



Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике



Никита Анатольевич Осинцев

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

✉ osintsev@magtu.ru

Никита ОСИНЦЕВ

АННОТАЦИЯ

В связи с возросшими требованиями мирового сообщества в соответствии с целями концепции устойчивого развития для управления целями поставок требуются сложные модели принятия решений, которые учитывают множество экологических, экономических и социальных ограничений при реализации различных экологически безопасных, «зелёных» методов и технологий. Эффективным инструментом в таких условиях является использование MCDM – многокритериальных методов принятия решений.

Целью исследования, результаты которого приведены в статье, являлся анализ применения MCDM в «зелёной» логистике и управлении «зелёными» целями поставок. В работе использован комплекс методов, включающий системный и структурно-функциональный анализ, методы теории нечётких множеств, математической статистики и экспертных оценок.

Предложена общая схема реализации MCDM и разработана комбинированная MCDM-модель оценки решений по выбору «зелёных» технологий, включающая систему показателей логистических потоков, модель управления логис-

тическими потоками и систему инструментов «зелёной» логистики.

В MCDM-модели для установления веса показателей логистических потоков применяется нечёткий аналитический иерархический процесс (fuzzy AHP), для ранжирования инструментов «зелёной» логистики используются одиннадцать MCDM-методов: SAW, TOPSIS, PROMETHEE, COPRAS, ARAS, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC, CODAS, MARCOS. Сравнение использования различных MCDM-методов показало высокую сходимость результатов ранжирования (коэффициент ранговой корреляции Спирмена 0,949). Наиболее согласованными являются методы SAW, MARCOS и WASPAS, наименее согласованным – метод CODAS.

Результаты расчётного примера показали, что наиболее предпочтительным решением является «использование интермодальных технологий и смешанных перевозок» (ранг №1 во всех одиннадцати методах), наименее предпочтительным – «использование экологических горючесмазочных материалов (видов топлива)» (ранг №12 в 10 методах из 11).

Ключевые слова: многокритериальные методы принятия решений, устойчивое развитие, «зелёная» логистика, управление «зелёными» целями поставок.

Для цитирования: Осинцев Н. А. Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 5 (96). С. 105–114. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-13>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире процесс принятия решений в организации чаще всего осуществляется в контексте концепции устойчивого развития [1] и должен одновременно учитывать экономические, социальные и экологические последствия в долгосрочной перспективе [2]. Эффективная реализация концепции устойчивого развития в логистической деятельности и управлении цепями поставок основана на использовании методов принятия управленческих решений по изменению параметров логистических потоков, совершенствованию элементов логистической системы и их функций [3]. Сложность принятия решений заключается в участии множества стейкхолдеров в цепи поставок, преследующих цели различной сложности [4]; неопределённости и динамичности логистической среды, а также необходимости учёта влияния множества факторов (экономических, технических, технологических, инфраструктурных, социальных и экологических) [3]; наличии широкого разнообразия управленческих решений на разных уровнях управления; увеличении числа критериев оценки управленческих решений, связанных, в частности, с достижением целей устойчивого развития [3; 5].

Необходимость учёта при принятии решения перечисленных ограничений привела к активному развитию научного направления в области многокритериального анализа принятия решений (multi-criteria decision

analysis – MCDA) или многокритериального принятия управленческих решений (multi-criteria decision-making – MCDM).

Целью настоящей статьи является анализ применения многокритериальных методов принятия решений в «зелёной» логистике и управлении «зелёными» цепями поставок. Достижение поставленной цели основывается на использовании системного и структурно-функционального анализа при разработке MCDM-модели выбора инструментов «зелёной» логистики, методов экспертных оценок и теории нечётких множеств для оценки показателей логистических потоков, а также математической статистики – для расчета коэффициента ранговой корреляции Спирмена при сравнении различных MCDM-методов.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Методы MCDM являются важной частью теории принятия решений и анализа. Основное назначение их использования сводится к решению четырёх типов проблем [6]: выбор наилучшего решения из множества, ранжирование и сортировка решений, описание и систематизация решений и последствий их реализации для оценки и дальнейшего управления. В настоящее время MCDM активно используются в области изменения климата [7], устойчивого развития [2], экономики [8], устойчивой инженерии [9], управления цепями поставок [10–12], энергопотребления [13], реверсивной логистики [14], корпоративной устойчивости [15], на транспорте [16; 17],

