

УДК 622.271.012.33
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223
Шифр специальности ВАК 2.8.8.; 1.6.21

Многокритериальный анализ стратегий устойчивого развития глубоких карьеров

К.В. Бурмистров^{1✉}, Н.А. Осинцев¹, А.Н. Рахмангулов¹, М.Э. Юсупов²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «Маггеопроект», г. Магнитогорск, Россия

✉ k.burmistrov@magtu.ru

Аннотация

Актуальность. Длительные периоды освоения крутопадающих месторождений приводят к необходимости многократного пересмотра вариантов развития горнотехнической системы в течение ее жизненного цикла. Принимаемые решения определяют стратегию развития горнодобывающего предприятия на продолжительный период времени. Сложность принятия таких стратегических решений заключается в необходимости учета большого количества параметров, влияющих на эффективность функционирования предприятий. Оцениваемые параметры оказывают различное влияние на итоговый результат, имеют разнообразные единицы измерения, целевые значения, а также не все параметры могут быть оценены количественно. В таких условиях необходимы новые подходы к выбору стратегии развития горнотехнической системы карьера и ее основной подсистемы – системы вскрытия, основанные на применении многокритериальных методов принятия решений. **Цель:** разработка методики выбора стратегии устойчивого развития горнотехнической системы глубоких карьеров с использованием многокритериальных методов принятия решений на основе оценки параметров системы вскрытия. **Объекты:** горнодобывающее предприятие, горнотехническая система, система вскрытия карьера. **Методы:** обзор научной литературы, системный анализ, многокритериальные методы принятия решений. **Результаты.** Определены основные стратегии развития горнотехнической системы для глубоких карьеров, направленные на достижения устойчивости развития предприятия: изменение параметров текущего этапа разработки; переход на новый этап открытых горных работ; переход на комбинированный способ разработки; прекращение функционирования горнодобывающего предприятия. Обоснована ключевая роль системы вскрытия в структуре горнотехнической системы для обеспечения ее устойчивого развития. Систематизированы основные параметры оценки системы вскрытия, и установлены целевые значения каждого параметра. Выполнен обзор основных многокритериальных методов принятия решений, применяемых для решения различных задач в горнодобывающей отрасли. Для выбора стратегии развития горнотехнической системы предложен ранговый коэффициент, расчет которого основан на применении комбинации многокритериальных методов – fuzzy AHP и CRADIS, соответствующей условиям решаемой задачи. Разработана пошаговая методика выбора стратегии устойчивого развития горнотехнической системы глубоких карьеров. Использование предлагаемого подхода апробировано применительно к условиям выбора стратегии развития горнотехнической системы на карьере Малый Куйбас. Полученные результаты показывают, что наилучшей стратегией, имеющей высший ранг, является переход на комбинированный способ разработки.

Ключевые слова: многокритериальные методы, горнотехническая система, система вскрытия, транспортирование горной массы, глубокий карьер, стратегия развития.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10040, <https://rscf.ru/project/23-21-10040>

Для цитирования: Многокритериальный анализ стратегий устойчивого развития глубоких карьеров / К.В. Бурмистров, Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, М.Э. Юсупов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 76–96. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223

UDC 622.271.012.33

DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223

Multi-criteria analysis of deep pits sustainable development strategy

K.V. Burmistrov¹✉, N.A. Osintsev¹, A.N. Rakhmangulov¹, M.E. Yusupov²

¹ *Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation*

² *LLC «Maggeoproekt», Magnitogorsk, Russian Federation*

✉ k.burmistrov@magtu.ru

Abstract

Relevance. Long periods of development of steeply dipping deposits necessitate multiple adjustments of mining and technical system throughout an open pit life cycle. The decisions made determine the development strategy of a mining enterprise for a long period. The complexity of making such strategic decisions depends on numerous influencing parameters. These parameters have a different impact, have a variety of units of measurement, target values, and are not only quantitative but also qualitative. There is a need for new approaches to the choice of development strategy of the mining and technical system of an open pit, as well as its main subsystem – the opening-up of an opencast system. It is proposed to base these approaches on multi-criteria decision-making methods that consider many influencing parameters. **Aim.** Development of a methodology for choosing a strategy for sustainable development of the deep open pit mining and technical system based on multi-criteria decision-making methods and assessment of the opening system parameters. **Objects.** Mining enterprise, mining and technical systems, opening system. **Methods.** Literature review, system analysis, multi-criteria decision-making. **Results.** The authors have determined the main strategies for development of the mining and technical system for deep open pits. These strategies aim at achieving the sustainable development of the mining and technical system: adjustment of the current stage mining parameters; transition to a new stage of mining; transition to a combined open-underground mining; mine closure. The key role of the opening system in the structure of the mining and technical system is substantiated to ensure its sustainable development. The authors systematized the main parameters for evaluating the pit opening system and set target values for each parameter. A review of the main multi-criteria decision-making methods used to solve various problems in the mining industry is made. A rank coefficient is proposed for choosing the mining and technical system development strategy. The calculation of this coefficient is based on a combination of the fuzzy AHP and CRADIS multi-criteria methods. A method was developed for selecting a strategy for sustainable development of the mining and technical system of deep open pits. A case study was conducted on the conditions of the Maly Kuibas open pit. The obtained results strongly suggest that the best strategy with the highest ranking is the transition to the combined development method.

Keywords: multi-criteria decision making methods, mining and technical system, opening system, rock mass transportation, deep open pit, development strategy.

Acknowledgements: The research was carried out using the RSF grant (project no 23-21-10040, <https://rscf.ru/project/23-21-10040>).

For citation: Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Yusupov M.E. Multi-criteria analysis of deep pits sustainable development strategy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 76–96. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223

Введение

Разработка крупных крутопадающих залежей производится этапами, как правило, в течение нескольких десятилетий. Освоение месторождений такого типа в различные периоды производится открытым, открыто-подземным или подземным способами. Выбор способа разработки и периода перехода с одного способа разработки на другой является стратегической задачей развития горнодобывающего предприятия. Анализ практики разработки крутопадающих месторождений, проектных и научных разработок [1–3] показывает, что до глубины 150–200 м месторождения преимуще-

ственно обрабатываются открытым способом, от 200 до 850 м может применяться как открытый, подземный, так и комбинация данных методов. В исследованиях [4, 5] отмечается, что в перспективе карьеры смогут достигать глубин до 1000 м. На больших глубинах добыча руды возможна только подземным способом. Глубина разработки является важнейшим параметром, определяющим не только способ разработки, но и целесообразность добычи полезного ископаемого в целом. Увеличение глубины карьеров усложняет обеспечение транспортного доступа к залежи, т. к. сложнее становится размещать вскрывающие выработки в про-

странстве карьера. Основную долю затрат в себестоимости добычи руды на глубоких горизонтах составляют расходы на транспортирование горной массы [6, 7]. Горнотехническая система (ГТС) представляет собой совокупность горных конструкций, технических и технологических подсистем открытых, подземных, физико-химических и специальных методов добычи во взаимодействии с вмещающими их участками недр [8]. Поэтому стратегия развития горнотехнической системы во многом определяет устойчивость развития горнодобывающего предприятия в целом [9].

На каждом этапе разработки месторождения собственником рассматривается перспектива развития горнодобывающего предприятия. Несвоевременное принятие решения по выбору стратегии развития горнодобывающих предприятий (ГДП) приводит к дисбалансу распределения полезных ископаемых между открытым и подземным способами разработки, низкой эффективности каждого способа разработки, нецелесообразности отработки оставшихся запасов ни одним из способов [3]. При выборе стратегии освоения месторождения и развития ГДП на отдельных этапах его разработки учитывается ценность разрабатываемой руды, параметры карьера, экономические показатели разработки месторождения, экологические ограничения [2, 3, 10]. Помимо этого, выбранная стратегия развития должна обеспечить непрерывный поток руды с месторождения при переходе на новый этап разработки и достижение проектных технико-экономических показателей функционирования в установленные сроки. Период времени, в течение которого осуществляется переход на новую стратегию разработки месторождения, называется переходным периодом [11]. Данные периоды считаются одними из самых сложных в течение всего срока разработки месторождения [12]. Формирование новой или реконструкция существующей схемы вскрытия с соответствующим транспортным обеспечением горных работ является одной из самых сложных и многовариантных задач в переходный период как при открытом, так и при подземном способе разработки месторождений. Вопросы вскрытия и транспортирования горной массы в [9] рассматривались в рамках системы вскрытия, которая является основной подсистемой ГТС, влияющей на эффективность разработки месторождения. Возможность реализации конкретной стратегии развития горнотехнической системы во многом зависит от параметров и показателей системы вскрытия [9, 13]. Неверно выбранная стратегия повышает риски несвоевременного выхода на проектные показатели, снижения экономических показателей вплоть до закрытия горнодобывающего предприятия.

Наличие множества факторов, влияющих на выбор стратегии развития и показателей оценки [9] ГТС и её подсистем делает целесообразным анализ возможности использования многокритериальных методов принятия управленческих решений применительно к комплексной оценке устойчивого функционирования и развития ГТС и системы вскрытия.

Литературный обзор

Выбор стратегии и ее реализация являются важным шагом для горнодобывающего предприятия, который определит устойчивость его функционирования на несколько десятилетий. Был проведен анализ литературных источников для определения возможных стратегий, применяемых на горнодобывающих предприятиях, факторов, оказывающих влияние на выбор каждой стратегии, а также методов, на основе которых принимается решение по выбору стратегии. Сложность принятия решений состоит в необходимости многокритериального подхода. При этом для разработки стратегических решений по развитию предприятий отмечается мировая тенденция к смещению приоритетов в сторону экологических и социальных аспектов при рассмотрении альтернативных вариантов (Sustainable development, ESG-управление) [14].

Стратегии развития ГТС карьеров в современных условиях

Способы добычи полезных ископаемых, направленные на обеспечение устойчивого развития предприятия, имеют важное значение для долгосрочного здоровья отрасли, поскольку они позволяют горнодобывающим предприятиям удовлетворять свои потребности в полезных ископаемых наиболее социально, экономически и экологически ответственным образом [15]. Стратегия развития ГТС предполагает выбор способа отработки запасов, последовательности применения способов, времени отработки запасов каждым способом и технико-технологических решений для каждого этапа разработки.

Крутопадающие месторождения могут отрабатываться 20–50 лет и более [7]. В течение данного периода на месторождении последовательно могут реализовываться несколько этапов открытых горных работ, открыто-подземные горные работы и подземный способ разработки. Продолжительность каждого отдельного этапа в соответствии с [15] составляет до 20 лет.

В течение запроектированного этапа могут пересматриваться некоторые технологические решения. Наиболее часто новые решения связаны с изменениями в процессе транспортирования горной массы, особенно при освоении запасов глубоких

горизонтов карьера [9, 16]. Переход на новый вид транспорта может происходить в течение длительного времени и предполагает также изменение параметров вскрывающих выработок и транспортных коммуникаций, т. е. производится изменение системы вскрытия. Под *системой вскрытия* понимается подсистема горнотехнической системы, предназначенная для обеспечения доступа к месторождению или его локальному участку, формирования и реализация грузопотоков полезного ископаемого, вскрываемых пород, оборудования и материалов, состоящая из вскрывающих выработок, транспортных средств и устройств, внутрикарьерных пунктов перегрузки горной массы [17].

Стратегия перехода на новый этап открытых горных работ предполагает изменение параметров карьера на конец отработки. Главный параметр, который изменяют, – конечная глубина карьера. Для увеличения глубины требуется расширение размеров карьеров по поверхности. При переходе с одного этапа открытых горных работ на другой необходимо изменять параметры рабочего и нерабочего бортов карьера [18], а также параметры вскрывающих выработок и эксплуатации карьерного транспорта [19]. В период перехода с одной стратегии на другую необходимо обеспечить беспрерывную добычу руды, так как остановка добычных работ может негативно сказаться на экономических показателях предприятия, вплоть до его закрытия [20].

