

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 656.078.1: 502.131.1  
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196



## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ СЕРОГО РЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н.

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

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Установлено отсутствие общепринятой методологии оценки устойчивости цепей поставок. В зависимости от вида и структуры цепей поставок используются разнообразные критерии, методы и модели оценки устойчивости, основанные на учёте влияния различных факторов среды функционирования этих цепей. **Цель работы.** Обоснование универсальной системы экономических, социальных и экологических факторов устойчивости цепей поставок и разработка методики оценки устойчивости этих цепей. **Используемые методы.** Литературный обзор, системный анализ, многокритериальный анализ, серый реляционный анализ, метод экспертных оценок. **Новизна.** Универсальная система факторов устойчивости цепей поставок, обоснованная с использованием оригинальной методики оценки значимости факторов на основе серого реляционного анализа. **Результат.** Ранжирование факторов устойчивости цепей поставок в порядке убывания влияния факторов на достижение целей устойчивого развития. Способ выбора методов и инструментов зелёной логистики на основе рангов факторов устойчивости. **Практическая значимость.** Разработанная методика предназначена для оценки устойчивости цепей поставок и выбора управленческих решений по достижению экономических, социальных и экологических целей их развития и функционирования.

**Ключевые слова:** цепи поставок, устойчивость, устойчивые цепи поставок, многокритериальный анализ, серый реляционный анализ, факторы, «зелёная» логистика

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>.*

© Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., 2023

### Для цитирования

Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 180-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# SUPPLY CHAIN SUSTAINABILITY ASSESSMENT BASED ON GRAY RELATIONAL ANALYSIS

Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** It has been established that there is no generally accepted methodology for assessing the sustainability of supply chains. A variety of criteria, methods, and models for assessing the sustainability based on the influence of various factors in the supply chain operation environment, are used depending on the type and the structure of supply chains. **Objectives.** The research is aimed at providing a rationale for a universal system of economic, social, and environmental factors for the sustainability of supply chains and development of a relevant assessment methodology. **Methods Applied.** A literature review, a system analysis, a multicriteria analysis, gray relational analysis, and a peer review method. **Originality.** A universal system of supply chain sustainability factors supported by using an original methodology for assessing the value of factors based on gray relational analysis. **Result.** The paper describes the ranking of supply chain sustainability factors in a descending order of their impact on the achievement of sustainable development goals. The authors present an approach to the choice of methods and tools of green logistics based on the ranks of sustainability factors. **Practical Relevance.** The developed methodology is designed to assess the sustainability of supply chains and make management decisions to achieve the economic, social, and environmental goals of their development and functioning.

**Keywords:** supply chains, sustainability, sustainable supply chains, multicriteria analysis, gray relational analysis, factors, green logistics

*The research was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>.*

## For citation

Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. Supply Chain Sustainability Assessment Based on Gray Relational Analysis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 180-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196>

## Введение

Изменчивость и неопределённость множества факторов эффективности функционирования цепей поставок осложняет принятие управленческих решений. Глобализация, сокращение продолжительности жизненного цикла товаров, государственное регулирование, инновации приводят к появлению новых продуктов и услуг, изменению целей и поведения стейкхолдеров в цепях поставок [1]. Каждый участник цепи поставок по-разному оценивает влияние факторов внешней среды. Такие оценки не всегда совпадают с объективной интенсивностью и силой воздействия факторов, оказывающих различное влияние на элементы цепей поставок. Это осложняет согласованное функционирования звеньев цепи поставок, снижает их эффективность. Возникает необходимость приоритизации факторов, определения их значимости и степени влияния на элементы цепей поставок с целью принятия эффективных управленческих решений.

В настоящее время эффективность функционирования цепей поставок всё чаще оценивают критерием устойчивости – комплексным критерием достижения экономических, социальных и экологических целей. Это обусловлено особенностями структуры цепей поставок, когда элементы одной и той же цепи могут располагаться в регионах с различными природно-климатическими и политическими условиями, разными уровнями развития экономики. Единственным фактором, оказывающим схожее влияние на разные элементы цепей поставок, является необходимость решения комплекса глобальных экологических проблем, связанных с выбросами парниковых газов, загрязнением окружающей среды, истощением природных ресурсов и изменением климата.

По заявлению генерального секретаря ООН Антонио Гутерриша, «Каждая страна, город, финансовое учреждение и компания должны принять планы по нулевому выбросу вредных веществ и действовать сейчас, чтобы встать на пра-

вильный путь к этой цели, что означает сокращение глобальных выбросов на 45% к 2030 году по сравнению с уровнем 2010 года» [2]. Следуя этой тенденции, многие ведущие мировые организации планируют достижение углеродной нейтральности в своей деятельности и цепочках поставок [3]. Большинство государств приняты цели в области устойчивого развития (ЦУР), реализуется концепция устойчивого развития (Sustainable Development). Растущее давление со стороны стейкхолдеров, государственных и неправительственных организаций вынуждает различные отрасли внедрять инициативы по управлению устойчивыми цепями поставок – Sustainable supply chain management [4]. Интеграция концепции устойчивого развития в операции цепей поставок позволяет компаниям создать «конкурентное преимущество» на рынке [5], а аспекты устойчивого развития и ЦУР становятся все более актуальными для включения в бизнес-логику и управление цепочками поставок [6].

Однако термин «устойчивость» в логистике и практике управления цепями поставок в настоящее время часто используется как синоним другим хорошо известным из теории управления понятиям, таким, например, как надёжность, эластичность, уязвимость или адаптация [7]. Наиболее часто в отношении устойчивости цепей поставок используются два понятия – «sustainability» и «resilience». Если «sustainability» больше тяготеет к концепции устойчивого развития, то «resilience» рассматривается как возможность сохранения ключевых функций в условиях неопределённости, сбоев и изменений [7, 8]. В данном исследовании под устойчивостью цепей поставок понимается их состояние, обеспечивающее достижение целей устойчивого развития, то есть достижение максимальных сбалансированных социальных, экологических и экономических показателей.

В настоящее время ведутся серьёзные споры о том, как следует измерять эффективность и устойчивость цепей поставок [9], какие факторы оказывают влияние на устойчивость [3], а также какие модели и методы использовать для оценки устойчивости. Целью настоящего исследования является разработка универсальной системы факторов устойчивости цепей поставок, а также методики формирования и корректировки такой системы.

Структура статьи организована следующим образом. В разделе «Литературный обзор» представлены результаты анализа актуальных исследований в области оценки устойчивости цепей

поставок, выявлены основные недостатки существующих подходов к оценке устойчивости. Раздел «Материалы и методы исследования» содержит описание оригинальной методики оценки факторов устойчивости цепей поставок, основанной на использовании серого реляционного анализа и логистического подхода к систематизации факторов устойчивости. В разделе «Полученные результаты и их обсуждение» представлены результаты ранжирования факторов устойчивости в порядке убывания их влияния на достижение целей устойчивого развития цепей поставок. Показан способ выбора методов и инструментов «зелёной» логистики на основе рангов факторов устойчивости. В заключении представлены основные результаты и показаны перспективы развития исследования.

### Литературный обзор

В результате обзора научных публикаций в области оценки устойчивости цепей поставок выделены следующие направления исследований: драйверы и барьеры управления устойчивыми или «зелёными» цепями поставок; модели и методы оценки факторов эффективности и устойчивости различных видов цепей поставок; тематические исследования цепей поставок различного вида и структуры. В [10] отмечается, что эмпирические исследования по изучению факторов управления «зелёными» цепями поставок показывают разные результаты.

В работе [11] в качестве основных факторов эффективности цепи поставок выделяют структуру цепей, политику управления запасами, систему обмена информацией, потребительский спрос, методы прогнозирования, время выполнения заказа и продолжительность отчётного периода. По мнению авторов [11], оптимальный набор параметров этих факторов повышает эффективность цепочки поставок. В [12] представлен всесторонний обзор факторов экологической устойчивости цепочки поставок. Эти факторы затем используются для обоснования управленческих решений по трём направлениям – управление закупками (тринадцать факторов), оценка эффективности (семь факторов) и сотрудничество (двадцать пять факторов).

В [13] исследованы факторы внутренней среды цепей поставок и выделены восемь групп факторов, наиболее значимыми из которых являются приверженность высшего руководства целям устойчивого развития, а также процессы реверсивной логистики и управления запасами. В другой работе [10] исследованы шесть факторов и

показано, что наиболее влиятельным является «зелёное производство», а фактор «зелёная логистика» находится под влиянием всех остальных факторов. В [14] выполнено исследование факторов, оказывающих влияние на реализацию «зелёных» инициатив и их вклад в достижение корпоративных целей логистических компаний.

В [15] установлено, что среди одиннадцати факторов внедрения «зелёных» цепей поставок на верхнем уровне иерархии находятся четыре: экологичный дизайн; интеграция качественного управления окружающей средой в процесс планирования и эксплуатации; снижение энергопотребления; повторное использование и переработка материалов (упаковки). В работе [16] исследованы важнейшие факторы успеха «зелёного» управления цепочками поставок в странах с развивающейся экономикой. Автором разработаны двадцать три модели и гипотезы с целью выявления факторов и барьеров внедрения экологичного управления ЦП.

