

Многокритериальный выбор модели автосамосвала при освоении запасов глубоких горизонтов

К.В. Бурмистров✉, Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, С.Е. Гавришев

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

✉ k.burmistrov@magtu.ru

Резюме: Количество и сложность технических, технологических, организационных, социально-экономических, экологических и других задач, связанных с эксплуатацией автосамосвалов на карьерах, значительно увеличивается при освоении запасов глубоких горизонтов и переходе на комбинированный способ разработки рудных месторождений. Эффективность работы транспортной системы в таких условиях зависит от множества различных факторов. Современные многокритериальные методы Multi-Criteria Decision-Making – (MCDM) позволяют учесть влияние этих факторов с высокой точностью. Цель работы – разработка методики выбора модели автосамосвала на основе использования многокритериального анализа. Методология исследования включает анализ актуальных моделей автосамосвалов для открытых и подземных горных работ, разработку методики выбора модели автосамосвала на основе многокритериальных методов принятия решений. Предлагаемая методика выбора модели автосамосвала учитывает большинство известных факторов, позволяет количественно оценить их влияние, рассчитать вес соответствующих критериев, комплексно сравнить модели автосамосвалов. Выполненные расчёты с использованием комбинированного многокритериального BWM-CRADIS метода на примере одного из горнодобывающих предприятий Уральского региона позволили определить модель автосамосвала, которая наиболее соответствует производимым на предприятии преобразованиям в транспортной системе.

Ключевые слова: глубокие карьеры, модель автосамосвала, многокритериальные методы, система критериев, выбор автосамосвала

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-11-00164 <https://rscf.ru/project/23-11-00164>

Для цитирования: Бурмистров К.В., Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., Гавришев С.Е. Многокритериальный выбор модели автосамосвала при освоении запасов глубоких горизонтов. *Горная промышленность*. 2025;(5S):36–42. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-36-42>

Multi-criteria selection of a dump truck model for deep-level mining

K.V. Burmistrov✉, N.A. Osintsev, A.N. Rakhmangulov, S.E. Gavrishchev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

✉ k.burmistrov@magtu.ru

Abstract: The number and complexity of technical, technological, organizational, social, economic, environmental, and other challenges associated with dump truck operations increased significantly during the development of deep levels in open-pits and transition to the combined mining methods of ore deposits. The efficiency of the haulage system under such conditions depends on numerous factors. Modern multi-criteria decision-making (MCDM) methods enable high-precision accounting of these factors. This study aims to develop a dump truck selection methodology based on multi-criteria analysis. The research framework includes analyzing current dump truck models for the surface and underground mining operations and designing a selection methodology using the MCDM techniques. The proposed approach accounts for the majority of the known factors that influence dump truck selection, quantifies their impact, calculates the criteria weights, and enables comprehensive model comparisons. Computational experiments using the hybrid BWM-CRADIS method at one of the Ural-region mining enterprises helped to identify the dump truck model best aligned with the ongoing transformation of the haulage system.

Keywords: deep open-pit mines, haul truck model, multi-criteria methods, criteria system, haul truck selection

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation No. 23-11-00164 <https://rscf.ru/project/23-11-00164>

For citation: Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Gavrishchev S.E. Multi-criteria selection of a dump truck model for deep-level mining. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):36–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-36-42>

Введение

В настоящее время основной объём перевозок горной массы на карьерах при открытом и комбинированном способах разработки осуществляется автосамосвалами. От выбранной модели карьерного автосамосвала зависит возможная провозная способность карьерных транспортных коммуникаций, достижение плановой производительности рудника, а также, во многом, затраты на разработку месторождения. Несмотря на различные ограничения, с которыми столкнулась горнодобывающая отрасль нашей страны в последние годы, разнообразие эксплуатируемых на карьерах моделей автосамосвалов остаётся достаточно широким.

Помимо большого разнообразия производителей карьерных самосвалов и широкого модельного ряда, имеются альтернативы выбора моделей самосвала с различными силовыми установками: дизельными, дизель-электрическими [1], электрическими [2], газовыми [3], водородными [4], отличающимися не только стоимостью, но и техническими характеристиками [5]. Также на горных предприятиях имеется возможность использовать автопоезда [6] и полностью автономные самосвалы [7; 8] для транспортирования горной массы. Поэтому выбор модели автосамосвалов для конкретных условий эксплуатации глубоких карьеров является сложной многофакторной задачей, для решения которой целесообразно применение многокритериальных моделей и методов принятия решений – Multi-Criteria Decision-Making (MCDM).