С другой стороны, на определенном этапе разработки под воздействием влияющих внешних и внутренних факторов возможен вариант целенаправленной реализации стратегии развития путем прекращения функционирования ГДП. Сформированное пространство карьера в данном случае может быть рекультивировано различными способами [21], а также использовано для размещения промышленных отходов [22]. Такая стратегия характеризуется низкой экономической эффективностью, но при этом обеспечиваются наилучшие экологические показатели.

Большинство исследователей, занимающихся вопросами выбора оптимальной стратегии разработки глубоких залежей, сходятся во мнении, что для верхней части месторождения предпочтителен открытый способ разработки ввиду многих его достоинств, а нижнюю часть месторождения целесообразно обрабатывать подземным способом. Месторождения, которые залегают под мощной толщей покрывающих пород, обрабатываются только подземным способом [23].

В рамках выбранной стратегии месторождение полезных ископаемых может обрабатываться различными способами одновременно, неодновременно, последовательно или в любой из этих комбина-

ций [24]. Выбор стратегий развития горных работ зависит прежде всего от возможностей предприятия и внешнеэкономического состояния в отрасли [25, 26].

В исследованиях [1, 2] говорится, что в зависимости от вида полезного ископаемого и горнотехнических условий разработки месторождений оптимальная глубина перехода на подземный способ разработки составляет 150–200 м. Опыт открыто-подземной разработки некоторых предприятий [8] также показывает, что переход к подземному способу разработки может осуществляться при достижении карьерами глубин 100–150 м. В работе [27] отмечается, что глубина перехода на открыто-подземную разработку может составлять и 1100 м.

В [10] отмечается, что предельная глубина перехода, в зависимости от ценности полезного ископаемого, может превышать 830 м. В [28] также говорится, что чем выше содержание и крупнее месторождение, тем экономически более выгодна добыча открытым способом на большие глубины, чем можно было бы рассматривать для месторождений с более низким содержанием или меньшего размера. В [29] предлагается в качестве основных показателей, влияющих на выбор стратегии отработки месторождения, учитывать содержание полезного компонента в руде и интенсивность горных работ.

При выборе стратегии развития ГТС необходимо учесть все ограничения и факторы, которые имеют прямое и удаленное влияние на экономическую и техническую осуществимость проекта [30].

В последнее время все более значительное внимание при выборе стратегии развития горнотехнических систем уделяется вопросам экологии. В [31] отмечают, что вопросы экологической устойчивости при добыче полезных ископаемых имеют важнейшее значение для отдельных регионов, где необходимо находить баланс между экономическими, экологическими и социальными проблемами. Ряд исследователей считает, что одним из самых перспективных направлений в горной отрасли является «green mining» [15] и «climate-smart mining» [32]. В работе [33] выполнен анализ интеграции устойчивого развития в жизненный цикл горнодобывающей промышленности. В работе [34] предложена оценка стратегического планирования в горнодобывающих регионах с учетом социальных, экологических и экономических последствий. В [35] отмечается, что экологические факторы необходимо учитывать при обосновании параметров карьеров.

На выбор стратегии может повлиять территория, на которой располагается месторождение. В [36] отмечается, что доля открытых и подземных работ различается в разных странах. Так, например, в США преобладают открытые горные работы, а в

Швеции – подземные. Детали оценочных исследований для проекта по добыче полезных ископаемых зависят в основном от стадии жизненного цикла рудника и преобладающих нормативных требований региона [30].

В [37] указали, что полная модель для решения проблемы перехода остается проблемой, они также считали, что исследование перехода для рудника должно начинаться в начале срока эксплуатации и не откладываться на последние годы, поскольку планирование и реализация иногда могут занимать до 20 лет.

Таким образом, выбор стратегии устойчивого развития ГТС является достаточно сложной задачей, на решение которой оказывает влияние значительное количество различных факторов.

Факторы устойчивого развития ГТС

Горнодобывающие предприятия являются сложными социально-техническими системами, оказывающими значительное влияние на социальное и экономическое развитие регионов их расположения. При этом их деятельность связана с существенным негативным воздействием на окружающую среду. Горнотехническая система ГДП постоянно находится под влиянием изменяющихся внешних и внутренних факторов, которые могут позитивно или негативно влиять на устойчивость ее функционирования и развития.

В [9, 38] отмечается, что на ГТС и её подсистемы оказывает влияние множество экономических, экологических, социальных и организационно-технологических факторов.

Предлагаемая в [15] модель включает три фактора (безопасность, высокая эффективность и влияние на окружающую среду), девять критериев и 35 индикаторов.

В [39] обоснованы пять групп факторов (экономические, социальные, технические, управленческие, экологические) оценки рисков при реализации проектов в золотодобывающей промышленности.

В [40] выявлены факторы, влияющие на репутацию горнодобывающей отрасли среди заинтересованных сторон. В [30] установлено, что экологические проблемы преобладают над экономическими.

В [41] рассмотрена система чистого производства в горнодобывающей промышленности. На стратегию развития системы влияют три уровня: обучение, планирование и проектирование, добыча и переработка полезных ископаемых.

В [42] выделяют девять факторов, влияющих на устойчивость развития горнодобывающего предприятия. Авторами выделено три группы факторов устойчивого развития: технико-экономические – 23; экологические – 10; социальные – 17.

По мнению авторов [43], на выбор стратегии влияют такие факторы, как прогрессивность технологии, устойчивость решения по внешним факторам, устойчивость по внутренним факторам, экономическая привлекательность. В основу оценки стратегии горного предприятия положено 14 факторов [44, 45] и применение SWOT анализа.

В [46] отмечается, что при разработке стратегий развития компаний необходимо руководствоваться ESG-принципами.

В [47] на различных стадиях оценки месторождения для выбора стратегии освоения рассматриваются модифицирующие факторы, включающие горнодобывающие, перерабатывающие, металлургические, инфраструктурные, экономические, маркетинговые, правовые, экологические, социальные и государственные факторы.

В [30] некоторые из факторов, которые необходимо учитывать при выборе стратегии отработки месторождения, включают: размер, форму и глубину залежи; геологическую формацию и геомеханические условия; производственные мощности и мощности оборудования; наличие квалифицированной рабочей силы; требования к капитальным и эксплуатационным затратам; извлечение и выручку от переработки руды; безопасность и травмы; воздействие на окружающую среду во время и после добычи; требования и затраты на рекультивацию и восстановление; социальные и культурные потребности.

При выборе между открытым и подземным способами добычи автор [30] предлагает учитывать множество факторов, таких как: а) размер, форму и глубину залежи; б) горные породы; в) производственные мощности и машинные мощности; г) требования к капиталу и операционные расходы, ставку дисконтирования, инвестиции, амортизацию и износ; д) извлечение руды и доходы; е) безопасность и травмы; ж) экологические аспекты. В дополнение к данным факторам автор [48] предлагает учитывать энергоэффективность, психологические факторы, потери и разубоживание руды, производственный потенциал и развитие производительности.

На продолжительность реализации стратегии оказывают влияние: вид полезного ископаемого, экономическая эффективность, период окупаемости инвестиций, обеспеченность предприятия запасами, производственная мощность предприятия, технические и технологические возможности предприятия, прогноз рыночной конъюнктуры, срок службы основных фондов, сырьевая зависимость предприятия, социальные аспекты, риски [49]. Если добыча полезных ископаемых была остановлена и осуществляется выбор стратегии возобновления работ, то по мнению [37] влияние окажут следующие

щие факторы: глубина, остаточные запасы, качество, количество попутных пород, производительность, социальные проблемы и человеческий фактор, экономики показатели, воздействие на окружающую среду, гидрологию и состояние грунтовых вод. Рассматриваемые исследователями факторы были распределены на пять групп (табл. 1).

Значительное внимание при выборе и реализации стратегии устойчивого развития уделяется энергетической эффективности производства. Наиболее энергозатратным процессом горного производства является транспортирование горной массы, которое по величине энергозатрат превосходит ближайший процесс взрывания более чем в 4 раза [50]. Одним из вариантов улучшения энергоэффективности горного производства является рациональное планирование работы самосвалов [51], изменение вида потребляемой самосвалами энергии [52], изменение вида транспорта [53], использование роботизированных транспортных комплексов [54]. При выборе вариантов устойчиво-

го развития территорий иногда закрытие горнодобывающих предприятий, добывающих энергетический уголь, перевод производств на другие, более зеленые, виды топлива, восстановление земель, нарушенных горными работами, рассматриваются как направления улучшения экологической и социальной устойчивости [21, 55].

Наличие множества факторов, влияющих на выбор стратегии устойчивого развития ГТС и её подсистем, делает целесообразным использование многокритериальных методов принятия управленческих решений применительно к комплексной оценке устойчивого функционирования и развития ГТС.

Обзор методов принятия решений

В горнодобывающей отрасли использование MCDM (Multi-Criteria Decision Making) получило широкое признание в таких областях применения, как добыча и обогащение полезных ископаемых. Для решения разных задач используются разнообразные MCDM [38].

Таблица 1. Группы факторов, определяющих выбор стратегии развития горнодобывающих предприятий
Table 1. Groups of factors for choosing a mining enterprises development strategy

Группы факторы Groups of Factors	Примеры факторов Factor examples
Технические Technical	<ul style="list-style-type: none"> • технико-экономические/technical and economic factors [42], • производственные мощности и машинные мощности/production and machine capacities [30], • технические возможности предприятия/technical capabilities [49], • эксплуатационные/operational [39]
Технологические Technological	<ul style="list-style-type: none"> • проектирование и планирование горных работ и переработки полезных ископаемых planning and design, mining, and mineral processing [41], • прогрессивность технологии/advanced technologies [43], • энергоэффективность, потери и разубоживание руды, производственный потенциал и развитие производительности/energy efficiency, ore loss and dilution, production capacity, production potential and productivity development [48], • производственная мощность предприятия, технологические возможности предприятия technical and technological capabilities of an enterprise [49], • глубина ведения горных работ/mining depth [37]
Экономические Economic	<ul style="list-style-type: none"> • эффективность/economic efficiency [15], • экономика/economics [39], • управление/management [47], • требования к капиталу и операционные расходы, ставка дисконтирования, инвестиции, амортизация и износ capital and operating expenses, discount rate, investments, depreciation [40], • экономическая привлекательность/economic attractiveness [43], • экономическая эффективность, период окупаемости инвестиций, обеспеченность предприятия запасами, прогноз рыночной конъюнктуры, срок службы основных фондов, сырьевая зависимость предприятия economic efficiency, payback period, availability of raw materials, forecast of raw material dependence, useful life of fixed assets, raw material dependence of the enterprise [49]
Социальные Social	<ul style="list-style-type: none"> • безопасность/work safety [15], • социальные проблемы и человеческий фактор/social issues and human factors [37], • репутация горнодобывающей отрасли с точки зрения заинтересованных сторон reputation of the mining industry from a stakeholder perspective [40], • психологические факторы/psychological factors [48], • социальные аспекты и риски/social aspects, risks [49], • социальные и государственные/government factors [47]
Экологические Environmental	<ul style="list-style-type: none"> • влияние на окружающую среду/impact on the environment [15], • экологические аспекты/environmental influence [40], • гидрогеологические условия и состав грунтовых вод/hydrology and groundwater conditions [37], • система чистого производства на горнодобывающих предприятиях/mining clean production system [41]

В работе [56] выполнен анализ применения классических MCDM (AHP – Analytic Hierarchy Process, ANP – Analytic Network Process, TOPSIS – Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, PROMETHEE – Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations и ELECTRE – Elimination and Choice Expressing the Reality) в горном деле по четырем основным направлениям: выбор горного оборудования, выбор метода добычи, выбор технологии добычи и выбор минерального сырья участка добычи. Установлено, что наиболее распространенным MCDM является AHP, а областью применения MCDM – проблема выбора способа добычи. В обзоре [57] выделены пять основных областей использования MCDM в управлении цепочкой поставок в горнодобывающей отрасли: планирование мощности, логистика, управление запасами, сетевое проектирование, экономические вопросы. В качестве основных подходов используются AHP, ISM (Interpretive Structural Modeling), DEMATEL (DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory), DEA (Data Envelopment Analysis), а также методы теории игр, математическое программирование и метаэвристические алгоритмы.

