

**РАНЖИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ЗЕЛЕННОЙ ЛОГИСТИКИ
КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ FUZZY ANP-TOPSIS**

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА
ДЛЯ СЛУЧАЯ ВОЗНИКШИХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
ВО ВРЕМЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТД-МПК**

**АУДИТ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ ТРАССАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ**

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**



МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александер Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Туранов Халибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Ташкент
13. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
14. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal «Transport of the Urals», Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyaev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Tashkent
13. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
14. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, А. В. Сладковский.
**Ранжирование инструментов зеленой логистики
 комбинированным методом fuzzy AHP-TOPSIS** 3

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, A. V. Sladkowski.
**A fuzzy AHP-TOPSIS approach for green logistics
 instruments ranking** 3

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Н. Ф. Сирина, О. А. Сисина. Имитационное моделирование информационного обмена для случая возникших чрезвычайных ситуаций во время перевозочного процесса на железнодорожном транспорте 15
Х. Т. Туранов, Я. О. Рuzметов, О. В. Молчанова, Ж. А. Шихназаров.
О креплении груза на вагоне при воздействии поперечных сил 23

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

N. F. Sirina, O. A. Sisina. Simulation modeling of information exchange for the case of emergency situations during the transportation process on the railway transport 15
Kh. T. Turanov, Ya. O. Ruzmetov, O. V. Molchanova, Zh. A. Shikhnazarov.
On fastening of freight in cars at action of transverse forces 23

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

О. И. Бондаренко, Д. Я. Антипин, С. Г. Шорохов.
**Оценка уровня травмирования пассажиров вагонов
 в аварийных ситуациях при взаимодействии с багажом** 30

ROLLING STOCK AND TRACTION

O. I. Bondarenko, D. Ya. Antipin, S. G. Shorokhov.
**Assessment of passenger injuries level in emergency situations
 at interaction with baggage** 30

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

Г. А. Черезов, Р. З. Галинуров, К. В. Колесниченко.
**О возможности применения методов обработки сигналов
 в системе технического диагностирования СТД-МПК** 35
А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев.
**Безопасность движения при остановке автотранспорта
 на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом** 39
А. В. Пулытяков, Р. В. Лихота, В. А. Алексеенко. Управление инцидентами в системе технической эксплуатации микропроцессорных устройств железнодорожной автоматике и телемеханики 43

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

G. A. Cherezov, R. Z. Galinurov, K. V. Kolesnichenko.
**Application of signal processing methods
 in the STD-MPK technical diagnostic system** 35
A. N. Popov, S. Yu. Grishaev.
**Safety of operation when motor vehicles stop
 at railway crossings in front of approaching train** 39
A. V. Pulytyakov, R. V. Likhota, V. A. Alekseenko.
**Incident management in system of technical operation
 of microprocessor devices of railway automation and telemchanics** 43

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

В. Ю. Лиференко. Об отдельных причинах возникновения вибрации в пассажирских вагонах 48
В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис. Методика оценки вероятности возникновения пожаров на основе мониторинга пожароопасных состояний электрооборудования пассажирских вагонов 54

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

V. Yu. Liferenko.
On separate reasons of vibration occurrence in passenger cars 48
V. A. Khanis, S. V. Bepalko, A. L. Khanis, A. A. Khanis.
**Method for assessing fire risk on the basis of monitoring
 of fire-hazardous conditions of passenger cars electric equipment** 54

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Е. С. Воеводин, К. В. Бакланова, Н. В. Шадрин, А. М. Асхабов, А. С. Поляков.
**Аудит безопасности дорожного движения
 на федеральных трассах Красноярского края** 57

MOTOR TRANSPORT

*E. S. Voevodin, K. V. Baklanova, N. V. Shadrin,
 A. M. Askhabov, A. S. Polyakov.*
Audit of road traffic safety on federal roads of Krasnoyarsk Territory 57

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. П. Буйносов, И. А. Иванов, Д. П. Кононов, С. В. Урушев. Некоторые аспекты назначения параметров структуры поверхности деталей машин 63

TRANSPORT MACHINERY

A. P. Buynosov, I. A. Ivanov, D. P. Kononov, S. V. Urushev.
Some aspects of assigning parameters of machine parts surface structure 63

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Н. Н. Андросов, И. С. Цихалевский, К. А. Вахрушев.
**Анализ возможности применения асинхронных
 тяговых электродвигателей с различным числом фаз** 70
Б. А. Аржанников, В. А. Кокшаров. Концептуальный подход к проблеме обоснования экономической эффективности трехфазной системы электрической тяги переменного тока 74
Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная.
**Определение основного удельного сопротивления
 движению поезда при анализе энергопотребления электровозами** 80
А. А. Бакланов, С. Г. Истомин. Эффективность использования электрической энергии на тягу электропоездов ЭД4М 85

ELECTRIC TRACTION

N. N. Androsov, I. S. Tsikhalevskiy, K. A. Vakhrushev.
**Analysis of possibility of application of induction motors
 with various number of phases** 70
B. A. Arzhannikov, V. A. Koksharov.
**Conceptual approach to problem of economic efficiency substantiation
 of three-phase alternating current system of electric traction** 74
E. A. Sidorova, S. O. Podgornaya.
**Determination of basic specific train tractive resistance
 at analysis of power consumption of electric locomotives** 80
A. A. Baklanov, S. G. Istomin. Efficiency of using electric power for traction of ED4M electric multiple units 85

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

А. Б. Батрашов, Н. В. Гущина. Применение численного моделирования для оценки электротепловых режимов работы элементов контактной сети постоянного тока 90
С. А. Филиппов, Р. С. Трифонов, О. А. Соловьёва.
**Факторный анализ работы дистанционной защиты фидеров
 контактной сети в условиях организации тяжеловесного движения** 94
Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев. Эффективность дистанционной защиты контактной сети постоянного тока с функцией адаптации к тяговому режиму 100
В. Л. Нежевак, С. С. Самолитов. Применение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения с целью повышения пропускной способности на лимитирующих участках 104

ELECTRIC SUPPLY

A. B. Batrashov, N. V. Gushhina. Application of numerical modelling for assessing electric and thermal operation modes of direct current catenary elements 90
S. A. Filippov, R. S. Trifonov, O. A. Solovyeva.
**Factor analysis of operation of catenary feeders' distance protection
 in conditions of heavy-load trains operation** 94
E. K. Khusainov, Yu. V. Kondratyev.
**Efficiency of direct current catenary distance protection
 with adaptation to traction mode** 100
V. L. Nezevak, S. S. Samolinov.
**Application of electric power accumulators in traction power supply
 system in order to increase capacity on «bottleneck» sections** 104

АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ

А. А. Пазуха. Влияние периодов суток на безопасность труда при обслуживании и ремонте устройств контактной сети 110

RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS

A. A. Pazukha. Influence of day period on labour safety at maintenance and repair of catenary facilities 110

2
 Январь – Март

УДК 656.078.1:502.131

Никита Анатольевич Осинцев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ), Магнитогорск, Россия,

Александр Нельевич Рахмангулов, доктор технических наук, профессор кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ), Магнитогорск, Россия,

Александр Валентинович Сладковский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика и транспортные технологии» Силезского технического университета, Катовице, Польша

РАНЖИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ЗЕЛЕННОЙ ЛОГИСТИКИ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ FUZZY AHP-TOPSIS

