

УДК 656.07:004.896

Гибридная многокритериально-имитационная модель структурных элементов зеленых цепей поставок

П. Н. Мишкuroв, Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Для цитирования: Мишкuroв П. Н., Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н., Корнилов С. Н. Гибридная многокритериально-имитационная модель структурных элементов зеленых цепей поставок // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 50–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-50-61

Аннотация

Цель: разработка гибридной многокритериально-имитационной модели зеленой цепи поставок для выбора рациональной комбинации инструментов зеленой логистики. **Методы:** выполнен анализ существующих подходов к комбинированию многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием и линейным программированием. Изучена возможность использования многокритериально-имитационных моделей для описания динамических зависимостей между индикаторами зеленой цепи поставок, параметрами и показателями материальных потоков, инструментами зеленой логистики. Основным недостатком существующих комбинированных моделей является выбор инструментов зеленой логистики без комплексной оценки как индикаторов устойчивости, специфичных для каждого структурного элемента зеленых цепей поставок, так и ограничений на логистические ресурсы. Разработка единого подхода к комбинированию методов многокритериального анализа, оптимизации и имитационных моделей является актуальной задачей, решение которой позволит повысить устойчивость зеленых цепей поставок. **Результаты:** предложен подход к комбинированию методов многокритериального анализа, линейного программирования и имитационного моделирования. **Практическая значимость:** использование предложенной в работе модели позволяет реализовать многокритериальное принятие решений по выбору и реализации эффективных инструментов зеленой логистики в цепи поставок.

Ключевые слова: устойчивое развитие, зеленая логистика, цепь поставок, гибридная модель, многокритериальный анализ, имитационная модель, оптимизация

* Исследование выполнено за счет грантов Российского научного фонда:

№ 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>,

№ 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.

Введение

Задачи управления зелеными цепями поставок (ЗЦП) являются наиболее сложными в логистике. Сложность таких задач обусловлена многовариантностью управленческих решений и неопределенностью множества факторов оценки эффективности таких решений

в условиях согласованного достижения экономических, социальных и экологических целей функционирования цепей поставок. В результате оперативным и административным руководителям сложнее принимать управленческие решения по повышению устойчивости зеленых цепей поставок [1].

Для оценки эффективности функционирования ЗЦП используются как одиночные, так и комбинированные методы. Основой таких методов являются экономические, экологические и социальные показатели цепей поставок и их элементов, например, величина издержек, уровни рисков, целевые показатели экономики замкнутого цикла и множество других [2]. Достижение каждого показателя зависит от качества принимаемых решений по реализации инструментов зеленой логистики (ЗЛ) [3]. Однако для достижения целей устойчивого развития многокритериальность и многовариантность реализации отдельного инструмента ЗЛ повышает требования к качеству оценки состояния как отдельных элементов цепи поставок, так и цепи в целом. С другой стороны, высокая динамика расхода логистических ресурсов, сложность структуры материальных потоков и многовариантность их переработки определяют ограничения задачи поиска оптимального управленческого решения по реализации инструментов ЗЛ.

Возрастает актуальность разработки новых моделей поддержки принятия решений по повышению устойчивости цепей поставок [4]. Усиливается интерес исследователей к анализу и оценке устойчивости цепей поставок на основе комплексного использования методов анализа, прогнозирования и оптимизации материальных потоков, например комбинирования методов многокритериального анализа с математическими методами [5]. Использование таких методов при решении задач многокритериального анализа позволило определять расходы и количество ресурсов на реализацию инструментов зеленой логистики в виде серых чисел, а также формировать комплекс инструментов ЗЛ для их реализации в цепи поставок [3]. Для повышения точности прогнозирования параметров и показателей материальных

потоков используются имитационные модели [6], результатом которых являются управленческие решения по повышению устойчивости цепей поставок.

Инструменты имитационного моделирования обладают необходимым потенциалом для создания высокоточных моделей цепей поставок [7]. Сложность моделирования зеленых цепей поставок (ЗЦП) связана с динамичностью, неопределенностью и многофакторностью среды их функционирования, а также с многокритериальностью задач. Эффективное моделирование ЗЦП должно адекватно отражать сложность их функционирования. Для этого требуется комплексное использование методов анализа, прогнозирования и оптимизации цепей поставок. Перспективным направлением является комбинирование многокритериальных методов с имитационными моделями, методами математического программирования и современными цифровыми и интеллектуальными технологиями [6].