В работе [58] выполнено сравнение 10 MCDM при выборе способов добычи полезных ископаемых. В [59] разработано мобильное приложение для выбора способа подземной добычи для рудника с использованием различных MCDM (TOPSIS, VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje), ELECTRE, FMADM (Fuzzy Multi-Attribute Decision Making) и PROMETHEE).

Ряд работ посвящены использованию MCDM для оценки препятствий реализации модели замкнутой экономики в горнодобывающей промышленности. Для анализа барьеров в [60] используют метод AHP, а в [61] комбинированный ISM-DEMATEL метод. В [62] теория игр применяется для анализа и улучшения экологического менеджмента в горнодобывающей промышленности. Для выигрышных функций игроков рекомендуется использовать многокритериальный подход.

В [63] представлена интеграция проектного мышления и MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) для устойчивого развития горнодобывающей промышленности. В [64] исследуются движущие силы внедрения корпоративной социальной ответственности для устойчивого развития горнодобывающей промышленности с применением MCDM.

Результаты выполненного анализа показывают:

1. На выбор стратегии развития ГТС оказывает влияние большое количество факторов, которые могут быть объединены в следующие группы: технические, технологические, социальные, экономические и экологические.

2. Основной подсистемой горнотехнической системы, влияющей на устойчивость функционирования и развития ГТС, является система вскрытия.
3. Для сформулированных групп факторов необходимо определить основные параметры, влияющие на устойчивость функционирования системы вскрытия, выбрать и определить основные возможные стратегии развития ГТС и выбрать метод принятия итогового решения.

Модели и методы

Разработка вариантов стратегий развития ГТС

Одним из определяющих факторов выбора стратегии развития ГТС является глубина ведения горных работ. Был выполнен анализ распределения по глубине разработки крутопадающих месторождений открытым, подземным и открыто-подземным способом на примере более 100 ГДП, разрабатывающих месторождения в разных странах (рис. 1).

На рис. 1 видно, что при глубине разработки до 200 м выбор стратегии не представляет сложности, т. к. до данной глубины реализуется преимущественно стратегия открытых горных работ (ОГР) – 73,1 % от работающих на данной глубине, открыто-подземная разработка – 26,9 %. Вскрытие до данной глубины производится наклонными траншеями с использованием автомобильного транспорта. Безальтернативным будет выбор стратегии при глубине разработки свыше 1000 м, т. к. на данных глубинах практически возможна только реализация стратегии подземного способа разработки (ППР) – 88,9 % от всех вариантов, 11,1 % открытый способ. Вскрытие на таких глубинах производится наклонными и вертикальными подземными выработками. Самая многочисленная по числу предприятий и глубине разработки является зона в диапазоне глубин от 200 до 1000 м, на которой может быть выбрана любая возможная стратегия: 61,9 % – открытый способ, 17,5 % – открыто-подземный и 20,6 % – подземный. В данном диапазоне глубин реализуются варианты вскрытия наклонными, крутыми траншеями и подземными выработками с перемещением пород средствами цикличного и циклично-поточного транспорта. В [65] такая зона называется переходная – это территория, где экономически целесообразно добывать руду открытым или подземным способом. На определенном этапе многие карьеры, которые в настоящее время находятся в зоне до 200 м, приблизятся к зоне 200–1000 м, и для таких предприятий выбор стратегии будет являться сложной и очень важной задачей, определяющей устойчивость их развития на последующие десятилетия.

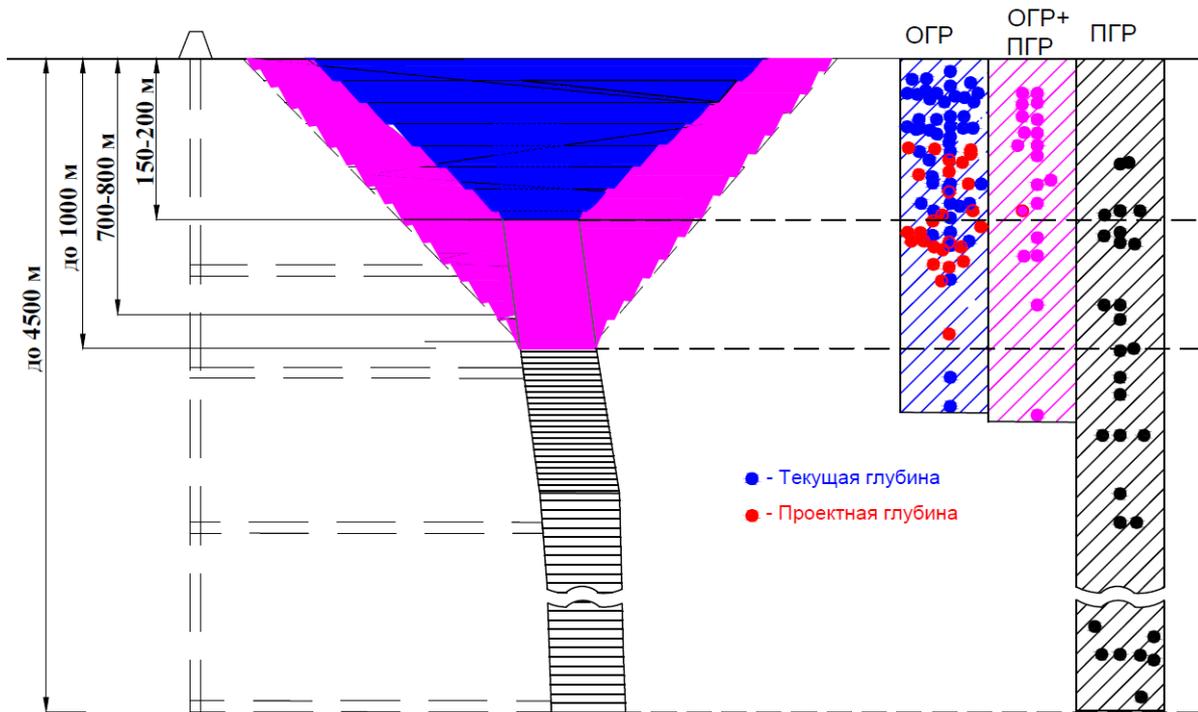


Рис. 1. Схема распределения предприятий по способам и глубинам отработки крутопадающих месторождений
Fig. 1. Scheme of distribution of mining enterprises by depth and methods of mining steeply falling deposits

Внутри каждого диапазона глубин, представленного на рис. 1, могут выделяться отдельные этапы разработки, характеризующиеся определенной глубиной и сроком разработки, производительностью по руде и вскрыше, комплексом применяемого оборудования, технологическими решениями по вскрытию месторождения и добыче полезного ископаемого [66].

Специфика функционирования горнодобывающих предприятий связана не только с тем, что они находятся в конкурентной среде, но и с тем, что они работают с природными ресурсами, на изначальное качество, объем и свойства которых повлиять невозможно. Поэтому выбранная стратегия развития для ГДП в первую очередь направлена на выбор эффективного способа разработки запасов месторождения на протяжении определенного планируемого промежутка времени, а в дальнейшем, когда месторождение уже разрабатывается, в зависимости от результатов эксплуатационной разведки и ситуации на рынках минерального сырья, оценивается целесообразность перехода на новый этап или способ разработки.

На основе выполненного литературного обзора были определены следующие стратегии, направленные на достижения устойчивости развития ГТС в переходный период: изменение параметров текущего этапа разработки; переход на новый этап ОГР; переход на комбинированный способ разработки; прекращение функционирования ГДП.

Сложность оценки развития ГТС заключается в недостаточно исследованных взаимосвязях показателей и параметров подсистем ГТС, а также в отсутствии методик комплексной оценки множества параметров и показателей ГТС.

Систематизация параметров и показателей устойчивости развития ГТС

Наличие множества параметров и показателей оценки ГТС и её подсистем делает целесообразным анализ возможности использования многокритериальных методов принятия управленческих решений применительно к комплексной оценке устойчивого развития ГТС и системы вскрытия.

Определяющее значение для устойчивого развития ГТС при реализации каждой стратегии имеет создание транспортного доступа к ресурсам и организация процесса транспортирования горной массы. Этот процесс является самым экономически затратным, до 70 % эксплуатационных затрат и до 50 % капитальных расходов, в организации процесса задействовано до 50 % рабочего персонала горнодобывающего предприятия, более 50 % единиц карьерной техники, а также данный процесс оказывает наибольшее воздействие на окружающую среду. Поэтому создание схемы вскрытия и организация процесса транспортирования объединены одной системой – системой вскрытия [9]. Параметры и показатели функционирования системы вскрытия оказывают наибольшее влияние на устойчивость ГТС.

Таблица 2. Систематизация параметров и их групп, определяющих устойчивость функционирования и развития системы вскрытия карьера

Table 2. Systematization of parameters and their groups that determine functioning and development stability of the pit opening system

Группа факторов Groups of factors	Группы параметров Groups of parameters	Параметры и показатели Parameters and indicators	Целевая функция Goal
Технические Technical	Вид транспорта (P1) Mining transport (P1)	Один вид/Mono transport (P1.1)	min
		Комбинированный транспорт/Combined transport (P1.2)	max
Технологические Technological	Производительность транспортного комплекса (P2) Performance of mining transport (P2)	Количество транспортных средств/Number of transport vehicles (P2.1)	min
		Производительность транспортного средства Performance of mining transport (P2.2)	max
		Количество перегрузочных пунктов в карьере Number of transshipment points in an open pit (P2.3)	min
		Производительность перегрузочного пункта Performance of transshipment points in an open pit (C2.4)	max
	Приведенная транспортная работа (P3) Transport work (P3)	Расстояние транспортирования/Transportation route length (P3.1)	min
		Высота подъема горной массы/Height of rock mass transportation (P3.2)	min
	Объем вскрываемых выработок (P4) Volume of mine opening (P4)	Объем перевозок/Traffic volume (P3.3)	min
		Глубина вскрываемой части карьера/Height of opening-up (P4.1)	min
		Ширина (сечение) выработки/Width of opening-up (P4.2)	min
		Протяженность (уклон) выработки Length of opening-up (road slope) (P4.3)	min
Экономические Economic	Период использования системы вскрытия (P5) Useful life of opening-system (P5)	Продолжительность формирования системы вскрытия Duration of formation of opening system (P5.1)	min
		Продолжительность этапа разработки/Mine period (P5.2)	max
		Число этапов разработки/Number of mine periods (P5.3)	max
	Экономическая эффективность (P6) Economic efficiency (P6)	Капитальные затраты/Capital cost (P6.1)	min
		Эксплуатационные затраты/Operating cost (P6.2)	min
	Совокупный доход/Total income (P6.3)	max	
Социальные Social	Социальная эффективность (P7) Social efficiency (P7)	Производительность труда/Working efficiency (P7.1)	max
		Условия работы персонала/Staff working conditions (P7.2)	max
		Уровень автоматизации и роботизации процесса транспортирования Level of automation and robotization of transportation (P7.3)	max
Экологические Environmental	Экологическая эффективность (P8) Environmental efficiency (P8)	Объемы выбросов загрязняющих веществ/Air pollution (P8.1)	min
		Объем образующихся отходов/Quantity of waste (P8.2)	min

Учитывая практику эксплуатации и реконструкции системы вскрытия на действующих ГДП и анализ научных трудов, посвященных вопросам эффективности эксплуатации карьерного транспорта и разработки оптимальных вариантов схем вскрытия, в настоящей работе выполнена систематизация параметров и показателей системы вскрытия. В основу систематизации положен функциональный подход с выделением пяти групп факторов: технические, технологические, экономические, социальные и экологические. Предлагается двухуровневая оценка факторов с использованием 8 групп параметров и 23 параметров и показателей (табл. 2) [38]. Первый уровень иерархии учитывает параметры оценки системы вскрытия при взаимодействии с ГТС и внешней средой. Ко второму уровню иерархии отнесены специфические параметры и показатели функционирования системы вскрытия.