Nikita Anatolyevich Osintsev, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia,

Alexander Nelyevich Rakhmangulov, DSc in Engineering, Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia,

Alexander Valentinovich Sladkowski, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Logistics and Transport Technologies, Faculty of Transport, Silesian University of Technology, Katowice, Poland

A fuzzy AHP-TOPSIS approach for green logistics instruments ranking

Аннотация

Эффективная реализация концепции устойчивого развития в логистической деятельности и управлении цепями поставок основана на использовании методов принятия управленческих решений по изменению параметров логистических потоков с использованием инструментов зеленой логистики. Решения должны приниматься на основе измерения и оценки параметров и показателей этих потоков. Сложность управления зелеными цепями поставок связана с недостаточной изученностью системы показателей и параметров логистических потоков, отсутствием методик их комплексной оценки, а также методов и инструментов влияния на эти параметры и показатели. В статье предложено использование комбинированного метода fuzzy AHP-TOPSIS для оценки показателей логистических потоков в зеленых цепях поставок, а также для ранжирования инструментов зеленой логистики с учетом степени влияния каждого из них на рассматриваемые параметры и показатели. Представлен расчетный пример ранжирования инструментов зеленой логистики на основе оценки параметров и показателей логистических потоков в цепях поставок.

Ключевые слова: логистическая система, зеленая логистика, цепь поставок, транспортная система, показатели, методы принятия решений, ранжирование, нечеткий AHP-TOPSIS метод.

Summary

The effective concept implementation of sustainable development in logistics and supply chain management is based on the use of management decision-making methods for changing the parameters of logistics flows using the green logistics instruments. Decisions should be made based on the measurement and evaluation of the indicators of these flows.

The complexity of managing green supply chains is associated with insufficient knowledge of the system of logistics flows indicators and parameters, as well as methods and instruments for influencing these indicators.

In the paper the use of the fuzzy AHP-TOPSIS method for evaluating the performance of logistics flows in green supply chains is considered, as well as ranking of green logistics instruments, taking into account the degree of influence on logistics flows indicators. The work presents a calculation implementation example in the logistics flow control system of the procedure for ranking green logistic instruments.

Keywords: logistics system, green logistics, supply chain, transport system, decisions making, ranking, indicators, fuzzy AHP-TOPSIS.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-3-14

ВВЕДЕНИЕ

Развитие международной торговли в условиях глобализации приводит к росту объемов мирового товарооборота, расширению и усложнению товарной номенклатуры. Мировой экспорт коммерческих услуг и мировой экспорт товаров за последние 20 лет увеличился соответственно с 1,18 до 4,87 и с 5,17 до 19 млрд долл. США [1]. Рост глобального рынка логистических услуг с 2016 г. составляет 3,48 % в год и по оценкам [2] к 2022 г. может превысить 12 млрд долл. Подобная положительная динамика показателей международной торговли делает актуальной задачу развития транспортных и логистических систем, способных обслуживать возрастающие объемы перевозок максимально эффективно. Решение этой задачи осложняется повышением требований к экологическим аспектам транспортно-логистической деятельности, а также необходимостью обеспечивать соответствие формируемых транспортных коридоров и международных цепей поставок целям концепции устойчивого развития [3].

Многие транспортные и логистические компании [4] в своей деятельности реализуют принципы [5, 6] и инструменты зеленой логистики [7], рассматривая их как основу эффективного управления технологическими процессами, ресурсными и энергетическими потоками для снижения эколого-экономического ущерба окружающей среде, решения социальных вопросов

и эффективного инновационного развития производства. Вместе с тем в мировой практике управления зелеными цепями поставок до сих пор идет накопление и отбор частных решений по снижению отрицательного влияния логистики и транспорта на окружающую среду. Такие решения находят отражение в различных зеленых программах, стратегиях, проектах [4]. Логистические компании и транспортные предприятия сталкиваются с проблемой выбора той или иной зеленой технологии, обоснования ее использования для реализации в своей практической деятельности. Это делает актуальной задачу обоснования подходов и методов принятия решений, позволяющих оценить и выбрать зеленые технологии, реализация которых обеспечит повышение эффективности логистических и транспортных систем при минимальном вредном воздействии на окружающую среду.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В настоящее время для сложных многофакторных и многокритериальных задач формирования зеленых цепей поставок и управления ими широко используются многокритериальные подходы к принятию решений (Multi-Criteria Decision Making — MCDM). Они могут применяться при количественной оценке компромиссов между экономическими, социальными и экологическими критериями устойчивого развития цепей поставок [8]. Необходимость использования этих методов обусловлена многообразием характеристик и свойств логистических систем, их элементов [9], а также множеством параметров и показателей оценки их функционирования [10].

В научной литературе MCDM разделены на две категории: малый и конечный набор решений, называемый многофакторным принятием решений (Multi-Attribute Decision Making — MADM), и большой и бесконечный набор альтернатив, называемый многоцелевым принятием решений (Multi-Objective Decision Making — MODM) или многоцелевым программированием (Multi-Objective Programming — MOP). Методы MADM направлены на выявление наилучшего варианта на основе известных атрибутов ограниченного числа альтернатив, в то время как MODM направлены на поиск наилучшего решения, удовлетворяющего желанию лица, принимающего решение.

Многообразие параметров, свойств и характеристик логистических потоков в цепях поставок ставит задачу использования MCDM совместно с различными нечеткими подходами и методами. Это обосновано необходимостью учета множества факторов, обусловленных спецификой функционирования транспортных систем и цепей поставок, а также многообразием параметров потоков, циркулирующих в рамках логистической системы, оценка которых может выполняться и на основе точных количественных показателей, и с использованием приближенных качественных оценок.

Анализ научной литературы показывает, что в практике управления зелеными цепями поставок авторы применяют различные нечеткие подходы и методы, в частности fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) [11–15], fuzzy Importance and Performance Analysis (FIPA) [16], fuzzy Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) [17, 18], fuzzy Technique for Order Preference by Similarity Ideal

Solution (TOPSIS) [13, 19–22], fuzzy Analytic Network Process (ANP) [14, 23], fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) [20, 24, 25], fuzzy Grey Relational Analysis (GRA) [20], Interpretive Structural Modeling (ISM) [22, 26], нечеткую теорию игр [27, 28] и др. Перечисленные нечеткие методы используются при оценке и выборе поставщиков, планировании и проектировании сети цепей поставок, для анализа факторов зеленого производства, повышения экономических и экологических показателей цепи поставок, выбора стратегии развития зеленых цепей поставок, оценки затрат на зеленую логистику, минимизации выбросов в окружающую среду.

Недостатки большинства существующих подходов состоят в отсутствии комплексного и системного подхода к оценке всех логистических потоков, недостаточном учете взаимосвязей между показателями и параметрами потоков с позиции концепции устойчивого развития. Поэтому разработка методов и методик оценки параметров и показателей логистических потоков для выбора инструментов обеспечения функционирования транспортных систем и цепей поставок в соответствии с целями устойчивого развития представляет собой актуальную научную проблему.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ FUZZY ANP-TOPSIS В УПРАВЛЕНИИ ЗЕЛЕНЫМИ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК

В настоящем исследовании предлагается применять комбинированный нечеткий метод ANP-TOPSIS для оценки параметров и показателей логистических потоков в зеленых цепях поставок с целью определения приоритетов использования инструментов зеленой логистики.