Исследование [17] посвящено анализу устойчивого развития отдельных звеньев цепи поставок. Выявлены семь факторов формирования стратегии устойчивости цепи поставок. В исследовании [18] авторы акцентируют внимание на поведенческие факторы устойчивой цепи поставок. Авторы выделяют четырнадцать таких факторов, влияющих на эффективность управления. В работе [4] оценка успешного внедрения устойчивых цепей поставок осуществляется с использованием шестнадцати факторов.

В [19] выполнен обзор исследований критических факторов реализации инноваций в устойчивых цепях поставок. В результате анализа выделено четырнадцать основных категорий критических факторов, наиболее значимыми из которых являются сотрудничество, стратегическая ориентация, культура, практика и политический контекст. В работе [20] в качестве критических факторов успеха устойчивого управления цепями поставок выделяют четыре группы факторов: внешнее влияние; внутренняя среда организации; практика устойчивого управления цепочками поставок; эффективность устойчивого развития организации. Оценка факторов осуществляется с использованием двадцати параметров. В работе [21] выполнен анализ семнадцати факторов риска цепочки поставок с участием малых и средних предприятий в условиях неопределённости внешней среды с целью устойчивого развития.

Авторы [22] основным драйвером устойчивости цепи поставок называют управление прозрачностью цепочки поставок. Ими исследовано че-

тырнадцать факторов и выполнена их приоритизация. В другой работе [23] прозрачность устойчивой цепи поставок предлагают оценивать пятнадцатью факторами, используя для оценки шестьдесят девять параметров и показателей. В [24] предложена ABCDE-структура, включающая в себя пять групп факторов прозрачности цепей поставок (предпосылки (А), барьеры (В), проблемы (С), драйверы (D) и последствия (Е)).

В [3] на основе обобщения тридцати двух факторов декарбонизации цепи поставок установлено четыре основных барьера устойчивости цепи: первоначальные инвестиционные затраты; недостаточная осведомлённость (среди потребителей, заказчиков, поставщиков и сотрудников); отсутствие опыта; устойчивое мышление. В [25] выявлено сорок семь барьеров, препятствующих внедрению «зелёных» практик в управление цепями поставок. В [26] на основе анализа научных работ систематизированы тридцать семь драйверов и тридцать шесть барьеров как основных факторов, влияющих на эффективность реверсивной логистики.

В качестве методов оценки факторов устойчивости цепей поставок большинство исследователей используют: интерпретационное структурное моделирование (Interpretive Structural Modelling, ISM) [13, 15, 21, 27]; метод «Матричное произведение пересечений (жёстких) воздействий применительно к рейтингу» (Matriced' Impacts Croises Multiplication Applique a un Classement, MICMAC) [15, 21]; метод «Лаборатория оценки и испытаний принятия решений» (DEMATEL) [10, 18]; системный литературный обзор [3, 19], факторный анализ [20]; дисперсионный анализ ANOVA [14]; метод парного сравнения с использованием нечётких чисел [22]; метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process, АНР) [25]. Изменчивость и неопределённость множества факторов, оказывающих влияние на функционирование цепей поставок, показывает возможность применения серого реляционного анализа (Grey Relational Analysis, GRA) для оценки эффективности и устойчивости цепочек поставок [28-31].

Таким образом, анализ научных работ в области оценки устойчивости цепей поставок позволяет сделать следующие выводы:

1. Наблюдается увеличение числа научных публикаций, посвящённых управлению устойчивыми и зелёными цепями поставок, в том числе работ, связанных с оценкой устойчивости цепей поставок. При этом отмечается расхождение во взглядах учёных относительно понимания устойчивости цепей поставок.

2. Недостатком большинства существующих подходов является отсутствие системного подхода к оценке устойчивости всех элементов и процессов в цепях поставок. Наиболее частым объектом оценки являются «устойчивая поставка», на долю которого приходится до 43% исследований. Наименьшее количество исследований приходится на «устойчивое производство» и «устойчивое складирование».

3. Отсутствует единая система факторов и общепринятая система индикаторов оценки устойчивости цепей поставок. Исследователями используются различные факторы и показатели оценки данных факторов в зависимости от вида цепей поставок, масштабов и целей их функционирования.

4. Множество факторов, оказывающих влияние на устойчивость цепей поставок, а также сложность сбора исходных данных для их оценки делает целесообразным использование многокритериального анализа, экспертных методов, в том числе основанных на положениях теории нечётких множеств и теории серых систем.

#### Материалы и методы исследования

**Серый реляционный анализ.** Серый реляционный анализ (далее GRA) является частью теории серых систем (Grey System Theory), которая впервые была предложена профессором Дэн Джулонгом [32] в 1982 году. Название теории было выбрано на основе соответствия цветов степени ясности информации о системе: черный – для обозначения неизвестной информации; белый – полностью известной информации; серый – для информации, которая известна только частично. Такой подход позволяет учитывать неопределённость в принятии решений при наличии неточной и неполной информации о системе (её элементах, границах, параметрах), а также поведении системы [33].

GRA используется для исследования динамической взаимосвязи между различными факторами и их изменениями, оценки влияния данных факторов на исследуемую систему и определения важности влияния факторов на цели системы [34]. На основе расчёта серых реляционных коэффициентов и анализа серой реляционной степени, которая является положительной метрикой корреляции, определяется важность соответствующего фактора в системе [31].

Методика оценки факторов устойчивости цепей поставок с использованием серого реляционного анализа состоит из шести этапов.

Этап 1. Формирование начальной матрицы оценки факторов устойчивости цепей поставок

$X_i$  в соответствии с мнениями экспертов, которая включает  $m$  факторов, характеризуемых  $n$  критериями по формуле

$$X_i = [x_{ij}]_{nm}, \quad (1)$$

где  $x_{ij}$  – значение оценки  $i$ -го фактора по  $j$ -му критерию.

Этап 2. Нормализация начальной матрицы оценки факторов устойчивости цепей поставок с учётом критериев «выгода» и «затраты», характеризующихся различными значениями целевой функции. Для критериев «выгода» (benefit) значение целевой функции стремится к максимуму, а для критериев «затраты» (cost) – к минимуму.

Нормализованная матрица  $X_i^*$  рассчитывается по формуле

$$X_i^* = [x_{ij}^*]_{nm}, \quad (2)$$

где значения  $x_{ij}^*$  для критериев «выгода» определяются по формуле

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}, \quad (3)$$

а для критериев «затраты» – по формуле

$$x_{ij}^* = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}. \quad (4)$$

Использование формул (3) или (4) будет зависеть от установленных целевых значений критериев. Например, для показателя «прибыль» значение целевой функции стремится к максимуму и используется формула (3), а для показателя «операционные расходы» – к минимуму и используется формула (4).

Этап 3. Определение эталонного значения оценки факторов и построение матрицы различий  $\Delta$  путём сравнения значений оценок каждого фактора нормализованной матрицы  $x_{ij}^*$  с эталонным значением  $x_{0j}$ .

$$\Delta = [\Delta_{ij}]_{nm}, \quad (5)$$

$$\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}^*|. \quad (6)$$

Из полученной матрицы различий  $\Delta_{ij}$  выбираются минимальное и максимальное значения:

$$\Delta_{\min} = \min \{ \Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \}, \quad (7)$$

$$\Delta_{\max} = \max \{ \Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \}. \quad (8)$$

Этап 4. Расчёт серого реляционного коэффициента для всех факторов по формуле

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} - \varphi \Delta_{\max}}, \quad (9)$$

где  $\varphi$  – различительный коэффициент, показывающий соотношение значений минимальных и максимальных оценок. Значение коэффициента устанавливается лицами, принимающими решения, в интервале  $\varphi \in [0, 1]$ . Обычно значение  $\varphi$  принимается равным 0,5 [35].

Этап 5. Расчёт серых реляционных оценок для  $m$  факторов.

Серая реляционная оценка рассчитывается как среднее значение серых реляционных коэффициентов по формуле

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma(x_{0j}, x_{ij}), i = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

В случае если критерии имеют разные веса, серая реляционная оценка определяется по формуле

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j \gamma(x_{0j}, x_{ij}), i = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad (12)$$

где  $w_j$  – весовой коэффициент  $j$ -го критерия.

Определение весовых коэффициентов критериев в сложных системах, к которым относится система оценки цепей поставок, возможна с использованием субъективных и объективных методов взвешивания. Субъективные методы определения веса основаны на экспертной оценке, то есть определяются на основе суждений лица, принимающего решения (ЛПР) о данных критериях. Наибольшее распространение в MCDM получили такие методы, как SMART, AHP, SIMOS и метод Delphi. В методах объективного взвешивания вес определяется в результате анализа данных, собранных по каждому критерию с использованием математических алгоритмов и моделей и без участия ЛПР. Наиболее распространёнными методами являются метод наименьших средних квадратов (LMS), минимальное максимальное

отклонение, энтропия, TOPSIS и многокритериальная оптимизация [36].