Предлагаемая система параметров и показателей позволяет выполнять комплексную оценку системы вскрытия с учетом требований концепции устойчивого развития и обеспечения проектных показателей функционирования ГТС при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Методика выбора стратегии устойчивого развития горнотехнической системы карьера с использованием MCDM

Оценку системы вскрытия, а также выбор стратегии освоения крутопадающих месторождений предлагается производить с использованием комплексного критерия эффективности, в качестве которого использовался ранговый коэффициент, позволяющий учитывать обоснованное в исследованиях количество параметров, качественную и количественную их величину, а также целевую функцию каждого параметра [17]. Расчет рангового коэффициента основан на применении комбинации двух многокритериальных методов – fuzzy AHP (FAHP) и CRADIS. Итоговый ранг для каждой стратегии устанавливается по значению рассчитанной функции полезности.

Метод CRADIS [67] предназначен для определения отклонений альтернатив от идеального и антиидеального решения. Этот метод представляет собой комбинацию шагов из трёх методов: TOPSIS (Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [68], ARAS (Additive Ratio ASessment) [69] и MARCOS (Measurement of

Alternatives and Ranking according to COMpromise Solution) [70]. Метод CRADIS (Compromise Ranking of Alternatives from Distance to the Ideal Solution) не является новым методом, это новый подход к использованию шагов из существующих методов в уникальную комбинацию. В этом методе используются идеальные решения, которые представляют собой максимальное значение идеального решения альтернативы, т. е. минимальное значение альтернативы при наблюдении альтернатив по всем критериям.

Основные этапы метода CRADIS.

Этап 1. Формирование исходной матрицы принятия решений, состоящей из определённого набора n критериев и m альтернатив

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Этап 2. Нормализация исходной матрицы принятия решений (X). Нормализованная матрица N получается с использованием следующих выражений:

$$N = [n_{ij}]_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j\max}} \quad \text{если } j \in C, \quad (3)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{j\min}}{x_{ij}} \quad \text{если } j \in B. \quad (4)$$

Этап 3. Расчёт взвешенной матрицы. Взвешенная матрица V создаётся путем произведения значений элементов нормализованной матрицы n_{ij} на соответствующие весовые коэффициенты критериев w_j

$$V = [v_{ij}]_{m \times n}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

$$V = n_{ij} \times w_j, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w_j = 1. \quad (7)$$

Этап 4. Определение идеального и антиидеального решения. Расчёт идеального решения t_i осуществляется определением наибольшего значения v_{ij} во взвешенной матрице решений, а расчёт антиидеального решения t_{ai} – определением наименьшего значения v_{ij} во взвешенной матрице решений:

$$t_i = \max v_{ij}, \quad (8)$$

$$t_{ai} = \min v_{ij}. \quad (9)$$

Этап 5. Расчет отклонений от идеальных и антиидеальных решений

$$d^+ = \max t_i - v_{ij}, \quad (10)$$

$$d^- = v_{ij} - \min t_{ai}. \quad (11)$$

Этап 6. Расчет степени отклонения индивидуальных альтернатив от идеальных и антиидеальных решений

$$s_i^+ = \sum_{j=1}^n d^+, \quad (12)$$

$$s_i^- = \sum_{j=1}^n d^-. \quad (13)$$

Этап 7. Расчет функции полезности для каждой альтернативы по отношению к отклонениям от оптимальных альтернатив.

$$K_i^+ = \frac{s_0^+}{s_i^+}, \quad (14)$$

$$K_i^- = \frac{s_i^-}{s_0^-}, \quad (15)$$

где s_0^+ – оптимальная альтернатива с наименьшим расстоянием от идеального решения, s_0^- – оптимальная альтернатива, максимально удаленная от антиидеального решения.

Этап 8. Ранжирование альтернатив. Окончательное ранжирование получается путем поиска среднего отклонения альтернатив от степени полезности

$$Q_i = \frac{K_i^+ + K_i^-}{2}. \quad (16)$$

Ранжирование альтернатив основано на окончательных значениях функций полезности Q_i . Наилучшей альтернативой считается альтернатива с максимальным значением функции полезности.

Для выбора стратегии устойчивого развития ГТС была разработана методика, основными этапами которой являются:

1. Анализ факторов устойчивого функционирования и развития ГТС с целью формирования стратегии развития ГТС при отработке месторождения.
2. Декомпозиция ГТС и определение доли системы вскрытия в структуре ГТС: по капитальным и эксплуатационным затратам, количеству персонала и оборудования, объемам выбросов загрязняющих веществ и образованию отходов.

3. Обоснование параметров и показателей оценки ГТС и системы вскрытия и расчет их веса на основе использования нечеткого метода аналитического иерархического процесса (FAHP).
 4. Формирование перечня возможных стратегий устойчивого развития ГТС.
 5. Оценка и выбор стратегии устойчивого развития ГТС с использованием метода CRADIS.
 6. Расчет показателей экономической эффективности реализации принятой стратегии.
- Принципиальная схема методики выбора стратегии устойчивого развития ГТС представлена на рис. 2.

Выбор стратегии развития ГТС на примере карьера

Исходные данные

В качестве примера предприятия для выбора стратегии устойчивого развития рассмотрен железорудный карьер Малый Куйбас. Добыча руды

производится открытым способом с 1973 г. В настоящее время открытые горные работы близки к завершению. Глубина карьера на конец отработки составит 310 м. Запасы руды разведаны до глубины 1000 м. Для данного карьера в разное время рассматривались различные стратегии развития горнотехнической системы [38]. Для всех рассматриваемых стратегий одной из самых сложных и многовариантных задач является выбор перспективной системы вскрытия.

В настоящее время на месторождении ведется добыча руды открытым способом.

Углубление карьера и увеличение затрат на доставку горной массы автомобильным транспортом снижает эффективность и устойчивость функционирования и развития горнотехнической системы. Поэтому были рассмотрены четыре стратегии обеспечения устойчивого развития ГТС:

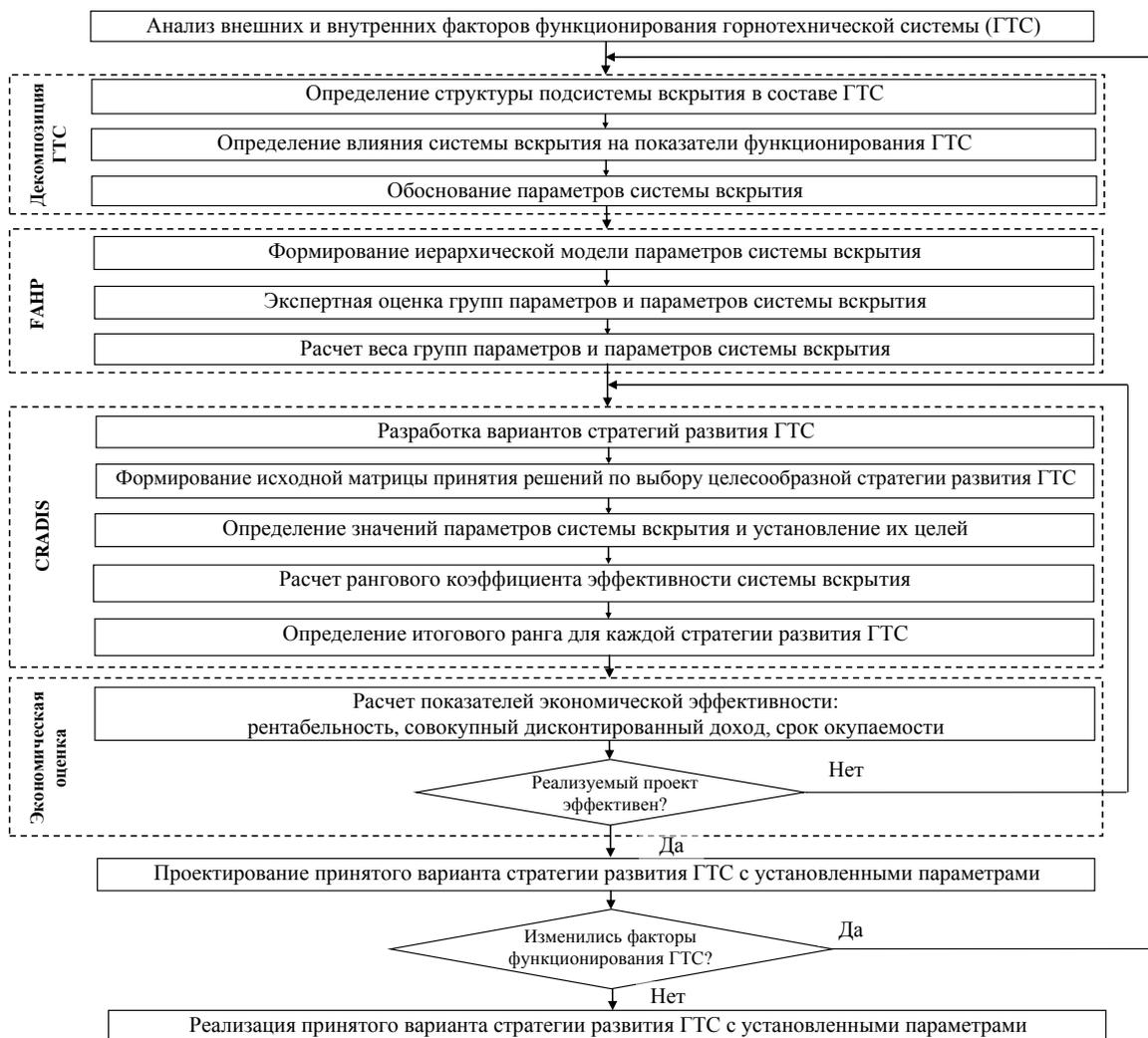


Рис. 2. Схема методики выбора стратегии устойчивого развития ГТС с использованием FAHP-CRADIS
Fig. 2. Scheme of methodology for choosing a strategy for the mining and technical system (MTS) sustainable development by the FAHP-CRADIS method

- изменение параметров текущего этапа (С1) – проектные контуры карьера не изменяются либо корректируются незначительно. В большинстве случаев изменяется производительность карьера, состав оборудования (выемочно-погрузочных или транспортных средств), а также корректируется схема вскрытия, параметры системы разработки;
- переход на новый этап открытых горных работ (С2) – осуществляется вовлечение в разработку дополнительных запасов полезного ископаемого. Изменяются проектные решения – увеличиваются параметры карьера в глубину и в плане, пересматривается производительность предприятия, производятся соответствующие изменения горнотранспортного оборудования и технологии производства горных работ;
- переход на открыто-подземный способ разработки (С3) – производится строительство подземного рудника. Характерной особенностью комбинированной разработки является наличие единого технологического пространства карьера и подземного рудника, функционирование которых должно обеспечивать рациональную взаимосвязь горных технологий карьера и шахты в единой технологической схеме освоения запасов месторождения;
- прекращение функционирования ГДП (С4) – предполагает временное или полное прекращение добычи полезного ископаемого на место-

рождении. Сформированное техногенное пространство может использоваться для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых: размещения отходов добывающей и перерабатывающей отраслей, размещения промышленных объектов различного назначения, а также в рекреационных целях.