Впервые подход fuzzy ANP с использованием треугольных нечетких чисел и метода анализа экстенгов описан в работе [29]. Позднее применение fuzzy ANP было обосновано для решения проблем устойчивого развития транспортных систем [19, 30], управления цепями поставок [31, 32], в области реверсивной логистики [24]. Использование fuzzy ANP, в отличие от метода анализа иерархии (AHP), предложенного Tomas L. Saaty [33], позволяет не только исключить такие недостатки, как несбалансированность шкалы суждений, неопределенность и субъективность суждения экспертов [34, 35], но и повысить точность ранжирования.

Для оценки степени влияния инструментов зеленой логистики на параметры и показатели логистических потоков и ранжирования инструментов между собой предлагается использовать нечеткий метод определения порядкового номера (или ранга) близости к идеальному решению fuzzy TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution).

TOPSIS относится к мультикритериальным методам принятия решений и основан на выборе такой альтернативы, которая наиболее близка к положительному идеальному решению и наиболее далека от отрицательного идеального решения. Впервые использование метода TOPSIS было предложено в работе [36] для выбора лучших альтернатив с конечным числом критериев. В [37, 38] сделан обзор применения метода TOPSIS в различных областях, среди которых наибольшая доля приходится на управление цепями поставок и логистику, инжиниринг и производственные системы. В ряде работ

[25, 32, 39, 40] обосновано использование fuzzy TOPSIS для многокритериальных задач принятия решений в нечеткой среде и для управления с неопределенностью в суждениях и оценках лиц, принимающих решения.

Комбинация методов ANP-TOPSIS позволяет повысить качество оценок лицами, принимающими решения, при выборе и реализации инструментов зеленой логистики. Метод fuzzy ANP используется для определения веса параметров и показателей логистических потоков, а fuzzy TOPSIS для ранжирования инструментов зеленой логистики с учетом степени влияния каждого инструмента на эти параметры и показатели.

2.1. Метод нечеткой аналитической иерархии — fuzzy ANP

Для использования fuzzy ANP необходимо представить систему параметров и показателей логистических потоков в виде многоуровневой иерархической модели. В качестве компонентов первого уровня иерархии выступают группы параметров логистических потоков, соответствующие основным аспектам концепции устойчивого развития. Компоненты второго уровня иерархии — это 15 показателей [10] оценки логистических потоков (табл. 1).

В качестве функции принадлежности предлагается использование треугольной функции, которая задается условиями

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (1)$$

где a — левый ноль;

b — точка, в которой значение функции принадлежности равно 1;

c — правый ноль (рис. 1).

На основе обобщения исследований [19, 32, 40] в настоящей работе приняты лингвистические переменные и треугольные нечеткие числа для оценки параметров и показателей логистических потоков (табл. 2).

Построение матриц парного сравнения $\tilde{A}(\tilde{u}_{ij})$ выполняется для всех параметров и показателей логистических потоков с целью определения относительной

Система параметров и показателей оценки логистических потоков

Группа параметров потока (I уровень иерархии)		Показатели потока (II уровень иерархии)	
Группа экономических параметров потока	E	Прибыль	E1
		Операционные расходы	E2
		Инвестиции в основной капитал	E3
Группа энергоэкологических показателей	EE	Энергоемкость логистического потока	EE1
		Объем выбросов парниковых газов	EE2
Группа показателей качества	S	Сохранность перевозки грузов	S1
		Своевременность перевозки грузов	S2
		Коэффициент управляемости логистического потока	S3
Группа статистических индикаторов	ST	Коэффициент неравномерности логистического потока	ST1
		Коэффициент сложности структуры логистического потока	ST2
		Коэффициент дискретности логистического потока	ST3
		Коэффициент дифференцируемости логистического потока	ST4
Группа управляемых (физических) параметров потока	M	Масса логистического потока	M1
		Скорость логистического потока	M2
		Длина маршрута логистического потока	M3

Таблица 2

Нечеткие и лингвистические переменные оценки параметров и показателей логистических потоков

Нечеткое число	Лингвистическая переменная	Шкала нечетких чисел
1	Равная важность	(1,1,3)
2	Умеренное превосходство	(1,3,5)
3	Значительное превосходство	(3,5,7)
4	Сильное превосходство	(5,7,9)
5	Абсолютное превосходство	(7,9,10)

ков с целью определения относительной важности каждой пары параметров (показателей) между собой:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{u}_{12} & \dots & \tilde{u}_{1n} \\ \tilde{u}_{21} & 1 & \dots & \tilde{u}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{u}_{(n-1)1} & \tilde{u}_{(n-1)2} & \dots & \tilde{u}_{(n-1)n} \\ \tilde{u}_{n2} & \tilde{u}_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{u}_{12} & \dots & \tilde{u}_{1n} \\ 1/\tilde{u}_{12} & 1 & \dots & \tilde{u}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/\tilde{u}_{(n-1)1} & 1/\tilde{u}_{(n-1)2} & \dots & \tilde{u}_{(n-1)n} \\ 1/\tilde{u}_{1n} & 1/\tilde{u}_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

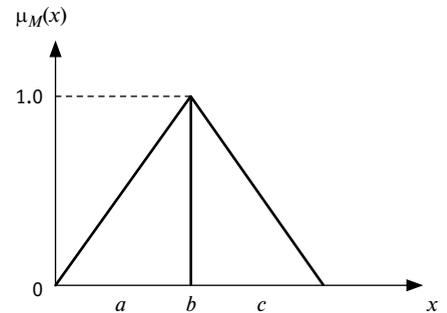


Рис. 1. Треугольная функция принадлежности

Матрица суждений \tilde{A} является нечеткой матрицей $n \times n$, содержащей нечеткие числа \tilde{u}_{ij} :

$$\tilde{u}_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 9^{-1}, 8^{-1}, 7^{-1}, 6^{-1}, 5^{-1}, 4^{-1}, 3^{-1}, 2^{-1}, 1^{-1}, & 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, i \neq j. \end{cases} \quad (3)$$

Значение нечеткой синтетической степени (экстенда) S_i относительно i -го критерия определяется как

$$S_i = \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где

$$\sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^m a_j, \sum_{j=1}^m b_j, \sum_{j=1}^m c_j \right); \quad (5)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n c_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i} \right). \quad (6)$$

Для оценки веса векторов по каждому критерию необходимо рассмотреть принцип сравнения нечетких чисел, основанный на пересечении двух нечетких чисел (рис. 2). В результате такого пересечения определяется величина V .