Этап 6. Ранжирование факторов.

Ранжирование факторов производится в порядке уменьшения значений серых реляционных оценок  $\delta_i$ . Фактор с наибольшим значением серой реляционной оценки будет считаться наиболее значимым, то есть его значение будет наиболее близким к эталонному значению по всем критериям.

**Методика оценки факторов устойчивости цепей поставок с использованием GRA.** Принципиальная схема предлагаемой методики оценки факторов устойчивости цепей поставок с использованием серого реляционного анализа представлена на **рис. 1**.

Основные этапы методики:

I этап. Формирование модели устойчивой цепи поставок путём декомпозиции цепи на элементы с выделением специфических функций и операций по продвижению и переработке логистических потоков [37]. В устойчивых цепях поставок такими функциями являются [38]: снабжение и поставка (входной элемент); производство (перерабатывающий элемент); складирование (накопительный элемент); транспортирование (транспортный элемент); сбыт и дистрибуция (выходной элемент) и управление (управляющий элемент) (**рис. 2**). Выполнение перечисленных функций направлено на достижение целей устойчивого развития [38].

II этап. Оценка факторов устойчивости цепей поставок. Формируется группа экспертов, которые выполняют оценку факторов, оказывающих влияние на устойчивость каждого элемента цепи поставок в соответствии с выбранными критериями устойчивости. Оценивание допускается производить с использованием различных шкал, в том числе с использованием нечётких чисел. Далее с использованием GRA (формулы (1)-(12)) рассчитываются серые реляционные оценки, численные значения которых показывают значимость того или иного фактора устойчивости цепи поставок.

III этап. Оценка степени влияния факторов на элементы цепей поставок с использованием результатов GRA. Полученные результаты являются основой разработки рекомендации по использованию инструментов «зелёной» логистики применительно к элементам цепей поставок. Для ранжирования и выбора инструментов рекомендуется использовать многокритериальные методы принятия решений [39].

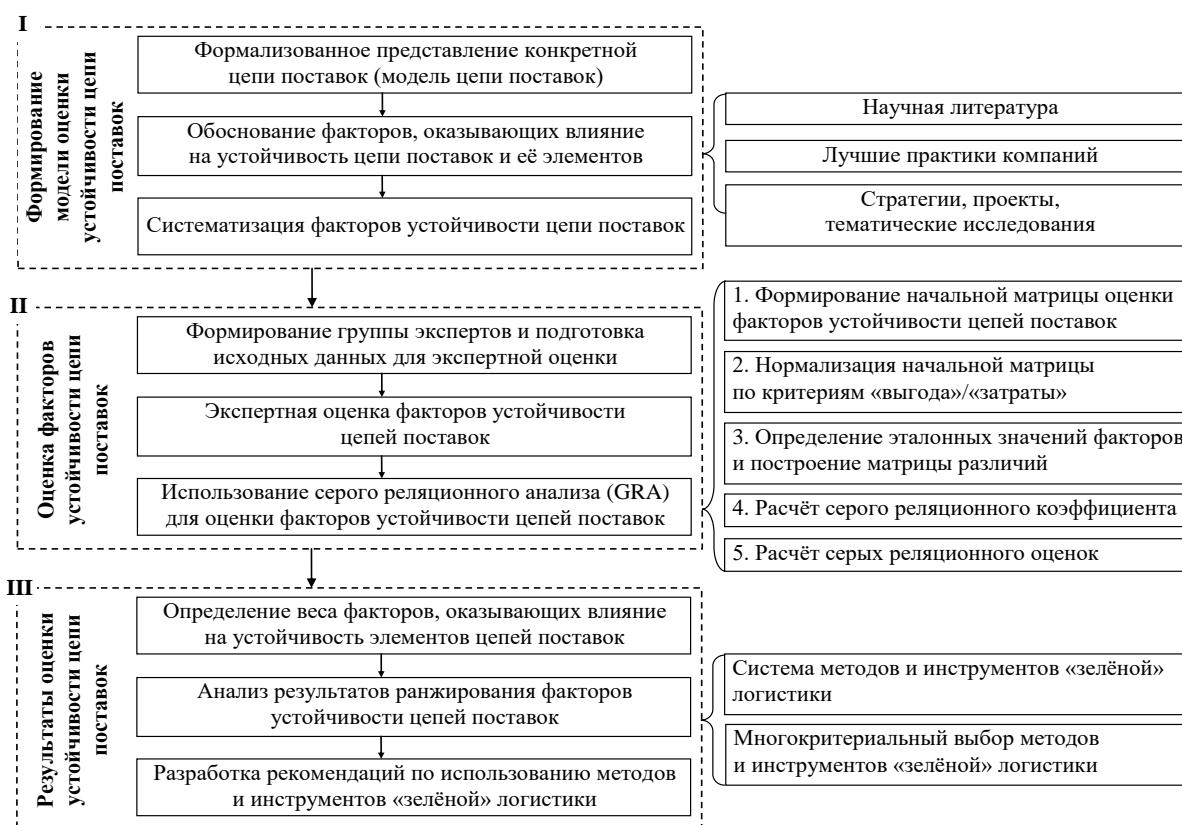


Рис. 1. Схема методики оценки факторов устойчивости цепей поставок  
 Fig. 1. Methodology for assessing the supply chain sustainability factors

### Полученные результаты и их обсуждение

**Система факторов устойчивости цепей поставок.** На основе анализа научной литературы, проектов, программ, а также лучших практик реализации «зелёных» принципов и технологий по повышению устойчивости цепей поставок нами обоснована система факторов устойчивости цепей поставок. На рис. 2 представлена предлагаемая система. В качестве основного признака систематизации были использованы поддерживающие функции элементов цепей поставок [40].

Разработанная система включает 54 фактора: 8 факторов входного элемента (F1.1...F1.8); 9 факторов перерабатывающего элемента (F2.1...F2.9); 11 факторов накопительного элемента (F3.1...F3.11); 12 факторов транспортного элемента (F4.1...F4.12); 6 факторов выходного элемента (F5.1...F5.6); 8 факторов управляющего (F6.1...F6.8). В качестве критериев оценки устойчивости цепей поставок могут быть использованы различные системы параметров и показателей, обзор которых представлен в [41]. Общим признаком различных систем оценки является соответствие параметров и показателей трём основным аспектам концепции устойчивого развития – экономическому, социально-культурному и экологи-

ческому. В настоящей работе использованы три обобщённых критерия экономической (C1), социальной (C2) и экологической (C3) устойчивости. Экономическая устойчивость характеризует эффективность использования всех видов ресурсов цепи поставок, а также степень экономической жизнеспособности цепи поставок. Это заключается в согласовании целей устойчивого развития с целями формирования и функционирования цепей поставок – получение прибыли, экономический рост, повышение конкурентоспособности и др. Социальная устойчивость характеризует возможность достижения целей, направленных на повышение уровня жизни, обеспечения транспортной безопасности, расширения доступности и улучшения качества транспортных и логистических услуг населению. Экологическая устойчивость отражает влияние цепей поставок на окружающую среду в процессе продвижения и переработки логистических потоков. Это выражается в оценке и учёте экологических факторов, а также ресурсных ограничений, необходимых для проектного и инвестиционного анализа, при стратегическом планировании развития территорий, обоснования приоритетных направлений развития транспорта и логистической инфраструктуры [40].

