

Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурин, С. Н. Корнилов, М. С. Мельников

КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ УСТОЙЧИВОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК *

Аннотация. Предложена концепция гибридной модели устойчивой цепи поставок на основе комбинирования многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием. Показана возможность использования имитационного моделирования для описания функциональных зависимостей между индикаторами устойчивой цепи поставок, параметрами и показателями логистических потоков при реализации инструментов «зеленой» логистики. Комбинация моделей необходима для прогнозирования и оптимизации значений параметров и показателей логистических потоков в соответствии с выбранными вариантами комплекса инструментов «зеленой» логистики и с учетом ограниченных по запасам логистических ресурсов. Предлагаемый подход позволит повысить устойчивость цепей поставок в результате выбора и реализации инструментов «зеленой» логистики.

Ключевые слова: устойчивое развитие, «зеленая» логистика, устойчивая цепь поставок, концепция, многокритериальная модель, имитационная модель, гибридная модель.

Для цитирования: Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 90–104 – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_90.

Введение

Изменчивость и неопределенность множества факторов эффективности функционирования цепей поставок усложняют принятие управленческих решений. Каждый участник цепи поставок по-разному оценивает влияние факторов и условий внешней среды. Такие оценки не всегда совпадают с эффективной интенсивностью и силой воздействия факторов, оказывающих различное влияние на элементы цепей поставок. В результате усложняется принятие решений по взаимодействию элементов цепи поставок, что снижает их эффективность и устойчивость [1].

Необходимость оценки множества индикаторов и показателей в процессе формирования и управления цепями поставок привела к активному обсуждению в научной среде проблемы разработки новых моделей принятия решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности и повышению устойчивости цепей поставок. Такие модели должны учитывать сложность структуры цепей поставок, многофакторность, динамичность и неопределенность среды их функционирования, многокритериальность задач, решаемых при формировании и развитии цепей. Это возможно путем комбинирования различных методов и моделей – математических, имитационных, многокритериальных методов принятия решений и использования современных информационных технологий и программного обеспечения.

В таблице 1 представлены результаты анализа существующих подходов к моделированию устойчивых цепей поставок. В области математического моделирования выделяют методы многокритериальной оптимизации устойчивых цепей поставок [2–4] на основе использования смешанного целочисленного нелинейного программирования [5–6], смешанного целочисленного линейного программирования [7–8], смешанного целочисленного линейного дробного программирования [9], двухуровневой маршрутизации с временными окнами [10], многокритериального анализа [11–13], классификационного анализа [14], нечеткого многоцелевого линейного программирования [15–17], стохастической двухцелевой оптимизации [18]. Решение задач многокритериальной оптимизации осуществляется с использованием эpsilon-метода [8–9], оптимизации Парето [5, 19], общей алгебраической системы моделирования (GAMS) [7, 20, 21], комбинирования метода многокритериальной оптимизации роя частиц (MOPSO) и адаптированного многокритериального поиска переменных окрестностей (AMOVNS) [10, 22], методов расчета показателя условной стоимости риска (CVaR) [24], генетических алгоритмов

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

[3, 4, 16, 17], гибридного структурного моделирования [15], комбинирования методов многокритериального анализа принятия решений и методов моделирования структурными уравнениями (SEM) [11], гибридной многокритериальной оптимизации [2, 13], комбинированной структурной оптимизации [23], комбинирования методов многокритериального анализа принятия решений и метода анализа иерархий [12].

Таблица 1

**Результаты литературного обзора существующих математических моделей
устойчивых цепей поставок**

Источник	Тип модели	Используемые в моделях методы (подходы)	Цель моделирования	Аспекты устойчивого развития
1	2	3	4	5
[5]	Смешанное целочисленное нелинейное программирование (MINLP)	Оптимизация Парето	Максимизация доходности при минимальном воздействии на окружающую среду	Экономические, экологические
[6]		–	Максимизация прибыли и рабочих мест при минимизации воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические, социальные
[24]	Смешанное целочисленное линейное программирование (MILP)	Метод расчета показателя условной стоимости риска (CVaR)	Максимизация доходности при минимальном воздействии на окружающую среду	Экономические, экологические
[7]		Использование алгебраической системы моделирования (GAMS)	Минимизация затрат в цепях поставок на основе управления жизненным циклом	Экономические, экологические
[11]	Аналитический сетевой процесс (ANP)	Многокритериальный анализ (MCDA)	Предпроектное обоснование параметров устойчивой цепи поставок	Экономические, экологические, социальные
[20]	Многоцелевое смешанно-целочисленное нелинейное программирование (MO-MINLP)	Использование алгебраической системы моделирования (GAMS)	Максимизация доходности от продажи готовой продукции с учетом логистических издержек, переработки и утилизации продукции	Экономические, экологические
[8]	Многоцелевое смешанное целочисленное линейное программирование (MO-MILP)	Эпсилон-метод	Минимизация общих издержек с учетом снижения выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла цепи поставок и создании рабочих мест	Экономические, экологические, социальные
[25]	Многоцелевое смешанное целочисленное программирование (MO-MIP)	Ускоренный алгоритм декомпозиции Бендера (BDA)	Минимизация общих издержек и негативного воздействия на окружающую среду при повышении социальной ответственности	Экономические, экологические, социальные
[9]	Смешанное целочисленное линейное дробное программирование (MILFP)	Эпсилон-метод	Минимизация затрат и негативного воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические
[10]	Двухуровневая маршрутизация с временными окнами (2E-LRPTW)	Многокритериальный гибридный алгоритм (MHPV: MOPSO-AMOVNS)	Проектирование и оптимизация цепей поставок на основе оценки экономических и экологических факторов	Экономические, экологические