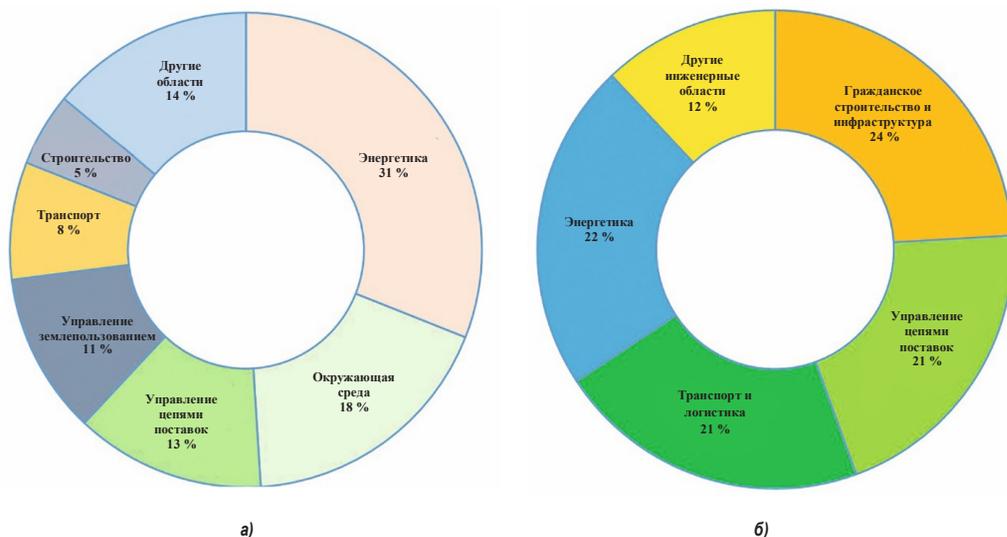


Рис. 1. Использование MCDM методов:
а – в области устойчивого развития; б – в устойчивой инженерии (составлено автором на основе [2; 9]).

в «зелёной» логистике [18] и управлении «зелёными» цепями поставок [19; 20].

Методы MCDM делятся на две категории: MODM – многоцелевое принятие решений (Multi-Objective Decision-Making) [21] и MADM – принятие решений по множеству атрибутов (Multi-Attribute Decision-Making) [22]. Модели MODM включают бесконечное или очень большое количество альтернативных решений, а цель рассмотрения проблемы состоит в том, чтобы определить оптимальную альтернативу с учётом набора чётко определённых ограничений путём решения математической модели. Модели MADM являются дискретными и применяются для ранжирования, когда конечное число предложенных альтернатив оценивается по отношению к различным взвешенным атрибутам для получения рейтинга предпочтений, который описывает эффективность каждой альтернативы для достижения цели в отношении атрибутов. Для повышения эффективности оценки MCDM-модели можно комбинировать с теорией нечётких множеств (Fuzzy set), грубой теорией множеств (Rough set), теорией серых систем (Grey set) и др. [23].

Среди недостатков применения MCDM называют [8; 24]: получение различных результатов при использовании MCDM для решения одной многокритериальной задачи; сложность сбора исходной информации и возможная её потеря в процессе агрегирования данных; повышение трудоёмкости процесса принятия решения. В работах [8; 25; 26] отмечается, что отсутствуют универсальные MCDM-методы, подходящие для всех ситуаций принятия решений, что приводит к проблеме выбора MCDM-метода. В исследованиях [25; 27] представлены рекомендации по такому выбору.

На рис. 1 показано распределение методов MCDM в области устойчивого развития [2] и устойчивой инженерии [9] – от 20 до 40 % исследований приходится на устойчивый транспорт и управление «зелёными» цепями поставок.

Наиболее часто используемыми MCDM-методами в области «зелёной» логистики и управления «зелёными» цепями поставок являются [9; 14; 18; 19; 28]: ANP – аналитический иерархический процесс, ANP – аналитический сетевой процесс, TOPSIS – метод упорядоченного предпочтения через сход-

ство с идеальным решением, DEMATEL – метод испытаний и оценки принятия решений, ELECTRE – исключение и выбор в условиях реальности, PROMETHEE – метод организации сортировки предпочтений для оценок альтернатив, VIKOR – многокритериальная оптимизация и компромиссное решение. Наиболее распространённым методом, используемым в комбинации с другими методами, является ANP и его разновидность – fuzzy ANP [9].

MCDM-методы используются для решения проблем, связанных с планированием сбыта, выбором «зелёного» поставщика, управлением обратными потоками (реверсивная логистика), оценкой расположения объектов логистической инфраструктуры, организацией и планированием перевозок [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные этапы использования MCDM

Процесс принятия решения с использованием MCDM включает три основных этапа (рис. 2):

1. *Структурирование решаемой проблемы.* На этапе определяются цели и задачи; выполняется анализ возможных решений (альтернатив), которые могут быть реализованы для достижения целей; устанавливается система критериев, по которым должны оцениваться альтернативы; определяются лица, участвующие в принятии решений, а также экспертная группа. Полученная на данном этапе информация выступает в качестве основы для определения того, какой метод MCDM может быть использован.

2. *Выбор и применение MCDM-метода.* На этапе выполняются формирование исходной матрицы решений; оценка важности каждого критерия по отношению к цели; оценка предпочтения каждой альтернативы по отношению к критериям; расчёт общих взвешенных оценок альтернатив; агрегирование альтернативных оценок; ранжирование всех возможных альтернатив на основе общих взвешенных баллов. Использование на данном этапе различных методов MCDM влияет на конечный результат оценки.

3. *Рекомендации для принятия решений.* Чем выше общий взвешенный балл, тем предпочтительнее будет альтернатива. Полученные результаты следует дополнительно