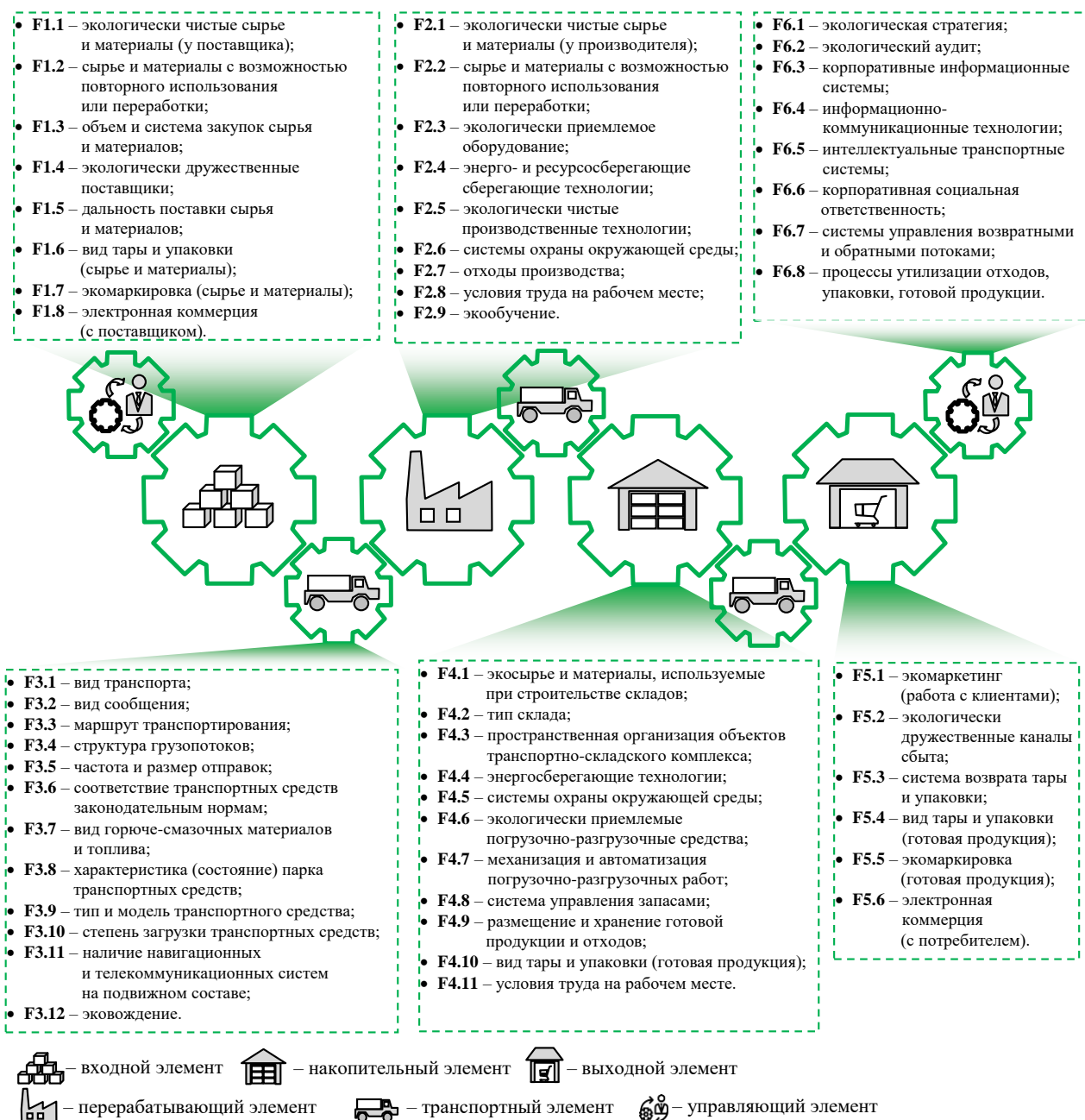


Рис. 2. Универсальная система факторов устойчивого развития цепей поставок [40]  
 Fig. 2. A universal system of the supply chain sustainable development factors [40]

На втором этапе реализации методики была сформирована группа экспертов, состоящая из пяти академических экспертов в области логистики и управления цепями поставок (три доктора и два кандидата технических наук). Эксперты произвели оценку влияния факторов на экономическую, социальную и экологическую устойчивость элементов цепей поставок по 9-бальной шкале (1 – наибольшее влияние, 9 – наименьшее). Сформированная начальная матрица оценки факторов  $X_i$  представлена в табл. 1.

Согласованность мнений экспертов в расчёт-

ном примере оценивалась с помощью коэффициента конкордации Кендалла отдельно по каждому критерию устойчивости цепи поставок и составила от 0,55 до 0,6, что говорит об умеренной согласованности экспертов. Необходимо отметить, что представленный пример ставит целью показать реализацию разработанной методики и максимально упростить оценку факторов по трём ключевым аспектам устойчивости цепей поставок (значимость которых в примере одинаковая). Однако для оценки устойчивости



цепей поставок на практике используют сложные многокритериальные иерархические системы. Вес параметров и показателей в них различный, а значения показателей могут быть получены как экспертными методами, так и с помощью

статистических или отчётных данных. Сложность сбора исходных данных, неопределённость информации делает целесообразным использование GRA для оценки устойчивости конкретных цепей поставок.

Таблица 1. Результаты экспертной оценки факторов устойчивости цепей поставок  
Table 1. An expert assessment of the supply chain sustainability factors

Элементы ЦП	Факторы	Эксперт 1			Эксперт 2			Эксперт 3			Эксперт 4			Эксперт 5		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Входной элемент (поставка)	F1.1	6	5	7	5	3	7	5	2	7	4	2	7	2	2	4
	F1.2	7	4	6	7	3	8	7	3	9	5	2	9	3	2	5
	F1.3	6	2	5	7	9	6	7	8	7	5	9	4	6	5	4
	F1.4	3	4	4	5	7	3	2	3	5	3	2	7	4	3	4
	F1.5	6	3	6	7	7	5	4	7	9	7	7	8	6	5	3
	F1.6	2	3	5	6	2	6	5	4	7	3	2	7	5	2	5
	F1.7	2	5	4	5	3	2	4	5	7	2	2	5	4	2	2
	F1.8	3	7	6	3	3	5	7	7	5	2	6	2	5	5	4
Перерабатывающий элемент (производство)	F2.1	7	5	7	9	5	9	7	2	9	5	2	8	4	2	3
	F2.2	8	5	8	7	2	7	7	2	9	5	2	9	3	3	5
	F2.3	7	8	8	7	6	9	5	2	9	5	2	8	5	2	5
	F2.4	8	7	6	7	5	8	7	2	9	8	2	8	3	3	6
	F2.5	8	8	9	7	5	9	7	2	9	8	2	8	3	3	5
	F2.6	6	7	7	7	3	9	5	2	9	5	2	5	3	2	6
	F2.7	6	7	8	8	2	7	7	2	9	5	2	8	5	3	4
	F2.8	7	9	6	5	6	7	3	3	9	4	2	5	3	2	3
	F2.9	4	7	6	5	5	7	5	3	9	4	2	4	3	2	2
Накопительный элемент (складирование)	F3.1	7	6	7	5	2	9	3	2	2	6	2	5	5	3	4
	F3.2	6	7	3	6	7	5	8	5	9	7	2	5	5	3	4
	F3.3	5	6	4	6	3	6	6	3	9	5	2	4	4	3	3
	F3.4	7	4	6	9	5	7	8	2	7	5	2	8	5	3	6
	F3.5	6	7	6	7	6	8	3	2	7	4	2	5	4	3	6
	F3.6	6	5	7	7	7	9	4	2	8	5	2	8	4	3	6
	F3.7	6	8	3	8	9	5	9	5	5	8	7	5	5	5	4
	F3.8	8	3	4	9	6	6	7	8	9	5	8	5	4	6	4
	F3.9	7	6	7	5	7	7	5	7	7	3	6	2	3	3	3
	F3.10	6	3	6	7	5	7	3	2	5	2	2	3	4	3	5
	F3.11	6	8	3	5	6	6	3	6	8	3	2	5	3	2	3
Транспортный элемент (транспортировка)	F4.1	6	5	7	9	5	9	6	3	9	3	2	8	4	3	5
	F4.2	7	6	7	6	7	7	7	6	7	7	7	7	3	4	3
	F4.3	6	6	5	6	6	7	7	7	7	5	7	6	4	5	5
	F4.4	5	5	4	5	7	7	7	7	7	7	7	6	6	4	3
	F4.5	8	5	6	5	4	7	7	7	7	6	8	5	3	4	5
	F4.6	5	3	7	7	6	8	6	2	9	5	2	8	3	3	4
	F4.7	6	2	7	7	2	9	6	2	9	5	2	7	3	3	4
	F4.8	7	6	6	7	6	7	8	4	9	7	2	9	3	3	6
	F4.9	6	5	6	7	4	9	6	2	9	6	2	9	3	3	5
	F4.10	5	3	4	7	4	6	8	3	9	6	2	6	5	3	7
	F4.11	7	6	5	5	6	5	5	7	7	4	5	6	3	5	4
	F4.12	4	6	4	6	5	7	3	4	7	2	2	5	3	3	4
Выходной элемент (дистрибуция)	F5.1	6	8	7	5	6	5	2	3	5	5	2	2	5	3	3
	F5.2	6	7	6	7	8	7	5	5	7	6	5	7	3	4	5
	F5.3	7	5	8	6	4	8	5	3	7	6	4	7	3	3	3
	F5.4	5	6	5	7	6	7	5	5	7	4	4	7	3	3	4
	F5.5	3	5	4	4	5	7	3	4	3	2	3	3	3	3	4
	F5.6	6	7	6	5	5	7	5	7	5	4	7	3	3	5	3
Управляющий элемент (управление)	F6.1	8	7	7	6	4	7	3	3	7	4	2	8	5	3	5
	F6.2	7	6	8	3	5	5	3	3	7	3	2	8	3	3	4
	F6.3	5	8	4	7	7	5	3	3	5	5	6	3	4	5	4
	F6.4	6	7	5	7	6	7	7	9	7	9	7	7	5	5	3
	F6.5	8	6	5	8	8	8	5	7	7	9	7	5	5	6	6
	F6.6	6	9	7	3	7	5	3	3	5	3	5	3	3	3	4
	F6.7	7	5	7	6	4	8	5	3	7	6	4	6	5	3	6
	F6.8	8	6	8	5	6	7	7	3	7	5	2	8	5	3	6