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
[15]	Нечеткое многоцелевое линейное программирование (Fuzzy MOLP)	Гибридное структурное моделирование, нечеткая логика и метод анализа иерархий (ФАНР)	Минимизация издержек на основе оценки экономических, социальных и экологических факторов	Экономические, экологические, социальные
[21]	Анализ свертки нечетких данных (Fuzzy DEA)	Использование алгебраической системы моделирования (GAMS)	Оценка и выбор поставщиков в устойчивых цепях поставок	Экономические, экологические, социальные
[14]	Матрицы перекрестного воздействия (MIC) и классификационный анализ (MAC)	Комбинированный метод MICMAC	Анализ и тестирование взаимосвязей устойчивых («зеленых») цепей поставок	Экономические, экологические, социальные
[16]	Нечеткая многокритериальная оптимизация (Fuzzy MO)	Генетические алгоритмы	Общая оптимизация прибыли при повышении безопасности труда и оперативности обработки заказов	Экономические, экологические, социальные
[17]			Управление устойчивой цепью поставок в условиях неопределенности параметров внутренней и внешней сред	Экономические, экологические, социальные
[13]			Гибридный метод. Комбинирование методов нечеткого аналитического иерархического аппарата (FANP) и многокритериального анализа	Оценка элементов устойчивой цепи поставок и выбор поставщиков
[12]		Гибридная модель. Комбинирование многокритериальных методов принятия решений	Выбор инструментов «зеленой» логистики для достижения целей устойчивого развития при управлении цепями поставок	Экономические, экологические, социальные
[23]	Многокритериальная оптимизация (MO)	Динамическое структурное моделирование и многокритериальная оптимизация	Определение оптимальных значений параметров устойчивых цепей поставок	Экономические, экологические, социальные
[3], [4]		Генетические алгоритмы (недоминирующая сортировка (NSGA-II), многообъектный (MOGA-II), гибридный (HYBRID))	Минимизация объема выбросов углекислых газов при транспортировке и общих затрат в распределительной цепочке	Экономические, экологические
[22]		Многокритериальный гибридный алгоритм (MHPV: MOPSO-AMOVNS)	Минимизация общих затрат и снижение негативного воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические
[19]		Оптимизация Парето	Комплексная минимизация общих затрат, числа несчастных случаев и объема выбросов парниковых газов	Экономические, экологические, социальные

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
[18]	Стохастическая двухцелевая оптимизация	–	Минимизация общих логистических издержек на основе расчета совокупной стоимости достижения целей устойчивого развития	Экономические, экологические, социальные

Результаты проведенного анализа показывают, что в последнее десятилетие возрастает интерес к анализу и оценке индикаторов устойчивых цепей поставок. Наблюдается использование как одиночных, так и комбинированных математических моделей для снижения издержек, управления рисками, достижения целей экономики замкнутого цикла и устойчивого развития. Для повышения точности модельных значений индикаторов цепей поставок, параметров и показателей логистических потоков предлагается использовать метод имитационного моделирования. Данный метод позволяет устанавливать зависимости индикаторов цепей поставок от принимаемых решений по повышению устойчивости цепей поставок и прогнозировать их изменение с учетом таких решений.

Инструменты имитационного моделирования обладают необходимым потенциалом для создания высокоточных моделей динамических цепей поставок [26]. Выделяют несколько подходов к построению имитационных моделей устойчивых цепей поставок на основе использования системно-динамической парадигмы моделирования [27–31], дискретно-событийного моделирования [32–36], агентного моделирования [37], моделирования в геоинформационных системах [38], комбинирования системной динамики и методов многокритериального анализа [39], комбинирования агентного моделирования и оптимизаторов сложных систем [40], комбинирования системной динамики и дискретно-событийного моделирования [41], комбинирования агентного и дискретно-событийного моделирования [42]. Наиболее распространенными программными инструментами построения имитационных моделей являются STELLA [27], Simulink [28], VENSIM [29–39], iThink [31], ARENA [33], Monte Carlo Simulation [34–35], AnyLogic [41], Simio [42], и специализированные: ALADIN [46], PROSIM [32], AnyLogistix [41] (табл. 2).

Таблица 2

Результаты литературного обзора существующих имитационных моделей устойчивых цепей поставок

Источник	Парадигма имитационного моделирования	Среда моделирования	Цель моделирования	Аспекты устойчивого развития
1	2	3	4	5
[27]	Системная динамика	STELLA	Моделирование горнодобывающего предприятия на основе теории пика Хабберта	Экономические, экологические
[28]	Системная динамика	Simulink	Анализ операций в замкнутых цепях поставок и выбор стратегий на основе использования метода «Н на бесконечности»	Экономические, экологические
[29]	Системная динамика	VENSIM	Выбор устойчивых поставщиков при сохранении стратегической эффективности	Экономические, экологические
[30]			Оценка системного поведения замкнутой цепи поставок с учетом удовлетворенности заказчиков и показателя «зеленого» имиджа	Экономические, экологические
[31]	Системная динамика	iThink	Изучение влияния использования мультимодальных перевозок на эффективность систем управления запасами на основе использования экономических и экологических параметров	Экономические, экологические

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
[32]	Дискретно-событийная	PROSIM	Повышение удовлетворенности клиентов и эффективности транспортного обслуживания при одновременном снижении объема выбросов углекислого газа	Экономические, экологические, социальные
[33]	Дискретно-событийная	Arena	Анализ целесообразности использования технологии радиочастотной идентификации при проектировании замкнутой цепи поставок	Экономические, экологические
[34]	Дискретно-событийная	Monte Carlo Simulation	Управление рисками в операционных сетях «зеленых» цепей поставок	Экономические, экологические
[35]			Минимизация транспортных расходов и снижение объема выбросов углекислого газа	Экономические, экологические
[36]	Дискретно-событийная	AnyLogistix	Минимизация логистических издержек и отходов в цепи поставок	Экономические, экологические
[37]	Агентная	ALADIN	Анализ величины издержек в цепи поставок, оценка качества продукции, энергопотребления и выбросов углекислого газа	Экономические, экологические
[38]	GIS-based simulation		Оценка спроса и предложения электроэнергии	Экономические, экологические
[39]	Системная динамика и Fuzzy MCDM	VENSIM	Поиск эффективных сценариев функционирования устойчивой цепи поставок	Экономические, экологические, социальные
[40]	Комбинирование агентного моделирования и оптимизации		Минимизация логистических издержек и негативного воздействия на окружающую среду	Экономические, экологические
[41]	Комбинирование системной динамики и дискретно-событийного моделирования	AnyLogic	Минимизация логистических издержек и объемов выбросов углекислого газа	Экономические, экологические
[42]	Комбинирование агентного и дискретно-событийного моделирования	Simio	Минимизация логистических издержек и негативного воздействия на окружающую среду с учётом численности рабочих мест	Экономические, экологические, социальные