В научной литературе MCDM использовались для выбора самосвалов в условиях открытых и подземных горных работ. Для выбора карьерных самосвалов на открытых горных работах использовались методы ANP [9] и ELECTRE III [10]. Оценка самосвалов для перевозки руды из шахты выполнялась на основе комбинации методов WPM, ELECTRE I, PROMETHEE II [11]. В условиях недостатка точных данных для оценки моделей карьерных автосамосвалов многокритериальные методы комбинировались с теорией нечётких множеств, например ANP-Fuzzy WSM [12] и Fuzzy TOPSIS [13]. Вместе с тем анализ литературы выявил пробелы в исследованиях, посвящённых комплексной оценке выбора моделей автосамосвалов при освоении запасов глубоких горизонтов месторождений, которые должны учитывать технические, технологические, геологические (природные), организационные, экономические и экологические факторы, а также мнения различных стейкхолдеров, участвующих в принятии решений при планировании и эксплуатации самосвалов.

Ранее авторами настоящей статьи была разработана методика и выполнены исследования по систематизации и ранжированию основных критериев выбора карьерных автосамосвалов [14]. Предложенный в данном исследовании подход к выбору модели автосамосвала для карьера имеет два основных отличия от традиционного технико-экономического сравнения вариантов: в традиционном методе экономические критерии имеют наивысший приоритет, а социальные и экологические показатели вариантов рассматриваются как ограничения; кроме того, рассматривается ограниченное количество технических и технологических критериев, при этом набор таких критериев в каждом конкретном случае носит субъективный характер. Предложенная универсальная система критериев и методика разработки и корректировки такой системы учитывает все известные критерии и факторы, определяющие выбор модели автосамосвала для карьера. Кроме того, ис-

пользование обоснованных в статье рангов критериев позволяет минимизировать влияние субъективного фактора при оценке и выборе моделей автосамосвалов. Выбранная модель автосамосвала должна не только рационально сочетаться с принятым выемочно-погрузочным оборудованием, но и обеспечивать достижение проектной производительности карьера с учётом экономических, экологических и социальных требований и ограничений. В настоящей статье проанализированы основные производители и модельный ряд карьерных автосамосвалов, приведен пример расчёта для выбора модели карьерного автосамосвала для горнодобывающего предприятия по разработанной методике.

Материалы и методы

Для формирования базы возможных альтернатив выбора модели автосамосвала было рассмотрено более 25 производителей самосвалов из разных стран мира (Россия, Беларусь, Китай, США, Япония, Германия и др.). Установлено, что диапазон грузоподъёмности выпускаемых в настоящее время моделей карьерных автосамосвалов – от 20 до 400 т, подземных автосамосвалов – от 5 до 65 т. Проанализированы данные по 98 моделям выпускаемых и тестируемых карьерных автосамосвалов и 50 автосамосвалам для подземных горных работ. Все рассматриваемые карьерные самосвалы были разделены на 5 классов по грузоподъёмности: до 40 т – 18 моделей (18,3%), 40–50 т – 20 моделей (20,4%), 50–100 т – 27 моделей (27,6%), 100–180 т – 12 моделей (12,2%) и свыше 180 т – 21 модель (21,5%); подземные автосамосвалы – на 3 класса: до 20 т – 23 модели (46%), 20–40 т – 14 моделей (28%), более 40 т – 13 моделей (24%). При этом ни один из рассматриваемых производителей не производит самосвалы всех классов. В четырех классах одновременно представлено 4 производителя; в трех классах – 5 производителей; в двух классах – 4 производителя и в одном классе – 8 производителей самосвалов (рис. 1).

При комбинированном способе разработки карьерные автосамосвалы широко используются для доставки руды от перегрузочного пункта в карьере до мест переработки сырья. Количество возможных альтернатив карьерных самосвалов превышает количество альтернатив для подземных горных работ почти в два раза. Поэтому далее основное внимание в исследованиях уделялось выбору модели карьерного автосамосвала для заданных условий разработки месторождений.