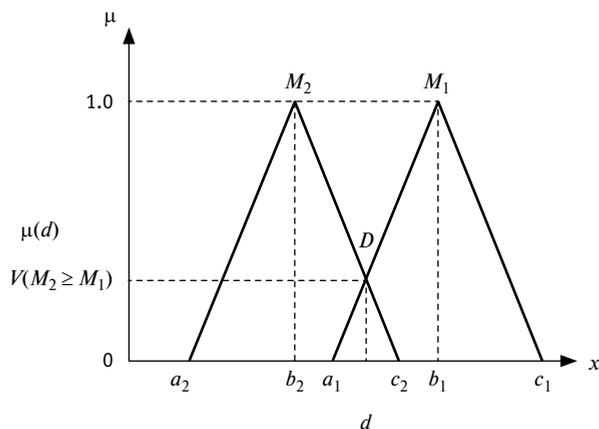


Рис. 2. Схема пересечения двух нечетких чисел M_1 и M_2

Мера возможности $M_2 = (a_2, b_2, c_2) > M_1 = (a_1, b_1, c_1)$ определяется следующим образом:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup [\min(\mu_{M_1(x)}, \mu_{M_2(y)})] = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2(d)}; \quad (7)$$

$$\mu_M(d) = \begin{cases} 1, & \text{если } b_2 \geq b_1; \\ 0, & \text{если } a_1 \geq c_2; \\ \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - a_1)}, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (8)$$

где d — ордината самой высокой точки пересечения D между $\mu_{M_1(x)}$ и $\mu_{M_2(y)}$.

Мера возможности для выпуклого нечеткого числа больше чем k выпуклых нечетких чисел $M_i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$ и рассчитывается по формуле

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1), \dots, (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i), i = 1, 2, \dots, k. \quad (9)$$

Величина $d'(A_i)$ рассчитывается по формуле

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k), \text{ для } k = 1, 2, \dots, n; k \neq i. \quad (10)$$

Тогда вектор приоритетов определится как

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T, \quad (11)$$

где $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ — вектор оцениваемых параметров, состоящий из n элементов.

С помощью нормализации получаем нормализованные весовые векторы

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T, \quad (12)$$

где W — нечеткое число.

Таким образом, в результате применения метода fuzzy AHP получены значения веса (ранга) параметров и показателей логистических потоков в цепях поставок.

2.2. Нечеткий метод ранжирования решений по критерию близости к идеальному — fuzzy TOPSIS

Для ранжирования инструментов зеленой логистики по степени их влияния на параметры и показатели логистических потоков в цепях поставок предлагается использовать метод fuzzy TOPSIS. В общем виде реализация fuzzy TOPSIS включает в себя следующие этапы.

1. Присвоение рейтинга критериям и альтернативам. Предположим, что существует m возможных альтернатив, называемых $I = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_m\}$, оценка которых выполняется по критериям $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$ группой из k лиц, принимающих решения, $D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_k\}$:

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_1 & \dots & C_1 \\ I_1 & r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ I_2 & r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_m & r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{matrix}, \quad (13)$$

где r_{mn} — рейтинг альтернатив I_m по критерию C_n , выставленный k -м лицом, принимающим решение.

В качестве альтернатив в настоящем исследовании выступают инструменты зеленой логистики [4, 7] (табл. 3).

Таблица 3

Инструменты зеленой логистики
 (на примере транспортного логистического элемента [7])

Инструмент	Обозначение
Использование экологичных видов транспорта	I_1
Использование интермодальных технологий и смешанных перевозок	I_2
Использование транспортных средств с наименьшим воздействием на окружающую среду	I_3
Выбор транспортных средств с большей грузоподъемностью (грузовместимостью)	I_4
Использование экологичных горюче-смазочных материалов (видов топлива)	I_5
Обеспечение технологического единства транспортно-складского процесса	I_6
Оптимизация маршрутов движения транспортных средств	I_7
Оптимизация скорости движения транспортных средств	I_8
Эковождение	I_9
Консолидация грузопотоков по направлениям	I_{10}
Оптимизация структуры грузопотоков	I_{11}
Оперативное управление параметрами материальных потоков	I_{12}

2. Расчет совокупной нечеткой оценки для критериев и альтернатив. Если нечеткие оценки всех лиц, принимающих решения, описываются треугольными нечеткими числами (табл. 4), то оценка каждого критерия рассчитывается по формулам:

$$a_{mnk} = \min_k \{a_{mnk}\}; b_{mnk} = \frac{1}{K} \sum_K b_{mnk}; c_{mnk} = \max_k \{c_{mnk}\}. \quad (14)$$

Таблица 4

Нечеткие числа и лингвистические переменные для оценки инструментов зеленой логистики

Нечеткое число	Лингвистическая переменная	Шкала нечетких чисел
1	Очень слабо	(1,1,3)
2	Слабо	(1,3,5)
3	Удовлетворительно	(3,5,7)
4	Сильно	(5,7,9)
5	Очень сильно	(7,9,10)

3. Нормализация матрицы нечетких решений. Нормализованная матрица нечетких решений имеет вид $R = [r_{ij}]_{m \times n}$, $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n$. Элементы этой матрицы рассчитываются по следующим критериям:

критерий результата $r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right)$ и $c_j^+ = \max_i \{c_{ij}\}$; (15)

критерий затрат $r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}^-}{c_{ij}^-}, \frac{a_{ij}^-}{c_{ij}^-}, \frac{a_{ij}^-}{c_{ij}^-} \right)$ и $a_{ij}^- = \min_i \{a_{ij}^-\}$. (16)

4. Вычисление взвешенной нормализованной матрицы. Взвешенная нормализованная матрица V определяется произведением весов критериев оценки w_j на нормализованную матрицу нечетких решений r_{ij} :

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

$$V = r_{ij} \times w_j, \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n w_j = 1.$$

5. Вычисление нечеткого положительного идеального решения (Fuzzy Positive Ideal Solution — FPIS) и нечеткого отрицательного идеального решения (Fuzzy Negative Ideal Solution — FNIS):

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+),$$

$$v_j^+ = \max_i \{v_{ij}^+\}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m;$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n; \quad (18)$$

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-),$$

$$v_j^- = \min_i \{v_{ij}^-\}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m;$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (19)$$

6. Расчет расстояния каждой альтернативы от FPIS и FNIS. Расстояние (d_i^+, d_i^-) каждой альтернативы A^+ и A^- определяется по формулам:

$$d_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \quad (20)$$

$$d_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (21)$$

7. Вычисление коэффициента близости CC_i каждой альтернативы. Коэффициент близости CC_i представляет собой расстояние до нечеткого положительного идеального решения A^+ и нечеткого отрицательного идеального решения A^- одновременно:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (22)$$

8. Ранжирование альтернатив. Альтернативы ранжируются в соответствии с коэффициентом близости CC_i в порядке убывания. Лучшая альтернатива — самая близкая к FPIS и самая дальняя от FNIS.

3. ПРИМЕР РАНЖИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ЗЕЛЕННОЙ ЛОГИСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FUZZY ANP-TOPSIS

На основе литературного обзора и практики реализации инструментов зеленой логистики в управлении цепями поставок были выбраны 12 инструментов (см. табл. 3). Логистические потоки оценивались по 5 группам параметров и 15 показателям в соответствии с аспектами концепции устойчивого развития (см. табл. 1).

В качестве лиц, принимающих решения, выбраны 7 академических экспертов. Ими выполнена оценка параметров и показателей логистических потоков с использованием лингвистических переменных и треугольных нечетких чисел (см. табл. 2 и 4). Итоговые результаты метода fuzzy ANP в виде матриц нечетких агрегированных решений по оценке параметров и показателей логистических потоков с указанием весовых коэффициентов приведены в табл. 5–10.

В табл. 11 представлены результаты расчета значений нечеткой синтетической степени (экстенда) групп параметров логистических потоков, выполненного по формулам (4)–(6).

Результаты расчета меры возможности критериев (V -значения) с использованием формул (7)–(8) для групп параметров логистических потоков приведены в табл. 12.