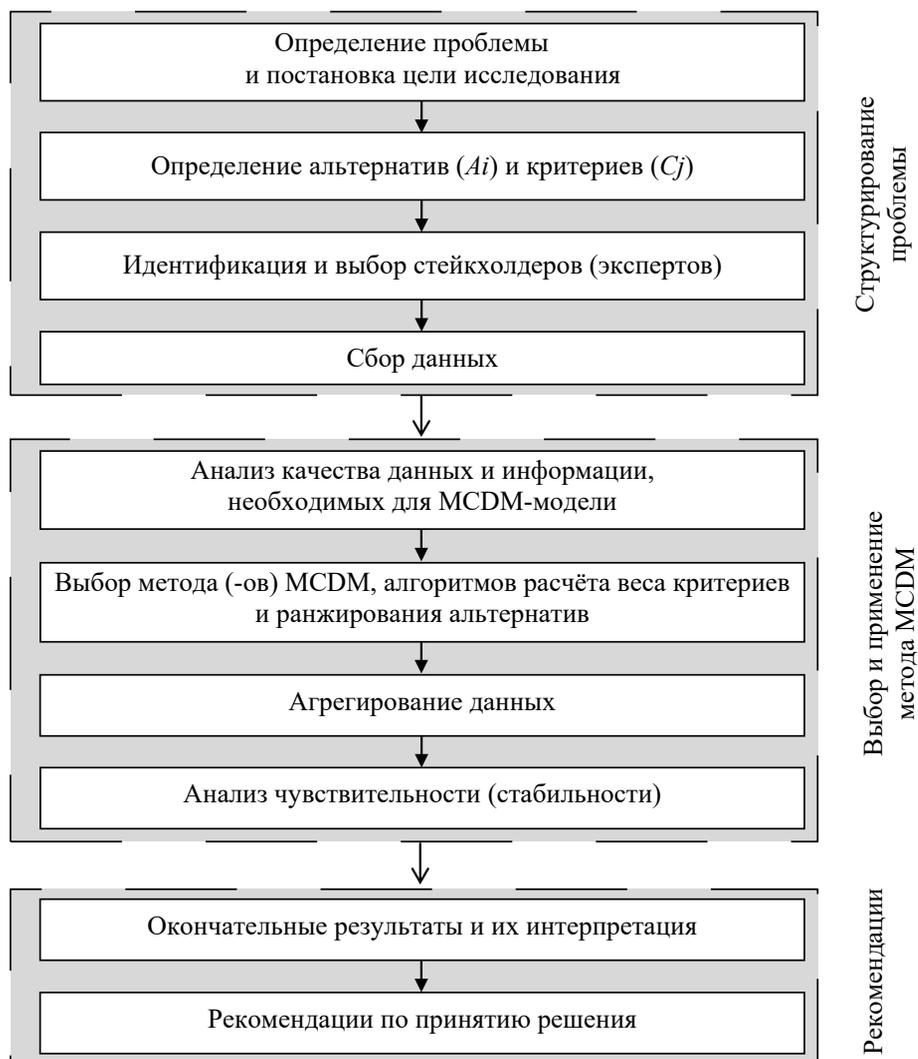


Рис. 2. Общая схема использования MCDM (разработано автором).

изучить, выполнив анализ чувствительности с целью оценки стабильности полученных результатов.

В случае, если в процессе принятия решения участвуют стороны с разными интересами, целесообразно использование метода многокритериального анализа с участием нескольких субъектов (Multi-Actor Multi-Criteria Analysis – МАМСА) [29]. В МАМСА иерархическая структура целей / задач / критериев формируется в общей модели в виде отдельных модулей для каждой заинтересованной стороны, которые впоследствии группируются вместе. Это позволяет группам заинтересованных сторон создавать свои собственные деревья критериев и учитывать, какие критерии представляют интерес для конкретной проблемы принятия решений [4].

Пример использования MCDM при выборе инструментов «зелёной» логистики

В качестве примера сравнения различных MCDM-методов в настоящей работе представлена задача оценки и выбора решений по реализации инструментов «зелёной» логистики для транспортного элемента логистической системы. Исходными данными для решаемой задачи являлись:

- система показателей логистических потоков [3];
- система инструментов «зелёной» логистики [30];
- модель управления логистическими потоками [31];
- весовые коэффициенты параметров и показателей логистических потоков, а также