С использованием формул (2)-(8) рассчитаны нормализованные значения оценки факторов  $x_{ij}^*$  и определены их отклонения от эталонного значения  $\Delta_{ij}$  (табл. 2). Далее по формуле (9) рассчитаны зна-

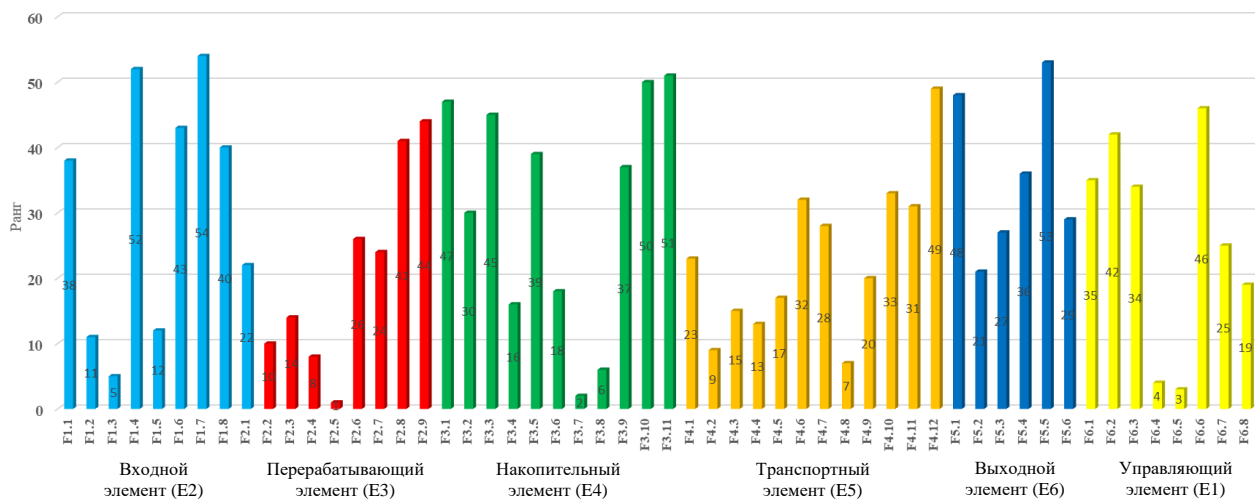
чения серого реляционного коэффициента  $\gamma$  для всех факторов, а по формуле (10) – серая реляционная оценка факторов  $\delta_i$  (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты оценки факторов методом GRA  
Table 2. The assessment of the factors by the GRA method

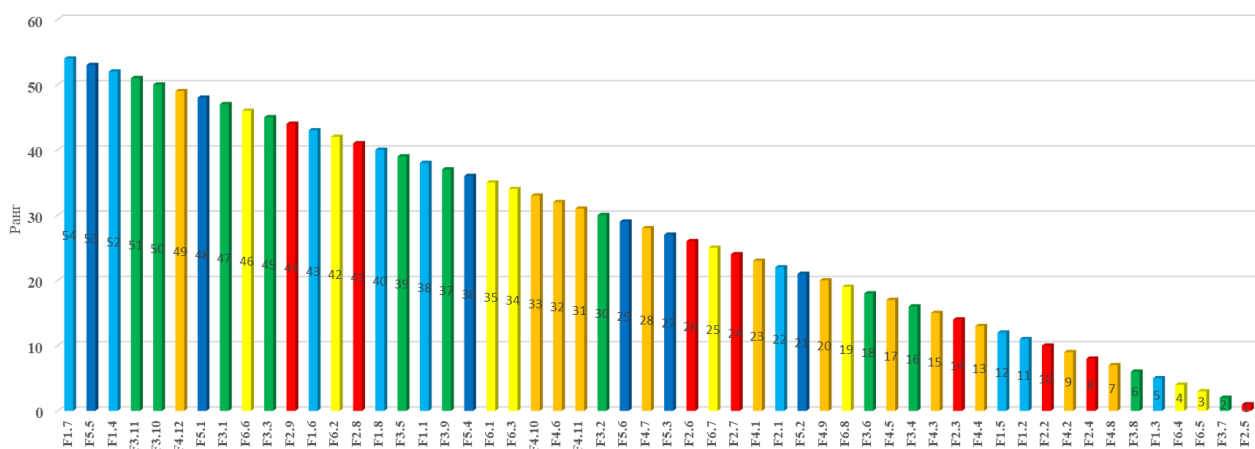
Факторы	Начальные значения оценок факторов $x_{ij}$			Нормализованные значения оценок факторов $x_{ij}^*$			Отклонения $\Delta_{ij}$			Серый реляционный коэффициент $\gamma$			Серая реляционная оценка $\delta_i$	Ранг
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3		
F1.1	4,742	2,491	6,787	0,428	0,067	0,759	0,571	0,932	0,240	0,466	0,349	0,675	0,496	38
F1.2	5,851	2,701	7,708	0,690	0,111	0,974	0,309	0,888	0,025	0,617	0,360	0,952	0,643	11
F1.3	6,153	6,948	5,073	0,762	1,000	0,357	0,238	0,000	0,642	0,677	1,000	0,437	0,705	5
F1.4	3,245	3,650	4,416	0,074	0,309	0,204	0,925	0,690	0,796	0,350	0,420	0,385	0,385	52
F1.5	6,153	5,524	6,407	0,762	0,702	0,670	0,238	0,298	0,329	0,677	0,626	0,602	0,635	12
F1.6	4,477	2,491	5,932	0,365	0,067	0,559	0,634	0,932	0,440	0,440	0,349	0,531	0,440	43
F1.7	3,169	3,129	3,545	0,056	0,200	0,000	0,943	0,799	1,000	0,346	0,384	0,333	0,354	54
F1.8	3,519	5,673	4,128	0,139	0,733	0,136	0,860	0,266	0,863	0,367	0,652	0,366	0,462	40
F2.1	6,433	2,885	6,710	0,828	0,149	0,741	0,171	0,850	0,258	0,744	0,370	0,658	0,591	22
F2.2	6,517	2,605	7,432	0,848	0,091	0,910	0,151	0,908	0,089	0,767	0,354	0,847	0,656	10
F2.3	5,720	2,759	7,633	0,659	0,123	0,957	0,340	0,876	0,042	0,595	0,363	0,921	0,626	14
F2.4	6,602	3,347	7,300	0,868	0,246	0,879	0,131	0,753	0,120	0,791	0,398	0,805	0,665	8
F2.5	7,159	3,816	7,815	1,000	0,344	1,000	0,000	0,655	0,000	1,000	0,432	1,000	0,810	1
F2.6	5,304	2,825	7,016	0,561	0,137	0,813	0,438	0,862	0,187	0,532	0,366	0,727	0,542	26
F2.7	6,093	2,605	6,942	0,747	0,091	0,795	0,252	0,908	0,204	0,664	0,354	0,709	0,576	24
F2.8	4,169	4,193	5,632	0,293	0,423	0,488	0,707	0,576	0,511	0,414	0,464	0,494	0,457	41
F2.9	4,128	3,936	4,967	0,283	0,369	0,333	0,716	0,630	0,667	0,410	0,442	0,428	0,427	44
F3.1	5,008	2,491	4,789	0,491	0,067	0,291	0,508	0,932	0,708	0,495	0,349	0,413	0,419	47
F3.2	6,319	4,300	4,617	0,801	0,445	0,251	0,198	0,554	0,748	0,715	0,474	0,400	0,530	30
F3.3	5,143	2,930	4,441	0,523	0,159	0,209	0,476	0,840	0,790	0,511	0,372	0,387	0,424	45
F3.4	6,608	3,519	6,759	0,869	0,282	0,752	0,130	0,717	0,247	0,793	0,410	0,669	0,624	16
F3.5	4,580	3,471	6,319	0,390	0,272	0,649	0,609	0,727	0,350	0,450	0,407	0,588	0,481	39
F3.6	5,304	3,347	7,528	0,561	0,246	0,932	0,438	0,753	0,067	0,532	0,398	0,881	0,604	18
F3.7	7,039	6,853	4,573	0,971	0,980	0,240	0,028	0,019	0,759	0,945	0,961	0,397	0,768	2
F3.8	6,608	6,490	5,073	0,869	0,904	0,357	0,130	0,095	0,642	0,793	0,839	0,437	0,690	6
F3.9	4,891	5,555	4,599	0,463	0,708	0,246	0,536	0,291	0,753	0,482	0,631	0,398	0,504	37
F3.10	4,324	2,825	5,008	0,329	0,137	0,342	0,670	0,862	0,657	0,427	0,366	0,431	0,408	50
F3.11	3,519	4,095	4,644	0,139	0,403	0,257	0,860	0,597	0,742	0,367	0,455	0,402	0,408	51
F4.1	5,223	3,393	7,432	0,542	0,256	0,910	0,457	0,743	0,089	0,522	0,401	0,847	0,590	23
F4.2	6,068	6,153	6,258	0,742	0,833	0,635	0,258	0,166	0,364	0,659	0,750	0,578	0,662	9
F4.3	5,501	6,153	6,153	0,607	0,833	0,610	0,392	0,166	0,389	0,560	0,750	0,562	0,624	15
F4.4	5,932	6,068	5,932	0,709	0,815	0,559	0,290	0,184	0,440	0,632	0,730	0,531	0,631	13
F4.5	6,093	5,618	6,153	0,747	0,721	0,610	0,252	0,278	0,389	0,664	0,642	0,562	0,623	17
F4.6	5,008	2,930	6,942	0,491	0,159	0,795	0,508	0,840	0,204	0,495	0,372	0,709	0,526	32
F4.7	5,501	2,168	6,920	0,607	0,000	0,790	0,392	1,000	0,209	0,560	0,333	0,704	0,532	28
F4.8	6,721	3,866	7,277	0,896	0,355	0,874	0,103	0,644	0,126	0,828	0,436	0,798	0,687	7
F4.9	5,705	2,992	7,378	0,656	0,172	0,897	0,343	0,827	0,102	0,592	0,376	0,830	0,599	20
F4.10	5,932	2,930	6,187	0,709	0,159	0,618	0,290	0,840	0,381	0,632	0,372	0,567	0,524	33
F4.11	4,617	5,752	5,304	0,399	0,749	0,412	0,601	0,250	0,588	0,454	0,666	0,459	0,526	31
F4.12	3,650	3,727	5,231	0,170	0,326	0,395	0,829	0,673	0,605	0,376	0,425	0,452	0,418	49
F5.1	4,682	3,866	4,020	0,414	0,355	0,111	0,585	0,644	0,888	0,460	0,436	0,360	0,419	48
F5.2	5,501	5,618	6,345	0,607	0,721	0,655	0,392	0,278	0,344	0,560	0,642	0,592	0,598	21
F5.3	5,501	3,727	6,602	0,607	0,326	0,715	0,392	0,673	0,284	0,560	0,425	0,637	0,541	27
F5.4	4,617	4,919	6,118	0,399	0,575	0,602	0,601	0,424	0,397	0,454	0,540	0,557	0,517	36
F5.5	2,930	3,898	3,866	0,000	0,361	0,075	1,000	0,638	0,924	0,333	0,439	0,350	0,374	53
F5.6	4,477	6,118	4,789	0,365	0,826	0,291	0,634	0,173	0,708	0,440	0,742	0,413	0,532	29
F6.1	4,919	3,471	6,721	0,470	0,272	0,743	0,529	0,727	0,256	0,485	0,407	0,661	0,518	35
F6.2	3,554	3,519	6,284	0,147	0,282	0,641	0,852	0,717	0,358	0,369	0,410	0,582	0,454	42
F6.3	4,617	6,093	4,128	0,399	0,821	0,136	0,601	0,179	0,863	0,454	0,736	0,366	0,519	34
F6.4	6,517	6,672	5,524	0,848	0,942	0,463	0,151	0,057	0,536	0,767	0,896	0,482	0,715	4
F6.5	6,628	6,759	6,093	0,874	0,960	0,596	0,125	0,039	0,403	0,799	0,926	0,553	0,759	3
F6.6	3,322	4,663	4,617	0,092	0,521	0,251	0,907	0,478	0,748	0,355	0,511	0,400	0,422	46
F6.7	5,578	3,727	6,759	0,626	0,326	0,752	0,374	0,673	0,247	0,572	0,425	0,669	0,555	25
F6.8	5,720	3,958	7,159	0,659	0,374	0,846	0,340	0,625	0,153	0,595	0,444	0,765	0,601	19
Мин	2,930	2,168	3,545	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	–	–	–	–	–
Макс	7,159	6,948	7,815	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	–	–	–	–	–

