

УДК 622.684:519.81

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

Шифр специальности ВАК: 1.6.6, 1.6.16

Научная статья

Универсальная система критериев выбора автосамосвалов для глубоких карьеров

К.В. Бурмистров[✉], Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, М.А. Багдасарян

Магнитогорский государственный технический университет, Россия, г. Магнитогорск

[✉]k.burmistrov@magtu.ru

Аннотация. Актуальность. Устойчивое развитие и функционирование горнодобывающих предприятий как основных источников экономического роста во многих странах определяется балансом экономических, экологических и социальных целей, а также ресурсами, необходимыми для их достижения. Транспорт является наиболее многочисленным и затратным видом оборудования на глубоких карьерах. На его долю приходится до 70 % эксплуатационных расходов на добычу полезного ископаемого. Рабочие параметры транспортных средств должны соответствовать параметрам карьера и отвечать условиям его эксплуатации. Увеличение грузоподъемности карьерных автосамосвалов, расширение модельного ряда у производителей карьерной техники, а также возрастающее количество производителей и поставщиков карьерных автосамосвалов привело к тому, что у горнодобывающих предприятий появилось большое количество возможных альтернатив компоновки транспортной системы карьеров. На выбор конкретной модели карьерных автосамосвалов оказывает влияние значительное количество факторов. Это предопределяет необходимость многофакторного подхода к решению задачи по выбору карьерных автосамосвалов. Ключевыми задачами в таких условиях являются обоснование системы критериев оценки данных факторов и выбор наиболее эффективных методов оценки, обеспечивающих точные и надёжные результаты. **Цель:** систематизация и определение значимости критериев выбора автосамосвалов для условий глубоких карьеров. **Объекты:** карьер, транспортная система. **Методы:** обзор научной литературы, системный анализ, многокритериальные методы принятия решений. **Результаты.** Разработана универсальная система критериев выбора модели автосамосвала для условий глубоких карьеров. Новизна предложенной системы заключается в комплексном учёте всех известных в настоящее время факторов и критериев выбора автосамосвала и разработке универсальной двухуровневой системы оценки, включающей четыре глобальных критерия (технический, технологический, экологический, экономико-организационный) и 32 подкритерия. Предложена методика определения значимости критериев с использованием многокритериального метода принятия решений «Лучший худший метод» (Best Worst Method). Разработана методика систематизации критериев выбора карьерных автосамосвалов с учётом целей и задач лиц, принимающих решения по выбору и эксплуатации автосамосвалов на различных уровнях управления горнодобывающим предприятием. Полученные ранги (весовые коэффициенты) критериев рекомендуется использовать руководителям горнодобывающих предприятий и специалистам проектных организаций для выбора моделей автосамосвалов в конкретных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: карьер, модель автосамосвала, многокритериальные методы, система критериев, выбор

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проекты №23-21-10040 и №23-21-10038).

Для цитирования: Универсальная система критериев выбора автосамосвалов для глубоких карьеров / К.В. Бурмистров, Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, М.А. Багдасарян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 29–44. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

UDC 622.684:519.81

DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

Scientific paper

Universal system of criteria for selecting deep open pit dump trucks

K.V. Burmistrov✉, N.A. Osintsev, A.N. Rakhmangulov, M.A. Bagdasaryan

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

✉k.burmistrov@magtu.ru

Abstract. Relevance. Sustainable development and operation of mining enterprises as major sources of economic growth in many countries is determined by the balance of economic, environmental and social objectives, as well as by the resources required to achieve them. Transportation is the most numerous and costly type of equipment in deep open pits. It accounts for up to 70% of the operating expenses of mineral extraction. Operating parameters of transportation means should correspond to the parameters of the open pit and meet the conditions of its operation. Many alternative variants of open pit transportation system layouts have appeared. This is due to the increase in carrying capacity of dump trucks, expansion of the model range of equipment manufacturers, as well as the increase in number of manufacturers and suppliers of dump trucks. The choice of a particular dump truck model is influenced by a significant number of factors. This predetermines the need for a multifactor approach to solving the problem of selecting dump trucks. The key tasks in such conditions are justifying the system of criteria for evaluation of relevant factors and selecting the most effective evaluation methods that provide accurate and reliable results. **Aim.** Systematization and determination of significance of dump truck selection criteria for deep pit conditions. **Objects.** Open pit, transportation system. **Methods.** Literature review, system analysis, multi-criteria decision making. **Results.** The authors have developed a universal system of criteria for selecting a dump truck model for deep open pits. The novelty of the proposed system lies in the complex consideration of all relevant factors known to date and criteria of dump truck selection and the development of a universal two-level evaluation system, including four global criteria (technical, technological, environmental, economic and organizational) and 32 sub-criteria. The authors proposed a methodology for determining the significance of criteria using the multi-criteria decision-making method Best Worst Method. They developed a methodology of criteria systematization for selection of dump trucks that considers the goals and objectives of decision makers on selection and operation of dump trucks at different levels of management of mining enterprises. The obtained ranks (weight coefficients) of criteria are recommended to be used by managers of mining enterprises and specialists of design organizations for dump truck model selection in specific operating conditions.

Keywords: open pit, dump truck model, multi-criteria methods, criteria system, selection

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (Projects No. 23-21-10040, 23-21-10038).

For citation: Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Bagdasaryan M.A. Universal system of criteria for selecting deep open pit dump trucks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 29–44. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4786

Введение

В настоящее время основной объем перевозок горной массы на карьерах осуществляется автосамосвалами. Несмотря на то, что рекомендуемая область применения карьерных автосамосвалов ограничивается предельным расстоянием транспортирования в 4–5 км [1], дальность перевозок на некоторых карьерах приближается к 10 км при текущей глубине в 600–700 м [2]. Увеличение предельно допустимого расстояния транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами стало возможным благодаря увеличению грузоподъемности и расширению модельного ряда. Максимальная грузоподъемность автосамосвалов в настоящее время составляет 450 т [3]. Затраты на транспорти-

рование горной массы для условий глубоких карьеров возрастают в среднем на 20–30 % на каждые 100 м увеличения глубины, достигая 60–70 % от общих затрат на разработку месторождения [4–6].

Для сокращения затрат на транспортирование горной массы увеличивают грузоподъемность применяемых автосамосвалов [7, 8], карьерные автосамосвалы переводят на более дешёвые виды топлива [9], применяют эклектическую или дизель-электрическую тягу [10], а также переходят на комбинированный транспорт, предусматривающий два и более вида транспорта для доставки грузов. Многие учёные связывают основные перспективы транспортирования горной массы с глубокими горизонтами карьера с развитием циклично-поточной

технологии, основанной на использовании автомобильного и конвейерного транспорта [11, 12]. Однако и в этом случае доля перевозок автосамосвалами остаётся достаточно большой [13, 14].

Увеличение глубины карьеров и, соответственно, расстояния транспортирования горной массы и потребного количества горного оборудования приводит не только к повышению себестоимости добычи полезного ископаемого, но и увеличивает негативное воздействие на окружающую среду. Экологические вопросы в настоящее время начинают оказывать значительное влияние на принятие проектных решений [15–17]. Особенно актуальны вопросы негативного влияния работы оборудования на атмосферу в глубоких карьерах, заключающегося в основном в выбросах от работы двигателей автосамосвалов и пылении при транспортировании пород [18].