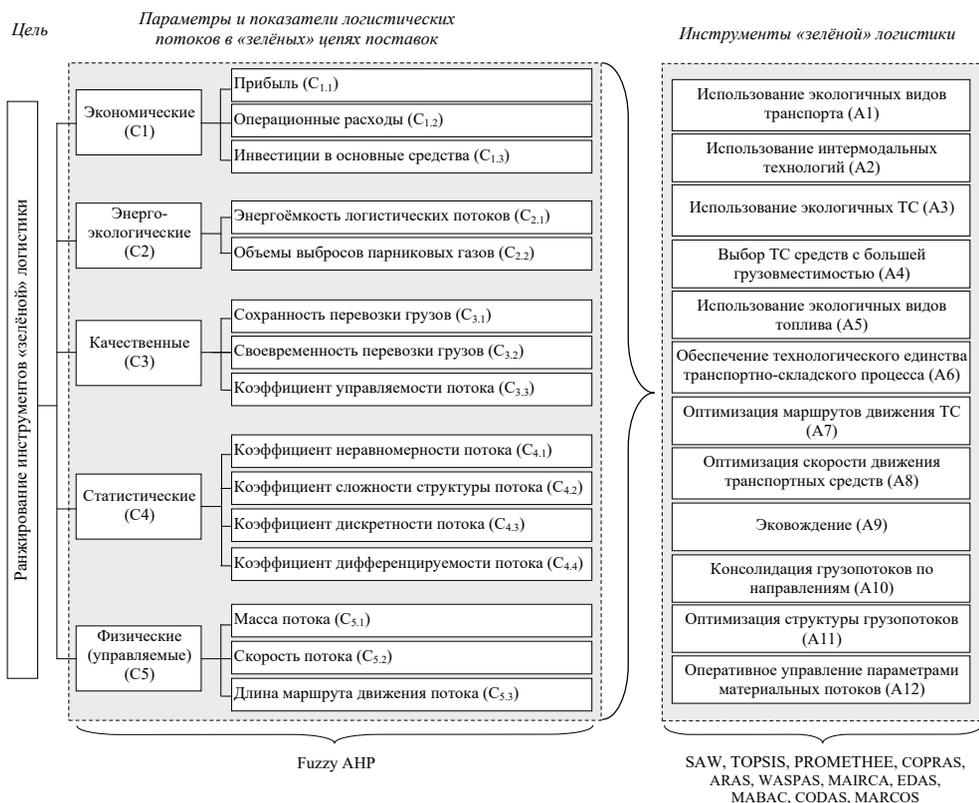


Рис. 3. Схема модели оценки управленческих решений по выбору инструментов «зелёной» логистики (разработано автором).

результаты экспертной оценки инструментов «зелёной» логистики [32].

На рис. 3 представлена общая схема MCDM-модели. Критериями (C1–C5) и субкритериями (C1.1–C5.3) модели являются пять групп параметров и 15 показателей логистических потоков [3], альтернативами (A1–A12) являются инструменты «зелёной» логистики транспортного элемента логистической системы [31].

Ранжирование инструментов «зелёной» логистики (альтернативы A1–A12) выполняется с использованием одиннадцати различных методов MCDM, в числе которых: метод простого аддитивного взвешивания (SAW – Simple Additive Weighting) [33]; метод расстановки приоритетов по сходству с идеальным решением (TOPSIS – Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [22]; метод формирования рангов предпочтения для обогащения оценок (PROMETHEE – Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) [34]; метод комплексной пропорциональной оценки (COPRAS – Complex Proportional Assessment) [35]; метод оценки аддитивного отношения (ARAS – Additive

Ratio Assessment) [36]; метод совокупной взвешенной суммы (WASPAS – Weighted Aggregated Sum Product Assessment) [37]; метод сравнительного анализа идеального и реального с множеством атрибутов (MAIRCA – Multi-Attributive Ideal-Real Comparative Analysis) [38]; метод оценки отклонения от среднего решения (EDAS – The Evaluation based on Distance from Average Solution) [39]; метод сравнения многокритериальных разграниченных областей (MABAC – Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) [40]; метод комбинированной дистанционной оценки (CODAS – Combinative Distance-based Assessment) [41]; метод оценки альтернатив и ранжирование в соответствии с компромиссным решением (MARCOS – Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution) [42]. С методиками расчёта и этапами реализации каждого метода можно ознакомиться в представленной научной литературе.

Исходная матрица принятия решений (X) включает альтернативы $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, оценка которых выполняется по критериям $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$.



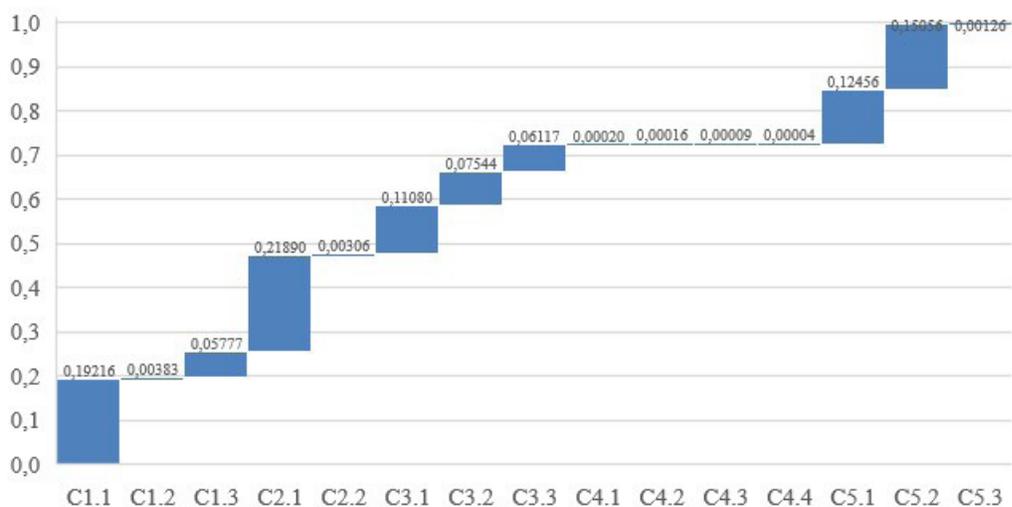


Рис. 4. Весовые коэффициенты показателей логистических потоков [32].

Таблица 1

Исходная матрица принятия решений [32]