В табл. 3 представлены результаты оценки проектных решений по показателям С1.1–С8.2, полученные по итогам выполненных для данного объекта научно-исследовательских работ [71–73]. Значения параметров P₂₂, P₃₁, P₃₂, P₃₃, P₄₁, P₄₂, P₄₃, P₅₁, P₅₂, P₅₃, P₆₁, P₆₂, P₇₁ являются количественными и были определены в результате выполненных расчетов. Значения параметров P₁₁, P₁₂, P₂₃, P₂₄, P₇₂, P₇₃, P₈₁, P₈₂ имеют качественную бальную оценку. Оценка производилась по 5 бальной шкале с привлечением руководителей и специалистов предприятия. Наилучшее значение показателя для рассматриваемой альтернативы приравнивалось к 5 баллам, наихудшее – 1 балл, 2, 3, 4 – промежуточные результаты.

Вес параметров и показателей устойчивого развития ГТС был принят на основе исследования [13]. Было рассмотрено три варианта: оценка академическими экспертами, экспертами горнодобывающих предприятий и обобщенная оценка. Итоговые весовые коэффициенты показателей P1.1–P8.2 представлены на рис. 2.

Таблица 3. Результаты оценки стратегий развития ГТС на примере карьера Малый Куйбас
Table 3. Results of evaluation of the MTS development strategies for the Malyi Kuibas open pit

Показатели Indicators	Ед. изм. Unit	Стратегии развития ГТС MTS development strategies			
		C1	C2	C3	C4
P1.1	доли ед./fraction units	4,08	3,95	1,89	3,44
P1.2	доли ед./fraction units	1,74	2,70	4,32	2,76
P2.1	шт./units	47	55	5	2
P2.2	млн т/год/million tons per year	0,48	0,53	0,32	0,7
P2.3	доли ед./fraction units	2,64	2,99	3,98	1,38
C2.4	млн т/год/million tons per year	2,759	2,605	4,129	1,821
P3.1	км/kilometers	4,1	7,3	1,5	2
P3.2	м/meters	470	550	290	470
P3.3	млн т/год/million tons per year	22	24	2,7	0,5
P4.1	м/meters	210	180	100	0,1
P4.2	м/meters	27	29	21	19
P4.3	м/meters	3400	2925	1625	500
P5.1	лет/years	10	15	6	1
P5.2	лет/years	10	15	25	30
P5.3	шт./units	1	2	1	1
P6.1	млн р./million rubles	265,58	1623,9	10572	37
P6.2	млн р./год/million rubles/year	217,3	312,4	722,92	52
P6.3	млн р./million rubles	103	918,69	1110,92	130,5
P7.1	тыс. т/чел. год/thousand tons/person year	19,23	19,1	5,12	5,8
P7.2	доли ед./fraction units	3,44	2,29	2,95	2,09
P7.3	доли ед./fraction units	2,86	1,64	3,56	1,78
P8.1	доли ед./fraction units	2,22	3,13	2,61	1,97
P8.2	доли ед./fraction units	2,49	4,57	1,89	1,15

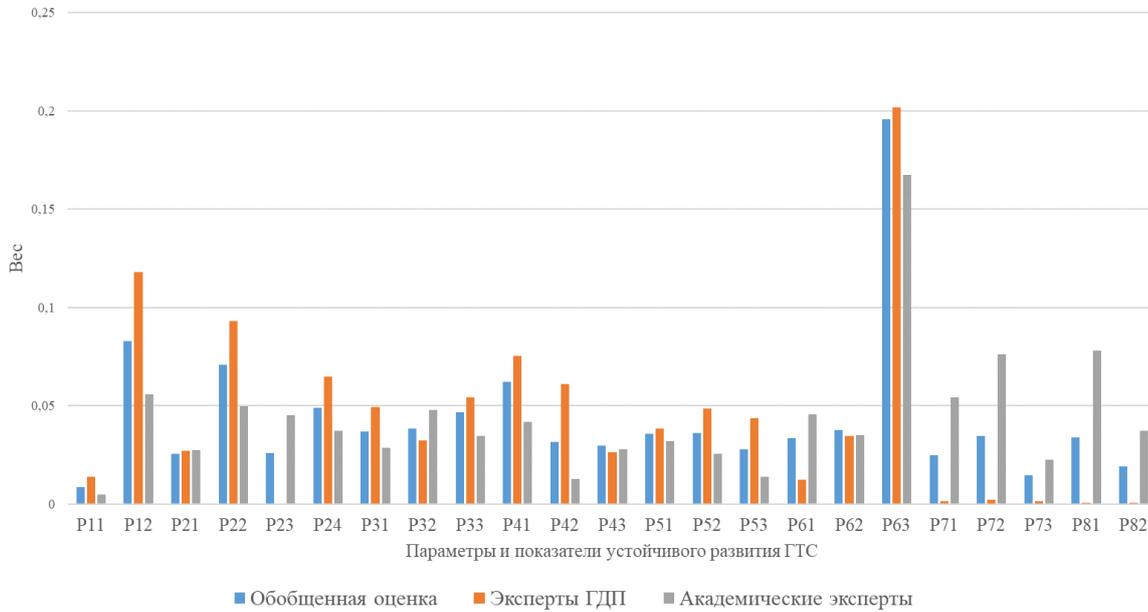


Рис. 3. Вес параметров и показателей ГТС [13]
Fig. 3. Weight of MTS parameters and indicators [13]

Расчетный пример выбора стратегии развития для действующего карьера

Разработанная многокритериальная модель выбора стратегии устойчивого развития ГТС карьера Малый Куйбас состоит из 23 параметров и показателей (P1.1–P8.2) и четырех альтернатив – стратегии С1–С4.

Первоначально формируется исходная матрица принятия решений с использованием формулы (1) (табл. 4).

Следующим этапом выполняется нормализация исходной матрицы с использованием формул (2)–(4) и взвешенной нормализованной матрицы по формулам (5)–(7). Взвешенная нормализованная матрица получается путем произведения всех значений нормализованной матрицы на весовые значения критериев, рассчитанных с использованием метода ФАНП и представленных на рис. 3. В табл. 5 представлены нормализованная и взвешенная нормализованная матрицы по результатам усреднённой оценки экспертов.

После определения идеального и антиидеального решений (формулы (8), (9)) во взвешенной мат-

рице рассчитываются отклонения от идеального и антиидеального решений (формулы (10), (11)), а также степени отклонения S-, S+ (формулы (12), (13)) и функции полезности K- и K+ (формулы (14), (15)) и среднего отклонения альтернатив от степени полезности Q (формула (16)). Окончательные результаты использования метода CRADIS по трем вариантам весовых коэффициентов (академические эксперты, эксперты с ГДП и усреднённый вес) показаны в табл. 6.

Окончательное решение по выбору и реализации на горнодобывающем предприятии конкретной стратегии развития принимается после расчета величины чистого дисконтированного дохода, получаемого от внедрения разработанных решений. Расчет производится для вариантов, имеющих наиболее высокие ранги.

Для проверки полученных результатов выполнено сравнение результатов, полученных методом CRADIS, с результатами других многокритериальных методов.

Таблица 4. Расширенная исходная матрица принятия решений
Table 4. Extended initial decision matrix

Стратегии Strategies	P11	P12	P21	P22	P23	P24	P31	P32	P33	P41	P42	P43	P51	P52	P53	P61	P62	P63	P71	P72	P73	P81	P82
C1	4,08	1,74	47,0	0,48	2,64	2,76	4,10	470	22,00	210,0	27	3400,0	10,0	10,0	1,0	265,6	217,3	103,0	19,23	3,44	2,86	2,22	2,49
C2	3,95	2,70	55,0	0,53	2,99	2,61	7,30	550	24,00	180,0	29	2925,0	15,0	15,0	2,0	1623,9	312,4	918,7	19,10	2,30	1,64	3,13	4,57
C3	1,89	4,32	5,00	0,32	3,98	4,13	1,50	290	2,70	100,0	21	1625,0	6,0	25,0	1,0	10572,0	722,9	1110,9	5,12	2,95	3,57	2,61	1,89
C4	3,44	2,76	2,0	0,70	1,38	1,82	2,00	470	0,50	0,10	19	500,0	1,0	30,0	1,0	37,0	52,0	130,5	5,80	2,09	1,78	1,97	1,15

Таблица 5. Нормализованная и взвешенная матрицы принятия решений
Table 5. Normalized decision matrix and weighted normalized decision matrix

Показатели Indicators	Нормализованная матрица Normalized decision matrix				Взвешенная матрица Weighted normalized decision matrix			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
P11	1,0000	0,9688	0,4633	0,8434	0,00855	0,00828	0,00396	0,00721
P12	0,4033	0,6258	1,0000	0,6392	0,03345	0,05191	0,08295	0,05302
P21	0,0426	0,0364	0,4000	1,0000	0,00108	0,00092	0,01015	0,02537
P22	0,6857	0,7571	0,4571	1,0000	0,04859	0,05365	0,03239	0,07086
P23	0,5228	0,4611	0,3466	1,0000	0,01358	0,01198	0,00900	0,02598
P24	0,6683	0,6309	1,0000	0,4409	0,03259	0,03076	0,04876	0,02149
P31	0,3659	0,2055	1,0000	0,7500	0,01342	0,00754	0,03668	0,02751
P32	0,6170	0,5273	1,0000	0,6170	0,02372	0,02027	0,03845	0,02372
P33	0,9167	1,0000	0,1125	0,0208	0,04275	0,04663	0,00525	0,00097
P41	0,0005	0,0006	0,0010	1,0000	0,00003	0,00003	0,00006	0,06200
P42	0,7037	0,6552	0,9048	1,0000	0,02219	0,02066	0,02854	0,03154
P43	1,0000	0,8603	0,4779	0,1471	0,02972	0,02556	0,01420	0,00437
P51	0,1000	0,0667	0,1667	1,0000	0,00357	0,00238	0,00595	0,03571
P52	0,3333	0,5000	0,8333	1,0000	0,01198	0,01797	0,02995	0,03594
P53	0,5000	1,0000	0,5000	0,5000	0,01383	0,02766	0,01383	0,01383
P61	0,1393	0,0228	0,0035	1,0000	0,00467	0,00076	0,00012	0,03352
P62	0,2393	0,1665	0,0719	1,0000	0,00896	0,00623	0,00269	0,03744
P63	0,0927	0,8269	1,0000	0,1175	0,01816	0,16194	0,19582	0,02300
P71	1,0000	0,9932	0,2663	0,3016	0,02469	0,02453	0,00658	0,00745
P72	1,0000	0,6683	0,8594	0,6084	0,03459	0,02311	0,02972	0,02104
P73	0,8027	0,4611	1,0000	0,5000	0,01164	0,00668	0,01449	0,00725
P81	0,8891	0,6309	0,7579	1,0000	0,03003	0,02131	0,02559	0,03378
P82	0,4611	0,2512	0,6084	1,0000	0,00871	0,00475	0,01149	0,01889