Методика выбора моделей карьерного автосамосвала с использованием MCDM включает четыре основных этапа. Общая схема методики представлена на рис. 2.

Этап 1. Подготовка исходных данных для оценки моделей карьерных автосамосвалов. В качестве исходных данных учитываются горнотехнические условия ведения горных работ (глубина карьера, расстояние транспортирования вскрышных пород и полезных ископаемых, годовые объёмы транспортирования горных пород, требуемые уклоны съездов), природно-экологические условия расположения и эксплуатации предприятия, наличие средств механизации для выемочно-погрузочных работ.

Этап 2. Формирование списка моделей карьерных автосамосвалов для конкретной горнотехнической системы. При формировании списка возможных моделей учитываются доступность к приобретению и последующему обслуживанию автосамосвала, сочетаемость геометрических ёмкостей кузова автосамосвала и ковша выемочно-погрузочного оборудования.

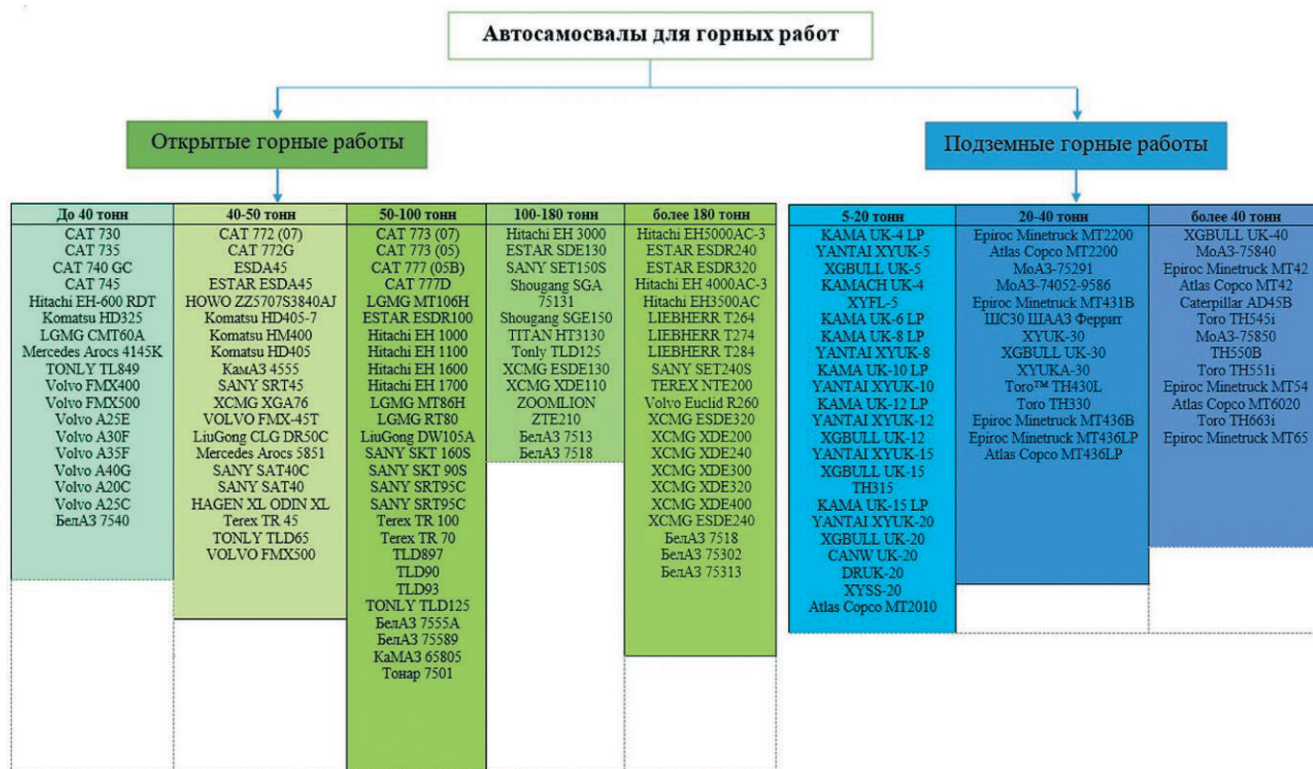


Рис. 1
Модельный ряд автосамосвалов для горных работ

Fig. 1
A range of dump truck models for mining operations

Этап 3. Обоснование критериев выбора карьерных автосамосвалов и определение веса критериев. Для оценки предлагается использовать универсальный комплекс критериев, предложенный в работе [14]. Все критерии разделены на три уровня и учитывают технические, технологические, природные и экологические, экономические и организационные факторы выбора автосамосвалов: уровень 1 (стратегический) – критерии, определяющие фи-