Увеличение грузоподъёмности карьерных автосамосвалов, расширение модельного ряда у производителей карьерной техники, а также возрастающее количество производителей и поставщиков карьерных автосамосвалов привело к тому, что у горнодобывающих предприятий появилось большое количество возможных альтернатив компоновки транспортной системы карьеров.

На выбор конкретной модели карьерных автосамосвалов оказывает влияние значительное количество факторов. Так, при использовании одной и той же модели экскаватора возможно большое количество вариантов карьерных автосамосвалов различных производителей, отличающихся своими техническими характеристиками. Вопросы выбора моделей автосамосвалов возникают как при проектировании карьеров, так и в процессе эксплуатации. Особую сложность приобретают вопросы выбора карьерных автосамосвалов для глубоких карьеров, так как на таких предприятиях за весь период разработки месторождения парк автосамосвалов полностью заменяется несколько раз. Количество техники в карьере увеличивается по мере его углубления. На один карьерный экскаватор при глубине карьера до 200 м приходится не менее 3–4 автосамосвалов, а при глубине 200–600 м – 10 и более. Кроме того, карьерный транспорт составляет основную массу оборудования и в 2,1–3,7 раза превышает количество всех остальных видов техники для основных технологических процессов. На долю автосамосвалов приходится от 60 до 75 % выбросов [19].

Авторы проанализированных нами научных работ рассматривают различные факторы, влияющие на выбор автосамосвала, в зависимости от целей исследований. Так, в [20] выбор вида и модели горного транспорта предлагается осуществлять с учётом таких факторов, как характеристики пере-

возимого груза, дальность перевозки, масштаб работ и темп освоения месторождения. В [21] выделяют следующие базовые условия, влияющие на выбор самосвала для карьера: отношение вместимости кузова самосвала к вместимости ковша экскаватора должно составлять в среднем 4–6; увеличение грузоподъёмности автосамосвалов с увеличением глубины карьеров, расстояния транспортирования и объёмов перевозки горной массы. В [22] при выборе автосамосвалов предлагается учитывать манёвренность, грузоподъёмность и безопасность для персонала. Подробный анализ факторов, оказывающих влияние на выбор модели автосамосвала, представлен в работе [19].

Анализ результатов современных исследований показывает, что для обеспечения эффективной эксплуатации карьерных автосамосвалов на глубоких карьерах при выборе моделей необходимо учитывать технические, технологические, экономические, экологические, природные и организационные факторы. Большое количество факторов, а также специфика производства работ на больших глубинах предопределяет необходимость многофакторного подхода к решению задачи по выбору карьерных автосамосвалов. Ключевыми задачами в таких условиях являются обоснование системы критериев оценки данных факторов и выбор наиболее эффективных методов оценки, обеспечивающих точные и надёжные результаты.

Анализ методов и критериев выбора карьерных автосамосвалов

Наиболее распространённым методом выбора автосамосвалов на карьерах является технико-экономическое сравнение нескольких конкурирующих вариантов. Решение принимается по критерию минимума капитальных затрат на приобретение оборудования и будущих эксплуатационных расходов. Однако акцент преимущественно на экономические показатели не позволяет учитывать экологичность использования автомобилей, оснащение автосамосвалов современными системами, влияющими на безопасность работ, автоматизацию процесса и другие важные факторы их эксплуатации. Процесс выбора карьерных автосамосвалов в результате стремления соблюсти социальные и экологические требования становится субъективным из-за необходимости учесть множество факторов или критериев, а также их взаимовлияние. Для научно-обоснованного выбора автосамосвалов необходимо использование многокритериальных методов принятия решений. В работе [19] исследованы существующие многокритериальные модели и методы выбора карьерных автосамосвалов и погрузочно-разгрузочного оборудования на открытых горных работах. В результате анализа установлено,

В публикациях российских авторов наибольшее внимание уделяется геологическим (природным) критериям, таким как свойства транспортируемых пород, погодные условия; техническим – производительность машин, преодолеваемый уклон; экологическим – выбросы загрязняющих веществ. Зарубежные авторы акцентируют внимание на таких технических критериях, как особенности трансмиссии, двигателя автосамосвалов; предлагают учитывать безопасность эксплуатации, условия сервисного обслуживания машин. Большинство российских и зарубежных авторов учитывают в своих исследованиях расстояние транспортирования пород, а также экономические показатели – капитальные и текущие затраты на приобретение и эксплуатацию машин.

Таким образом, наличие большого количества критериев оценки выбора автосамосвалов, различная степень их влияния на принятие решений, а также отсутствие универсальной системы комплексной оценки, учитывающей особенности эксплуатации и устойчивого развития горнодобывающего предприятия, делает актуальной задачу систематизации критериев, определяющих выбор модели автосамосвала.

Модели и методы

Систематизация критериев, определяющих выбор модели автосамосвала

Систематизация критериев, определяющих выбор модели карьерных автосамосвалов, выполнялась в пять этапов:

Этап 1. Анализ исследований в области выбора горного оборудования, автосамосвалов, планирования и организации работы горного транспорта с целью определения факторов, влияющих на выбор автосамосвалов и формирование перечня критериев, по которым в настоящее время выполняется выбор автосамосвалов на горнодобывающих предприятиях.

Было проанализировано 49 статей [19] по выбору автосамосвалов, комплексов оборудования для карьеров, а также исследования по особенностям работы транспорта в глубоких карьерах. В результате выявлен 71 уникальный критерий. По каждому критерию собраны следующие данные: наименование критерия, определение (краткая характеристика) критерия, единица измерения, целевое значение и диапазон изменения значений критерия. Разнообразие и большое количество существующих критериев выбора автосамосвалов привели к необходимости их группировки.

Этап 2. Первичная группировка существующих критериев по факторам, влияющим на выбор автосамосвала. Основная идея группировки критериев заключается в их объединении в отдельные группы в зависимости от сущности критериев. Поскольку авторы в статьях используют различные термины применительно к критериям выбора самосвалов

(например, индикаторы, показатели, параметры, критерии и субкритерии) в данной работе используется следующие термины: критерии (глобальные критерии) – применительно к группам факторов, влияющим на выбор автосамосвала (технические, технологические, геологические (природные), организационные, экономические и экологические); подкритерии (локальные критерии) – конкретные показатели и параметры выбора автосамосвала. Таким образом, была сформирована двухуровневая система оценки, которая включала шесть критериев и 71 подкритерий. Количество подкритериев в группах составило от 4 до 26, что затрудняет дальнейшую оценку и делает необходимым вторичную группировку критериев.

Этап 3. Вторичная группировка с целью уменьшения количества подкритериев. Группировка осуществлялась путём объединения схожих критериев и подкритериев по смыслу, единицам измерения, диапазону допустимых значений и целевым значениям. Выполнено объединение природных и экологических критериев, а также организационных и экономических критериев. Кроме того, исключены из рассмотрения условно-постоянные подкритерии, а также зависимые подкритерии. Например, технический показатель «продолжительность разгрузки автосамосвала» исключается, так как он условно одинаков для всех карьерных автосамосвалов, а время, затрачиваемое на разгрузку, не превышает 1 % от общей продолжительности цикла. Другой технический показатель «среднее сопротивление качению» также исключён, поскольку его значение зависит от других подкритериев, уже включённых в группу технических критериев. Таким образом, в результате вторичной группировки окончательно выделено 4 критерия (технические, технологические, природные и экологические, экономические и организационные). Количество подкритериев сократилось с 71 до 43.