В имитационных моделях описываются диапазоны и типы экономических параметров цепей поставок на основе комбинирования методов математического моделирования [43]. Широкое применение нашли системно-динамические модели устойчивых цепей поставок. Использование системно-динамического подхода позволило целостно исследовать влияние экономических и экологических факторов [27–31]. В свою очередь, использование дискретно-событийного подхода позволило повысить точность использования логистических ресурсов элементов цепи поставок [32, 33], более точно описать зависимости экономических, социальных и экологических факторов и динамических процессов в элементах цепей поставок [34, 37, 38]. Комбинирование парадигм имитационного моделирования позволило повысить точность прогнозирования индикаторов устойчивой цепи поставок на стратегическом [41] и тактическом [42] уровнях управления. Наблюдаются попытки комплексного использования методов многокритериальной оптимизации и имитационного моделирования [39–40].

Однако для эффективной реализации концепции устойчивого развития в логистической деятельности и управлении цепями поставок необходимо применять многокритериальные методы принятия управленческих решений по изменению параметров логистических потоков на основе измерения и оценки их экономических, социальных и экологических показателей [44]. В последнее десятилетие

на транспорте и в логистике активно развивается научное и практическое направление по разработке и совершенствованию методов многокритериального принятия решений (*Multi-criteria Decision Making – MCDM*) [45–46]. Выбор наиболее эффективного и надежного MCDM- метода достигается в результате принятия управленческих решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности, основанных на использовании так называемых гибридных MCDM-имитационных моделей [13]. Сложность построения высокоточных MCDM-имитационных моделей устойчивых цепей поставок заключается в отсутствии комплексного подхода к оценке фактических и модельных данных параметров логистических потоков.

Обзор и анализ моделей устойчивых цепей поставок позволяют говорить об интеграции аспектов устойчивого развития в практику управления цепями поставок. В зависимости от целей моделирования используются различные методы и модели – математические, имитационные, многокритериальные методы принятия решений, как одиночные, так и в комбинациях друг с другом. Вместе с тем наблюдается фрагментарность связей между экологическими, социальными и экономическими индикаторами оценки устойчивости цепей поставок, вызванная сложностью, динамичностью объекта исследования и влиянием на него множества факторов, наличием разнообразных ограничений и противоречивостью целей устойчивого развития. Это снижает эффективность оценки и реализации решений по повышению устойчивости цепей поставок. Требуется разработка единого подхода по повышению устойчивости цепей поставок, в основу которого будут положены существующие решения и комплекс моделей по управлению цепями поставок, сочетающий в себе метод имитационного моделирования с методами точной оптимизации и приближенными многокритериальными методами принятия решений.

Гибридная многокритериальная модель устойчивой цепи поставок

Для достижения целей устойчивого развития при управлении цепями поставок разработана концепция, в основу которой заложена идея формирования баланса экономической, экологической и социальной устойчивости цепи с использованием принципов и инструментов «зеленой» логистики и гибридной многокритериальной модели. Предлагаемая концепция обеспечивает соблюдение следующих условий:

- согласование целей устойчивого развития с целями цепей поставок [12, 44, 47];
- использование системы принципов «зеленой» логистики в качестве основы управления устойчивыми цепями поставок [12];
- использование инструментов «зеленой» логистики при принятии решений по повышению устойчивости цепей поставок [12];
- комбинирование многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием для повышения эффективности управления устойчивыми цепями поставок [12, 44].

Основными положениями концепции являются:

1 Устойчивое развитие цепей поставок достигается приведением в соответствие целей и задач цепей поставок целям и задачам «зеленой» логистики на всех этапах доставки продукции от закупки до сбыта.

2 Формирование и устойчивое развитие цепей поставок основано на использовании системы принципов «зеленой» логистики, представляющей собой синтез принципов устойчивого развития с логистическими принципами.

3 Повышение устойчивости цепей поставок обеспечивается реализацией системы инструментов «зеленой» логистики – специфических способов и решений по воздействию на элементы цепей и логистические потоки.

4 Логистические потоки в зависимости от степени их детализации на разных уровнях системы управления представляются дискретными или непрерывными. Дискретные логистические потоки образованы совокупностью отдельных объектов (элементов или струй), и параметры их моделирования используются для принятия решений по реализации инструментов «зеленой» логистики на оперативном уровне управления. Представление логистических потоков как непрерывных используется на стратегических и тактических уровнях управления.

5 Управление устойчивыми цепями поставок основано на комбинировании многокритериальных моделей принятия решений с имитационным моделированием (см. рисунок). Многокритериальные модели используются для оценки состояния элементов цепей поставок, анализа параметров и показателей логистических потоков, ранжирования и выбора инструментов «зеленой» логистики. Ими-

тационное моделирование используется для определения зависимостей между параметрами логистических потоков и индикаторами функционирования устойчивых цепей поставок при реализации инструментов «зеленой» логистики.

6 Повышение точности прогнозирования значений индикаторов функционирования устойчивых цепей поставок достигается на основе использования комплексного подхода к оценке фактических и модельных данных параметров, и показателей логистических потоков. Комбинирование методов математического и имитационного моделирования позволяет оценивать реализуемость инструментов «зеленой» логистики и находить оптимальные значения параметров и показателей логистических потоков с учетом ограниченных логистических ресурсов.