нансовые показатели и репутацию компании, учитывают аспекты стратегического управления горнодобывающим предприятием; уровень 2 (конструктивный) – критерии, используемые при принятии решений при проектировании и планировании горных работ; уровень 3 (оптимизационный) – критерии, непосредственно связанные с процессом эксплуатации и обслуживания автосамосвалов в карьере. Определение веса критериев для каждого уровня выполня-

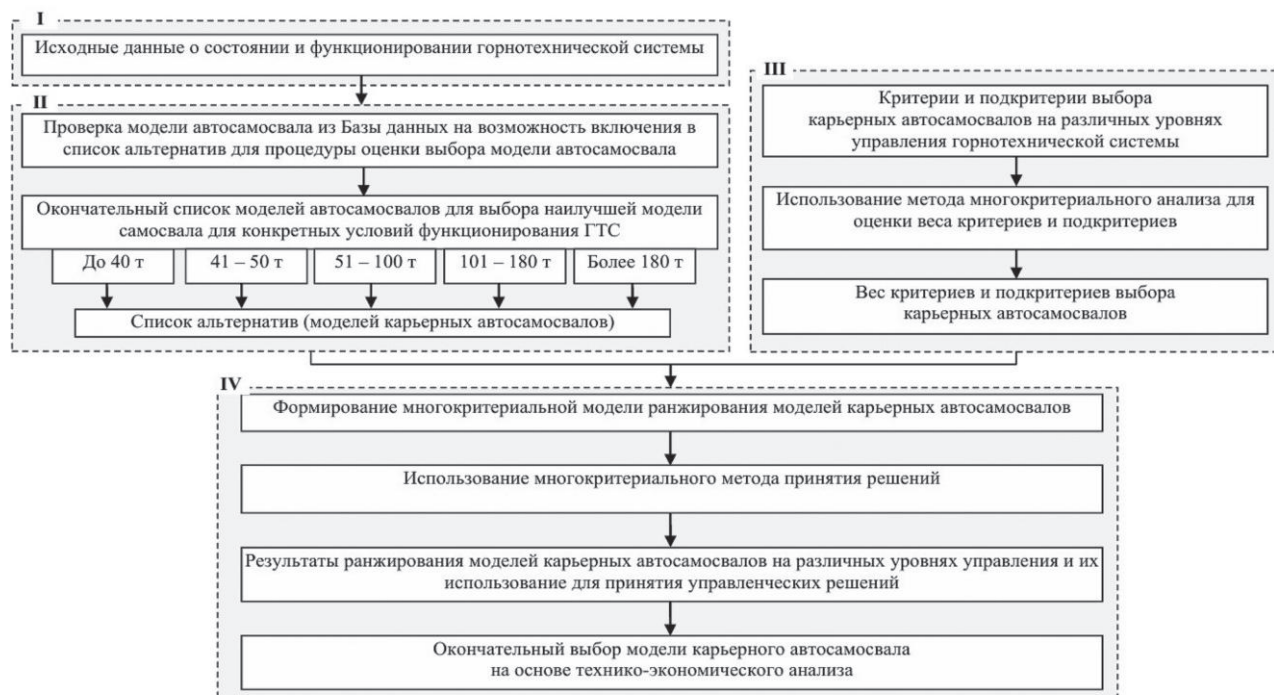


Рис. 2
Алгоритм методики выбора моделей карьерных автосамосвалов с использованием MCDM

Fig. 2
An algorithm for selecting models of mining dump trucks using MCDM

ется с использованием многокритериальных методов, например, ANP, ANP, BWM, DEMATEL, FUCOM [15].