Таблица 5

Матрица нечетких агрегированных решений параметров логистических потоков

Параметр	E	EE	S	ST	M	Вес	Ранг
E	(1, 1, 1)	(1.12, 1.85, 2.69)	(0.19, 0.27, 0.43)	(3.97, 6.20, 8.27)	(0.19, 0.29, 0.46)	0.2538	2
EE	(0.37, 0.54, 0.89)	(1, 1, 1)	(1.37, 2.09, 4.11)	(2.44, 3.51, 5.92)	(0.21, 0.32, 0.58)	0.2219	4
S	(2.17, 3.47, 5.05)	(0.24, 0.43, 0.73)	(1, 1, 1)	(2.17, 2.76, 5.23)	(0.85, 1.26, 2.47)	0.2474	3
ST	(0.12, 0.16, 0.25)	(0.17, 0.28, 0.41)	(0.19, 0.36, 0.46)	(1, 1, 1)	(0.32, 0.39, 0.86)	0.0005	5
M	(2.17, 3.48, 5.05)	(1.72, 3.08, 4.64)	(0.40, 0.79, 1.17)	(1.15, 2.56, 3.11)	(1, 1, 1)	0.2764	1

Таблица 6

Матрица нечетких агрегированных решений экономических показателей логистических потоков (E)

Показатель	$E1$	$E2$	$E3$	Вес	Ранг
$E1$	(1, 1, 1)	(2.27, 3.64, 4.96)	(1.58, 2.86, 4.11)	0.7572	1
$E2$	(0.20, 0.27, 0.44)	(1, 1, 1)	(0.43, 0.69, 1.16)	0.0151	3
$E3$	(0.24, 0.35, 0.63)	(0.86, 1.46, 2.30)	(1, 1, 1)	0.2277	2

Таблица 7

Матрица нечетких агрегированных решений энергоэкологических показателей логистических потоков (EE)

Показатель	$EE1$	$EE2$	Вес	Ранг
$EE1$	(1, 1, 1)	(1.87, 3.31, 5.24)	0.9862	1
$EE2$	(0.19, 0.30, 0.53)	(1, 1, 1)	0.0138	2

Таблица 8

Матрица нечетких агрегированных решений показателей качества логистических потоков (S)

Показатель	$S1$	$S2$	$S3$	Вес	Ранг
$S1$	(1, 1, 1)	(1.27, 1.70, 2.30)	(0.85, 1.72, 2.86)	0.4478	1
$S2$	(0.43, 0.59, 0.79)	(1, 1, 1)	(0.72, 1.40, 2.09)	0.0349	3
$S3$	(0.35, 0.58, 1.17)	(0.48, 0.71, 1.39)	(1, 1, 1)	0.2473	2

Таблица 9

Матрица нечетких агрегированных решений статистических показателей логистических потоков (ST)

Показатель	$ST1$	$ST2$	$ST3$	$ST4$	Вес	Ранг
$ST1$	(1, 1, 1)	(1.47, 2.02, 2.43)	(1.04, 1.72, 2.36)	(1.26, 1.81, 2.17)	0.4116	1
$ST2$	(0.41, 0.49, 0.68)	(1, 1, 1)	(0.87, 1.54, 2.45)	(1.37, 2.17, 2.76)	0.3290	2
$ST3$	(0.42, 0.58, 0.96)	(0.41, 0.65, 1.13)	(1, 1, 1)	(0.96, 1.17, 1.51)	0.1747	3
$ST4$	(0.46, 0.55, 0.79)	(0.36, 0.46, 0.73)	(0.66, 0.85, 1.04)	(1, 1, 1)	0.0846	4

Таблица 10

Матрица нечетких агрегированных решений управляемых параметров логистических потоков (M)

Параметр	$M1$	$M2$	$M3$	Вес	Ранг
$M1$	(1, 1, 1)	(0.95, 1.29, 1.90)	(1.70, 2.57, 3.96)	0.4507	2
$M2$	(0.53, 0.78, 1.05)	(1, 1, 1)	(2.36, 4.53, 6.59)	0.5447	1
$M3$	(0.25, 0.39, 0.59)	(0.15, 0.22, 0.42)	(1, 1, 1)	0.0046	3

Таблица 11

Результаты расчета значения нечеткой синтетической степени (экстента)

Параметр	$\sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^m a_j, \sum_{j=1}^m b_j, \sum_{j=1}^m c_j \right)$	$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n c_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i} \right)$	S_i
E	(6.4773, 9.6169, 12.8589)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.11205, 0.24576, 0.48402)
EE	(5.4023, 7.4697, 12.5095)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.09346, 0.19089, 0.47086)
S	(6.4337, 8.9299, 14.4818)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.1113, 0.22821, 0.5451)
ST	(1.8021, 2.1975, 2.9859)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.03118, 0.05616, 0.11239)
M	(6.4518, 10.9166, 14.9697)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.11161, 0.27898, 0.56347)

Таблица 12

Результаты расчета меры возможности критериев (V -значения)

Параметр	E	EE	S	ST	M
E	—	1	1	1	0.91811
EE	0.86736	—	0.90598	1	0.80309
S	0.96104	1	—	1	0.89516
ST	0.00177	0.12322	0.00631	—	0.00349
M	1	1	1	1	—

Таблица 13

Ранжирование параметров и показателей логистических потоков

Группы параметров логистических потоков	Вес	Показатели логистических потоков	Вес	Финальный вес	Финальный ранг
Группа экономических параметров (E)	0.2538	$E1$	0.75726	0.19216	2
		$E2$	0.01508	0.00383	9
		$E3$	0.22766	0.05777	8
Группа энергоэкологических показателей (EE)	0.2220	$EE1$	0.98622	0.21890	1
		$EE2$	0.01378	0.00306	10
Группа показателей качества (S)	0.2474	$S1$	0.44784	0.11080	5
		$S2$	0.30491	0.07544	6
		$S3$	0.24725	0.06117	7
Группа статистических индикаторов (ST)	0.0005	$ST1$	0.41160	0.00020	12
		$ST2$	0.32903	0.00016	13
		$ST3$	0.17474	0.00009	14
		$ST4$	0.08463	0.00004	15
Группа физических параметров (M)	0.2764	$M1$	0.45068	0.12456	4
		$M2$	0.54476	0.15056	3
		$M3$	0.00456	0.00126	11

Мера возможности для каждого параметра вычисляется по формуле (9)

$$d'(E) = \min V(S_i = S_k) = \min(1, 1, 1, 0.91811) = 0.91811.$$

Для других параметров значения равны $d'(EE) = 0.80309$, $d'(S) = 0.89516$, $d'(ST) = 0.00349$, $d'(M) = 1$.

Весовой вектор каждого критерия $W' = 0.9181, 0.8030, 0.8951, 0.0017, 1$.

Посредством нормализации конечный вектор веса $W = 0.25375, 0.22196, 0.24741, 0.00049, 0.27639$.

Аналогичные расчеты выполняются для каждой группы параметров логистических потоков. Окончательные результаты расчета весовых коэффициентов параметров и показателей логистических потоков приведены в табл. 13.

Для ранжирования инструментов зеленой логистики методом fuzzy TOPSIS выполнена экспертная оценка этих инструментов с использованием треугольных нечетких чисел (см. табл. 2).