Этап 4. Распределение подкритериев по уровням компетентности экспертов для дальнейшего ранжирования и определения веса подкритериев на каждом уровне. Такое распределение необходимо для получения наиболее объективной и качественной оценки критериев. Идея заключается в том, что наиболее качественную оценку критериям и подкритериям могут дать эксперты с компетенциями, максимально соответствующими содержанию подкритерия. В связи с тем, что специалисты предприятия, принимающие решение в выборе карьерных автосамосвалов, обладают различными компетенциями, преследуют отличающиеся цели в данном исследовании, в соответствии с подходом [19], предлагается выделить три уровня экспертных компетенций: стратегический, конструктивный и оптимизационный (табл. 1).

Таблица 1. Система критериев выбора карьерных автосамосвалов

Table 1. System of criteria for selecting dump trucks

Критерии Criteria	Подкритерии Sub-criteria	Ед. изм. Unit	Источник получения информации* Data source*	Целевое значение Target	Уровень/Level		
					1	2	3
Технические (Т) Technical (T)	Срок службы автосамосвалов Useful life (T1)	годы, моточасы years or motor hours	ТХ/А	max	1	–	–
	Преодолеваемый уклон/Grade (T2)	град/grad, %, ‰			–	2	–
	Коэффициент тары Net to tare ratio (T3)	доли/fractions		min	–	2	–
	Безопасность (технологическая и си- стемы безопасности)/Safety (T4)	балл/score	Э/Д		max	1	–
	Комфортность (эргономика) Comfort, ergonomics (T5)			1		–	3
	Простота обслуживания Ease of maintenance (T6)			–		–	3
	Управляемость автосамосвалом Dump truck controllability (T7)			–		–	3
	Минимальный радиус поворота Minimum turning radius (T8)	м/m	ТХ/А	min	–	2	–
	Грузоподъёмность Payload capacity (T9)	т/t		max	–	2	–
	Тип кузова/Dump truck tray type (T10)	балл/score			–	2	–
	Ширина автосамосвала Dump truck width (T11)	м/m		min	–	2	3
Технологические (ТЛ) Technological (TL)	Совместимость с выемочно-погру- зочным и дробильным оборудованием Match with excavator and crusher (TL1)	м³/м³ m³/m³	АР/С	max	–	2	3
	Ширина транспортных берм Haul road width (TL2)	м/m	ТХ, П/А, В	min	–	2	–
	Коэффициент использования грузо- подъёмности/Payload factor (TL3)	доли/fractions	АР/С	max	–	2	–
	Глубина карьера/Open pit depth (TL4)	м/m	П/В		1	–	–
	Производительность карьера Production rate (TL5)	млн т/год mln t per year	П/В		1	–	–
	Качество дорожного покрытия Haul road condition (TL6)	балл/score	Э/Д	min	–	2	3
	Потребное количество автосамосвалов Required dump trucks fleet (TL7)	ед./pcs	П/В		1	2	3
Природные и экологические (Е) Environmental (E)	Объем образующихся отходов Waste materials produced (E1)	т/год tons per year	АР/С	min	1	2	–
	Объем выбросов загрязняющих веществ/Air pollution (E2)	м³/год m³ per year			1	2	3
	Уровень шума/Noisy (E3)	дБ/decibels	АР/С	max	–	–	3
	Тип и параметры месторождений Type and geometry of deposit (E4)	балл/score	Э/Д		1	2	–
	Соответствие климатическим зо- нам/Climatic zone match (E5)				–	–	3
Экономические и организационные (ЕО) Economic and organizational (EO)	Коэффициент технической готовности Availability (EO1)	доли/fractions	АР/С	max	–	2	–
	Капитальные затраты/CAPEX (EO2)	р./\$		min	1	2	–
	Эксплуатационные расходы/OPEX (EO3)				–	2	–
	Стоимость перепродажи Resale value (EO4)		балл/score	Э/Д	min	1	–
	Престиж производителя Manufacture reputation (EO5)	1				–	–
	Надёжность работы автосамосвала Reliability (EO6)	–				–	3
	Условия сервисного обслуживания Back-up service (Support) (EO7)	–				–	3
	Наличие навыка у персонала Labor skill (EO8)	–				–	3
	Уровень технологии (роботизация, автоматизация)/Technological level (robotization, automation) (EO9)	1				2	3

*ТХ – техническая характеристика автосамосвала; П – проект на разработку месторождения; АР – аналитический расчёт; Э – экспертная оценка/А – technical characteristics of dump truck, В – field development project, С – analytical calculation; Д – expert evaluation.

Уровень 1 (стратегический). Эксперты этого уровня обладают компетенциями в области стратегического управления горнодобывающим предприятием. Эти эксперты оценивают подкритерии, определяющие финансовые показатели и репутацию компании. К экспертам первого уровня относятся владельцы или президенты компаний, ключевые руководители, директора (генеральные, коммерческие, технические и др.), а также их заместители.

Уровень 2 (конструктивный). Эксперты оценивают подкритерии, которые используются при принятии проектных решений. Экспертами второго уровня являются руководители и специалисты проектно-технического отдела, главные специалисты (инженеры, горняки, геологи, маркшейдеры), руководители и специалисты планово-экономических отделов, руководители отделов охраны труда и экологии.

Уровень 3 (оптимизационный). На этом уровне эксперты оценивают подкритерии, непосредственно связанные с процессом эксплуатации и обслуживания автосамосвалов в карьере. К экспертам третьего уровня относятся механики, энергетики, начальники карьеров, транспортных отделов, начальники смен, горные мастера и др.

Количество подкритериев на каждом уровне различается. На стратегическом уровне для оценки используются 13 подкритериев, на конструктивном – 18, а на оптимизационном – 15. Некото-

рые подкритерии были отнесены к зонам ответственности специалистов нескольких уровней.

Методика определения веса критериев выбора модели автосамосвалов с использованием Best Worst Method

Наличие множества подкритериев, влияющих на выбор модели автосамосвала для условий глубоких карьеров, делает целесообразным использование многокритериальных методов принятия решений. На рис. 2 представлена принципиальная схема методики расчёта весов критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов с использованием «Лучшего худшего метода» (Best Worst Method – BWM). «Лучший худший метод» впервые предложен в работе [23]. Основная идея метода основана на выборе «лучшего» и «худшего» критериев оценки исследуемого объекта и последующем парном сравнении каждого из них со всеми остальными критериями оценки. Определение веса всех критериев выполняется путём решения задачи максимального минимума и расчёта коэффициента несогласованности и оценки достоверности сравнений. Преимущества BWM по сравнению с другим, часто используемым в горном деле, многокритериальным методом – АНР следующие: BWM относительно прост в расчётах из-за неиспользования дробных чисел, меньшее число парных сравнений ($(2n-3)$ в BWM против $(n(n-1)/2)$ в АНР), наиболее надёжные результаты [24, 25].