Результаты ранжирования факторов устойчивости цепей поставок представлены на **рис. 3**. Факторы обозначены номерами (F1.1-F6.8) в соответствии с **рис. 2** и цветами, которые соответствуют элементам цепи поставок: голубой – входной; красный – перерабатывающий; зелёный – накопительный; оранжевый – транспортный; синий – выходной; жёлтый – управляющий.

Ранжирование факторов производится в порядке уменьшения значений серых реляционных оценок  $\delta_i$ . Фактор с наибольшим значением серой реляционной оценки будет считаться наиболее значимым, то есть его значение будет наиболее близким к эталонному значению по всем критериям.



а



б

Рис. 3. Результаты ранжирования факторов устойчивости цепей поставок: а – по элементам цепи поставок; б – в порядке убывания рангов

Fig. 3. The ranking of the supply chain sustainability factors: а is by supply chain elements; б is in a descending order of ranks

Полученные результаты оценки разработанной универсальной системы факторов устойчивости цепей поставок с использованием серого реляционного анализа показывают, что:

- тремя наиболее значимыми факторами, обладающими наибольшими значениями серой реляционной оценки по результатам GRA, являются: F2.5 «Экологически чистые производственные технологии» (значение серой относительной оценки  $\delta_{2,5} = 0,801$ ; ранг №1); F3.6 «Соответствие транспортных средств законодательным нормам» ( $\delta_{3,6} = 0,768$ ; ранг №2); F6.5 «Интеллектуальные транспортные системы» ( $\delta_{6,5} = 0,759$ ; ранг №3). Наименее значимыми: F1.4 «Экологически дружественные поставщики» ( $\delta_{1,4} = 0,385$ ; ранг №52); F5.5 «Экомаркировка (готовая продукция)» ( $\delta_{5,5} = 0,374$ ; ранг №53); F1.7 «Экомаркировка (сырьё и материалы)» ( $\delta_{1,7} = 0,354$ ; ранг №54). Максимальное, среднее и минимальное значение серой относительной оценки  $\delta_i$  составляют соответственно 0,8109; 0,5522; 0,3549. Максимальное значение дисперсии, равное 0,013, наблюдается у одного фактора – F2.5. Минимальное значение дисперсии у нескольких факторов: F2.6; F2.7; F3.2; F4.7; F5.3; F5.6; F6.7. Незначительные расхождения отклонений по цепи поставок в целом, с одной стороны, и существенное различие рангов внутри элементов, с другой, говорят о необходимости комплексной оценки устойчивости цепи поставок с учётом значимости отдельных элементов цепи поставок;

- наивысший/наименьший ранги по элементам цепи поставок распределились следующим образом: входной (5/54); перерабатывающий (1/44); накопительный (2/51); транспортный (7/49); выходной (21/53); (3/46). Такие результаты свидетельствуют о неравномерности влияния факторов как по отдельным элементам (рис. 3, а), так и по цепи поставок в целом (рис. 3, б);

- наиболее важными являются группы факторов, оказывающие влияние на устойчивость перерабатывающего (среднее значение реляционной оценки – 0,595), транспортного (0,579) и управляющего (0,568) элементов цепи поставок. Наименьшее влияние – у групп факторов, относящихся к накопительному, входному и выходному элементам (среднее значение серой реляционной оценки соответственно 0,533; 0,515 и 0,497).

Полученные результаты оценки системы факторов устойчивости цепей поставок и степени их влияния на элементы цепей являются основой формирования программ реализации методов и инструментов «зелёной» логистики [42]. Например, для снижения воздействия наиболее значимых факторов F2.5, F3.6 и F6.5 целесообразно использование следующих трёх методов и двенадцати инструментов «зелёной» логистики (табл. 3). Окончательное решение по выбору конкретного инструмента необходимо обосновывать с использованием многокритериальных методов принятия решений. Авторская методика такого выбора представлена в работе [39].

Таблица 3. Пример выбора методов и инструментов «зелёной» логистики по результатам оценки факторов устойчивости цепи поставок

Table 3. An example of choosing the green logistics methods and tools based on the assessment results of the supply chain sustainability factors

Фактор устойчивости цепи поставок	Метод «зелёной» логистики	Инструменты «зелёной» логистики [42]
Экологически чистые производственные технологии (F2.5)	Использование экологически приемлемого оборудования и технологий	– использование энерго- и ресурсосберегающего оборудования и технологий – использование оборудования с минимальным воздействием на окружающую среду – использование систем охраны окружающей среды – максимальное использование сырьевых компонентов с целью минимизации отходов производства
Соответствие транспортных средств законодательным нормам (F3.6)	Выбор экологически чистых транспортных средств	– использование транспортных средств с наименьшим воздействием на окружающую среду – выбор транспортных средств, соответствующих установленным требованиям в области экологии – выбор транспортных средства с большей грузоподъёмностью (грузовместимостью) – использование экологичных горюче-смазочных материалов (видов топлива)
Интеллектуальные транспортные системы (F6.5)	Разработка и внедрение интеллектуальных транспортных систем	– использование методов Data Mining – использование методов и моделей искусственного интеллекта – методы ситуационного управления транспортными потоками и транспортными средствами – внедрение новейших информационных технологий

### Заключение

Предложена универсальная система факторов устойчивости цепей поставок и разработана методика оценки и ранжирования степени влияния этих факторов на основе серого реляционно-го анализа. Реализация методики позволяет производить выбор методов и инструментов устойчивого развития цепей поставок для достижения баланса социальных, экологических и экономических показателей их функционирования.