При расчете совокупной матрицы нечетких решений используется формула (14). Результаты расчета совокупной нечеткой оценки для показателей логистических потоков и инструментов зеленой логистики приведены в табл. 14.

Таблица 14

Матрица нечетких агрегированных решений инструментов зеленой логистики

Инструменты зеленой логистики	Показатели логистических потоков						
	$E1$	$E2$	$E3$...	$M1$	$M2$	$M3$
I_1	(3, 5.67, 9)	(5, 7.67, 10)	(5, 8.33, 10)	...	(1, 5, 9)	(1, 5, 9)	(3, 5.67, 9)
I_2	(5, 7.67, 10)	(3, 6.33, 10)	(5, 7, 9)	...	(1, 4.33, 9)	(3, 6.33, 9)	(3, 7, 10)
I_3	(1, 4.33, 9)	(1, 5.67, 9)	(3, 6.33, 10)	...	(1, 3.66, 7)	(1, 3.67, 7)	(1, 3.67, 7)
I_4	(3, 5.67, 9)	(3, 7, 10)	(1, 6.33, 10)	...	(5, 7, 9)	(1, 3.67, 9)	(1, 1.67, 5)
I_5	(3, 5.67, 9)	(3, 6.33, 9)	(1, 3, 7)	...	(1, 1, 3)	(1, 2.33, 5)	(1, 1, 3)
I_6	(1, 5.67, 10)	(3, 7, 10)	(1, 5, 9)	...	(1, 3.67, 9)	(1, 5, 9)	(1, 3.67, 7)
I_7	(1, 5, 9)	(3, 5.67, 9)	(1, 3, 7)	...	(1, 2.33, 7)	(1, 5, 9)	(1, 5.67, 10)
I_8	(1, 5, 10)	(1, 5, 9)	(1, 1.67, 5)	...	(1, 2.33, 5)	(7, 9, 10)	(1, 3, 7)
I_9	(1, 2.33, 5)	(1, 3.67, 7)	(1, 1, 3)	...	(1, 1.67, 5)	(1, 5, 9)	(1, 2.33, 7)
I_{10}	(1, 4.33, 7)	(1, 5.67, 9)	(1, 1.67, 5)	...	(5, 7.66, 10)	(1, 5, 9)	(1, 5.67, 9)
I_{11}	(1, 5.67, 9)	(1, 5, 9)	(1, 2.33, 5)	...	(3, 5, 7)	(1, 6.33, 10)	(1, 3.67, 7)
I_{12}	(1, 4.33, 9)	(1, 5, 9)	(1, 2.33, 5)	...	(1, 5, 9)	(3, 6.33, 9)	(3, 5.67, 9)

Таблица 15

Нормализованная матрица нечетких решений инструментов зеленой логистики

Инструменты зеленой логистики	Показатели логистических потоков						
	$E1$	$E2$	$E3$...	$M1$	$M2$	$M3$
I_1	(0.3, 0.567, 0.9)	(0.2, 0.130, 0.1)	(0.5, 0.833, 1)	...	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.333, 0.177, 0.111)
I_2	(0.5, 0.767, 1)	(0.333, 0.158, 0.1)	(0.5, 0.7, 0.9)	...	(0.1, 0.433, 0.9)	(0.3, 0.633, 0.9)	(0.333, 0.143, 0.1)
I_3	(0.1, 0.433, 0.9)	(1, 0.177, 0.111)	(0.3, 0.633, 1)	...	(0.1, 0.367, 0.7)	(0.1, 0.367, 0.7)	(1, 0.273, 0.143)
I_4	(0.3, 0.567, 0.9)	(0.333, 0.143, 0.1)	(0.1, 0.633, 1)	...	(0.5, 0.7, 0.9)	(0.1, 0.367, 0.9)	(1, 0.6, 0.2)
I_5	(0.3, 0.567, 0.9)	(0.333, 0.158, 0.111)	(0.1, 0.3, 0.7)	...	(0.1, 0.1, 0.3)	(0.1, 0.233, 0.5)	(1, 1, 0.333)
I_6	(0.1, 0.567, 1)	(0.333, 0.143, 0.1)	(0.1, 0.5, 0.9)	...	(0.1, 0.367, 0.9)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.273, 0.143)
I_7	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.333, 0.176, 0.111)	(0.1, 0.3, 0.7)	...	(0.1, 0.233, 0.7)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.177, 0.1)
I_8	(0.1, 0.5, 1)	(1, 0.2, 0.111)	(0.1, 0.167, 0.5)	...	(0.1, 0.233, 0.5)	(0.7, 0.9, 1)	(1, 0.333, 0.143)
I_9	(0.1, 0.233, 0.5)	(1, 0.273, 0.143)	(0.1, 0.1, 0.3)	...	(0.1, 0.167, 0.5)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.429, 0.143)
I_{10}	(0.1, 0.433, 0.7)	(1, 0.176, 0.111)	(0.1, 0.167, 0.5)	...	(0.5, 0.767, 1)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.177, 0.111)
I_{11}	(0.1, 0.567, 0.9)	(1, 0.2, 0.111)	(0.1, 0.233, 0.5)	...	(0.3, 0.5, 0.7)	(0.1, 0.633, 1)	(1, 0.273, 0.143)
I_{12}	(0.1, 0.433, 0.9)	(1, 0.2, 0.111)	(0.1, 0.233, 0.5)	...	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.3, 0.633, 0.9)	(0.333, 0.177, 0.111)

С учетом критерия результата или критерия затрат в соответствии с формулами (15) и (16) выполняется нормализация нечетких решений (табл. 15).

Для расчета взвешенной нормализованной матрицы используются весовые коэффициенты показателей логистических потоков, полученные методом fuzzy ANP (см. табл. 13). Результаты представлены в табл. 16.

После определения нечеткого положительного идеального решения (FPIS) и нечеткого отрицательного идеального решения (FNIS) [формулы (18) и (19)] рассчитывается расстояние (d_i^+ , d_i^-) между каждой альтернативой, с одной стороны, и значениями FPIS и FNIS — с другой [формулы (20) и (21)]. Ранжирование инструментов зеленой логистики производится по величине коэффициента близости CC_i . Результаты ранжирования представлены в табл. 17.

Результаты ранжирования инструментов зеленой логистики по степени их воздействия на параметры и показатели логистических потоков рекомендуется использовать при выборе того или иного инструмента с целью корректировки фактических значений показателей логистических потоков в соответствии с целями концепции устойчивого развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время многие транспортные и логистические компании в своей практической деятельности сталкиваются с проблемой выбора наиболее эффективной зеленой технологии из множества возможных. Для этого лицам, принимающим решение, требуется анализировать большое количество параметров и показателей перевозочного процесса, а также учитывать различные и зачастую противоречивые критерии.