Основными задачами настоящего исследования являются:

1. Разработка гибридных моделей на основе комплексного использования имитационного моделирования с методами многокритериального анализа. Для повышения точности моделирования ЗЦП необходимо совмещать разные подходы (например, системную динамику, агентное и дискретно-событийное моделирование) в рамках одной модели элементов ЗЦП. Решение данной задачи позволит расширить возможности использования многокритериальных методов принятия решений на основе использования комбинированных имитационных моделей элементов ЗЦП.

2. Интеграция критериев устойчивости в имитационные модели. Задача заключается в корректном определении баланса

экономической, экологической и социальной устойчивости ЗЦП. Потенциально данная задача решается на основе формализованного описания индикаторов ЗЦП, параметров и показателей материальных потоков в имитационных моделях элементов цепей [6].

Литературный обзор

Обзор и анализ моделей цепей поставок [6] позволяют говорить об интеграции аспектов устойчивого развития в практику управления цепями поставок. В управлении цепями поставок применяются математические, имитационные, многокритериальные методы принятия решений. В зависимости от целей исследования используются различные комбинации методов и моделей ЗЦП (табл. 1). Такие модели по-разному учитывают функциональную сложность ЗЦП.

Перспективным направлением развития моделей ЗЦП является комбинация различных типов моделей с имитационным моделированием, что позволит учитывать функциональную сложность цепей поставок и ее структурных элементов, многофакторность, динамичность и неопределенность внешней и внутренней среды, сложность структуры материальных потоков.

Примерами построения имитационных моделей ЗЦП являются системно-динамические [8], дискретно-событийные [9], агентные имитационные модели [10] и модели, построенные на основе использования геоинформационных систем [11]. Наблюдается повышенный интерес исследователей к многопроходному моделированию ЗЦП. Основой таких моделей являются комбинирование многокритериального анализа и системной динамики [12]; комплексное использование методов оптимизации сложных систем и агентное моделирование [13], дискретно-событийного моделирования

и системной динамики [14], дискретно-событийного и агентного моделирования [15].

Использование системно-динамического подхода позволило целостно исследовать влияние экономических и экологических факторов [16, 17]. Системно-динамические имитационные модели описывают сложные нелинейные динамические зависимости [18]. Использование дискретно-событийного подхода позволило не только повысить точность моделирования технологии переработки материальных потоков в элементах цепи поставок [19], но и описать зависимости вариантов данной технологии от экономических, социальных и экологических факторов [10, 11].

Агентные имитационные модели ЗЦП используются в основном для гибкого описания взаимодействий между ее участниками [20], при оценке жизненного цикла цепей поставок или определении их экологической, социальной, эколого-экономической устойчивости [21].

Выбор подхода к построению имитационных моделей структурных элементов ЗЦП и способов интеграции математических методов принятия решений определяется конкретными целями исследования [22]. В основном комбинированные имитационные модели применяются для описания ключевых экономических параметров цепей поставок. В таких моделях значения экономических параметров определяются с помощью методов оптимизации [12, 13]. Результатом комплексного использования имитационных и оптимизационных моделей является повышение точности прогнозов значений параметров материальных потоков как на стратегическом [14], так и на тактическом [15] уровне управления.

Основным недостатком существующих гибридных моделей является выбор инструментов зеленой логистики без комплексной

ТАБЛИЦА 1. Краткая характеристика существующих моделей управления зелеными целями поставок