A _i /C _j	C1.1 (max)	C1.2 (min)	C1.3 (max)	C2.1 (min)	C2.2 (min)	C3.1 (max)	C3.2 (max)	C3.3 (max)	C4.1 (min)	C4.2 (min)	C4.3 (min)	C4.4 (min)	C5.1 (max)	C5.2 (max)	C5.3 (min)
A1	3.302	4.309	4.642	4.309	5.000	2.000	1.260	3.302	2.000	2.520	2.289	2.289	2.884	2.884	3.302
A2	4.309	3.557	4.000	4.642	4.309	3.915	3.915	3.634	3.634	3.684	3.420	2.466	2.289	3.634	3.915
A3	2.289	3.175	3.557	3.634	4.642	2.000	1.817	2.080	1.817	2.000	1.817	2.289	2.289	2.289	2.080
A4	3.302	3.915	2.924	4.000	4.217	2.000	2.000	1.817	3.420	2.289	4.309	2.289	4.000	2.000	1.260
A5	3.302	3.634	1.817	3.634	3.557	1.000	1.000	1.000	1.587	1.260	1.260	1.260	1.000	1.587	1.000
A6	2.714	3.915	2.884	2.884	2.884	3.302	4.309	4.309	4.309	2.289	2.080	2.080	2.000	2.884	2.080
A7	2.520	3.302	1.817	2.621	2.884	1.817	2.884	3.634	2.289	2.289	2.080	2.289	1.442	2.520	3.107
A8	2.466	2.884	1.260	2.080	1.442	1.587	2.884	2.000	2.000	1.442	1.587	1.817	1.587	5.000	1.817
A9	1.587	2.289	1.000	2.080	2.621	1.000	1.587	1.817	1.587	1.442	1.442	1.000	1.260	2.884	1.442
A10	2.621	3.175	1.260	3.000	3.000	2.289	2.884	3.302	2.714	3.634	2.714	3.915	4.309	2.884	3.175
A11	3.175	2.884	1.587	2.884	2.621	2.289	3.175	3.634	3.175	5.000	2.289	2.884	3.000	3.420	2.080
A12	2.289	2.884	1.587	3.000	3.000	2.621	4.309	4.309	4.309	3.915	3.302	3.557	2.884	3.634	3.302

$$X = \begin{pmatrix} A_1 & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где m – количество альтернатив, равное 12;

n – количество критериев, равное 15;

x_{ij} – оценка значение i -й альтернативы A по j -му критерию C .

Значения весовых коэффициентов критериев C1.1–C5.3 рассчитаны методом fuzzy АНР (рис. 4), результаты экспертной оценки альтернатив представлены в табл. 1 [32]. Значение критериев C1.1, C1.3, C3.1, C3.2,

C3.3, C5.1, C5.2 стремится к максимуму (группа «выгода»), критериев C1.2, C2.2, C2.2, C4.1, C4.2, C4.3, C4.4, C5.3 стремится к минимуму (группа «затраты»).

С использованием данных табл. 1 и рис. 4 выполнены расчёт нормализованной матрицы принятия решений и агрегация данных в соответствии с выбранными MCDM-методами. Результаты ранжирования альтернатив с использованием одиннадцати методов MCDM представлены в табл. 2 и на рис. 5.

Результаты анализа показывают, что наиболее предпочтительной альтернативой является A1 «использование интермодальных технологий и смешанных перевозок» (ранг

Таблица 2

Результаты ранжирования альтернатив различными методами MCDM

Метод MCDM	Альтернативы (инструменты «зелёной» логистики)											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
SAW	0.610	0.751	0.529	0.595	0.437	0.694	0.584	0.672	0.514	0.662	0.686	0.682
	7	1	10	8	12	2	9	5	11	6	3	4
TOPSIS	0.079	0.103	0.060	0.082	0.053	0.096	0.074	0.094	0.066	0.096	0.102	0.095
	8	1	11	7	12	4	9	6	10	3	2	5
PROMETHEE	-0.046	0.155	-0.140	-0.053	-0.262	0.128	-0.031	0.091	-0.156	0.080	0.126	0.108
	8	1	10	9	12	2	7	5	11	6	3	4
COPRAS	81.33	100.00	70.28	79.18	56.29	91.38	75.62	86.95	65.73	87.39	89.88	89.71
	7	1	10	8	12	2	9	6	11	5	3	4
ARAS	0.613	0.755	0.530	0.598	0.427	0.690	0.573	0.659	0.498	0.660	0.680	0.678
	7	1	10	8	12	2	9	6	11	5	3	4
WASPAS	0.344	0.423	0.299	0.336	0.245	0.392	0.330	0.377	0.287	0.374	0.388	0.385
	7	1	10	8	12	2	9	5	11	6	3	4
MAIRCA	0.035	0.051	0.028	0.035	0.019	0.049	0.036	0.046	0.027	0.045	0.048	0.047
	8	1	10	9	12	2	7	5	11	6	3	4
EDAS	0.498	0.843	0.313	0.473	0.053	0.721	0.412	0.585	0.183	0.646	0.690	0.691
	7	1	10	8	12	2	9	6	11	5	4	3
MABAC	-0.014	0.170	-0.101	-0.020	-0.212	0.146	0.000	0.112	-0.115	0.102	0.144	0.127
	8	1	10	9	12	2	7	5	11	6	3	4
CODAS	-0.098	0.617	-0.620	-0.037	-0.552	0.111	-0.247	0.493	0.002	0.126	0.128	0.090
	9	1	12	8	11	5	10	2	7	4	3	6
MARCOS	0.566	0.696	0.491	0.552	0.406	0.644	0.542	0.623	0.477	0.615	0.637	0.633
	7	1	10	8	12	2	9	5	11	6	3	4