Таблица 16

Взвешенная нормированная матрица нечетких решений инструментов зеленой логистики

Инструменты зеленой логистики	Показатели логистических потоков					
	E_1	E_2	E_3	...	M_2	M_3
I_1	(0.0576, 0.1089, 0.1729)	(0.0008, 0.0005, 0.0004)	(0.0289, 0.0481, 0.0578)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0004, 0.0002, 0.0001)
I_2	(0.0961, 0.1473, 0.1922)	(0.0013, 0.0006, 0.0004)	(0.0289, 0.0404, 0.052)	...	(0.0452, 0.0954, 0.1355)	(0.0004, 0.0002, 0.0001)
I_3	(0.0192, 0.0833, 0.1729)	(0.0038, 0.0007, 0.0004)	(0.0173, 0.0366, 0.0578)	...	(0.0151, 0.0552, 0.1054)	(0.0013, 0.0003, 0.0002)
I_4	(0.0576, 0.1089, 0.1729)	(0.0013, 0.0005, 0.0004)	(0.0058, 0.0366, 0.0578)	...	(0.0151, 0.0552, 0.1355)	(0.0013, 0.0008, 0.0003)
I_5	(0.0576, 0.1089, 0.1729)	(0.0013, 0.0006, 0.0004)	(0.0058, 0.0173, 0.0404)	...	(0.0151, 0.0351, 0.0753)	(0.0013, 0.0013, 0.0004)
I_6	(0.0192, 0.1089, 0.1922)	(0.0013, 0.0005, 0.0004)	(0.0058, 0.0289, 0.052)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0003, 0.0002)
I_7	(0.0192, 0.0961, 0.1729)	(0.0013, 0.0007, 0.0004)	(0.0058, 0.0173, 0.0404)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0002, 0.0001)
I_8	(0.0192, 0.0961, 0.1922)	(0.0038, 0.0008, 0.0004)	(0.0058, 0.0096, 0.0289)	...	(0.1054, 0.1355, 0.1506)	(0.0013, 0.0004, 0.0002)
I_9	(0.0192, 0.0448, 0.0961)	(0.0038, 0.001, 0.0005)	(0.0058, 0.0058, 0.0173)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0005, 0.0002)
I_{10}	(0.0192, 0.0833, 0.1345)	(0.0038, 0.0007, 0.0004)	(0.0058, 0.0096, 0.0289)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0002, 0.0001)
I_{11}	(0.0192, 0.1089, 0.1729)	(0.0038, 0.0008, 0.0004)	(0.0058, 0.0135, 0.0289)	...	(0.0151, 0.0954, 0.1506)	(0.0013, 0.0003, 0.0002)
I_{12}	(0.0192, 0.0833, 0.1729)	(0.0038, 0.0008, 0.0004)	(0.0058, 0.0135, 0.0289)	...	(0.0452, 0.0954, 0.1355)	(0.0004, 0.0002, 0.0001)

Таблица 17

Ранжирование инструментов зеленой логистики

Инструмент	d^+	d^-	CC_i	Ранг
Обеспечение технологического единства транспортно-складского процесса (I_6)	0.195214	0.416591	0.680921	1
Использование интермодальных технологий и смешанных перевозок (I_2)	0.211811	0.356473	0.62728	2
Оптимизация скорости движения транспортных средств (I_8)	0.232096	0.353631	0.603747	3
Оптимизация структуры грузопотоков (I_{11})	0.241263	0.363241	0.60089	4
Оптимизация маршрутов движения транспортных средств (I_7)	0.267667	0.334363	0.555393	5
Оперативное управление параметрами материальных потоков (I_{12})	0.281979	0.300057	0.51553	6
Выбор транспортных средств с большей грузоподъемностью (грузовместимостью) (I_4)	0.307761	0.28637	0.481998	7
Консолидация грузопотоков по направлениям (I_{10})	0.311175	0.268526	0.463214	8
Использование экологичных видов транспорта (I_1)	0.3334	0.245775	0.424354	9
Использование транспортных средств с наименьшим воздействием на окружающую среду (I_3)	0.354835	0.233818	0.397209	10
Эковожждение (I_9)	0.376805	0.190401	0.335682	11
Использование экологичных горюче-смазочных материалов (видов топлива) (I_5)	0.453394	0.096086	0.174868	12

Результатом неверного выбора в таких сложных условиях становится неустойчивость как самих транспортных организаций, так и перевозочного процесса.

В статье рассматриваются система обобщенных параметров и показателей логистических потоков, а также комплекс инструментов зеленой логистики, позволяющие принимать управленческие решения по выбору зеленых технологий в цепях поставок. Выбор эффективных инструментов зеленой логистики предлагается осуществлять на основе нечеткого метода ANP-TOPSIS. Он представляет собой комбинацию fuzzy ANP — метода опре-

деления веса параметров и показателей логистических потоков — и fuzzy TOPSIS — метода ранжирования инструментов зеленой логистики. Ранг (вес) каждого инструмента определяется по результатам оценки его влияния на параметры и показатели логистических потоков. В статье приводится пример ранжирования инструментов зеленой логистики, реализуемых в цепях поставок с целью обеспечения их устойчивого развития.

Представленный метод может использоваться в качестве основы для формирования системы управления логистическими потоками в зеленых цепях поставок.

Литература

1. WTO. Trade in goods and services has fluctuated significantly over the last 20 years. URL: https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/its2015_e/its15_highlights_e.pdf (дата обращения: 28.06.2019).
2. Logistics Market Outlook — 2022. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/logistics-market> (дата обращения: 11.08.2019).
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=R (дата обращения: 05.04.2019).
4. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. «Зеленая» логистика в России и за рубежом: обзор лучших практик // Вестник РГУПС. 2018. № 3 (71). С. 120–134. ISSN 0201–727X.
5. Систематизация принципов «зеленой» логистики (Часть 2. Синтез принципов логистики и устойчивого развития) / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, А. В. Сладковский, В. В. Багинова // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 2 (284). С. 7–16. ISSN 2072–8115.
6. Систематизация принципов «зеленой» логистики (Часть 1. Анализ существующих принципов логистики и устойчивого развития) / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, А. В. Сладковский, В. В. Багинова // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 1 (283). С. 10–16. ISSN 2072–8115.
7. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green Logistics: A System of Methods and Instruments — Part 2 // Naše more. 2018. Vol. 65. No. 1. Pp. 49–55.
8. Banasik A., Bloemhof-Ruwaard J. M., Kanellopoulos A. et al. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review // Flexible Services and Manufacturing Journal. 2018. Vol. 30. No. 3. Pp. 366–396.
9. Миротин Л. Б. Транспортная логистика : учебник для транспортных вузов. Москва : Экзамен, 2002. 511 с.
10. Осинцев Н. Параметры и показатели потоков в зеленых цепях поставок // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2019. Т. 9. № 1. С. 27–40. ISSN 2222–9396.
11. Govindan K., Khodaverdi R., Vafadarnikjoo A. Intuitionistic fuzzy based DEMATEL method for developing green practices and performances in a green supply chain // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 20. Pp. 7207–7220.
12. Lin K.-P., Tseng M.-L., Pai P.-F. Sustainable supply chain management using approximate fuzzy DEMATEL method // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 128. Pp. 134–142.
13. Uygun Ö., Dede A. Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques // Computers & Industrial Engineering. 2016. Vol. 102. Pp. 502–511.
14. Chen Z., Ming X., Zhang X. et al. A rough-fuzzy DEMATEL-ANP method for evaluating sustainable value requirement of product service system // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 228. Pp. 485–508.
15. Cheng S.-H., Ou S. M., Lin S.-M. Using decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) to explore the key success factors for green logistics manufacturers // African Journal of Business Management. 2018. Vol. 12. No. 3. Pp. 58–65.
16. Islam M. S., Tseng M.-L., Karia N., Lee C.-H. Assessing green supply chain practices in Bangladesh using fuzzy importance and per-