Этап 4. Ранжирование моделей автосамосвалов для карьера с использованием многокритериальных методов принятия решений. Выбор модели карьерного автосамосвала основан на формировании матрицы принятия решения, которая имеет следующий вид:

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ & w_1 & w_2 & \dots & w_n \\ \begin{matrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix},$$

где $M = \{M_1, M_2 \dots M_m\}$ – модели карьерных автосамосвалов; m – количество моделей; $C = \{C_1, C_2 \dots C_n\}$ – критерии выбора моделей карьерных автосамосвалов; n – количество критериев; $w = \{w_1, w_2 \dots w_n\}$ – вес критериев; x_{ij} – соответственно оценочная величина i -й модели по j -му критерию C .

Необходимо выбрать конкретные многокритериальные методы, которые различаются алгоритмами агрегации данных, точностью результатов и трудоёмкостью вычислений. Наиболее распространёнными методами ранжирования являются TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, VIKOR, MABAC, MARCOS, CRADIS и др. [15]. Оценка моделей карьерных автосамосвалов выполняется для каждого уровня управления горнодобывающим предприятием и учитывает влияние как глобальных факторов, так и специфических условий эксплуатации автосамосвалов на конкретном предприятии.

Оценка экономической эффективности при выборе принятой модели автосамосвала для конкретных условий

функционирования карьера базируется на расчёте капитальных и эксплуатационных затрат для моделей автосамосвалов, имеющих наиболее высокие ранги. Окончательное решение принимается для модели, характеризующейся наилучшими экономическими показателями.

Результаты

Выбор моделей карьерных автосамосвалов выполнялся на примере одного из горнодобывающих предприятий Уральского региона в период происходящего технического перевооружения. На предприятии было рассмотрено четыре модели автосамосвалов, которые соответствуют существующим условиям эксплуатации карьера: 1. TONLY TLD65; 2. SANY SKT 90S; 3. БелАЗ 7540; 4. SANY SKT105Ета.

Оценка моделей выполнялась с использованием комплекса критериев, предложенных в работе [14]: на стратегическом уровне для оценки используются 13 критериев, на конструктивном – 18, на оптимизационном – 15. В состав экспертной группы вошли руководители и специалисты различных горнодобывающих предприятий (директора, руководители отделов, главные специалисты, механики, мастера участков), а также специалисты специализированных проектных и научно-исследовательских организаций.

Для оценки весов критериев использован «Лучший худший метод» (Best Worst Method – BWM) [16]. Основная идея метода основана на выборе «лучшего» и «худшего» критериев оценки исследуемого объекта и последующее парное сравнение каждого из них со всеми остальными критериями оценки. Определение веса всех критериев выполнялось путём решения задачи максимального минимума и расчёта коэффициента несогласованности и оценки достоверности сравнений.

В табл. 1 представлены результаты, являющиеся исходными данными для формирования матрицы принятия решений.

Таблица 1
Исходные данные для формирования матрицы принятия решений по выбору карьерных автосамосвалов

Table 1
Input data for creating a decision matrix for selecting mining trucks

Группы	Критерии	Ед. изм.	Вес критериев			Модели автосамосвалов			
			1-й уровень	2-й уровень	3-й уровень	TONLY TLD65	SANY SKT 90S	БелАЗ 7540	SANY SKT105E
Технические (П)	Срок службы автосамосвалов (Т1)	Балл	0,1103	–	–	3	3	3	5
	Преодолеваемый уклон (Т2)	‰	–	0,0941	–	360	300	100	380
	Коэффициент тары (Т3)	Доли	–	0,0278	–	0,625	0,767	0,503	0,629
	Безопасность (технологическая и системы безопасности) (Т4)	Балл	0,0652	–	0,1475	3,00	3,50	2,75	4,25
	Комфортность (эргономика) (Т5)	Балл	0,0318	–	0,0765	3,50	3,75	2,75	4,50
	Простота обслуживания (Т6)	Балл	–	–	0,0750	2,75	2,50	4,25	1,75
	Управляемость автосамосвалом (Т7)	Балл	–	–	0,1111	3,25	3,50	3,25	4,25
	Минимальный радиус поворота (Т8)	м	–	0,0654	–	10,5	14	8,7	13
	Грузоподъёмность (Т9)	м	–	0,1326	–	40	60	30	70
	Тип кузова (Т10)	Балл	–	0,0353	–	1	1	1	1
	Ширина автосамосвала (Т11)	м	–	0,0705	0,0509	1368	1493	1667	1493