Таблица 6. Результаты ранжирования решений методом CRADIS
Table 6. CRADIS method ranking results

Альтернативы (стратегии) Alternatives (strategies)	Степень отклонения альтернатив от Alternatives deviations from		Функция полезности по отклонению альтернативы с Utility function for deviation of the alternative with		Функция полезности Utility function (Q)	Ранг Rank
	идеальных решений ideal solutions (S+)	анти идеальных решений anti-ideal solutions (S-)	наименьшим расстоя- нием от идеального решения the smallest distance from the ideal solution (K+)	наибольшим расстоя- нием от анти идеаль- ного решения the greatest distance from the anti-ideal solution (K-)		
Оценка академическими экспертами/Academic experts						
C1	3,3508	0,5025	0,8517	0,5027	0,6772	4
C2	3,2859	0,5674	0,8685	0,5676	0,7181	3
C3	3,2170	0,6363	0,8871	0,6366	0,7619	2
C4	3,2121	0,6412	0,8884	0,6415	0,7650	1
Оценка экспертами с ГДП/Mining industry experts						
C1	4,2409	0,4014	0,8590	0,4017	0,6304	4
C2	4,0526	0,5898	0,8990	0,5903	0,7446	3
C3	3,9681	0,6742	0,9181	0,6748	0,7964	1
C4	4,0264	0,6160	0,9048	0,6165	0,7607	2
Усредненная оценка/Total						
C1	4,0635	0,4398	0,8623	0,4401	0,6512	4
C2	3,9284	0,5749	0,8919	0,5752	0,7336	3
C3	3,8573	0,6459	0,9084	0,6464	0,7774	1
C4	3,8821	0,6212	0,9026	0,6216	0,7621	2

Для сравнения были выбраны шесть MCDM методов: SAW (Simple Additive Weighting) [74], TOPSIS (Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [68], ARAS (Additive Ratio Assessment) [69], WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) [75], MABAC

(Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) [76] и MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution) [70]. На рис. 4 показаны результаты анализа.

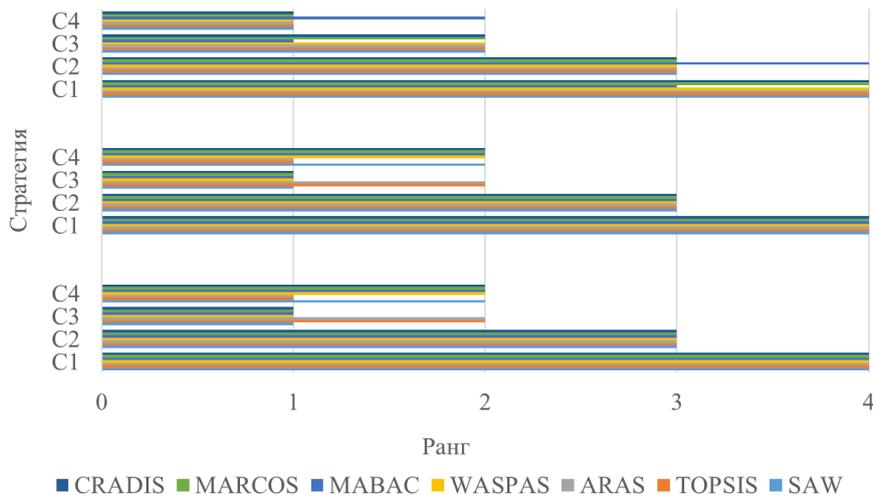


Рис. 4. Сравнение результатов ранжирования методом CRADIS с другими MCDM методами
Fig. 4. Comparison of the CRADIS method with other MCDMs

Результаты расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена показали сильную корреляцию между результатами ранжирования различными MCDM методами. Средний коэффициент корреляции составил: при усредненных весовых коэффициентах – 0,883, при использовании весовых коэффициентов академических экспертов – 0,817, использовании весовых коэффициентов экспертов с ГДП – 0,905.

Заключение

Для горнодобывающих предприятий, разрабатывающих крутопадающие месторождения, сложной и многофакторной является задача выбора стратегии развития горнотехнической системы. От правильности и своевременности принятия решения по выбору стратегии зависит эффективность и устойчивость функционирования и развития горнотехнической системы в последующие этапы разработки. В ходе исследований рассматривались следующие стратегии, направленные на достижение устойчивости развития горнотехнической системы: изменение параметров текущего этапа разработки; переход на новый этап открытых горных работ; переход на комбинированный способ разработки; прекращение функционирования горнодобывающего предприятия.

Определяющее значение для устойчивого развития горнотехнической системы при реализации каждой стратегии имеет создание транспортного доступа к ресурсам и организация процесса транспортирования горной массы. Этот процесс является самым экономически затратным, до 70 % эксплуатационных затрат и до 50 % капитальных расходов, в организации процесса задействовано до 50 % рабочего персонала горнодобывающего предприятия, более 50 % единиц карьерной техники, а также

данный процесс оказывает наибольшее воздействие на окружающую среду. Поэтому создание схемы вскрытия и организация процесса транспортирования объединены одной системой – системой вскрытия. Параметры и показатели функционирования системы вскрытия оказывают наибольшее влияние на устойчивость горнотехнической системы. Для системы вскрытия предлагается двухуровневая оценка факторов с использованием 8 групп параметров и 23 параметров и показателей. Первый уровень иерархии учитывает параметры оценки системы вскрытия при взаимодействии с горнотехнической системой и внешней средой. Ко второму уровню иерархии отнесены специфические параметры и показатели функционирования системы вскрытия. Наличие множества параметров и показателей оценки горнотехнической системы и её подсистем делает целесообразным использование многокритериальных методов принятия управленческих решений применительно к комплексной оценке устойчивого функционирования и развития горнотехнической системы и системы вскрытия. Для выбора стратегии развития горнотехнической системы на основе оценки системы вскрытия предложен комплексный критерий эффективности – ранговый коэффициент, расчет которого основан на применении комбинации методов FАHP-CRADIS.

В качестве примера предприятия для выбора стратегии устойчивого развития рассмотрен железорудный карьер Малый Куйбас. Для данного карьера в разное время рассматривались различные стратегии развития горнотехнической системы. Были определены значения всех индикаторов для каждой рассматриваемой стратегии.

Выполненные расчеты показали, что наиболее предпочтительной стратегией является переход на

комбинированный способ разработки (ранг 1), далее следует прекращение функционирования горнодобывающих предприятий (ранг 2), переход на новый этап открытых горных работ (ранг 3), и наименее предпочтительной альтернативой является изменение параметров текущего этапа (ранг 4). Оценка устойчивости полученных результатов основывалась на сравнении FAHP-CRADIS с другими многокритериальными методами – SAW, TOPSIS, ARAS, WASPAS, MABAC и MARCOS. Результаты расчета коэффициента ранговой корреляции Спирмена показали сильную корреляцию между результатами ранжирования различными MCDM методами. Средний коэффициент корреляции составил: при усредненных весовых коэффициентах – 0,883, при использовании весовых коэффициентов академических экспертов – 0,817, при использовании весовых коэффициентов экспертов с горнодобывающих предприятий – 0,905.

Будущие исследования направлены на решение вопросов, связанных с разработкой методов принятия решений для выбора последовательности реализации стратегий, обеспечивающих устойчивое развитие горнодобывающего предприятия в течение всего жизненного цикла. Такой подход предполагает многоуровневую систему принятия решений. На уровне горнотехнической системы принимаются стратегии с использованием многоатрибутных MADM-моделей и определяются целевые показатели. На уровне подсистем горнотехнической системы (система вскрытия, система разработки) разрабатываются многоцелевые MODM-модели для формирования новых технологических решений и оптимизации параметров подсистем горнотехнической системы. В дальнейшем данные оптимальные параметры будут использоваться в качестве исходных данных в MADM-модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ordin A.A., Vasil'ev I.V. Optimized depth of transition from open pit to underground coal mining // *Journal of Mining Science*. – 2014. – V. 50. – № 4. – P. 696–706.
2. Савич И.Н. Глубина перехода к подземной разработке кимберлитовых месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2005. – № 5. – С. 179–181.
3. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рьльникова М.В. Комбинированная геотехнология. – М.: ИД «Руда и металлы», 2003. – 560 с.
4. Решетняк С.П. Актуальные направления развития методов проектирования горнодобывающих предприятий // *Горная Промышленность*. – 2015. – № 3. – С. 22–26.
5. Инновации при проектировании алмазородных карьеров в криолитозоне / И.В. Зырянов, А.Н. Акишев, И.Б. Бокий, И.Ф. Бондаренко // *Горная Промышленность*. – 2018. – № 5. – С. 66–69.
6. Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties // 16th International Conference on Computer Applications in the Mineral Industries. – Istanbul, Turkey: AGRO ARGE Danışmanlık San. ve Tic. A.Ş., 2016. – С. 1–7.
7. Яковлев В.Л., Яковлев В.А. Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2018. – № 6. – С. 118–126.
8. Каплунов Д.Р., Рьльникова М.В., Корнеев С.А. Систематизация и типизация горнотехнических систем комбинированной геотехнологии // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2009. – № 11. – С. 194–205.
9. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Sustainable open pit mining and technical systems: Concept, principles, and indicators // *Sustainability*. – 2021. – V. 13. – № 3. – P. 1101.
10. Пешкова М.Х., Кузьмина И.Е. Определение предельной глубины перехода на подземные горные работы при разработке кимберлитовых месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2005. – № 6. – С. 332–334.
11. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // *Горный журнал*. – 2017. – № 7. – С. 46–50.
12. Бурмистров К.В., Осинцев Н.А. Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – V. 331. – № 4. – С. 179–195.
13. Бурмистров К.В., Осинцев Н.А. Ранжирование параметров и показателей устойчивого функционирования и развития системы вскрытия карьера методом fuzzy АНР // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2020. – V. 12. – № 3. – С. 394–409.
14. Environmental transparency of Russian mining and metal companies: Evidence from independent ranking system / A. Knizhnikov, E. Shvarts, L. Ametistova et al. // *The Extractive Industries and Society*. – 2021. – V. 8. – № 3. – P. 100937.
15. Evaluation index system of green surface mining in China / Y. Zhou, W. Zhou, X. Lu et al. // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2020. – V. 37. – № 4. – P. 1093–1103.
16. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining / V.L. Yakovlev, A.V. Glebov, V.A. Bersenyov et al. // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. – 2020. – V. 4. – № 442. – P. 127–137.
17. Бурмистров К.В. Разработка геотехнологических решений по сохранению устойчивости функционирования горнорудных предприятий путем поэтапного вскрытия запасов глубоких горизонтов при открытой и комбинированной обработке крутопадающих месторождений: дисс. ... д-ра техн. наук. – Магнитогорск, 2022. – 340 с.