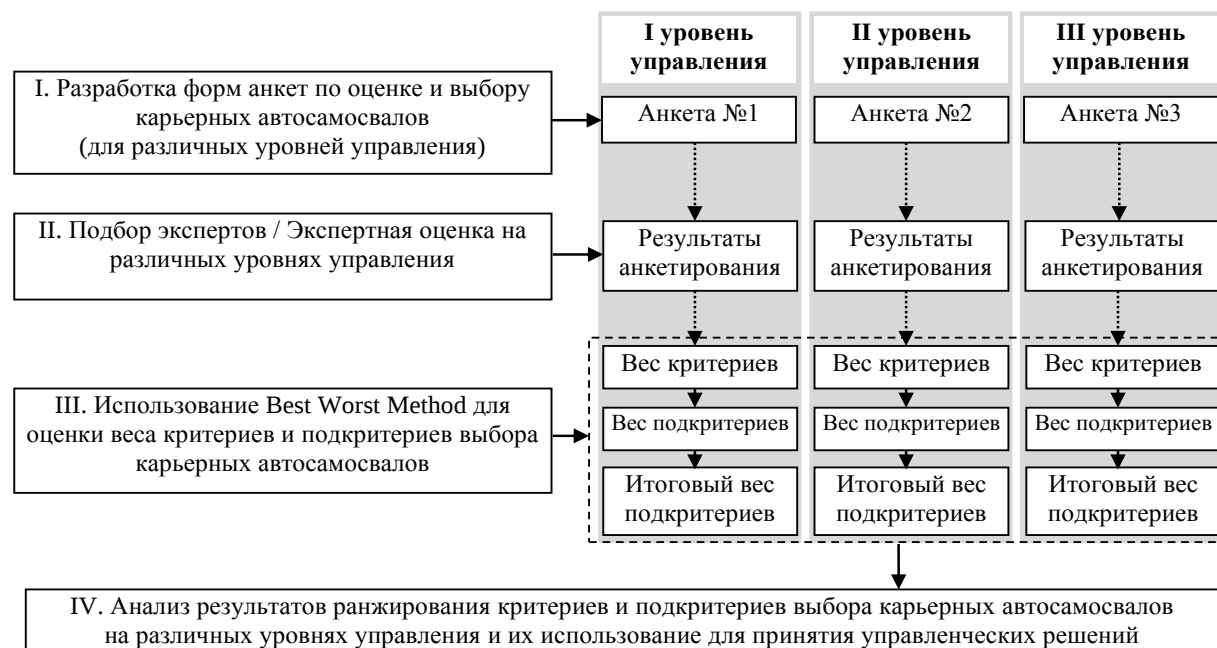


Рис. 2. Схема методики расчёта весов критериев и подкритериев выбора моделей карьерных автосамосвалов с использованием метода BWM

Fig. 2. Methodology for calculating the weights of criteria and sub-criteria for selecting dump truck models using the BWM method

Основными этапами методики являются:

I. Разработка форм анкет по оценке и выбору карьерных автосамосвалов.

Форма анкеты разрабатывается в соответствии с уровнем управления горнодобывающим предприятием – уровнем экспертных компетенций. Каждая анкета содержит комплекс критериев и подкритериев оценки автосамосвалов, соответствующих конкретному уровню. Таким образом, каждая анкета включает оценку по четырём критериям и по 13–18 подкритериям, в зависимости от уровня управления (табл. 1).

II. Подбор экспертов и экспертная оценка на различных уровнях управления.

В состав экспертной группы могут входить руководители и специалисты различных горнодобывающих предприятий, а также специалисты профильных проектных и научно-исследовательских организаций. Подбор экспертов осуществляется по каждому уровню управления. Каждый эксперт должен заполнить анкету, соответствующую уровню его компетенции.

III. Использование BWM для оценки веса критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов. BWM в общем виде состоит из шести этапов [23]:

Этап 1. Формирование комплекса критериев оценки выбора автосамосвалов. Комплекс критериев в общем виде записывается как $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, где n – количество критериев оценки.

Этап 2. Определение наилучшего и наихудшего критериев.

Лицо, принимающее решение (ЛПР), определяет наиболее важный («лучший») и наименее значимый («худший») критерий из комплекса $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$.

Этап 3. Сравнение наилучшего критерия со всеми остальными критериями.

ЛПР указывает предпочтение наилучшего критерия B перед другими критериями, используя число от 1 до 9 (где 1 означает равную важность, а 9 означает, что лучший критерий намного важнее рассматриваемого критерия). В результате сравнения создаётся вектор A_B «от лучшего к другим»:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}),$$

где a_{Bj} – предпочтение наилучшего критерия B критерию j .

Этап 4. Сравнение наихудшего критерия со всеми остальными критериями.

Аналогично предыдущему этапу ЛПР указывает предпочтение всех критериев по отношению к наихудшему критерию W , используя число от 1 до 9. В результате сравнения создаётся вектор A_W «от других к худшему»:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}),$$

где a_{jW} – предпочтение критерия j над наихудшим критерием W .

Этап 5. Определение относительной важности критериев путём расчёта окончательных и оптимальных весов.

Критерии оптимальных весов $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ рассчитываются следующим образом: для каждой пары $\frac{w_B}{w_j}$ и $\frac{w_j}{w_W}$ оптимальный вес должен удовлетво-

рять требованию $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ и $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$. Цель состоит

в том, чтобы определить оптимальные веса критериев так, чтобы максимальные абсолютные разно-

сти $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ и $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$ для всех j были минималь-

ны, что переводится в следующую модель:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\}$$

$$\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0, \text{ для всех } j. \quad (1)$$

Модель (1) может быть преобразована как:

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \text{ для всех } j$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \text{ для всех } j$$

$$\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0, \text{ для всех } j. \quad (2)$$

Оптимальные веса критериев получаются в результате решения уравнения (2).

Этап 6. Расчёт коэффициента согласованности (K_{si}) для оценки надёжности парных сравнений.

Коэффициент согласованности определяется по следующей формуле:

$$K_{si} = \frac{\xi^*}{CI}.$$

где ξ^* – максимальное значение ξ , которое определяется на основе решения уравнений (4); CI – значение индекса согласованности, определяется по табл. 2 [17] и соответствует максимальному значению предпочтений a_{BW} .

Таблица 2. Значения индекса согласованности CI для метода BWM [23]

Table 2. CI consistency index values for the BWM method [23]

авв	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$CI (\max \xi^*)$	0	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Аналогичные расчёты выполняются для определения веса подкритериев на каждом уровне управления. Окончательные весовые коэффициенты подкритериев определяются как произведение весов критериев и подкритериев. Чем выше значение весового коэффициента подкритерия, тем большее влияние он оказывает на выбор модели автосамосвала в карьере.

IV. Анализ результатов ранжирования критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов на различных уровнях управления и использование полученных результатов для принятия управленческих решений.

Анализ результатов ранжирования критериев и подкритериев выбора автосамосвалов сводится к поиску ответов на следующие вопросы:

1. Совпадают ли оценки важности критериев и подкритериев у экспертов различных групп?
2. Какие критерии и подкритерии являются приоритетными для каждой группы экспертов?

Окончательные результаты данного анализа являются руководством для ЛПР об установлении окончательных значений весовых коэффициентов критериев выбора автосамосвалов, которые в дальнейшем будут использованы в многокритериальной

модели принятия решений для выбора конкретной модели автосамосвала в карьере.

Расчётный пример реализации методики

В качестве исходных данных для расчёта веса критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов использованы результаты экспертной оценки, представленные в работе [19]. В качестве экспертов были привлечены руководители и специалисты горнодобывающих предприятий, разрабатывающих железную руду, медную руду, золоторудное сырьё, строительные горные породы, а также сырьё для химической и металлургической промышленности.

В качестве экспертов 1-го уровня управления выступили два генеральных директора, заместитель генерального директора, директор, руководитель департамента. Экспертами 2-го уровня являлись главный геолог, два главных маркшейдера, главный горняк, начальник проектно-технического отдела и главный инженер. На 3-м уровне управления экспертами являлись два главных механика, ведущий специалист ПТО и три горных мастера.