Схема концепции гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок

Соблюдение представленных условий и положений предполагается осуществлять в пять основных этапов комбинирования методов многокритериального анализа и имитационного моделирования:

1 *Подготовка исходных данных.* Для оценки устойчивости цепей поставок предлагается двухуровневая система оценки. На первом уровне выполняется комплексная оценка устойчивости цепи поставок, на втором – комплексная оценка логистических потоков на соответствие аспектам устойчивого развития и качества управления потоками. Компонентами первого уровня выступают следующие группы индикаторов устойчивых цепей поставок: инфраструктурные (оценка элементов транспортно-логистической инфраструктуры, задействованной в продвижении потоков); организационно-технологические (оценка степени развития технологий, организации взаимодействия элементов цепей поставок при переработке и продвижении потоков); экономические (показатели, определяющие экономическую эффективность как отдельных элементов, так и цепи поставок в целом); социальные (оценка стейкхолдеров цепи поставок и социально-экономических аспектов функционирования цепей); экологические (оценка влияния цепей поставок на окружающую среду); политические (оценка геополитических и санкционных ограничений по продвижению потоков и функционированию элементов цепей поставок); потоковые (характеристика материального потока цепи поставок).

Компонентами второго уровня являются параметры и показатели логистических потоков [12]: управляемые (физические) параметры (параметры потоков, характеризующие их интенсивность и направления изменения потоков в пространстве и во времени); экономические показатели (эффективность использования всех видов ресурсов цепи поставок при управлении потоками); энергоэкологические показатели (эффективность использования энергии в процессе продвижения логистических потоков и их влияние на окружающую среду); показатели качества (оценка сохранности и своевременности продвижения и переработки потоков, а также качество управления потоками); статистические показатели (отражают закономерности изменения управляемых параметров логистических потоков и цепи поставок).

2 *Определение значимости индикаторов цепи поставок, параметров и показателей логистических потоков.* Данный этап обосновывается различной важностью тех или иных параметров и показателей, их неоднородностью, влиянием параметров (показателей) друг на друга, использованием интегральных показателей, а также особенностью применения различных многокритериальных методов и моделей принятия решений. Определение веса (весовых коэффициентов) индикаторов цепи поста-

вок, параметров и показателей логистических потоков основано на привлечении экспертов и использовании дискретных методов многокритериального анализа. Основным недостатком дискретных методов многокритериального анализа является зависимость от субъективных экспертных оценок, что является ограничением точности выбора управленческих решений. Для повышения точности весовых коэффициентов предлагается использовать метод имитационного моделирования.

3 *Оптимизация весовых коэффициентов индикаторов цепей поставок, параметров и показателей логистических потоков.* В настоящее время программы имитационного моделирования обладают необходимым потенциалом для создания высокоточных моделей оценки функциональных зависимостей индикаторов устойчивых цепей поставок, параметров и показателей логистических потоков на основе использования развитых инструментов визуального построения моделей и проблемно ориентированных библиотек стандартных объектов моделирования. Уточненные функциональные зависимости могут быть использованы при корректировке весов индикаторов, параметров и показателей, которые определены на предыдущем этапе предлагаемой гибридной многокритериальной модели. Функциональные зависимости в имитационной модели предлагается описывать системной динамикой. В свою очередь, корректировку весов индикаторов, параметров и показателей предлагается осуществлять на основе использования в имитационной модели алгоритмов оптимизации.

4 *Ранжирование и выбор инструментов «зеленой» логистики.* Методика ранжирования и выбора инструментов «зеленой» логистики основана на использовании моделей и методов многокритериального принятия решений. Оптимальная комбинация инструментов «зеленой» логистики для конкретной цепи поставок определяется с учетом имеющихся материальных, финансовых, информационных ресурсов и ресурсов услуг. Полученное множество вариантов комбинации инструментов «зеленой» логистики проверяется на оптимальность использования логистических ресурсов по их реализации с помощью имитационной модели.

5 *Прогнозирование и оптимизация.* Оценка эффективности реализации инструментов «зеленой» логистики в цепи поставок предлагается осуществлять на основе использования имитационного моделирования большей детализации и методов оптимизации. При описании устойчивых цепей поставок в комбинированных аналитико-имитационных моделях приняты следующие допущения [12]:

- каждый элемент логистического потока характеризуется определенным качественным свойством и обладает количественной величиной;
- в зависимости от качественных свойств элементов потока и особенностей расчета количественных параметров различают четыре вида логистических потоков: 1) материальный поток описывает объемы грузопотоков по струям; 2) поток услуг – работы, выполняемые по переработке и продвижению материального потока; 3) финансовый поток – объем финансовых средств, необходимых для продвижения материального потока; 4) информационный поток – сообщения и события, циркулирующие в системе функционирования цепи поставок;
- материальный поток представляет собой объединение нескольких элементов потока. Поток характеризуется маршрутом – последовательностью элементов цепи поставок, через которые проходит поток;
- элемент цепи поставок (логистический элемент) выполняет следующие функции: задержка логистического потока на время выполнения технологической операции; хранение запаса в случае замятости логистического элемента переработкой предыдущего потока;
- связи между инфраструктурными элементами цепи поставок описываются неориентированным графом маршрутизации;
- в процессе реализации инструмента «зеленой» логистики цепь поставок потребляет следующие виды ограниченных логистических ресурсов: материальные (транспортно-логистическая инфраструктура, подвижной состав, технические средства, трудовые ресурсы), финансовые (текущие затраты), информационные (количество управленческой информации) и ресурсы услуг (объем и качество работ).

Результатом решения гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок является оптимальный комплекс инструментов «зеленой» логистики в условиях неопределенности параметров и показателей ЛП и ограничений ресурсов (табл. 3). Комбинирование методов многокритериального анализа и имитационного моделирования позволит установить зависимости между индикаторами оценки устойчивости цепей поставок, параметрами и показателями логистических потоков, а также оценить эффективность реализации инструментов «зеленой» логистики в условиях ограничения логистических ресурсов.