18. Косолапов А.И., Пташник А.И. Управление режимом горных работ при открытой разработке месторождений этапами // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 4. – С. 387–393.
19. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 262. – P. 12038.
20. Laurence D. Establishing a sustainable mining operation // Journal of Cleaner Production. – 2011. – V. 19. – № 2–3. – P. 278–284.
21. Mborah C., Bansah K.J., Boateng M.K. Evaluating alternate post-mining land-uses: a review // Environment and Pollution. – 2016. – V. 5. – № 1. – P. 14–22.
22. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов / С.Е. Гавришев, С.Н. Корнилов, И.А. Пыталев, И.В. Гапонова // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 46–51.
23. Opoku S., Musingwini C. Stochastic modelling of the open pit to underground transition interface for gold mines // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2013. – V. 27. – № 6. – P. 407–424.
24. Afum B.O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit – underground mining options and transitions // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2020. – V. 34. – № 10. – P. 700–724.
25. Khorolskiy A.A., Grinev V.G. Selection of scenario for the development of mineral deposits // Geology and Bowels of the Earth. – 2018. – № 3. – P. 68–74.
26. Голик В.И., Дмитрак Ю.В. Перспективы комбинирования горных технологий при производстве цветных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – № 1. – С. 4–10.
27. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2019. – V. 11. – № 3. – P. 549–561.
28. Hore-Lacy I. Uranium for nuclear power. – Oxford: Woodhead Publ., 2016. – 488 p.
29. Newman A.M., Yano C.A., Rubio E. Mining above and below ground: timing the transition // IIE Transactions. – 2013. – V. 45. – № 8. – P. 865–882.
30. Afum B.O., Ben-Awuah E. A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization // Mining. – 2021. – V. 1. – № 1. – P. 112–134.
31. Collins B., Kumral M. Environmental sustainability, decision-making, and management for mineral development in the Canadian Arctic // International Journal of Sustainable Development & World Ecology. – 2020. – V. 27. – № 4. – P. 297–309.
32. Green and climate-smart mining / I.M. Jiskani, Q. Cai, W. Zhou, S.A. Ali Shah // Resources Policy. – 2021. – V. 71. – P. 102007.
33. A review of studies on sustainable development in mining life cycle / E.T. Asr, R. Kakaie, M. Ataei, M.R. Tavakoli Mohammadi // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 229. – P. 213–231.
34. Challenges of integrated modelling in mining regions to address social, environmental and economic impacts / A.M. Lechner, N. McIntyre, K. Witt et al. // Environmental Modelling & Software. – 2017. – V. 93. – № 19. – P. 268–281.
35. Ultimate pit optimization with environmental problem for open-pit coal mine / X. Xu, X. Gu, Q. Wang et al. // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – V. 173. – P. 366–372.
36. Underground Mining Methods Handbook / Ed. by W. Hustrulid. – Englewood; Society for Mining Metallurgy, 1982. – 1754 p.
37. Phlevani D., Osanloo M. Resumption of deep open-pit mining as a future challenge // Application of computers and operations research in the mineral industry / Ed. by S. Bandopadhyay. – Englewood, Colorado: Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc, 2015. – P. 249–256.
38. Rakhmangulov A.N., Burmistrov K.V., Osintsev N.A. Selection of open-pit mining and technical system’s sustainable development strategies based on MCDM // Sustainability. – 2022. – V. 14. – № 13. – P. 8003.
39. Scammacca O., Gunzburger Y., Mehdizadeh R. Gold mining in French Guiana // The Extractive Industries and Society. – 2021. – V. 8. – № 1. – P. 32–43.
40. A multi-component approach to conceptualizing the reputation of the mining industry from a stakeholder perspective / K. Svobodova, J. Vojar, M. Yellishetty, K. Janeckova // Resources Policy. – 2020. – V. 68. – № 7645. – P. 101724.
41. Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines / L. Dong, X. Tong, X. Li et al. // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 210. – № 3–4. – P. 1562–1578.
42. Morteza M.R. Mine design selection considering sustainable development // Mine Planning and Equipment Selection / Eds. C. Drebenstedt, R. Singhal. – Cham: Springer International Publishing, 2014. – P. 151–163.
43. Явуз М., Алпай С. Применение методов многокритериальной оптимизации при выборе способа разработки месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 4. – С. 78–89.
44. Ranking the strategies of mining sector through ANP and TOPSIS in a SWOT framework / R. Azimi, A. Yazdani-Chamzini, M.M. Fouladgar et al. // Journal of Business Economics and Management. – 2011. – V. 12. – № 4. – P. 670–689.
45. Fouladgar M.M., Yazdani-Chamzini A., Yakhchali H.S. A new methodology for prioritizing mining strategies // International Journal of Innovation, Management and Technology. – 2011. – V. 2. – № 4. – P. 342–347.
46. Хворостяная А.С. ESG-стратегирование промышленных компаний: отечественный и зарубежный опыт // Экономика промышленности. – 2022. – V. 15. – № 3. – С. 334–343.
47. The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. The CIMVAL Code for the Valuation of Mineral Properties. URL: https://mrmr.cim.org/media/1120/cimval_code_nov2019.pdf (дата обращения 20.03.2023).
48. Shahriar K., Oraee K., Bakhtavar E. Effective factors investigation in choice between surface and underground mining // Modern management of mine producing, geology and environmental protection. – Sofia, 2007. – P. 1–7.
49. Никишичев С.Б. А.А. Твердов, А.В. Жура К вопросу определения оптимального периода долгосрочного планирования для горнодобывающих предприятий // Горная Промышленность. – 2010. – № 6. – С. 42–45.

50. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Copper: Technology and competitiveness, OTA-E-367. – Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1988. – 272 p.
51. Patterson S.R., Kozan E., Hyland P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – V. 262. – № 2. – P. 759–770.
52. Хазин М.Л. Направления развития карьерного автотранспорта // *Недропользование*. – 2021. – №3. – С. 144–150.
53. Kawalec W., Król R., Suchorab N. Regenerative belt conveyor versus haul truck-based transport // *Sustainability*. – 2020. – V. 12. – № 21. – P. 9215.
54. Robotic transport complex of automotive vehicles for handling of rock mass at the process of open cast mining / A. Kolga, A. Rakhmangulov, N. Osintsev et al. // *Transport Problems*. – 2015. – V. 10. – № 2. – P. 109–116.
55. Bazilian M.D. The mineral foundation of the energy transition // *The Extractive Industries and Society*. – 2018. – V. 5. – № 1. – P. 93–97.
56. Sitorus F., Cilliers J.J., Brito-Parada P.R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing // *Expert Systems with Applications*. – 2019. – V. 121. – P. 393–417.
57. A comprehensive interdisciplinary review of mine supply chain management / L. Zeng, S.Q. Liu, E. Kozan et al. // *Resources Policy*. – 2021. – V. 74. – P. 102274.
58. Baloyi V.D., Meyer L.D. The development of a mining method selection model through a detailed assessment of multi-criteria decision methods // *Results in Engineering*. – 2020. – № 8. – P. 100172.
59. Iphar M., Alpay S. A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. – 2018. – V. 33. – № 7. – P. 480–504.
60. Managing operations for circular economy in the mining sector / R.K. Singh, A. Kumar, J.A. Garza-Reyes, M.M. de Sá // *Resources Policy*. – 2020. – V. 69. – № 4. – P. 101752.
61. Moving the circular economy forward in the mining industry / V.V. Gedam, R.D. Raut, A.B. Lopes de Sousa Jabbour, N. Agrawal // *Resources Policy*. – 2021. – V. 74. – № 2. – P. 102279.
62. Collins B.C., Kumral M. Game theory for analyzing and improving environmental management in the mining industry // *Resources Policy*. – 2020. – V. 69. – P. 101860.
63. Sinan Erzurumlu S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis // *Resources Policy*. – 2015. – V. 46. – P. 6–14.
64. Govindan K., Kannan D., Shankar K.M. Evaluating the drivers of corporate social responsibility in the mining industry with multi-criteria approach // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – V. 84. – № 3. – P. 214–232.
65. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – V. 257. – № 1. – P. 297–309.
66. Совершенствование методов обоснования производственной мощности и срока существования алмазородных карьеров / А.Н. Акишев, И.В. Зырянов, С.В. Корнилков, В.Д. Кантемиров // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 1. – С. 77–83.
67. Puška A., Stević Ž., Pamučar D. Evaluation and selection of healthcare waste incinerators using extended sustainability criteria and multi-criteria analysis methods // *Environment, Development and Sustainability*. – 2021. – V. 32. – № 4. – P. 688.
68. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple attribute decision making. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. – 270 p.
69. Zavadskas E.K., Turskis Z. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making // *Technological and Economic Development of Economy*. – 2010. – V. 16. – № 2. – P. 159–172.
70. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: measurement of alternatives and ranking according to COMPromise solution (MARCOS) / Ž. Stević, D. Pamučar, A. Puška, P. Chatterjee // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – V. 140. – P. 106231.
71. Бурмистров К.В., Овсянников М.П. Обоснование параметров этапа открытых горных работ в переходные периоды разработки крутопадающих месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2018. – № 6. – С.20–28.
72. Обоснование рациональных вариантов перехода с открытого на подземный способ разработки месторождения «Малый Куйбас»: отчет о НИР (заключ.) / рук. С.Е. Гавришев, В.Н. Калмыков; исполн. А.А. Гоготин и др. – Магнитогорск, 2012. – 134 с.
73. Техико-экономическое обоснование целесообразности строительства подземного рудника на месторождении «Малый Куйбас»: отчет о НИР (заключ.) / рук. В.Н. Калмыков, С.Е. Гавришев; исполн. А.А. Гоготин и др. – Магнитогорск, 2021. – 231 с.
74. Churchman C.W., Ackoff R.L. An approximate measure of value // *Journal of the Operations Research Society of America*. – 1954. – V. 2. – № 2. – P. 172–187.
75. Zavadskas E.K., Turskis Z., Antucheviciene J. Optimization of weighted aggregated sum product assessment // *Electronics and Electrical Engineering*. – 2012. – V. 122. – № 6. – P. 3–6.
76. Pamučar D., Čirović G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC) // *Expert Systems with Applications*. – 2015. – V. 42. – № 6. – P. 3016–3028.

REFERENCES

1. Ordin A.A., Vasil'ev I.V. Optimized depth of transition from open pit to underground coal mining. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 696–706.
2. Savich I.N. Depth of transition to underground mining of kimberlite deposits. *Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal)*, 2005, no. 5, pp. 179–181. In Rus.
3. Kaplunov D.R., Kalmykov V.N., Rylnikova M.V. *Kombinirovannaya geotekhnologiya* [Combined geotechnology]. Moscow, Ore & Metals Publ. House, 2003. 560 p.