Экспертами были заполнены формы анкет, содержащих варианты комбинации критериев и подкритериев выбора автосамосвалов (табл. 1).

Результаты расчётов методом BWM представлены в табл. 3.

На рис. 3–5 представлены окончательные результаты оценки весов подкритериев по уровням управления. Цвета прямоугольников соответствуют цветам из табл. 1.

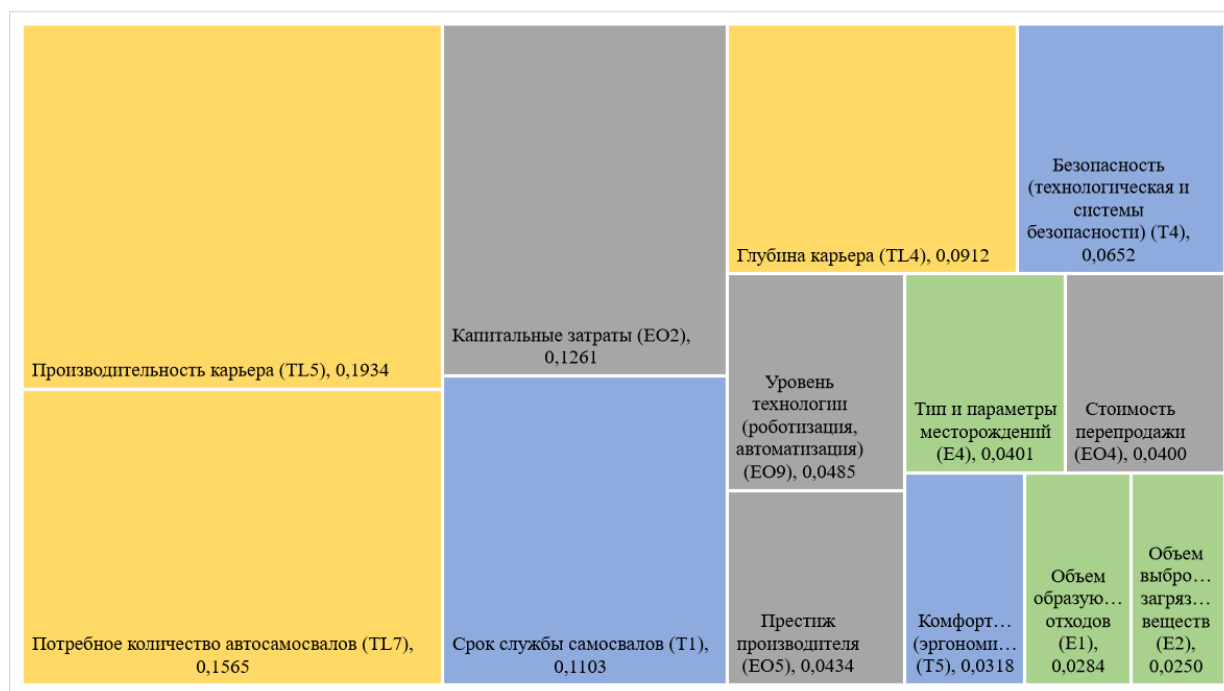


Рис. 3. Результаты оценки веса подкритериев выбора карьерных автосамосвалов методом BWM (1-й уровень управления)

Fig. 3. Results of weight assessment of sub-criteria for selection of dump trucks by BWM method (1st level of management)

Таблица 3. Результаты расчёта весов критериев и подкритериев выбора карьерных автосамосвалов

Table 3. Results of calculating the weights of criteria and sub-criteria for selecting dump trucks

Эксперты Experts	Критерии/Criteria				Коэф. соглас. Ksi Consistency coefficient Ksi
	Технические (Т) Technical (T)	Технологические (TL) Technological (TL)	Природные и экологические (Е) Environmental (E)	Экономические и организационные (ЕО) Economic and organizational (EO)	
1 уровень управления/Level 1					
Эксперт 1 Experts 1	0,181818	0,545454	0,090909	0,181818	0,0000
Эксперт 2 Experts 2	0,180327	0,557377	0,081967	0,180327	0,0163
Эксперт 3 Experts 3	0,368421	0,368421	0,070175	0,192982	0,0175
Эксперт 4 Experts 4	0,122449	0,55102	0,122449	0,204082	0,0612
Эксперт 5 Experts 5	0,183673	0,183673	0,102041	0,530612	0,0204
Среднее Average	0,207338	0,441189	0,093508	0,257964	–
2 уровень управления/Level 2					
Эксперт 6 Experts 6	0,333333	0,166667	0,333333	0,166667	0,0000
Эксперт 7 Experts 7	0,250000	0,375000	0,125000	0,250000	0,1250
Эксперт 8 Experts 8	0,641975	0,135802	0,08642	0,135802	0,0370
Эксперт 9 Experts 9	0,198020	0,564356	0,089109	0,148515	0,0297
Эксперт 10 Experts 10	0,630435	0,163043	0,076087	0,130435	0,0217
Эксперт 11 Experts 11	0,500000	0,250000	0,083333	0,166667	0,0000
Среднее Average	0,425627	0,275812	0,132214	0,166348	–
3 уровень управления/Level 3					
Эксперт 12 Experts 12	0,419355	0,225806	0,129032	0,225806	0,0322
Эксперт 13 Experts 13	0,606742	0,235955	0,05618	0,101124	0,1011
Эксперт 14 Experts 14	0,606742	0,235955	0,05618	0,101124	0,1011
Эксперт 15 Experts 15	0,333333	0,333333	0,166667	0,166667	0,0000
Эксперт 16 Experts 16	0,400000	0,400000	0,133333	0,066667	0,0000
Эксперт 17 Experts 17	0,400000	0,400000	0,100000	0,100000	0,0000
Среднее Average	0,461029	0,305175	0,106899	0,126898	–

Оценка чувствительности результатов многокритериального анализа выполнена на основе сравнения результатов BWM с результатами, полученными другим многокритериальным методом – методом полной согласованности (Full Consistency Method – FUCOM) [24]. Выбор FUCOM обоснован высокой надёжностью получения результатов многокритериальной оценки. Кроме того, в FUCOM сокращается количество парных сравнений для отображения n числа критериев, равное $(n-1)$ парных сравнений для FUCOM, по сравнению с BWM, равным $(2n-3)$ парных сравнений. Диаграммы на рис. 6 показывают высокую согласованность методов FUCOM и BWM, что говорит о надёжности полученных результатов.

Обсуждение результатов

Анализ результатов расчётов, представленных на рис. 3–5 и в табл. 4, показывает, что оценки значимости критериев и подкритериев выбора автосамосвала различаются у экспертов разного уровня управления.

На начальном этапе исследования авторы сделали несколько предположений. Эти предположения связаны с ориентацией экспертов определённого уровня компетентности на критерии, соответствующие их сфере деятельности. Гипотеза о том, что эксперты уровня 1 отдают предпочтение экономическим и экологическим критериям, заключалась в том, что эти эксперты ориентированы на

принятие стратегических решений. К таким решениям относятся, например, максимизация финансовых результатов всей компании, а также укрепление репутации компании путём реализации различных экологических и социальных мероприятий. Упор на технологические критерии ожидался у экспертов уровня 2, поскольку эти эксперты отвечают за оперативное планирование. Наконец, при-

оритет технических критериев ожидался в оценках экспертов 3-го уровня, поскольку они непосредственно эксплуатируют автосамосвалы и заинтересованы в их надёжности и безопасности. Однако все вышеперечисленные гипотезы не подтвердились. Детальный анализ полученных результатов позволил найти объяснения расхождению между фактическими и ожидаемыми результатами.