Таблица 3

Общая характеристика гибридной модели устойчивой цепи поставок

Вид модели	Основное назначение	Результаты моделирования
Комплекс многокритериальных моделей принятия решений	- определение значимости индикаторов устойчивой цепи поставок; - определение значимости параметров и показателей логистических потоков; - оценка состояния элементов устойчивой цепи поставок; - ранжирование инструментов «зеленой» логистики	- весовые коэффициенты индикаторов устойчивой цепи поставок; - весовые коэффициенты параметров и показателей логистических потоков; - ранги значимости элементов цепи поставок; - ранги инструментов «зеленой» логистики
Имитационная модель оценки функциональных зависимостей	- уточнение функциональных зависимостей индикаторов устойчивой цепи поставок, параметров и показателей логистических потоков; - корректирование весов индикаторов устойчивой цепи поставок, параметров и показателей логистических потоков на основе использования алгоритмов оптимизации в рамках имитационной модели	- оптимальные весовые коэффициенты индикаторов устойчивой цепи поставок; - оптимальные весовые коэффициенты параметров и показателей логистических потоков
Комбинированная аналитико-имитационная модель	- оптимизация состава инструментов «зеленой» логистики и определение параметров и показателей логистических потоков в цепи поставок	- оптимальный комплекс инструментов «зеленой» логистики; - оптимальные значения параметров и показателей логистических потоков

Заключение

Предложена концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок, основанная на комбинации многокритериальных методов принятия решений и метода имитационного моделирования. Теоретически показана возможность оценки эффективности реализации инструментов «зеленой» логистики для достижения целей устойчивого развития цепи поставок на основе прогнозирования и оптимизации значений параметров и показателей логистических потоков с учетом ограниченных логистических ресурсов. Использование предлагаемой концепции позволит: во-первых, установить влияние инструментов «зеленой» логистики на индикаторы устойчивости цепей поставок, а также параметры и показатели логистических потоков; во-вторых, повысить точность описания функциональных зависимостей между индикаторами устойчивой цепи поставок и параметрами и показателями логистических потоков; в-третьих, повысить точность поиска оптимальных значений параметров и показателей логистических потоков по критерию достижения целей устойчивого развития. Разработанную гибридную модель предлагается использовать для оценки эффективности решений по устойчивому развитию цепей поставок, а также для прогнозирования параметров и показателей логистических потоков и принятия управленческих решений. Дальнейшим направлением развития предлагаемой концепции является исследование методов комбинированной многокритериальной оптимизации для оценки эффективности инструментов «зеленой» логистики в устойчивых цепях поставок.

Список литературы

- 1 Осинцев, Н. А. Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2023. – № 3 (21). – С. 180–196. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- 2 Govindan, K. Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic /

References

- 1 Osintsev, N. A. Supply chain sustainability assessment based on gray relational analysis / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov // Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2023. – No. 3 (21). – P. 180–196. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196.
- 2 Govindan, K. Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic

K. Govindan, A. Jafarian, V. Nourbakhsh // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 62. – P. 112–130. – ISSN 1873-765X.

3 Validi, S. A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model / S. Validi, A. Bhattacharya, P. J. Byrne // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 204–217. – ISSN 1873-765X.

4 Validi, S. A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system – A multi-objective approach / S. Validi, A. Bhattacharya, P. Byrne // *International Journal of Production Economics*. – 2014. – No. 152. – P. 71–87. – ISSN 1873-7579.

5 Guillén-Gosálbez, G. Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty / G. Guillén-Gosálbez, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 2009. – No. 1 (55). – P. 99–121. – ISSN 0001-1541.

6 Rahimi, M. A stochastic risk-averse sustainable supply chain network design problem with quantity discount considering multiple sources of uncertainty / M. Rahimi, V. Ghezavati, F. Asadi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019. – No. 130. – P. 430–449. – DOI 10.1016/j.cie.2019.02.037.

7 Mathematical programming model of biodiesel supply chain in Colombia / J. A. Aranda, M. J. Bar´on, I. Huertas, J. A. Orjuela // *Ingeniería*. – 2014. – No. 1 (19). – P. 19–49. – ISSN 1405-7743.

8 Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis / F. You, L. Tao, D. J. Graziano, S. W. Snyder // *AIChE Journal*. – 2012. – No. 4 (58). – P. 1157–1180. – ISSN 0001-01541.

9 Design of sustainable product systems and supply chains with life cycle optimization based on functional unit : general modeling framework, mixed-integer nonlinear programming algorithms and case study on hydrocarbon biofuels / D. Yue, M. A. Kim, F. You // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2013. – No. 8 (1). – P. 1003–1014. – ISSN 2168-0485.

10 Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food / K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, K. Devika // *International journal of production economics*. – 2014. – No. 152. – P. 9–28. – ISSN 1873-7579.

11 Büyüközkan, G. Designing a sustainable supply chain using an integrated analytic network process and goal programming approach in quality function deployment / G. Büyüközkan, Ç. Berkol // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – No. 11 (38). – P. 13731–13748. – ISSN 1873-6793.

/ K. Govindan, A. Jafarian, V. Nourbakhsh // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 62. – P. 112–130. – ISSN 1873-765X.

3 Validi, S. A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model / S. Validi, A. Bhattacharya, P. J. Byrne // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 204–217. – ISSN 1873-765X.

4 Validi, S. A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system – A multi-objective approach / S. Validi, A. Bhattacharya, P. Byrne // *International Journal of Production Economics*. – 2014. – No. 152. – P. 71–87. – ISSN 1873-7579.

5 Guillén-Gosálbez, G. Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty / G. Guillén-Gosálbez, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 2009. – No. 1 (55). – P. 99–121. – ISSN 0001-1541.

6 Rahimi, M. A stochastic risk-averse sustainable supply chain network design problem with quantity discount considering multiple sources of uncertainty / M. Rahimi, V. Ghezavati, F. Asadi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019. – No. 130. – P. 430–449. – DOI 10.1016/j.cie.2019.02.037.

7 Mathematical programming model of biodiesel supply chain in Colombia / J. A. Aranda, M. J. Bar´on, I. Huertas, J. A. Orjuela // *Ingeniería*. – 2014. – No. 1 (19). – P. 19–49. – ISSN 1405-7743.

8 Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis / F. You, L. Tao, D. J. Graziano, S. W. Snyder // *AIChE Journal*. – 2012. – No. 4 (58). – P. 1157–1180. – ISSN 0001-01541.

9 Design of sustainable product systems and supply chains with life cycle optimization based on functional unit : general modeling framework, mixed-integer nonlinear programming algorithms and case study on hydrocarbon biofuels / D. Yue, M. A. Kim, F. You // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2013. – No. 8 (1). – P. 1003–1014. – ISSN 2168-0485.

10 Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food / K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, K. Devika // *International journal of production economics*. – 2014. – No. 152. – P. 9–28. – ISSN 1873-7579.