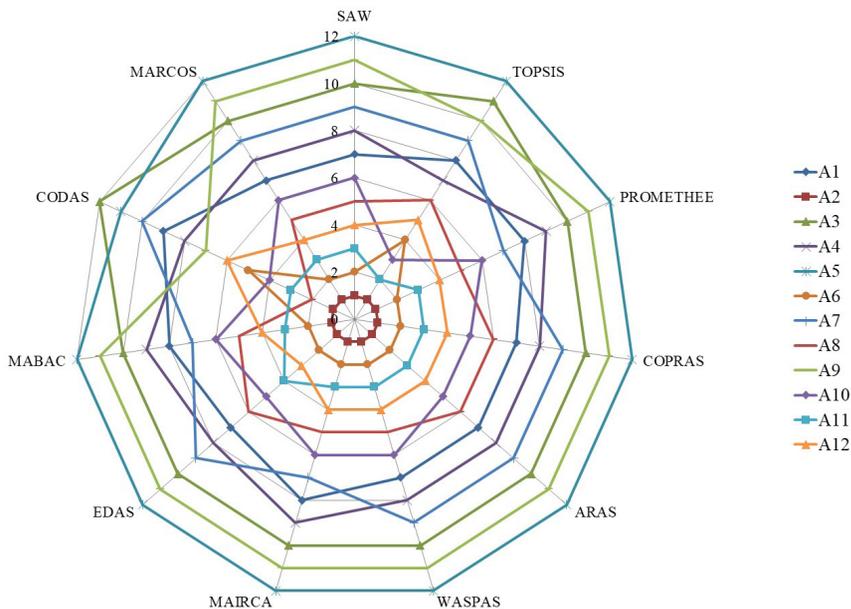


Рис. 5. Результаты ранжирования инструментов «зелёной» логистики одиннадцатью методами MCDM.



Коэффициент ранговой корреляции Спирмена (результаты получены автором)

Метод MCDM	SAW	TOPSIS	PROMETHEE	COPRAS	ARAS	WASPAS	MAIRCA	EDAS	MABAC	CODAS	MARCOS
SAW	1.000	0.930	0.979	0.993	0.993	1.000	0.979	0.986	0.979	0.818	1.000
TOPSIS	–	1.000	0.909	0.951	0.951	0.930	0.909	0.930	0.909	0.881	0.930
PROMETHEE	–	–	1.000	0.972	0.972	0.979	1.000	0.965	1.000	0.797	0.979
COPRAS	–	–	–	1.000	1.000	0.993	0.972	0.993	0.972	0.804	0.993
ARAS	–	–	–	–	1.000	0.993	0.972	0.993	0.972	0.804	0.993
WASPAS	–	–	–	–	–	1.000	0.979	0.986	0.979	0.818	1.000
MAIRCA	–	–	–	–	–	–	1.000	0.965	1.000	0.797	0.979
EDAS	–	–	–	–	–	–	–	1.000	0.965	0.783	0.986
MABAC	–	–	–	–	–	–	–	–	1.000	0.797	0.979
CODAS	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.000	0.818
MARCOS	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.000

№ 1 во всех одиннадцати методах), наименее предпочтительной альтернатива А5 «использование экологических горюче-смазочных материалов (видов топлива)» (ранг № 12 в 10 методах из 11). Расхождение ранга в альтернативах объясняется использованием в методах различных алгоритмов и способов нормализации исходной матрицы решений и агрегирования данных, а также наличием множества альтернатив при небольшом различии в оценках между ними.

Чтобы определить взаимосвязь между результатами ранжирования, полученными с помощью различных MCDM-методов, используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена [43] (табл. 3).

Несмотря на то, что в рассмотренных MCDM-методах используются разные способы нормализации и агрегации данных, при ранжировании альтернатив была достигнута высокая корреляция (общий коэффициент корреляции составил 0,949). Методы SAW, MARCOS и WASPAS полностью согласованы между собой и имеют самое высокое значение среднего коэффициента корреляции среди всех методов, равное 0,9688. Наименее согласованным по сравнению с другими методами является CODAS (средний коэффициент корреляции равен 0,829). Различие в рангах

описано в литературе [44; 45] и обосновано применением различных методов нормализации данных (например, векторной или линейной нормализации).

Полученные результаты ранжирования инструментов «зелёной» логистики могут быть использованы для принятия управленческих решений по повышению устойчивости транспортного элемента «зелёной» цепи поставок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследованы вопросы применения многокритериальных методов принятия решений (MCDM) в «зелёной» логистике и управлении «зелёными» цепями поставок, показаны особенности применения методов и обоснована необходимость их использования при управлении цепями поставок.

Разработанная комбинированная MCDM-модель оценки и выбора решений по реализации инструментов «зелёной» логистики включает двенадцать альтернатив и 15 критериев. Вес критериев рассчитывался с использованием fuzzy AHP, ранжирование альтернатив выполнялось одиннадцатью MCDM-методами – SAW, TOPSIS, PROMETHEE, COPRAS, ARAS, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC, CODAS, MARCOS.

Расчётный пример сравнения одиннадцати MCDM-методов показал высокую корреляцию результатов (коэффициент корреляции 0,949). Наиболее согласованными являются методы SAW, MARCOS и WASPAS, наименее согласованным – метод CODAS. По результатам расчётов предпочтительной альтернативой является «использование интермодальных технологий и смешанных перевозок» (A1), наименее предпочтительной альтернатива A5 «использование экологических горючесмазочных материалов».