Группы	Критерии	Ед. изм.	Вес критериев			Модели автосамосвалов			
			1-й уровень	2-й уровень	3-й уровень	TONLY TLD65	SANY SKT 90S	БелАЗ 7540	SANY SKT105E
Технологические	Совместимость с выемочно-погрузочным и дробильным оборудованием (TL1)	м³/м³	–	0,0878	0,1203	0,571	0,400	1,000	0,333
	Ширина транспортных берм (TL2)	м	–	0,0626	–	23,078	24,193	25,867	24,193
	Коэффициент использования грузоподъёмности (TL3)	Доли	–	0,0281	–	0,97	0,925	0,74	0,951
	Глубина карьера (TL4)	м	0,0912	–	–	120	120	120	120
	Производительность карьера (TL5)	млн т/год	0,1934	–	–	2,3	2,3	2,3	2,3
	Качество дорожного покрытия (TL6)	Балл	–	0,0355	0,0519	1	1	1	1
	Потребное количество автосамосвалов (TL7)	ед.	0,1565	0,0619	0,1330	4	2	5	2
Природные и экологические (Е)	Объем образующихся отходов (Е1)	т/год	0,0284	0,0383	0,0177	2,75	2,25	3,00	4,25
	Объем выбросов загрязняющих веществ (Е2)	м³/год	0,0250	0,0286	–	3,50	2,75	3,50	5,00
	Уровень шума (Е3)	дВ	–	–	0,0189	3,50	3,25	3,25	5,00
	Тип и параметры месторождений (Е4)	Балл	0,0401	0,0653	–	1,00	1,00	1,00	1,00
	Соответствие климатическим зонам (Е5)	Балл	–	–	0,0703	4,25	4,50	4,50	1,75
Экономические и организационные (ЕО)	Коэффициент технической готовности (ЕО1)	Доли	–	0,0537	–	1	1	1	1
	Капитальные затраты (ЕО2)	руб.	0,1261	0,0468	–	58,8	62,4	120	103,8
	Эксплуатационные расходы (ЕО3)	руб.	–	0,0476	–	2,25	2,25	3,25	4,75
	Стоимость перепродажи (ЕО4)	руб.	0,0400	–	–	2,25	3,25	3,25	1,75
	Престиж производителя (ЕО5)	Балл	0,0434	–	–	2,75	3,75	4,50	2,75
	Надёжность работы автосамосвала (ЕО6)	Балл	–	–	0,0515	2,75	3,25	3,75	2,50
	Условия сервисного обслуживания (ЕО7)	Балл	–	–	0,0198	2,75	3,50	4,00	1,75
	Наличие навыка у персонала / Labor skill (ЕО8)	Балл	–	–	0,0438	3,75	4,50	5,00	2,50
	Уровень технологии (роботизация, автоматизация) (ЕО9)	Балл	0,0485	0,0182	0,0118	2,75	3,75	2,75	5,00

Ранжирование моделей автосамосвалов выполнено с использованием метода «Компромиссное ранжирование альтернатив по расстоянию до идеального решения» (Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution – CRADIS) [17]. Идея метода заключается в определении и сравнении отклонений значений оценок всех

моделей от «идеальной» и «анти-идеальной» модели автосамосвала.

Итоговые ранги сравниваемых моделей карьерных автосамосвалов для различных уровней управления, полученные на основе расчётов методами BWM-CRADIS, представлены на рис. 3.