11 Büyüközkan, G. Designing a sustainable supply chain using an integrated analytic network process and goal programming approach in quality function deployment / G. Büyüközkan, Ç. Berkol // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – No. 11 (38). – P. 13731–13748. – ISSN 1873-6793.

12 Осинцев, Н. А. Методологические основы устойчивого развития логистических цепей грузопотоков : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 2.9.9 / Осинцев Никита Анатольевич. – Москва, 2023. – 360 с.

13 A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design / E. B. Tirkolaee, A. Mardani, Z. Dashtian, M. Soltani, G. W. Weber // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 250. – P. 119517. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119517.

14 Sustainable supply chain management : framework and further research directions / S. J. Childe, S. F. Wamba, A. Gunasekaran, R. Dubey, K. Shibin, T. Papadopoulos // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – No. 142. – P. 1119–1130. – ISSN 1879-1786.

15 Jakhar, S. K. Performance evaluation and a flow allocation decision model for a sustainable supply chain of an apparel industry / S. K. Jakhar // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – No. 87. – P. 391–413. – ISSN 1879-1786.

16 Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design / H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, H. Jafari // *Computers & Industrial Engineering*. – 2017. – No. 109. – P. 191–203. – ISSN 1879-0550.

17 Sustainable fertilizer supply chain network design using evolutionary-based resilient robust stochastic programming / M. Rabbani, S. M. H. Molana, S. M. Sajadi, M. H. Davoodi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2022. – No. 174. – P. 108770. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108770.

18 Jabbarzadeh, A. Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks / A. Jabbarzadeh, B. Fahimnia, F. Sabouhi // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 17 (56). – P. 5945–5968. – DOI 10.1080/00207543.2018.1461950.

19 Orjuela-Castro, J. A. Identifying trade-offs between sustainability dimensions in the supply chain of biodiesel in Colombia / J. A. Orjuela-Castro, J. A. Aranda-Pinilla, C. E. Moreno-Mantilla // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2019. – No. 161. – P. 162–169. – DOI 10.1016/j.compag.2018.03.009.

20 Corsano, G. Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model / G. Corsano, A. R. Vecchietti, J. M. Montagna // *Computers & Chemical Engineering*. – 2011. – No. 8 (35). – P. 1384–1398. – ISSN 1873-4375.

12 Osintsev, N. A. Methodological foundations of sustainable development of logistics chains of cargo flows : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 2.9.9 / Osintsev Nikita Anatolievich. – Moscow, 2023. – 360 p.

13 A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design / E. B. Tirkolaee, A. Mardani, Z. Dashtian, M. Soltani, G. W. Weber // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 250. – P. 119517. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119517.

14 Sustainable supply chain management : framework and further research directions / S. J. Childe, S. F. Wamba, A. Gunasekaran, R. Dubey, K. Shibin, T. Papadopoulos // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – No. 142. – P. 1119–1130. – ISSN 1879-1786.

15 Jakhar, S. K. Performance evaluation and a flow allocation decision model for a sustainable supply chain of an apparel industry / S. K. Jakhar // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – No. 87. – P. 391–413. – ISSN 1879-1786.

16 Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design / H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, H. Jafari // *Computers & Industrial Engineering*. – 2017. – No. 109. – P. 191–203. – ISSN 1879-0550.

17 Sustainable fertilizer supply chain network design using evolutionary-based resilient robust stochastic programming / M. Rabbani, S. M. H. Molana, S. M. Sajadi, M. H. Davoodi // *Computers & Industrial Engineering*. – 2022. – No. 174. – P. 108770. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108770.

18 Jabbarzadeh, A. Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks / A. Jabbarzadeh, B. Fahimnia, F. Sabouhi // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 17 (56). – P. 5945–5968. – DOI 10.1080/00207543.2018.1461950.

19 Orjuela-Castro, J. A. Identifying trade-offs between sustainability dimensions in the supply chain of biodiesel in Colombia / J. A. Orjuela-Castro, J. A. Aranda-Pinilla, C. E. Moreno-Mantilla // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2019. – No. 161. – P. 162–169. – DOI 10.1016/j.compag.2018.03.009.

20 Corsano, G. Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model / G. Corsano, A. R. Vecchietti, J. M. Montagna // *Computers & Chemical Engineering*. – 2011. – No. 8 (35). – P. 1384–1398. – ISSN 1873-4375.