Дальнейшие исследования могут быть связаны с разработкой гибридной MCDM-модели принятия решений по выбору инструментов «зелёной» логистики в цепях поставок, учитывающей интересы различных стейкхолдеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sustainable Development. United Nations Department of Economic and Social Affairs. [Электронный ресурс]: <https://sustainabledevelopment.un.org/>. Доступ 06.07.2021.
2. Kandakoglu, A., Frini, A., Ben Amor, S. Multicriteria decision making for sustainable development: a systematic review. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2019, Vol. 26, Iss. 5–6. pp. 202–251. DOI: <https://doi.org/10.1002/mcda.1682>.
3. Osintsev, N., Rakhmangulov, A., Śladkowski, A., Dyorina, N. Logistic flow control system in green supply chains. In: *Ecology in Transport: Problems and Solutions*. Ed. by Śladkowski, A. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2020, Vol. 124, pp. 311–380. DOI: [10.1007/978-3-030-42323-0_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_6).
4. Fredriksson, A., Janné, M., Nolz, P., Radiguès Chenevière, P., van Lier, T., Macharis, C. Creating stakeholder awareness in construction logistics by means of the MAMCA. *City and Environment Interactions*, 2021, Iss. 11, p. 100067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100067>.
5. Rakhmangulov, A. N., Kornilov, S. N., Aleksandrin, D. V., Shevkunov, N. O. Multi-criteria model for the development of industrial logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Iss. 966, 012103. DOI: [10.1088/1757-899X/966/1/012103](https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012103).
6. Roy, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Boston, MA: Springer US, 1996. Series: *Nonconvex Optimization and Its Applications*, Vol. 12, 292 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>.
7. Doukas, H., Nikas, A. Decision support models in climate policy. *European Journal of Operational Research*, 2020, Vol. 280, Iss.1. pp. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.017>.
8. Zavadskas, E. K., Turskis, Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 2011, Vol. 17, Iss. 2, pp. 397–427. DOI: [10.3846/20294913.2011.593291](https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291).
9. Stojčić, M., Zavadskas, E., Pamučar, D., Stević, Ž., Mardani, A. Application of MCDM methods in sustainability engineering: a literature review 2008–2018. *Symmetry*, 2019, Vol. 11, Iss. 3, 350. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym11030350>.
10. *Multiple Criteria Decision Making in Supply Chain Management*. Ed. by Ravindran, A. R. Boca Raton: CRC

Press, 2016, Vol.12, 412 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315371450>.

11. Beck, P., Hofmann, E. Multiple criteria decision making in supply chain management – Currently available methods and possibilities for future research. *Die Unternehmung*, 2012, Vol. 66, Iss. 2, pp. 180–213. DOI: [10.5771/0042-059X-2012-2-180](https://doi.org/10.5771/0042-059X-2012-2-180).

12. Khan, S. A., Chaabane, A., Dweiri, F.T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: a systematic literature review. In: *Multi-Criteria Methods and Techniques Applied to Supply Chain Management*. Ed. by V. A. P. Salomon. InTechOpen, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.intechopen.com/chapters/59664>. Доступ 06.07.2021.

13. Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Zakuan, N., Jusoh, A., Nor, K. M., Khoshnoudi, M. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Iss. 71, pp. 216–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.053>.

14. Rezaei, J. A systematic review of multi-criteria decision-making applications in reverse logistics. *Transportation Research Procedia*, 2015, Iss. 10, pp. 766–776. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.030>.

15. Chowdhury, P., Paul, S. K. Applications of MCDM methods in research on corporate sustainability: a systematic literature review. *Management of Environmental Quality*, 2020, Vol. 31, Iss. 2, pp. 385–405. DOI: <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2019-0284>.

16. Macharis, C., Bernardini, A. Reviewing the use of multi-criteria decision analysis for the evaluation of transport projects: time for a multi-actor approach. *Transport Policy*, 2015, Vol. 37, Iss. 1, pp. 177–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.11.002>.

17. Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Jusoh, A., Nor, K. M. Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems: a systematic review of the state of the art literature. *Transport*, 2016, Vol. 31, Iss. 3, pp. 359–385. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1121517>.

18. Wątróbski, J. Outline of multicriteria decision-making in green logistics. *Transportation Research Procedia*, 2016, Vol. 16, pp. 537–552. DOI: [10.1016/j.trpro.2016.11.051](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.051).

19. De Oliveira, U. R., Espindola, L. S., Da Silva, I. R., Da Silva, I. N., Rocha, H. M. A systematic literature review on green supply chain management: research implications and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 187, pp. 537–561. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.03.083](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.083).

20. Zhang, L.-J.; Liu, R.; Liu, H.-C.; Shi, H. Green supplier evaluation and selections: a state-of-the-art literature review of models, methods, and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, Iss. 4, pp. 1–25.

21. Hwang, Ching-Lai; Masud, Abu Syed Md. *Multiple Objective Decision Making – Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1979, 354 p. ISBN 978-3-642-45511-7. [Электронный ресурс]: <https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-642-45511-7%2F1.pdf>. Доступ 06.07.2021.

22. Hwang, Ching-Lai; Yoon, Kwangsun. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. A State-of-the-Art Survey*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1981, 262 p. ISBN 978-3-642-48318-9. [Электронный ресурс]: <https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-642-48318-9%2F1.pdf>. Доступ 06.07.2021.

23. *Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) Techniques for Business Processes Information Management*. Ed. by E. K. Zavadskas, J. Antucheviciene, P. Chatterjee. Basel, MDPI, 2019, 322 p. ISBN 978-3-03897-642-4. DOI: [10.3390/books978-3-03897-642-4](https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-642-4).

24. Zardari, N. H., Ahmed, K., Shirazi, S. M., Yusop, Z. B. Methods and their Effects on Multi-Criteria



Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management. Weighting Cham, Springer International Publishing, 2015, 166 p. DOI: 10.1007/978-3-319-12586-2.