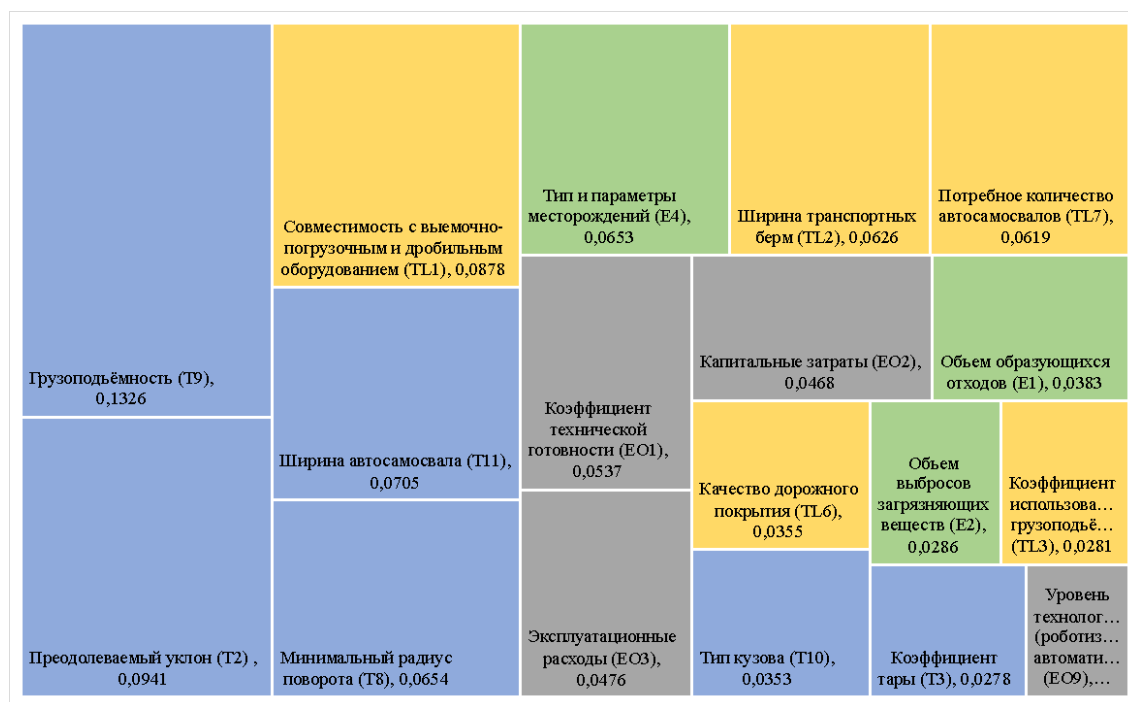


Рис. 4. Результаты оценки веса подкритериев выбора карьерных автосамосвалов методом BWM (2-й уровень управления)
Fig. 4. Results of weight assessment of sub-criteria for selection of dump trucks by BWM method (2nd level of management)

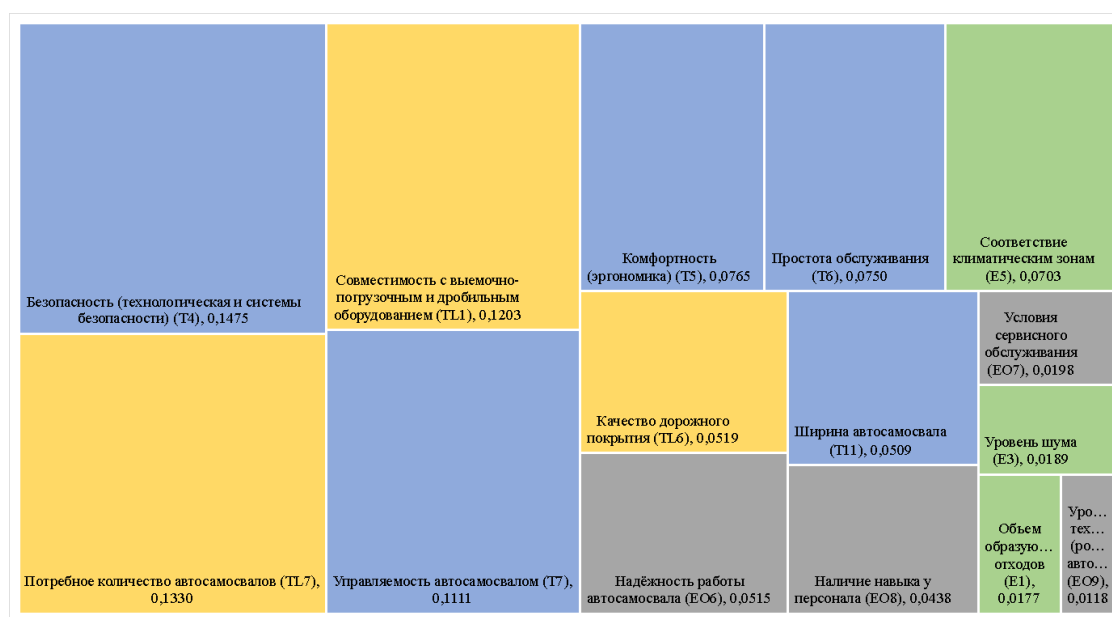


Рис. 5. Результаты оценки веса подкритериев выбора карьерных автосамосвалов методом BWM (3-й уровень управления)
Fig. 5. Results of weight assessment of sub-criteria for selection of dump trucks by BWM method (3rd level of management)



Рис. 6. Сравнение результатов расчёта весов подкритериев BWM и FUCOM
Fig. 6. Comparison of the sub-criteria weights calculation results by BWM and FUCOM

Оценки критериев и подкритериев не совпадали у экспертов всех уровней компетентности. Обсуждение полученных результатов с экспертами позволило установить причины таких различий. Выяснилось, что эксперты воспринимают критерии как целевые, а подкритерии – как ограничения, которые необходимо соблюдать в процессе достижения целевых критериев.

Например, эксперты 1-го уровня в качестве целевых критериев выделили Технологические критерии (TL), но технический подкритерий «Срок службы автосамосвалов» (T1) был выбран ими в качестве приоритетного локального критерия. Эксперты 2-го уровня выбрали в качестве целевых технические критерии (T), так как в своей деятельности они ориентированы на максимально эффективную работу техники. Однако те же эксперты отдали приоритет подкритерию «Тип и параметры месторождений» (E4) из группы природных и экологических критериев. Это объясняется тем, что оперативные решения этих экспертов определяются фактической конфигурацией рудного тела, которая может значительно отличаться от проектной. Оперативные корректировки усложняют текущее и оперативное планирование и поэтому воспринимаются этой группой экспертов как ограничения. Хотя эксперты уровня 3, как и ожидалось, отдали приоритет целевой группе технических критериев (T), они выбрали «Соответствие климатической зоне» (E5) из группы экологических подкритериев в качестве приоритетного локального критерия. Основная причина такого расхождения объясняется тем, что горнодобывающие предприятия, на которых работают опрошенные эксперты, расположены в суровых климатических условиях Российской Федерации и Республики Казахстан. Поэтому влияние климатических условий, в частности резких колебаний температуры окружающего воздуха, воспринимается экспертами данного уровня как факторы, усложняющие работу горного предприятия и снижающие надёжность и безопасность автосамосвалов.