- 21 A new fuzzy DEA model for evaluation of efficiency and effectiveness of suppliers in sustainable supply chain management context / M. Azadi, M. Jafarian, R. F. Saen, S. M. Mirhedayatian // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 274–285. – ISSN 1873-765X.
- 22 Impact of supply chain management practices on sustainability / K. Govindan, S. G. Azevedo, H. Carvalho, V. Cruz-Machado // *Journal of Cleaner production*. – 2014. – No. 85. – P. 212–225. – ISSN 1879-1786.
- 23 Optimization of network redundancy and contingency planning in sustainable and resilient supply chain resource management under conditions of structural dynamics / A. Pavlov, D. Ivanov, D. Pavlov, A. Slinko // *Annals of Operations Research*. – 2019. – P. 1–30. – DOI 10.1007/s10479-019-03182-6.
- 24 Da Silva, C. Environmental monetization and risk assessment in supply chain design and planning / C. Da Silva, A. P. Barbosa-Povoa, A. Carvalho // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 270. – P. 121552. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121552.
- 25 Pishvae, M. S. An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty : A case study of medical needle and syringe supply chain / M. S. Pishvae, J. Razmi, S. A. Torabi // *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*. – 2014. – No. 67. – P. 14–38. – ISSN 1878-5794.
- 26 Hoffa-Dabrowska, P. Simulation modeling of the sustainable supply chain / P. Hoffa-Dabrowska, K. Grzybowska // *Sustainability*. – 2020. – No. 15 (12). – P. 6007. – DOI 10.3390/su12156007.
- 27 Tao, Z. What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak / Z. Tao, M. Li // *Energy Policy*. – 2007. – No. 6 (35). – P. 3145–3154. – ISSN 1873-6777.
- 28 Huang, X. Y. Dynamic models of closed-loop supply chain and robust H_∞ control strategies / X. Y. Huang, N. N. Yan, R. Z. Qiu // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 9 (47). – P. 2279–2300. – ISSN 1366-588X.
- 29 Orji, I. J. An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection : A case on manufacturing industry / I. J. Orji, S. Wei // *Computers & Industrial Engineering*. – 2015. – No. 88. – P. 1–12. – ISSN 1879-0550.
- 30 Golroudbary, S. R. System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain / S. R. Golroudbary, S. M. Zahraee // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2015. – No. 53. – P. 88–102. – ISSN 1569-190X.
- 21 A new fuzzy DEA model for evaluation of efficiency and effectiveness of suppliers in sustainable supply chain management context / M. Azadi, M. Jafarian, R. F. Saen, S. M. Mirhedayatian // *Computers & Operations Research*. – 2015. – No. 54. – P. 274–285. – ISSN 1873-765X.
- 22 Impact of supply chain management practices on sustainability / K. Govindan, S. G. Azevedo, H. Carvalho, V. Cruz-Machado // *Journal of Cleaner production*. – 2014. – No. 85. – P. 212–225. – ISSN 1879-1786.
- 23 Optimization of network redundancy and contingency planning in sustainable and resilient supply chain resource management under conditions of structural dynamics / A. Pavlov, D. Ivanov, D. Pavlov, A. Slinko // *Annals of Operations Research*. – 2019. – P. 1–30. – DOI 10.1007/s10479-019-03182-6.
- 24 Da Silva, C. Environmental monetization and risk assessment in supply chain design and planning / C. Da Silva, A. P. Barbosa-Povoa, A. Carvalho // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – No. 270. – P. 121552. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121552.
- 25 Pishvae, M. S. An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty : A case study of medical needle and syringe supply chain / M. S. Pishvae, J. Razmi, S. A. Torabi // *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*. – 2014. – No. 67. – P. 14–38. – ISSN 1878-5794.
- 26 Hoffa-Dabrowska, P. Simulation modeling of the sustainable supply chain / P. Hoffa-Dabrowska, K. Grzybowska // *Sustainability*. – 2020. – No. 15 (12). – P. 6007. – DOI 10.3390/su12156007.
- 27 Tao, Z. What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak / Z. Tao, M. Li // *Energy Policy*. – 2007. – No. 6 (35). – P. 3145–3154. – ISSN 1873-6777.
- 28 Huang, X. Y. Dynamic models of closed-loop supply chain and robust H_∞ control strategies / X. Y. Huang, N. N. Yan, R. Z. Qiu // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 9 (47). – P. 2279–2300. – ISSN 1366-588X.
- 29 Orji, I. J. An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection : A case on manufacturing industry / I. J. Orji, S. Wei // *Computers & Industrial Engineering*. – 2015. – No. 88. – P. 1–12. – ISSN 1879-0550.
- 30 Golroudbary, S. R. System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain / S. R. Golroudbary, S. M. Zahraee // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2015. – No. 53. – P. 88–102. – ISSN 1569-190X.

- 31 External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro, A. L. Caicedo-Otavo, A. F. Ruiz-Moreno, W. Adarme-Jaimes // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. – 2016. – No. 2 (10). – P. 311–322. – ISSN 2011-2173.
- 32 Longo, F. Sustainable supply chain design : an application example in local business retail / F. Longo // *Simulation*. – 2012. – No. 12 (88). – P. 1484–1498. – ISSN 1741-3133.
- 33 Kumar, A. RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore / A. Kumar, S. Rahman // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – No. 85. – P. 382–394. – ISSN 1879-1786.
- 34 Mangla, S. K. Monte Carlo simulation based approach to manage risks in operational networks in green supply chain / S. K. Mangla, P. Kumar, M. K. Barua // *Procedia Engineering*. – 2014. – No. 97. – P. 2186–2194. – ISSN 1877-7058.
- 35 Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong, C. Alzaman, A. Diabat, A. A. Bulgak // *Annals of Operations Research*. – 2019. – No. 275. – P. 339–366. – DOI 10.1007/s10479-018-3077-7.
- 36 Ivanov, D. Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability : a simulation study / D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 10 (56). – P. 3507–3523. – DOI 10.1080/00207543.2017.1343507.
- 37 Van der Vorst, J. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics / Jack Van der Vorst, S. O. Tromp, D. J. Zee // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 23 (47). – P. 6611–6631. – ISSN 1366-588X.
- 38 Eising, J. W. Towards smart grids : Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains / J. W. Eising, T. Van Onna, F. Alkemade // *Applied Energy*. – 2014. – No. 123. – P. 448–455. – ISSN 0306-2619.
- 39 Moradi, S. System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company / S. Moradi, G. Sierpiński, H. Masoumi // *Energies*. – 2022. – No. 15 (13). – P. 4917. – DOI 10.3390/en15134917.
- 40 Sahay, N. Supply chain management using an optimization driven simulation approach / N. Sahay, M. Ierapetritou // *AIChE Journal*. – 2013. – No. 2 (59). – P. 4612–4626.
- 31 External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro, A. L. Caicedo-Otavo, A. F. Ruiz-Moreno, W. Adarme-Jaimes // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. – 2016. – No. 2 (10). – P. 311–322. – ISSN 2011-2173.
- 32 Longo, F. Sustainable supply chain design : an application example in local business retail / F. Longo // *Simulation*. – 2012. – No. 12 (88). – P. 1484–1498. – ISSN 1741-3133.
- 33 Kumar, A. RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore / A. Kumar, S. Rahman // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – No. 85. – P. 382–394. – ISSN 1879-1786.
- 34 Mangla, S. K. Monte Carlo simulation based approach to manage risks in operational networks in green supply chain / S. K. Mangla, P. Kumar, M. K. Barua // *Procedia Engineering*. – 2014. – No. 97. – P. 2186–2194. – ISSN 1877-7058.
- 35 Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong, C. Alzaman, A. Diabat, A. A. Bulgak // *Annals of Operations Research*. – 2019. – No. 275. – P. 339–366. – DOI 10.1007/s10479-018-3077-7.
- 36 Ivanov, D. Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability : a simulation study / D. Ivanov // *International Journal of Production Research*. – 2018. – No. 10 (56). – P. 3507–3523. – DOI 10.1080/00207543.2017.1343507.
- 37 Van der Vorst, J. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics / Jack Van der Vorst, S. O. Tromp, D. J. Zee // *International Journal of Production Research*. – 2009. – No. 23 (47). – P. 6611–6631. – ISSN 1366-588X.
- 38 Eising, J. W. Towards smart grids : Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains / J. W. Eising, T. Van Onna, F. Alkemade // *Applied Energy*. – 2014. – No. 123. – P. 448–455. – ISSN 0306-2619.
- 39 Moradi, S. System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company / S. Moradi, G. Sierpiński, H. Masoumi // *Energies*. – 2022. – No. 15 (13). – P. 4917. – DOI 10.3390/en15134917.
- 40 Sahay, N. Supply chain management using an optimization driven simulation approach / N. Sahay, M. Ierapetritou // *AIChE Journal*. – 2013. – No. 2 (59). – P. 4612–4626.