25. Guitouni, A., Martel, J.-M. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 1998, Vol. 109, Iss. 2, pp. 501–521. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v109y1998i2p501-521.html#download>. Доступ 06.07.2021.

26. Valipour, A., Sarvari, H., Tamošaitiene, J. Risk Assessment in PPP Projects by Applying Different MCDM Methods and Comparative Results Analysis. *Administrative Sciences*, 2018, Vol. 8, Iss. 4, p. 80. DOI: 10.3390/admsci8040080.

27. Wątróbski, J., Jankowski, J., Ziemba, P., Karczmarczyk, A., Ziolo, M. Generalised framework for multi-criteria method selection. *Omega*, 2019, Vol. 86, Iss. 1, pp. 107–124. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/eee/jomega/v86y2019i1p107-124.html#download>. Доступ 06.07.2021.

28. Banasik, A., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., van der Vorst, J. G. A. J. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2018, Vol. 30, Iss. 3, pp. 366–396. [Электронный ресурс]: https://ideas.repec.org/a/spr/flsman/v30y2018i3d10.1007_s10696-016-9263-5.html#download. Доступ 06.07.2021.

29. Macharis, C., De Witte, A., Turckin, L. The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) application in the Flemish long-term decision making process on mobility and logistics. *Transport Policy*, 2010, Vol. 17, Iss. 5, pp. 303–311. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/eee/transport/v17y2010i5p303-311.html#download>. Доступ 06.07.2021.

30. Rakhmangulov, A., Sladkowski, A., Osintsev, N., Muravev, D. Green logistics: a system of methods and instruments. Part 2. *Naše more*, 2018, Vol. 65, Iss. 1, pp. 49–55. [Электронный ресурс]: https://www.nasemore.com/wp-content/uploads/2018/04/7_Rakhmangulov_Sladkowski_Osintsev_Muravev.pdf. Доступ 06.07.2021.

31. Осинцев Н. Концепция системы управления логистическими потоками в «зелёных» цепях поставок // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2020. – № 2. – С. 81–92. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92.

32. Осинцев Н., Рахмангулов А., Сладковский А. Ранжирование инструментов «зелёной» логистики комбинированным методом Fuzzy АНР-TOPSIS // *Транспорт Урала*. – 2020. – Т. 64. – № 1. – С. 3–14. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-3-14.

33. Churchman, C. W., Ackoff, R. L. An Approximate Measure of Value. *Journal of the Operations Research Society of America*, 1954, Vol. 2, Iss. 2, pp. 172–187. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/inm/oropre/v2y1954i2p172-187.html#download>. Доступ 06.07.2021.

34. Brans, J. P., Vincke, P. Note – a preference ranking organization method. *Management Science*, 1985, Vol. 31, Iss. 6, pp. 647–656. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/inm/ormsnc/v31y1985i6p647-656.html#download>. Доступ 06.07.2021.

35. Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., Sarka, V. The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and Economic Development of Economy*, 1994, Vol. 1, Iss. 3, pp. 131–139. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Arturas-Kaklauskas/publication/285902199_The_new_method_of_multicriteria_complex_proportional_assessment_of_projects/links/6076cdae020ab5f21733a0b/The-new-method-of-multicriteria-complex-proportional-assessment-of-projects.pdf. Доступ 06.07.2021.

36. 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, Iss. 2, pp. 159–172. DOI: 10.3846/tede.2010.10.

37. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, Vol. 122, Iss. 6, pp. 3–6. DOI: 10.5755/j01.eee.122.6.1810.

38. Pamučar, D., Vasin, L., Lukovac, V. Selection of railway level crossing for investing in security equipment using hybrid DEMATEL-MAIRCA: Application of a new method of multi-criteria decision-making. 16th Scientific-Expert Conference on Railways, RAILCON 2014. Bane, Faculty of Mechanical Engineering, pp. 89–92. DOI: 10.13140/2.1.2707.6807.

39. Keshavarz-Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., Turskis, Z. Multi-Criteria Inventory Classification Using a New Method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS). *Informatica*, 2015, Vol. 26, Iss. 3, pp. 435–451. DOI: 10.15388/Informatica.2015.57.

40. Pamučar, D., Čirović, G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attribute border approximation area comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42, Iss. 6, pp. 3016–3028. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.057.

41. Keshavarz-Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. A New Combinative Distance-Based Assessment (Codas) Method for Multi-Criteria Decision-Making. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 2016, Vol. 50, Iss. 3, pp. 25–44. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/cys/eococyb/v50y2016i3p25-44.html#download>. Доступ 06.07.2021.

42. 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, 106231. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106231.

43. Conover, W. J. *Practical nonparametric statistics*. Ed. 3rd. New York, Chichester, John Wiley, 1999, 608 p. ISBN 978-0-471-16068-7.

44. Aytekin, A. Comparative Analysis of the Normalization Techniques in the Context of MCDM Problems. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 2021, Vol. 4, Iss. 2, pp. 1–25. DOI: 10.31181/dmame210402001a.

45. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Kildienė, S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 2014, Vol. 20, Iss. 1, pp. 165–179. DOI: 10.3846/20294913.2014.892037.

Информация об авторе:

Осинцев Никита Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия, osintsev@magtu.ru.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021, одобрена после рецензирования 11.10.21, дополнена 29.10.2021, принята к публикации 05.11.2021.