSSCI.2008.017590](https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590)



25. Leal J.E. AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method // *MethodsX*. 2020. Vol. 7. № 100748. DOI: [10.1016/j.mex.2019.11.021](https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.021)
26. Yazdani-Chamzini A. An integrated fuzzy multi criteria group decision making model for handling equipment selection // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2014. Vol. 20. № 5. P. 660-673. DOI: [10.3846/13923730.2013.802714](https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802714)
27. Blagojević A., Vesković S., Kasalica S. et al. The application of the fuzzy AHP and DEA for measuring the efficiency of freight transport railway undertakings // *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2020. Vol. 3. Iss. 2. P. 1-23. DOI: [10.31181/oresta2003001b](https://doi.org/10.31181/oresta2003001b)
28. Gupta P., Mehawat M.K., Aggarwal U., Charles V. An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry // *Resources Policy*. 2021. Vol. 71. № 101180. DOI: [10.1016/j.resourpol.2018.04.007](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.04.007)
29. Patuicar D., Ecer F., Devci M. Assessment of alternative fuel vehicles for sustainable road transportation of United States using integrated fuzzy FUCOM and neutrosophic fuzzy MARCOS methodology // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 788. № 147763. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.147763](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147763)
30. Stević Ž., Brković N. A Novel Integrated FUCOM-MARCOS Model for Evaluation of Human Resources in a Transport Company // *Logistics*. 2020. Vol. 4. Iss. 1. № 4. DOI: [10.3390/logistics4010004](https://doi.org/10.3390/logistics4010004)
31. Pan Wu, Guoyan Zhao, Yang Li. Green Mining Strategy Selection via an Integrated SWOT-PEST Analysis and Fuzzy AHP-MARCOS Approach // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 13. № 577. DOI: [10.3390/su14137577](https://doi.org/10.3390/su14137577)
32. Яковлев В.Л., Соколов И.В., Саканцев Г.Г., Кравчук И.Л. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений // *Горный журнал*. 2017. № 7. С. 46-50. DOI: [10.17580/gzh.2017.07.08](https://doi.org/10.17580/gzh.2017.07.08)
33. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсозобновляемых технологий // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 5. С. 57-62. DOI: [10.24000/0409-2961-2022-5-57-62](https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-5-57-62)
34. Argimbaev K.R. Technogenic Deposit Reclamation as an Environmental Protection Factor // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14. Iss. 17. P. 6342-6345. DOI: [10.36478/jeasci.2019.6342.6345](https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.6342.6345)
35. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V. et al. Technology for Nonwaste Recovery of Tailings of the Mizur Mining and Processing Plant // *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. Iss. 11-12. P. 1476-1480. DOI: [10.1007/s11015-023-01462-y](https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y)

Авторы: Константин Владимирович Бурмистров, д-р техн. наук, профессор, burmistrov_kv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3433-133X> (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия), Сергей Евгеньевич Гавришев, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-8594-8463> (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия), Вадим Юрьевич Заляднов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5730-1432> (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.