Значения весов критериев для каждой группы экспертов являются результатом стремления к балансу между глобальными критериями и подкритериями-ограничениями. Например, технологический подкритерий «Производительность карьера» (TL5) получил максимальный вес у экспертов 1-го уровня, поскольку достижение целевых значений этого подкритерия является основным критерием эффективности экспертов этой группы. Аналогичное объяснение мы делаем и для результатов других групп экспертов. Подкритерий «Грузоподъёмность» (T9) получил максимальный глобальный вес в группе экспертов 2-го уровня, а подкритерий «Безопасность (технологическая и системы безопасности)» (T4) – у экспертов 3-го уровня.

Полученные результаты также объясняют частичное неподтверждение гипотезы о приоритетности тех или иных критериев среди экспертов определённого уровня. Это объясняется двумя причинами. Первая причина заключается в выборе конкретных экспертов. Например, состав экспертной группы 1-го уровня в нашем исследовании составили эксперты, не являющиеся собственниками горнодобывающих предприятий или топ-менеджерами. Поэтому в качестве целевых они выбрали технологические критерии, а не ожидаемую группу экономических или экологических критериев. Вторая причина заключается в двухуровневом характере предлагаемой нами системы критериев. Критерии с наибольшим локальным весом не входят в группу критериев, также имеющих наибольший вес среди экспертов всех уровней. Это также свидетельствует о различиях в оценке критериев и подкритериев. Критерии с максимальным глобальным весом определяются как компромиссные критерии, соответствие которым позволяет достичь целевых критериев при соблюдении ограничивающих подкритериев.

Мы сравнили результаты усреднения весов критериев с оценками экспертов разных уровней (рис. 7).

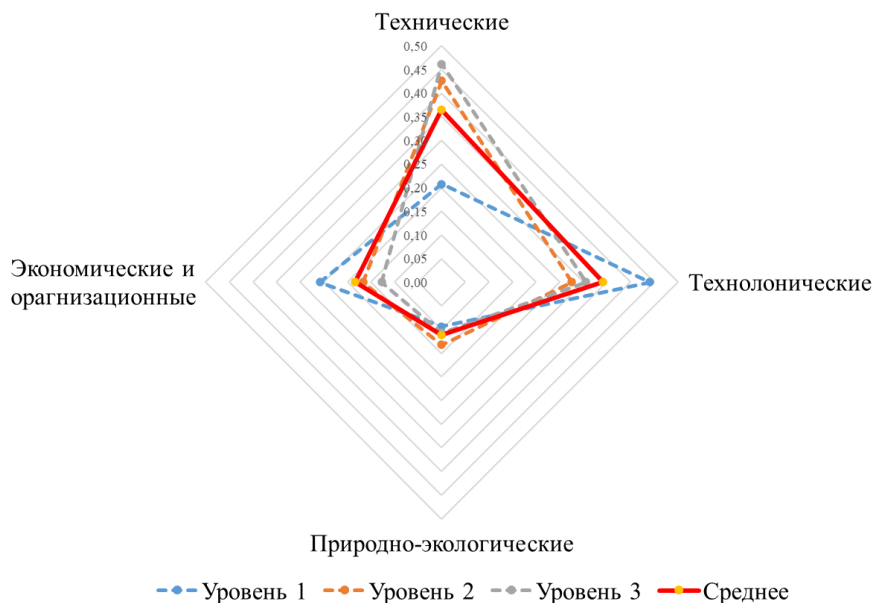


Рис. 7. Результат сравнения среднего веса критериев с оценками разных экспертов

Fig. 7. Result of comparing the average weight of the criteria with the assessments of different experts

Средние значения в основном совпадают с результатами оценок экспертов 2-го и 3-го уровней. Однако эксперты 1-го уровня по-разному оценили экономические и организационные и технологические критерии. Эксперты 1-го уровня отдали приоритет технологическим критериям (вес $TL=0,4411$) и экономическим и организационным критериям (вес $EO=0,2579$), в то время как эксперты 2-го и 3-го уровней наиболее высоко оценили значимость технических критериев (соответственно вес $T=0,4256$ и $T=0,4610$). Полученный результат объясняется особенностью организации труда на исследуемых карьерах, когда непосредственные исполнители (стратегические на уровне 2 и оперативные на уровне 3) ориентируются на требования руководителей, преследующих разные, часто противоположные, цели.

Заключение

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о продуктивности предложенной методики формирования системы критериев выбора автосамосвалов. Парк автосамосвалов является важнейшим элементом сложной горнотехнической системы. Основной особенностью методики является двухуровневая система критериев, вес которых определяются экспертами трех разных уровней

компетентности. Применение предложенной методики для условий конкретного горнодобывающего предприятия позволит определить критерии выбора модели автосамосвала с учётом влияния как глобальных факторов, так и специфических условий эксплуатации автосамосвалов на конкретном предприятии.

Предлагаемый подход к выбору модели автосамосвала для карьера имеет два основных отличия от традиционного технико-экономического сравнения вариантов. Во-первых, в традиционном методе экономические критерии имеют наивысший приоритет. Социальные и экологические показатели вариантов рассматриваются как ограничения. Во-вторых, рассматривается ограниченное количество технических и технологических критериев. Набор таких критериев в каждом конкретном случае носит субъективный характер. Предлагаемая универсальная система критериев и методика разработки и корректировки такой системы учитывает все известные на сегодняшний день критерии и факторы, определяющие выбор модели автосамосвала для карьера. Кроме того, использование обоснованных в статье рангов критериев позволяет минимизировать влияние субъективного фактора при оценке и выборе моделей автосамосвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин В.И., Шешко Е.Е. Возможность применения различных типов ленточных конвейеров при циклично-поточной технологии глубоких карьеров // Горная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 117–122. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-117-122.
2. Оценка дорожных условий Олимпиадинского и Благодатного ГОКов / А. Журавлев, В. Черепанов, В. Карпов, А. Неужин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 3. – С. 25–37. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-25-37.