References

1. WTO. Trade in goods and services has fluctuated significantly over the last 20 years. URL: https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/its2015_e/its15_highlights_e.pdf (access date: 28.06.2019).
2. Logistics Market Outlook — 2022. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/logistics-market> (access date: 11.08.2019).
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=R (access date: 05.04.2019).
4. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. «Green» logistics in Russia and abroad: best practices' review [Zelenaya logistika v Rossii i za rubezhom: obzor luchshikh praktik] // Vestnik RGUUPS. 2018. No. 3 (71). Pp. 120–134. ISSN 0201–727X.
5. Systematization of the green logistics' principles. Part 2. Synthesis of the principles of logistics and sustainable development / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, A. V. Sladkovski, V. V. Baginova [Sistemizatsiya printsipov «zelenoy» logistiki (Chast' 2. Sintez printsipov logistiki i ustoychivogo razvitiya)] // Bulletin of Transport Information. 2019. No. 2(284). Pp. 7–16. ISSN 2072–8115.
6. Systematization of the green logistics' principles. Part 1. The analysis of the existing logistics' and sustainable development principles / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, A. V. Sladkovski, V. V. Baginova [Sistemizatsiya printsipov «zelenoy» logistiki (Chast' 1. Analiz sushhestvuyushhikh printsipov logistiki i ustoychivogo razvitiya)] // Bulletin of Transport Information. 2019. No. 1(283). Pp. 10–16.
7. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green Logistics: A System of Methods and Instruments — Part 2 // Naše more. 2018. Vol. 65. No. 1. Pp. 49–55.
8. Banasik A., Bloemhof-Ruwaard J. M., Kanellopoulos A. et al. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review // Flexible Services and Manufacturing Journal. 2018. Vol. 30. No. 3. Pp. 366–396.
9. Mirotin L. B. Transport logistics [Transportnaya logistika] : textbook for transport universities. Moscow : Examination, 2002. 511 p.
10. Osintsev N. Flow indicators in green supply chains [Parametry i pokazateli potokov v zelenykh tsepyakh postavok] // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 27–40. ISSN 2222–9396.
11. Govindan K., Khodaverdi R., Vafadarnikjoo A. Intuitionistic fuzzy based DEMATEL method for developing green practices and performances in a green supply chain // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 20. Pp. 7207–7220.
12. Lin K.-P., Tseng M.-L., Pai P.-F. Sustainable supply chain management using approximate fuzzy DEMATEL method // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 128. Pp. 134–142.
13. Uygun Ö., Dede A. Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques // Computers & Industrial Engineering. 2016. Vol. 102. Pp. 502–511.
14. Chen Z., Ming X., Zhang X. et al. A rough-fuzzy DEMATEL-ANP method for evaluating sustainable value requirement of product service system // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 228. Pp. 485–508.
15. Cheng S.-H., Ou S. M., Lin S.-M. Using decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) to explore the key success factors for green logistics manufacturers // African Journal of Business Management. 2018. Vol. 12. No. 3. Pp. 58–65.
16. Islam M. S., Tseng M.-L., Karia N., Lee C.-H. Assessing green supply chain practices in Bangladesh using fuzzy importance and perfor-

- formance approach // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 131. Pp. 134–145.
17. Rostamzadeh R., Govindan K., Esmaeili A., Sabaghi M. Application of fuzzy VIKOR for evaluation of green supply chain management practices // *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 49. Pp. 188–203.
 18. Gul M., Celik E., Aydin N. et al. A state of the art literature review of VIKOR and its fuzzy extensions on applications // *Applied Soft Computing*. 2016. Vol. 46. Pp. 60–89.
 19. Awasthi A., Chauhan S. S., Omrani H. Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems // *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38. No. 10. Pp. 12270–12280.
 20. Banaeian N., Mobli H., Nielsen I. E., Omid M. A methodology for green supplier selection in food industries // *Technology Management for Sustainable Production and Logistics* / Ed. by P. Golińska and A. Kawa. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. Pp. 3–23.
 21. Awasthi A., Chauhan S. S., Goyal S. K. A fuzzy multicriteria approach for evaluating environmental performance of suppliers // *International Journal of Production Economics*. 2010. Vol. 126. No. 2. Pp. 370–378.
 22. Kannan G., Pokharel S., Sasi Kumar P. A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider // *Resources, Conservation and Recycling*. 2009. Vol. 54. No. 1. Pp. 28–36.
 23. Chen L., Ren J. Multi-attribute sustainability evaluation of alternative aviation fuels based on fuzzy ANP and fuzzy grey relational analysis // *Journal of Air Transport Management*. 2018. Vol. 68. Pp. 176–186.
 24. Sirisawat P., Kiatcharoenpol T. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers // *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 117. Pp. 303–318.
 25. Prakash C., Barua M. K. Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment // *Journal of Manufacturing Systems*. 2015. Vol. 37. Pp. 599–615.
 26. Mathiyazhagan K., Govindan K., NoorulHaq A., Geng Y. An ISM approach for the barrier analysis in implementing green supply chain management // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 47. Pp. 283–297.
 27. Yang D., Xiao T. Pricing and green level decisions of a green supply chain with governmental interventions under fuzzy uncertainties // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 149. Pp. 1174–1187.
 28. Chavoshlou A. S., Khamseh A. A., Naderi B. An optimization model of three-player payoff based on fuzzy game theory in green supply chain // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 128. Pp. 782–794.
 29. Chang D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // *European Journal of Operational Research*. 1996. Vol. 95. No. 3. Pp. 649–655.
 30. Gumus A. T. Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology // *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36. Issue 2. Pp. 4067–4074.
 31. Patil S. K., Kant R. A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers // *Expert Systems with Applications*. 2014. Vol. 41. Issue 2. Pp. 679–693.
 32. Sun C.-C. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods // *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37. Issue 12. Pp. 7745–7754.

33. Saaty T. L. The Analytical Hierarchical Process. New York : McGraw-Hill, 1980.
34. Cheng C.-H., Yang K.-L., Hwang C.-L. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight // European Journal of Operational Research. 1999. Vol. 116. No. 2. Pp. 423–435.
35. Yang C.-C., Chen B.-S. Key quality performance evaluation using fuzzy AHP // Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers. 2004. Vol. 21. Issue 6. Pp. 543–550.
36. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Berlin; New York : Springer-Verlag, 1981. 259 p.
37. Behzadian M., Khanmohammadi Otaghsara S., Yazdani M., Ignatius J. A state-of the-art survey of TOPSIS applications // Expert Systems with Applications. 2012. Vol. 39. Issue 17. Pp. 13051–13069.
38. Salih M. M., Zaidan B. B., Zaidan A. A., Ahmed M. A. Survey on fuzzy TOPSIS state-of-the-art between 2007 and 2017 // Computers & Operations Research. 2019. Vol. 104. Pp. 207–227.
39. Kannan D., Jabbour A. B. L. d. S., Jabbour C. J. C. Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company // European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 233. No. 2. Pp. 432–447.
40. Nadaban S., Dzitac S., Dzitac I. Fuzzy TOPSIS: A General View // Procedia Computer Science. 2016. 91. Pp. 823–831.

Объем статьи 1,2 авторских листа