Оценка 54-х факторов предлагаемой системы показала, что наиболее значимыми факторами являются «Экологически чистые производственные технологии», «Соответствие транспортных средств законодательным нормам» и «Интеллектуальные транспортные системы». Наименее значимые факторы – «Экологически дружественные поставщики», «Экомаркировка (готовая продукция)» и «Экомаркировка (сырье и материалы)». Наиболее значимыми для повышения устойчивости элементами цепи поставок, выполняющих функции по повышению устойчивости, являются перерабатывающий, транспортный и управляющий элементы.

Значения оценок универсальной системы факторов зависят от типа и структуры конкретной цепи поставок. Кроме того, на оценки факторов оказывает влияние структура экспертной группы. В настоящем исследовании экспертная группа состояла из академических экспертов, что предполагает получение максимально объективных оценок. Однако конкретные цепи или их отдельные элементы могут функционировать в условиях преобладания определённых социально-экономических, климатических или геополитических условий. В таком случае рекомендуются в состав экспертов включать специалистов в соответствующих областях для обеспечения выбора наиболее эффективных методов и инструментов «зелёной» логистики для достижения устойчивости цепи поставок.

В будущих исследованиях авторы планируют использовать в качестве шкалы оценки интервальных или нечётких чисел для повышения точности оценки в условиях недостатка или неопределённости информации. Кроме того, нами предусмотрены исследования различных комбинаций GRA с методами многокритериального анализа для выбора наиболее эффективных методов и инструментов «зелёной» логистики.

### Список источников

1. An evaluation of the environmental factors for supply chain strategy decisions using grey systems and composite indicators / J.-J. Alfaro-Saiz, M.C. Bas, V. Giner-Bosch [and etc.] // *Applied Mathematical Modelling*. 2020, vol. 79, pp. 490-505. DOI: 10.1016/j.apm.2019.10.048.
2. Guterres A. Carbon neutrality by 2050: the world's most urgent mission. URL: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world%E2%80%99s-most-urgent-mission> (дата обращения 28.05.2023).
3. Overcoming barriers to supply chain decarbonization: Case studies of first movers / A. Zhang, M.F. Alvi, Y. Gong, J.X. Wang // *Resources, Conservation and Recycling*. 2022, vol. 186, p. 106536. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106536.
4. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study / S. Gandhi, S.K. Mangla, P. Kumar, D. Kumar // *International Strategic Management Review*. 2015, vol. 3, no. 1-2, pp. 96-109. DOI: 10.1016/j.ism.2015.05.001.
5. A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions / S.A. Rehman Khan, Z. Yu, H. Golpira [and etc.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 278, p. 123357. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123357.
6. Lazar S., Klimecka-Tatar D., Obrecht M. Sustainability orientation and focus in logistics and supply chains // *Sustainability*. 2021, vol. 13, no. 6, p. 3280. DOI: 10.3390/su13063280.
7. Meerow S., Newell J.P. Urban resilience for whom, what, when, where, and why? // *Urban Geography*. 2019, vol. 40, no. 3, pp. 309-329. DOI: 10.1080/02723638.2016.1206395.
8. Supply chain resilience initiatives and strategies: A systematic review / T. Rahman, S.K. Paul, N. Shukla [and etc.] // *Computers & Industrial Engineering*. 2022, vol. 170, p. 108317. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108317.
9. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains // *Journal of Cleaner Production*. 2013, vol. 52, pp. 329-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.02.018.
10. Anand K.R., Ramalingaiah, Parthiban P. Evaluation of green supply chain factors using DEMATEL // *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 592-594, pp. 2619-2627. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.2619.
11. George J., Pillai V.M. A study of factors affecting supply chain performance // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. vol. 1355, no. 1, p. 12018. DOI: 10.1088/1742-6596/1355/1/012018.
12. Pimenta H.C., Ball P.D. Analysis of environmental sustainability practices across upstream supply chain management // *Procedia CIRP*. 2015, vol. 26, pp. 677-682. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.036.

13. Chakraborty A., Al Amin M., Baldacci R. Analysis of internal factors of green supply chain management: An interpretive structural modeling approach // *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2023, vol. 7, p. 100099. DOI: 10.1016/j.clscn.2023.100099.
14. Sureeyatanapas P., Poophiukhok P., Pathumnakul S. Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 191, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.206.
15. Diabat A., Govindan K. An analysis of the drivers affecting the implementation of green supply chain management // *Resources, Conservation and Recycling*. 2011, vol. 55, no. 6, pp. 659-667. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.12.002.
16. Khan S., Chaabane A. A., Dweiri F.T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review // *Multi-criteria methods and techniques applied to supply chain management*. Ed. V. Salomon, IntechOpen: 2018, pp. 3-31. DOI: 10.5772/intechopen.74067.
17. Wiśniewski T., Tundys B. Comparative analysis of sustainability factors in supply chain links. Evidence of empirical research // *Procedia Computer Science*. 2022, vol. 207, pp. 3358-3366. DOI: 10.1016/j.procs.2022.09.394.
18. Behavioral factors on the adoption of sustainable supply chain practices / A. Kumar, M.A. Moktadir, S.A.R. Khan [and etc.] // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020, vol. 158, no. 2, p. 104818. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104818.
19. Nilsson F., Göransson M. Critical factors for the realization of sustainable supply chain innovations: Model development based on a systematic literature review // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 296, p. 126471. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126471.
20. Critical success factors of sustainable supply chain management and organizational performance: An exploratory study / D.S. Prasad, R.P. Pradhan, K. Gaurav, A.K. Sabat // *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 48, pp. 327-344. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.027.
21. Analyzing supply chain risk factors in the small and medium enterprises under fuzzy environment: Implications towards sustainability for emerging economies / C.L. Karmaker, R.A. Aziz, T. Palit, A.B.M. Maniul Bari // *Sustainable Technology and Entrepreneurship*. 2023, vol. 2, no. 1, p. 100032. DOI: 10.1016/j.stae.2022.100032.
22. Prioritising visibility influencing factors in supply chains for resilience / F. Sunmola, P. Burgess, A. Tan [and etc.] // *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 217, pp. 1589-1598. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.359.
23. Apeji U.D., Sunmola F. Principles and factors influencing visibility in sustainable supply chains // *Procedia Computer Science*. 2022, vol. 200, pp. 1516-1527. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.353.
24. The ABCDE of supply chain visibility: A systematic literature review and framework / R. Kalaiarasan, J. Olhager, T.K. Agrawal, M. Wiktorsson // *International Journal of Production Economics*. 2022, vol. 248, p. 108464. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108464.
25. Pradeep C.C. Assessment and analysis of GSCM barriers using AHP // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1777-1782.
26. Govindan K., Bouzon M. From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 187, pp. 318-337. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.040.
27. Lamba N., Thareja P. Modelling of barriers pertaining to implementation of green supply chain management using ISM approach // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 43, pp. 9-16. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.488
28. Minguito G., Banluta J. Risk management in humanitarian supply chain based on FMEA and grey relational analysis // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023, vol. 87, Part B, p. 101551. DOI: 10.1016/j.seps.2023.101551.
29. Phate M., Toney S., Phate V. Optimistic implementation of supply chain management in small & medium enterprise: Approach using Grey Relational Analysis (GRA) // *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*. 2021, vol. 32, no. 1, pp. 65-77. DOI: 10.22068/ijiepr.32.1.65.
30. Sharma Y. K., Sharma S. IT success factors in sustainable food supply chain management // *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 56, Part 1, pp. 43-45. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.597.
31. Fan L., Yi H. The influence factors analysis on response speed of agile supply chain // *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 472-475, pp. 3269-3272. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.3269.
32. Ju-Long D. Control problems of grey systems // *Systems & Control Letters*. 1982, vol. 1, no. 5, pp. 288-294. DOI: 10.1016/S0167-6911(82)80025-X.
33. Liu S., Lin Y. *Grey Information*. London: Springer-Verlag, 2006, 508 p. DOI: 10.1007/1-84628-342-6.
34. Cao X., Deng H., Lan W. Use of the grey relational analysis method to determine the important environmental factors that affect the atmospheric corrosion of Q235 carbon steel // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2015, vol. 62, no. 1, pp. 7-12. DOI: 10.1108/ACMM-10-2013-1308.
35. Javed S.A., Gunasekaran A., Mahmoudi A. DGRA: Multi-sourcing and supplier classification through Dynamic Grey Relational Analysis method // *Computers & Industrial Engineering*. 2022, vol. 173, p. 108674. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108674.
36. Zardari N. H., Ahmed K., Shirazi S. M., Yusop Z. B. Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management. Cham: Springer International