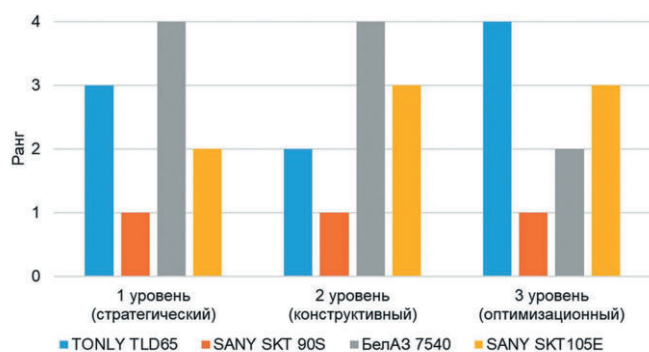


Рис. 3
Результаты ранжирования моделей автосамосвала (на примере горнодобывающего предприятия Уральского региона)

Fig. 3
Results of ranking dump truck models (based on the case study of a mining company in the Ural region)

Заключение

От выбранной модели автосамосвала во многом зависит эффективность освоения запасов глубоких горизонтов открытым и комбинированным способами. В настоящее время на рынке горного оборудования работает более 25 производителей самосвалов для открытых и подземных горных работ. Доступны к применению самосвалы с дизельными, дизель-электрическими, электрическими, газовыми и водородными силовыми установками. Количество конкурирующих моделей для конкретных рассматриваемых условий может составлять более 10, что существенно усложняет выбор автосамосвала.

При принятии решений по выбору моделей автосамосвала в таких условиях необходимо комплексно учитывать

множество разнообразных критериев оценки. Поэтому для решения такой задачи предложено применение методов многокритериального анализа. Такой подход позволяет учитывать множество различных критериев, определять вес данных критериев и выполнять по ним сравнение конкурирующих между собой моделей автосамосвалов.

Предложена новая методика выбора автосамосвалов для горных работ, которая предусматривает использование комбинации нескольких методов многокритериального анализа. Особенностью данной методики является комплексный учёт большинства известных критериев, влияющих на выбор модели автосамосвала, учёт веса каждого критерия дифференцированно по уровням принятия решений заинтересованными специалистами.

Расчёты с использованием разработанной методики были выполнены применительно к одному из горнодобывающих предприятий Уральского региона, которое производит техническое перевооружение транспортного комплекса. Для условий данного предприятия был определён допустимый диапазон по грузоподъёмности самосвалов от 30 до 70 т. В данном диапазоне определены три производителя карьерной техники, готовые поставить автосамосвалы в необходимом количестве. Из имеющегося модельного ряда данных производителей выбраны четыре модели для сравнения: дизельные автосамосвалы TONLY TLD65 (грузоподъёмность 40 т), SANY SKT 90S (60 т), БелАЗ 7540 (30 т) и электрический самосвал SANY SKT105E (70 т). Результаты расчётов с использованием комбинированного многокритериального метода BWM-CRADIS показали, что для условий заданного предприятия наиболее соответствуют автосамосвалы SANY SKT 90S. Данная модель была принята к дальнейшим технико-экономическим расчётам по детальной оценке экономической целесообразности производимых на предприятии преобразований.

Список литературы / References

1. Черепанов В.А., Журавлев А.Г., Глебов И.А., Чендырев М.А. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий. *Проблемы недропользования*. 2019;(1):33–49. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/388> (дата обращения: 14.06.2025).
Cherepanov V.A., Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Chendyrev M.A. Overview of transport with power supply in focus of mining industry development. *Problems of Subsoil Use*. 2019;(1):33–49. (In Russ.) Available at: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/388> (accessed: 14.06.2025).
2. Дубинкин Д.М., Турганев И.А., Шахманов В.Н. Особенности создания аккумуляторного карьерного самосвала на электрической тяге. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2022;(17-1):159–169. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-17-159-169>
Dubinkin D.M., Turgenev I.A., Shahmanov V.N. Features of creating a battery mining dump truck on electric drive. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2022;17(1):159–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-17-159-169>
3. Мылдық А.Д.О., Асабина Е.М., Добров О.И. Использование газогенераторов для карьерных самосвалов и переоборудование ДВС на газодизель. *Вестник Тувинского государственного университета. №3 Технические и физико-математические науки*. 2011;(3):58–65.
Myldyk A.D.O., Asabina E.M., Dobrov O.I. Use of gas generators for career dump-body trucks and transition from the diesel engine on the engine working on Gaza and solar oil. *Vestnik Tuvinskogo Gosudarstvennogo Universiteta. №3 Tekhnicheskie i Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2011;(3):58–65. (In Russ.)
4. Хазин М.Л., Апакашев Р.А. Карьерные самосвалы на водородном топливе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(1):47–59. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_47
Khazin M.L., Apakashev R.A. Hydrogen-powered mining trucks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):47–59. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_47
5. Хазин М.Л., Фурзиков В.В., Тарасов П.И. Перспективные энергоносители для мощной карьерной и дорожной техники. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2022;(16):139–145. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-139-145>
Khazin M.L., Furzikov V.V., Tarasov P.I. Promising energy resources for powerful mining and road equipment. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2022;(16):139–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-139-145>