4. Reshetnyak S.P. Important areas of the evolution of mine planning and design methods. *Russian Mining Industry*, 2015, no. 3, pp. 22–26. In Rus.
5. Zyryanov I.V., Akishev A.N., Bokiy I.B., Bondarenko I.F. Innovations in diamond mine planning in a permafrost zone. *Russian Mining Industry*, 2018, vol. 141, no. 5, pp. 66–69. In Rus.
6. Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties. *16th International Conference on Computer Applications in the Mineral Industries*. Istanbul, Turkey, AGRO ARGE Danışmanlık San. ve Tic. A.Ş., 2016. pp. 1–7.
7. Yakovlev V.L., Yakovlev V.A. Open pit transport systems formation with the account of adaptation to deep-lying complex-structured deposits development changing conditions. *Minerals and Mining Engineering*, 2018, no. 6, pp. 118–126. In Rus.
8. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Korneev S.A. Systematization and typification of mining systems of combined geotechnology. *Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal)*, 2009, no. 11, pp. 194–205. In Rus.
9. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Sustainable open pit mining and technical systems: Concept, principles, and indicators. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 3, p. 1101.
10. Peshkova M.H., Kuzmina I.E. Determination of the maximum depth of transition to underground mining operations during the development of kimberlite deposits. *Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal)*, 2005, no. 6, pp. 332–334. In Rus.
11. Yakovlev V.L., Sokolov I.V., Sakantsev G.G., Kravchuk I.L. Transition processes in hybrid mineral mining. *Gornyi Zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 46–50. In Rus.
12. Burmistrov K.V., Osintsev N.A. Principles of sustainable development of mining and technical systems in transitional periods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 179–195. In Rus.
13. Burmistrov K.V., Osintsev N.A. A fuzzy AHP approach for ranking parameters and indicators of sustainable functioning and development of opening-up of an opencast system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 394–409. In Rus.
14. Knizhnikov A., Shvarts E., Ametistova L. Environmental transparency of Russian mining and metal companies: Evidence from independent ranking system. *The Extractive Industries and Society*, 2021, vol. 8, no. 3, p. 100937.
15. Zhou Y., Zhou W., Lu X. Evaluation index system of green surface mining in China. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020, vol. 37, no. 4, pp. 1093–1103.
16. Yakovlev V.L., Glebov A.V., Bersenyov V.A. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2020, vol. 4, no. 442, pp. 127–137.
17. Burmistrov K.V. *Razrabotka geotekhnologicheskikh resheniy po sokhraneniyu ustoychivosti funktsionirovaniya gornorudnykh predpriyatiy putem poetapnogo vskrytiya zapasov glubokikh gorizontov pri otkrytoy i kombinirovannoy otrabotke krutopadayushchikh mestorozhdeniy*. Dis. Dokt. nauk [Development of geotechnological solutions to maintain the mining enterprise's functioning stability by gradually opening reserves of deep horizons during open and combined mining of steeply dipping deposits. Dr. Diss.]. Magnitogorsk, 2022. 340 p.
18. Kosolapov A. I., Ptashnik A. I. Management of a mode of mountain works at open-cast mining of deposits by stages. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 387–393. In Rus.
19. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 262, p. 12038.
20. Laurence D. Establishing a sustainable mining operation. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 19, no. 2–3, pp. 278–284.
21. Mborah C., Bansah K.J., Boateng M.K. Evaluating alternate post-mining land-uses: a review. *Environment and Pollution*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 14–22.
22. Gavrishv S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti gornodobyvayushchikh predpriyatiy za schet vovlecheniya v ekspluatatsiyu tekhnogennykh georesursov [Enhancing mine production efficiency through waste management]. *Gornyi Zhurnal*, 2017, no. 12, pp. 46–51. In Rus.
23. Opoku S., Musingwini C. Stochastic modelling of the open pit to underground transition interface for gold mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2013, vol. 27, no. 6, pp. 407–424.
24. Afum B.O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit – underground mining options and transitions. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2020, vol. 34, no. 10, pp. 700–724.
25. Khorolskiy A.A., Grinev V.G. Selection of scenario for the development of mineral deposits. *Geology and Bowels of the Earth*, 2018, no. 3, pp. 68–74.
26. Golik V.I., Dmitrak Yu.V. Prospects of using a combination of mining techniques in the production of non-ferrous metals. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 4–10. In Rus.
27. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel "macroblock variant" block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 549–561.
28. Hore-Lacy I. *Uranium for nuclear power*. Oxford, Woodhead Publ., 2016. 488 p.
29. Newman A.M., Yano C.A., Rubio E. Mining above and below ground: timing the transition. *IIE Transactions*, 2013, vol. 45, no. 8, pp. 865–882.
30. Afum B.O., Ben-Awuah E. A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization. *Mining*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 112–134.
31. Collins B., Kumral M. Environmental sustainability, decision-making, and management for mineral development in the Canadian Arctic. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 297–309.
32. Jiskani I.M., Cai Q., Zhou W., Ali Shah S.A. Green and climate-smart mining. *Resources Policy*, 2021, vol. 71, p. 102007.
33. Asr E.T., Kakaie R., Ataei M., Tavakoli Mohammadi M.R. A review of studies on sustainable development in mining life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 229, pp. 213–231.

34. Lechner A.M., McIntyre N., Witt K. Challenges of integrated modelling in mining regions to address social, environmental and economic impacts. *Environmental Modelling & Software*, 2017, vol. 93, no. 19, pp. 268–281.
35. Xu X., Gu X., Wang Q. Ultimate pit optimization with environmental problem for open-pit coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 173, pp. 366–372.
36. *Underground Mining Methods Handbook* Ed. by W. Hustrulid. Englewood, Society for Mining Metallurgy, 1982. 1754 p.
37. Phlevani D., Osanloo M. Resumption of deep open-pit mining as a future challenge. *Application of computers and operations research in the mineral Industry*. Englewood, Colorado, Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc, 2015. pp. 249–256.
38. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sustainable development strategies based on MCDM. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 13, p. 8003.
39. Scammacca O., Gunzburger Y., Mehdizadeh R. Gold mining in French Guiana. *The Extractive Industries and Society*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 32–43.
40. Svobodova K., Vojar J., Yellishetty M., Janeckova K. A multi-component approach to conceptualizing the reputation of the mining industry from a stakeholder perspective. *Resources Policy*, 2020, vol. 68, no. 7645, p. 101724.
41. Dong L., Tong X., Li X. Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 210, no. 3–4, pp. 1562–1578.
42. Morteza O. Mine design selection considering sustainable development. *Mine Planning and Equipment Selection*. Eds. C. Drebenstedt, R. Singhal. Cham, Springer International Publ., 2014. pp. 151–163.
43. Yavuz M., Alpay S. Underground mining technique selection by multicriterion optimization methods. *Journal of Mining Science*, 2008, no. 4, pp. 391–401. In Rus.
44. Azimi R., Yazdani-Chamzini A., Fouladgar M.M. Ranking the strategies of mining sector through ANP and TOPSIS in a SWOT framework. *Journal of Business Economics and Management*, 2011, vol. 12, no. 4, pp. 670–689.
45. Fouladgar M.M., Yazdani-Chamzini A., Yakhchali H.S. A new methodology for prioritizing mining strategies. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 342–347.
46. Khvorostyanaya A.S. ESG-strategizing of industrial companies: domestic and foreign experience. *Russian Journal of Industrial Economics*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 334–343. In Rus.
47. *The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. The CIMVAL Code for the Valuation of Mineral Properties*. Available at: https://mrmr.cim.org/media/1120/cimval_code_nov2019.pdf (accessed 20 March 2023).
48. Shahrar K., Oraee K., Bakhtavar E. Effective factors investigation in choice between surface and underground mining. *Modern management of mine producing, geology and environmental protection*. Sofia, 2007. pp. 1–7.
49. Tverdov A.A., Zhura A.V., Nikishichev S.B. On the problem of assessment of the optimal time range of long-term planning for mines. *Russian Mining Industry*, 2010, vol. 94, no. 6, pp. 42–45.
50. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Copper: Technology and competitiveness, OTA-E-367. *Copper: technology and competitiveness*. Washington, DC, U.S. Government Printing Office, 1988. 272 p.
51. Patterson S.R., Kozan E., Hyland P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 262, no. 2, pp. 759–770.
52. Khazin M.L. Directions of career transport development. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 144–150. In Rus.
53. Kawalec W., Król R., Suchorab N. Regenerative belt conveyor versus haul truck-based transport. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 21, p. 9215.
54. Kolga A., Rakhmangulov A., Osintsev N. Robotic transport complex of automotive vehicles for handling of rock mass at the process of open cast mining. *Transport Problems*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 109–116.
55. Bazilian M.D. The mineral foundation of the energy transition. *The Extractive Industries and Society*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 93–97.
56. Sitorus F., Cilliers J.J., Brito-Parada P.R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing. *Expert Systems with Applications*, 2019, vol. 121, pp. 393–417.
57. Zeng L., Liu S.Q., Kozan E.A comprehensive interdisciplinary review of mine supply chain management. *Resources Policy*, 2021, vol. 74, p. 102274.
58. Baloyi V.D., Meyer L.D. The development of a mining method selection model through a detailed assessment of multi-criteria decision methods. *Results in Engineering*, 2020, no. 8, p. 100172.
59. Iphar M., Alpay S. A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2018, vol. 33, no. 7, pp. 480–504.
60. Singh R.K., Kumar A., Garza-Reyes J.A., De Sá M.M. Managing operations for circular economy in the mining sector. *Resources Policy*, 2020, vol. 69, no. 4, p. 101752.
61. Gedam V.V., Raut R.D., Lopes de Sousa Jabbour A.B., Agrawal N. Moving the circular economy forward in the mining industry. *Resources Policy*, 2021, vol. 74, no. 2, p. 102279.
62. Collins B.C., Kumral M. Game theory for analyzing and improving environmental management in the mining industry. *Resources Policy*, 2020, vol. 69, p. 101860.
63. Sinan Erzurumlu S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. *Resources Policy*, 2015, vol. 46, pp. 6–14.
64. Govindan K., Kannan D., Shankar K.M. Evaluating the drivers of corporate social responsibility in the mining industry with multi-criteria approach. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 84, no. 3, pp. 214–232.
65. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 257, no. 1, pp. 297–309.
66. Akishev A.N., Zyryanov I.V., Kornilkov S.V., Kantemirov V.D. Improving evaluation methods for production capacity and life of open pit diamond mines. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 71–76. In Rus.
67. Puška A., Stević Ž., Pamučar D. Evaluation and selection of healthcare waste incinerators using extended sustainability criteria and multi-criteria analysis methods. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, vol. 32, no. 4, p. 688.

68. Hwang C.-L., Yoon K. *Multiple attribute decision making*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 1981. 270 p.
69. Zavadskas E.K., Turskis Z. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 159–172.
70. Stević Ž., Pamučar D., Puška A., Chatterjee P. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 2020, vol. 140, p. 106231.
71. Burmistrov K.V., Ovsyannikov M.P. Validation of open pit stage design in the transition periods of mining at steeply dipping mineral deposits. *Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal)*, 2018, no. 6, pp. 20–28. In Rus.
72. *Obosnovanie ratsionalnykh variantov perekhoda s otkrytogo na podzemny sposob razrabotki mestorozhdeniya «Maly Kuybas»: otchet o NIR* [Feasibility study of the construction of an underground mine at the Maly Kuybas deposit: research report (fin.)]. Project supervisor S.E. Gavrishchev, V.N. Kalmykov; project employee A.A. Gogotin. Magnitogorsk, 2012. 134 p.
73. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie tselesoobraznosti stroitelstva podzemnogo rudnika na mestorozhdenii «Maly Kuybas»: otchet o NIR* [Substantiation of rational options for the transition from the open to the underground mining of the "Maly Kuybas" deposit: research report]. Project supervisor V.N. Kalmykov, S.E. Gavrishchev; project employee A.A. Gogotin. Magnitogorsk, 2021. 231 p.
74. Churchman C.W., Ackoff R.L. An approximate measure of value. *Journal of the Operations Research Society of America*, 1954, vol. 2, no. 2, pp. 172–187.
75. Zavadskas E.K., Turskis Z., Antucheviciene J. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, vol. 122, no. 6, pp. 3–6.
76. Pamučar D., Čirović G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 3016–3028.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Константин Владимирович Бурмистров, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; k.burmistrov@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3433-133X>

Никита Анатольевич Осинцев, кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; osintsev@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1168-6725>

Александр Нельевич Рахмангулов, доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; ran@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7862-4743>

Максим Эдгарович Юсупов, инженер, Общество с ограниченной ответственностью «Маггеопроект», г. Магнитогорск, Россия; max1m.yusupov@yandex.ru

Поступила в редакцию: 12.05.2023

Поступила после рецензирования: 24.05.2023

Принята к публикации: 30.11.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Burmistrov, Dr. Sc., Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; k.burmistrov@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3433-133X>

Nikita A. Osintsev, Cand. Sc., Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; osintsev@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1168-6725>

Aleksandr N. Rakhmangulov, Dr. Sc., Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; ran@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7862-4743>

Maxim E. Yusupov, Engineer, Limited liability company «Maggeoproekt», Magnitogorsk, Russian Federation. max1m.yusupov@yandex.ru

Received: 12.05.2023

Revised: 24.05.2023

Accepted: 30.11.2023