- Publishing, 2015. 166 p. DOI: 10.1007/978-3-319-12586-2.
37. Корнилов С., Рахмангулов А., Шаульский Б. Основы логистики. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 302 с.
  38. 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.
  39. Осинцев Н. Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике // Мир транспорта. 2021. № 5. С. 105-114. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
  40. Осинцев Н.А., Казармщикова Е.В. Факторы устойчивого развития транспортно-логистических систем // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2017. Т. 7. № 1. С. 13-21. DOI: 10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21.
  41. Osintsev N., Rakhmangulov A., Baginova V. Evaluation of logistic flows in green supply chains based on the combined DEMATEL-ANP method // Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 473-498. 10.22190/FUME2105050610
  42. Green logistics: a system of methods and instruments – Part 2 / A. Rakhmangulov, A. Sladkowski, N. Osintsev, D. Muravev // Nase More. 2018, vol. 65, no. 1, pp. 49-55. DOI: 10.17818/NM/2018/1.7.
- References**
1. Alfaro-Saiz J.-J., Bas M.C., Giner-Bosch V. et al. An evaluation of the environmental factors for supply chain strategy decisions using grey systems and composite indicators. *Applied Mathematical Modelling*. 2020;79:490-505. DOI: 10.1016/j.apm.2019.10.048
  2. Guterres A. Carbon neutrality by 2050: the world's most urgent mission. Available at: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world%E2%80%99s-most-urgent-mission> (Accessed on May 28, 2023).
  3. Zhang A., Alvi M.F., Gong Y., Wang J.X. Overcoming barriers to supply chain decarbonization: Case studies of first movers. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022;186:106536. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106536
  4. Gandhi S., Mangla S.K., Kumar P., Kumar D. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study. *International Strategic Management Review*. 2015;3(1-2):96-109. DOI: 10.1016/j.ism.2015.05.001
  5. Rehman Khan S.A., Yu Z., Golpira H. et al. A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions. *Journal of Cleaner Production*. 2021;278:123357. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123357
  6. Lazar S., Klimecka-Tatar D., Obrecht M. Sustainability orientation and focus in logistics and supply chains. *Sustainability*. 2021;13(6):3280. DOI: 10.3390/su13063280
  7. Meerow S., Newell J.P. Urban resilience for whom, what, when, where, and why? *Urban Geography*. 2019;40(3):309-329. DOI: 10.1080/02723638.2016.1206395
  8. Rahman T., Paul S.K., Shukla N. et al. Supply chain resilience initiatives and strategies: A systematic review. *Computers & Industrial Engineering*. 2022;170:108317. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108317
  9. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*. 2013;52:329-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.02.018
  10. Anand K.R., Ramalingaiah, Parthiban P. Evaluation of green supply chain factors using DEMATEL. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;592-594:2619-2627. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.2619
  11. George J., Pillai V.M. A study of factors affecting supply chain performance. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1355(1):12018. DOI: 10.1088/1742-6596/1355/1/012018
  12. Pimenta H.C., Ball P.D. Analysis of environmental sustainability practices across upstream supply chain management. *Procedia CIRP*. 2015;26:677-682. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.036
  13. Chakraborty A., Al Amin M., Baldacci R. Analysis of internal factors of green supply chain management: An interpretive structural modeling approach. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2023;7:100099. DOI: 10.1016/j.clscn.2023.100099
  14. Sureeyatanapas P., Poophiukhok P., Pathumnakul S. Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals. *Journal of Cleaner Production*. 2018;191:1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.206
  15. Diabat A., Govindan K. An analysis of the drivers affecting the implementation of green supply chain management. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011;55(6):659-667. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.12.002
  16. Khan S., Chaabane A.A., Dweiri F.T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review. Multi-criteria methods and techniques applied to supply chain management. Ed. V. Salomon, IntechOpen: 2018:3-31. DOI: 10.5772/intechopen.74067
  17. Wiśniewski T., Tundys B. Comparative analysis of sustainability factors in supply chain links. Evidence of empirical research. *Procedia Computer Science*. 2022;207:3358-3366. DOI: 10.1016/j.procs.2022.09.394
  18. Kumar A., Moktadir M.A., Khan S.A.R. et al. Behavioral factors on the adoption of sustainable supply chain practices. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020;158(2):104818. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104818

19. Nilsson F., Göransson M. Critical factors for the realization of sustainable supply chain innovations: Model development based on a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;296:126471. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126471
20. Prasad D.S., Pradhan R.P., Gaurav K., Sabat A.K. Critical success factors of sustainable supply chain management and organizational performance: An exploratory study. *Transportation Research Procedia*. 2020;48:327-344. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.027
21. Karmaker C.L., Aziz R.A., Palit T., Maniul Bari A.B.M. Analyzing supply chain risk factors in the small and medium enterprises under fuzzy environment: Implications towards sustainability for emerging economies. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*. 2023;2(1):100032. DOI: 10.1016/j.stae.2022.100032
22. Sunmola F., Burgess P., Tan A. et al. Prioritising visibility influencing factors in supply chains for resilience. *Procedia Computer Science*. 2023;217:1589-1598. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.359
23. Apeji U.D., Sunmola F. Principles and factors influencing visibility in sustainable supply chains. *Procedia Computer Science*. 2022;200:1516-1527. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.353
24. Kalaiarasan R., Olhager J., Agrawal T.K., Wiktorsson M. The ABCDE of supply chain visibility: A systematic literature review and framework. *International Journal of Production Economics*. 2022;248:108464. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108464
25. Pradeep C.C. Assessment and analysis of GSCM barriers using AHP. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(6):1777-1782.
26. Govindan K., Bouzon M. From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*. 2018;187:318-337. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.040
27. Lamba N., Thareja P. Modelling of barriers pertaining to implementation of green supply chain management using ISM approach. *Materials Today: Proceedings*. 2021;43:9-16. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.488
28. Minguito G., Banluta J. Risk management in humanitarian supply chain based on FMEA and grey relational analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023;87(Part B):101551. DOI: 10.1016/j.seps.2023.101551
29. Phate M., Toney S., Phate V. Optimistic implementation of supply chain management in small & medium enterprise: Approach using grey relational analysis (GRA). *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*. 2021;32(1):65-77. DOI: 10.22068/ijiepr.32.1.65
30. Sharma Y.K., Sharma S. IT success factors in sustainable food supply chain management. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56(Part 1):43-45. DOI: 10.1016/j.matpr. 2021.11.597
31. Fan L., Yi H. The influence factors analysis on response speed of agile supply chain. *Advanced Materials Research*. 2012;472-475:3269-3272. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.3269
32. Ju-Long D. Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*. 1982;1(5):288-294. DOI: 10.1016/S0167-6911(82)80025-X
33. Liu S., Lin Y. *Grey information*. London: Springer-Verlag, 2006, 508 p. DOI: 10.1007/1-84628-342-6
34. Cao X., Deng H., Lan W. Use of the grey relational analysis method to determine the important environmental factors that affect the atmospheric corrosion of Q235 carbon steel. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2015;62(1):7-12. DOI: 10.1108/ACMM-10-2013-1308
35. Javed S.A., Gunasekaran A., Mahmoudi A. DGRA: Multi-sourcing and supplier classification through Dynamic Grey Relational Analysis method. *Computers & Industrial Engineering*. 2022;173:108674. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108674
36. Zardari N.H., Ahmed K., Shirazi S.M., Yusop Z.B. Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management. Cham: Springer International Publishing, 2015. 166 p. DOI:10.1007/978-3-319-12586-2
37. Kornilov S.N., Rakhmangulov A.N., Shaulskii B.F. *Osnovy logistiki* [Basics of logistics]. Moscow: Training and Methodology Centre for Railway Transport, 2016, 302 p. (In Russ.)
38. Osintsev N. A concept of the management system of logistic flows in "green" supply chains. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Herald of Ural State University of Railway Transport]. 2020;(2):81-92. (In Russ.) DOI: 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92
39. Osintsev N. Multi-criteria decision-making methods in green logistics. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation]. 2021;(5):105-114. (In Russ.) DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13
40. Osintsev N.A., Kazarmshchikova E.V. Factors of sustainable development of transport and logistics systems. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of Russian Transport Complex]. 2017;7(1):13-21. (In Russ.) DOI: 10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21
41. Osintsev N., Rakhmangulov A., Baginova V. Evaluation of logistic flows in green supply chains based on the combined DEMATEL-ANP method. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2021;19(3):473-498. DOI: 10.22190/FUME2105050610
42. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: a system of methods and instruments – Part 2. *Naše More*. 2018;65(1):49-55. DOI: 10.17818/NM/2018/1.7

Поступила 16.07.2023; принята к публикации 24.08.2023; опубликована 25.09.2023  
Submitted 16/07/2023; revised 24/08/2023; published 25/09/2023



**Осинцев Никита Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: osintsev@magtu.ru. ORCID 0000-0003-1168-6725

**Рахмангулов Александр Нельевич** – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743

**Nikita A. Osintsev** – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: osintsev@magtu.ru. ORCID 0000-0003-1168-6725

**Aleksandr N. Rakhmangulov** – DrSc (Eng.), Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743