41 Bi-objective Decision Support Tool Based on System Dynamics and Discrete Event Modelling for Sustainable Supply Chain / J. Yu, T. Hieu, S. Gray, A. A. Encinas-Oropesa // *Journal of Circular Economy*. – 2023. – P. 1–20. – DOI 10.55845/SDDH3833.

42 Vieira, A. A. C. A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals / A. A. C. Vieira, J. R. Figueira, R. Fragoso // *Expert Systems with Applications*. – 2023. – P. 120757. – DOI 10.1016/j.eswa.2023.120757.

43 Chanchaichujit, J. Sustainable supply chain management: A literature review of recent mathematical modelling approaches / J. Chanchaichujit, Q. C. Pham, A. Tan // *International Journal of Logistics Systems and Management*. – 2019. – No. 4 (33). – P. 467–496. – DOI 10.1504/IJLSM.2019.101794.

44 Осинцев, Н. А. Концепция системы управления логистическими потоками в «зеленых» цепях поставок / Н. А. Осинцев // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2020. – № 2 (46). – С. 81–92. – DOI 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92.

45 Осинцев, Н. А. Мультикритериальные методы принятия решений на транспорте и в логистике / Н. А. Осинцев // *Транспорт Урала*. – 2021. – № 4 (71). – С. 4–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

46 Осинцев, Н. А. Многокритериальные методы принятия решений в «зеленой» логистике / Н. А. Осинцев // *Мир транспорта*. – 2021. – № 5 (96). – С. 105–114. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.

47 Logistic flow control system in green supply chains / N. Osintsev, A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Dyorina // *Ecology in Transport : Problems and Solutions*. – 2020. – P. 311–380. – ISBN 978-3-030-42322-3.

41 Bi-objective Decision Support Tool Based on System Dynamics and Discrete Event Modelling for Sustainable Supply Chain / J. Yu, T. Hieu, S. Gray, A. A. Encinas-Oropesa // *Journal of Circular Economy*. – 2023. – P. 1–20. – DOI 10.55845/SDDH3833.

42 Vieira, A. A. C. A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals / A. A. C. Vieira, J. R. Figueira, R. Fragoso // *Expert Systems with Applications*. – 2023. – P. 120757. – DOI 10.1016/j.eswa.2023.120757.

43 Chanchaichujit, J. Sustainable supply chain management: A literature review of recent mathematical modelling approaches / J. Chanchaichujit, Q. C. Pham, A. Tan // *International Journal of Logistics Systems and Management*. – 2019. – No. 4 (33). – P. 467–496. – DOI 10.1504/IJLSM.2019.101794.

44 Osintsev, N. A. The concept of a logistics flow management system in “green” supply chains / N. A. Osintsev // *Bulletin of the Ural State Transport University*. – 2020. – No. 2 (46). – P. 81–92. – DOI 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92.

45 Osintsev, N. A. Multicriteria methods of decision-making in transport and logistics / N. A. Osintsev // *Transport of the Urals*. – 2021. – No. 4 (71). – P. 4–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

46 Osintsev, N. A. Multi-criteria decision-making methods in “green” logistics / N. A. Osintsev // *World of Transport*. – 2021. – No. 5 (96). – P. 105–114. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.

47 Logistic flow control system in green supply chains / N. Osintsev, A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Dyorina // *Ecology in Transport : Problems and Solutions*. – 2020. – P. 311–380. – ISBN 978-3-030-42322-3.

N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, P. N. Mishkurov, S. N. Kornilov, M. S. Melnikov

THE CONCEPT OF HYBRID MULTICRITERIA MODEL OF SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN

Abstract. The paper proposed the concept of a hybrid model of sustainable supply chain based on the combination of multi-criteria decision-making methods with simulation modeling. The possibility of using simulation modeling to describe functional dependencies between the indicators of sustainable supply chain, parameters, and indicators of logistics flows in the implementation of green logistics instruments is shown. The combination of models is necessary to forecast and optimize the values of parameters and indicators of logistics flows in accordance with the selected options of the set of green logistics instruments and considering the limited logistics resources. The proposed approach will improve the sustainability of supply chains as a result of the selection and implementation of green logistics tools.

Keywords: sustainable development, green logistics, sustainable supply chain, concept, multi-criteria model, simulation model, hybrid model.

For citation: The concept of hybrid multicriteria model of sustainable supply chain / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, P. N. Mishkurov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 90–104. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_90.

Сведения об авторах

Осинцев Никита Анатольевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: osintsev@magtu.ru

Рахмангулов Александр Нельевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ran@magtu.ru

Мишкuroв Павел Николаевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Корнилов Сергей Николаевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: sn_kornilov@magtu.ru

Мельников Михаил Сергеевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
магистрант,
e-mail: andruxa645@mail.ru

Information about the authors

Osintsev Nikita Anatolievich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: osintsev@magtu.ru

Rakhmangulov Aleksander Nelievich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ran@magtu.ru

Mishkurov Pavel Nikolayevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Kornilov Sergey Nikolayevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: sn_kornilov@magtu.ru

Melnikov Mikhail Sergeevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Master's Student,
e-mail: andruxa645@mail.ru