3. Хазин М.Л. Направления развития карьерного автотранспорта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 144–150. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.7.
4. Кузнецов Д.В., Одаев Д.Г., Линьков Я.Е. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 54–65.
5. 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. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012038.
6. Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties // 6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries. – Istanbul, Turkey, 5–7 October 2016. – P. 1–7.
7. Кулешов А.А. Способы повышения качества функционирования систем карьерного автотранспорта в современных условиях // Записки Горного института. – 2004. – № 157. – С. 181–185.
8. Яковлев В.Л., Корнилов С.В. Геотехнологические проблемы и особенности ведения горных работ на глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 54–66.
9. Грачев А. БелАЗ-7558Н – первый в мире 90-тонный самосвал на сжиженном природном газе // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 122–123.
10. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий / В. Черепанов, А. Журавлев, И. Глебов, М. Чендырев // Проблемы недропользования. – 2019. – Т. 20. – № 1. – С. 33–49. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033.
11. Braun T., Hennig A., Lottermoser B.G. The need for sustainable technology diffusion in mining: achieving the use of belt conveyor systems in the German hard-rock quarrying industry // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – Vol. 16. – № 1. – P. 24–30.
12. Применение задачи о брахистохроне в исследовании траектории спуска сосуда на открытых горных работах / В.С. Великанов, Н.В. Дёрина, Ю.В. Кочержинская, Н.В. Мамай, Т.В. Логунова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20. – № 4. – С. 5–14. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14.
13. Zimmermann E., Kruse W. Mobile crushing and conveying in quarries cheaper production! URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/12/mobile-crushing.pdf> (дата обращения 20.03.2024).
14. Robotic transport complex of automotive vehicles for handling of rock mass at the process of open cast mining / A. Kolga, A. Rakhmangulov, N. Osintsev, A. Sladkowski, I. Stolpovskikh // Transport Problems. – 2015. – Vol. 10. – № 2. – P. 109–116.
15. Ultimate pit optimization with environmental problem for open-pit coal mine / X. Xu, X. Gu, Q. Wang, Y. Zhao, Z. Zhu, F. Wang, Z. Zhang // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Vol. 173. – P. 366–372. DOI: 10.1016/j.psep.2023.03.024.
16. Golik V.I., Polovneva S.I., Turluyev R.R. Processing and use of waste from the mining industry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1021. – № 1. – P. 12004. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012004.
17. Argimbaev K.R. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 18. – № 7. – P. 1713–1717. DOI: 10.36478/jeasci.2018.1713.1717.
18. Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейзов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17. – № 2. – С. 166–180. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6.
19. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Multi-criteria system's design methodology for selecting open pits dump trucks // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – № 2. – P. 863. DOI: 10.3390/su16020863.
20. Justification of efficiency of heavy dump trucks effectiveness in open pit mines according to operating life criterion of the back axle / I. Panachev, G. Shirokolobov, I. Kuznetsov, A. Shirokolobova // Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety: 8th Russian-Chinese Symposium. – Kemerovo, Russia: Atlantis Press, 2016. – P. 144–148. DOI: 10.2991/coal-16.2016.29.
21. 8 Q&A You need to know about dump truck. URL: <https://www.miningpedia.cn/mining/8-Q-A-You-Need-to-Know-about-Dump-Truck.html#section7> (дата обращения 20.03.2024).
22. 3 factors to consider when choosing dump trucks for your project. URL: <https://connect2local.com/l/48162/c/163549/3-factors-to-consider-when-choosing-dump-trucks-for-your-project> (дата обращения 20.03.2024).
23. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method // Omega. – 2015. – Vol. 53. – P. 49–57. DOI: 10.1016/j.omega.2014.11.009.
24. Rezaei J. Best-Worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model // Omega. – 2016. – Vol. 64. – P. 126–130. DOI: 10.1016/j.omega.2015.12.001.
25. Pamucar D., Stevic Z., Sremac S. A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM) // Symmetry. – 2018. – Vol. 10. – № 9. – P. 393. DOI: 10.3390/sym10090393.

Информация об авторах

Константин Владимирович Бурмистров, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; 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, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; 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, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; ran@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7862-4743>

Маргар Аветикович Багдасарян, аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38; mbaga2012@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4872-2398>

Поступила в редакцию: 26.07.2024

Поступила после рецензирования: 23.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Galkin V.I., Sheshko E.E. The possibility of using various types of belt conveyors, with the cyclic-flow technology of deep open pits. *Mining Industry Journal*, 2023, no. 4, pp. 117–122. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-117-122.
2. Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Karpov V.A., Nevezhin A.Yu. Assessing the road conditions of the Olimpiada and Blagodatny mining and processing plants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2023, no. 3, pp. 25–37. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-25-37.
3. Khazin M.L. Directions of career transport development. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 144–150. (In Russ.) DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.7.
4. Kuznetsov D.V., Odaev D.G., Linkov Y.E. Peculiarities of technological motor transport selection used for deep north open pits operation. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2017, no. 5, pp. 54–65. (In Russ.)
5. 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. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012038.
6. Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties. *6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries*. Istanbul, Turkey, 5–7 October 2016. pp. 1–7.
7. Kuleshov A.A. Ways to improve the quality of operation of quarry road transport systems in modern conditions. *Journal of Mining Institute*, 2004, no. 157, pp. 181–185. (In Russ.)
8. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V. Technological problems and features of conducting mining operations in deep open pits. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2015, no. S56, pp. 54–66. (In Russ.)
9. Grachev A. BELAZ-7558 N – the world's first 90-ton dump truck running on liquefied natural gas. *Gornyi Zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 122–123 (In Russ.)
10. Cherepanov V.A., Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Chendyrev M.A. Overview of transport with rower supply in focus of mining industry development. *Problems of Subsoil Use*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 33–49. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033.
11. Braun T., Hennig A., Lottermoser B.G. The need for sustainable technology diffusion in mining: Achieving the use of belt conveyor systems in the German hard-rock quarrying industry. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 24–30.
12. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Kocherzhinskaya Y.V., Mamay N.V., Logunova T.V. The brachistochrone problem applied in the study on a conveyance descending trajectory in open pit mining. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 5–14. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-5-14.
13. Zimmermann E., Kruse W. *Mobile crushing and conveying in quarries cheaper production!* Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/12/mobile-crushing.pdf>. (accessed 20 March 2024).
14. Kolga A., Rakhmangulov A., Osintsev N., Śladowski A., Stolpovskikh I. 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.
15. Xu X., Gu X., Wang Q., Zhao Y., Zhu Z., Wang F., Zhang Z. Ultimate pit optimization with environmental problem for open-pit coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 173, pp. 366–372. DOI: 10.1016/j.psep.2023.03.024.
16. Golik V.I., Polovneva S.I., Turluyev R.R. Processing and use of waste from the mining industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1021, no. 1, pp. 12004. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012004.
17. Argimbaev K.R. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 18, no. 7, pp. 1713–1717. DOI: 10.36478/jeasci.2018.1713.1717.
18. Khazin M., Tarasov A. Ecological and economic evaluation of quarry trolley trucks. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 166–180. (In Russ.) DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6.
19. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Multi-criteria system's design methodology for selecting open pits dump trucks. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 863. DOI: 10.3390/su16020863.
20. Panachev I., Shirokolobov G., Kuznetsov I., Shirokolobova A. Justification of efficiency of heavy dump trucks effectiveness in open pit mines according to operating life criterion of the back axle. *8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety*. Kemerovo, Russia: Atlantis Press, 2016. pp. 144–148. DOI: 10.2991/coal-16.2016.29.
21. 8 Q&A you need to know about dump truck. Available at: <https://www.miningpedia.cn/mining/8-Q-A-You-Need-to-Know-about-Dump-Truck.html#section7> (accessed 20 March 2024).
22. 3 factors to consider when choosing dump trucks for your project. Available at: <https://connect2local.com/l/48162/c/163549/3-factors-to-consider-when-choosing-dump-trucks-for-your-project> (accessed 20 March 2024).
23. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 2015, vol. 53, pp. 49–57. DOI: 10.1016/j.omega.2014.11.009.

24. Rezaei J. Best-Worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model. *Omega*, 2016, vol. 64, pp. 126–130. DOI: 10.1016/j.omega.2015.12.001.
25. Pamucar D., Stevic Z., Sremac S. A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry*, 2018, vol. 10, no. 9, pp. 393.

Information about the authors

Konstantin V. Burmistrov, Dr. Sc., Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, 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, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; osintsev@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1168-6725>

Aleksandr N. Rakhmangulov, Dr. Sc., Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; ran@magtu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7862-4743>

Margar A. Bagdasaryan, Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation; mbaga2012@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4872-2398>

Received: 26.07.2024

Revised: 23.09.2024

Accepted: 21.04.2025