6. Черепанов В.А. К вопросу применения автопоездов на горных работах. *Проблемы недропользования*. 2022;(4):73–88. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/315> (дата обращения: 14.06.2025).
Cherepanov V.A. On the issue of application of road-trains in mining. *Problems of Subsoil Use*. 2022;(4):73–88. (In Russ.) Available at: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/315> (accessed: 14.06.2025).
7. Колчанов А.Г. Особенности проектирования карьерных автомобильных дорог для автономных самосвалов. *Недропользование и транспортные системы*. 2024;14(4):10–20. Режим доступа: <https://transgeos.ru/index.php/SMTS/ru/article/view/80> (дата обращения: 14.06.2025).
Kolchanov A.G. Features of open pit road design for autonomous dump trucks. *Subsurface Management and Transportation Systems*. 2025;14(4):10–20. 2024;14(4):10–20. (In Russ.) Available at: <https://transgeos.ru/index.php/SMTS/ru/article/view/80> (accessed: 14.06.2025).
8. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2020;18(1):4–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>
Khazin M.L. Robotic equipment for mining operations. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020;18(1):4–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>
9. Komljenovic D., Kecojevic V. Multi-attribute selection method for mining trucks. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*. 2006;320:94–104.
10. Bodziony P., Kasztelewicz Z., Sawicki P. The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks. *Archives of Mining Sciences*. 2016;61(2):223–243. <https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0017>
11. de Sousa Jr W.T., Souza M.J.F., Cabral I.E., Diniz M.E. Multi-Criteria decision aid methodology applied to highway truck selection at a mining company. *Revista Escola de Minas*. 2014;67(3):285–290. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672014000300007>
12. Malli T., Ozfirat P.M., Yetkin M.E., Ozfirat, M.K. Truck selection with the fuzzy-wsm method in transportation systems of open pit mines. *Tehnički Vjesnik = Technical Gazette*. 2021;28(1):58–64. <https://doi.org/10.17559/TV-20190910100025>
13. Yavuz M. Equipment selection by using fuzzy TOPSIS method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016;44:042040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/4/042040>
14. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Multi-criteria system's design methodology for selecting open pits dump trucks. *Sustainability*. 2024;16(2):863. <https://doi.org/10.3390/su16020863>
15. Бурмистров К.В., Осинцев Н.А. Систематизация атрибутов многокритериальных моделей в горной отрасли на основе литературного обзора исследований. *Недропользование и транспортные системы*. 2024;14(1):25–57. Режим доступа: <https://transgeos.ru/index.php/SMTS/ru/article/view/46> (дата обращения: 14.06.2025).
Burmistrov K.V., Osintsev N.A. Systematization of multi-criteria models attributes in the mining industry based on a literature review. *Subsurface Management and Transportation Systems*. 2024;14(1):25–57. Available at: <https://transgeos.ru/index.php/SMTS/ru/article/view/46> (accessed: 14.06.2025).
16. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*. 2015;53:49–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
17. 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*. 2022;24(9):11195–11225. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01902-2>

Информация об авторах

Бурмистров Константин Владимирович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: burmistrov_kv@mail.ru

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

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

Гавришев Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8594-8463>; e-mail: orpmi-cg@mail.ru

Information about the authors

Konstantin V. Burmistrov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Mineral Deposit Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: k.burmistrov@magtu.ru

Nikita A. Osintsev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1168-6725>; e-mail: osintsev@magtu.ru

Aleksandr N. Rakhmangulov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7862-4743>; e-mail: ran@magtu.ru

Sergey E. Gavrishev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Mineral Deposit Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8594-8463>; e-mail: orpmi-cg@mail.ru

Article info

Received: 25.08.2025

Revised: 06.10.2025

Accepted: 16.10.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.08.2025

Поступила после рецензирования: 06.10.2025

Принята к публикации: 16.10.2025