Тип модели	Подходы и методы моделирования	Уровни управления	Краткое описание модели	Результат
Математические модели	Одноцелевые	Стратегический	Точность исходных данных, оптимизация по одному критерию	Оптимальные значения параметров материальных потоков или элементов цепей поставок по одному критерию
	Многоцелевые	Стратегический	Точность исходных данных, математическое описание баланса конфликтующих критериев	Оптимальные значения параметров материальных потоков или элементов цепей поставок по нескольким критериям
Многокритериальные модели принятия решений (MCDM)	Принятие решений по множеству атрибутов (MADM)	Стратегический и тактический	Точные атрибуты, альтернативы предопределены, малое количество альтернатив	Ранжирование и сортировка решений (альтернатив), выбор наилучшей альтернативы из множества
	Многоцелевое принятие решений (MODM)	Стратегический, тактический, оперативный	Неточные атрибуты, альтернативы не предопределены, большое (бесконечное) количество альтернатив	Определение оптимальной альтернативы с учетом ограничений и нескольких целей
Имитационные модели	Одноподходные	Стратегический	Динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, точное описание технологии переработки материальных потоков	Варианты значений параметров материальных потоков или элементов цепей поставок
	Многоподходные	Тактический и оперативный	Динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, взаимодействие элементов материальных потоков сложной структуры	Варианты значений параметров материальных потоков или элементов цепей поставок
Комбинированные	Имитационные и оптимизационные	Тактический	Точность исходных данных, динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, взаимное взаимодействие элементов материальных потоков сложной структуры, оптимизация по одному критерию	Оптимальные значения параметров материальных потоков или элементов цепей поставок по одному критерию
	Многокритериальные и оптимизационные	Стратегический и тактический	Неопределенность исходных данных, многовариантность значений параметров материальных потоков, многофакторность	Набор альтернатив комплексного использования инструментов ЗЛ, оптимальное значение параметров инструментов по одному критерию эффективности
	Многокритериальные и имитационные	Оперативный, тактический и стратегический	Динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, точное описание технологии переработки материальных потоков, многовариантность баланса конфликтующих критериев	Оптимальные значения параметров инструмента ЗЛ и материальных потоков по нескольким критериям

оценки как индикаторов устойчивости, специфичных для каждого структурного элемента ЗЦП, так и ограничений на логистические ресурсы.

В связи с этим разработана универсальная методика формирования гибридных моделей структурных элементов ЗЦП на основе комплексного использования многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием и методами оптимизации материальных потоков является актуальной задачей, решение которой позволит повысить экономическую, социальную и экологическую эффективность ЗЦП.

Гибридная многокритериально-имитационная модель структурных элементов зеленых цепей поставок

Цепи поставок являются частью глобальных логистических транспортных систем. Такие системы представляют линейно упорядоченную совокупность элементов вдоль материального и сопутствующих ему информационному, финансовому потокам и потоку услуг. Транспортный, накопительный, перерабатывающий, входной и выходной элементы цепи поставок выполняют функции по переработке и продвижению материальных потоков. Управляющий элемент логистической цепи координирует функционирование всех ее элементов, контролирует выполнение функций и операций в элементах цепи, а также обеспечивает информационную и финансовую связь между ними [23].

В процессе функционирования элементы цепи поставок являются загрязнителями окружающей среды, а также потребителями логистических ресурсов (материальных, финансовых, информационных ресурсов и услуг), количество которых ограничено. Повышение устойчивости функционирования ЗЦП

достигается при комплексном использовании инструментов ЗЛ. Инструмент ЗЛ является способом воздействия на элементы и логистические потоки с целью изменения их параметров для повышения экономической, экологической и социальной устойчивости ЗЦП [3].

Одной из основных задач управляющего элемента ЗЦП является выбор комплекса инструментов ЗЛ в зависимости от сложности и загруженности инфраструктуры, используемых технологий, организации взаимодействия структурных элементов ЗЦП, показателей экономической эффективности, экологического воздействия на окружающую среду, геополитических и санкционных ограничений, параметров и показателей материальных потоков. Данные индикаторы устойчивости ЗЦП объединены в группы: инфраструктурные, организационно-технологические, экономические, социальные, экологические, политические, потоковые [6]. Сложность оценки комплексного использования инструментов ЗЛ обусловлена многовариантностью реализации каждого инструмента ЗЛ.

Функционал управляющего элемента ЗЦП предлагается моделировать на основе использования разработанной гибридной многокритериальной имитационной модели (рис. 1). Предлагаемая модель представляет собой трехуровневую комбинацию многокритериальных методов принятия решений с имитационными моделями.

На первом уровне применяются методы многокритериального анализа структурных элементов ЗЦП, инструментов ЗЛ, критериев устойчивости ЗЦП и показателей материальных потоков. Результатом многокритериального анализа являются значения весовых коэффициентов инструментов ЗЛ, показателей материальных потоков, значимости элементов ЗЦП и коэффициенты значимости

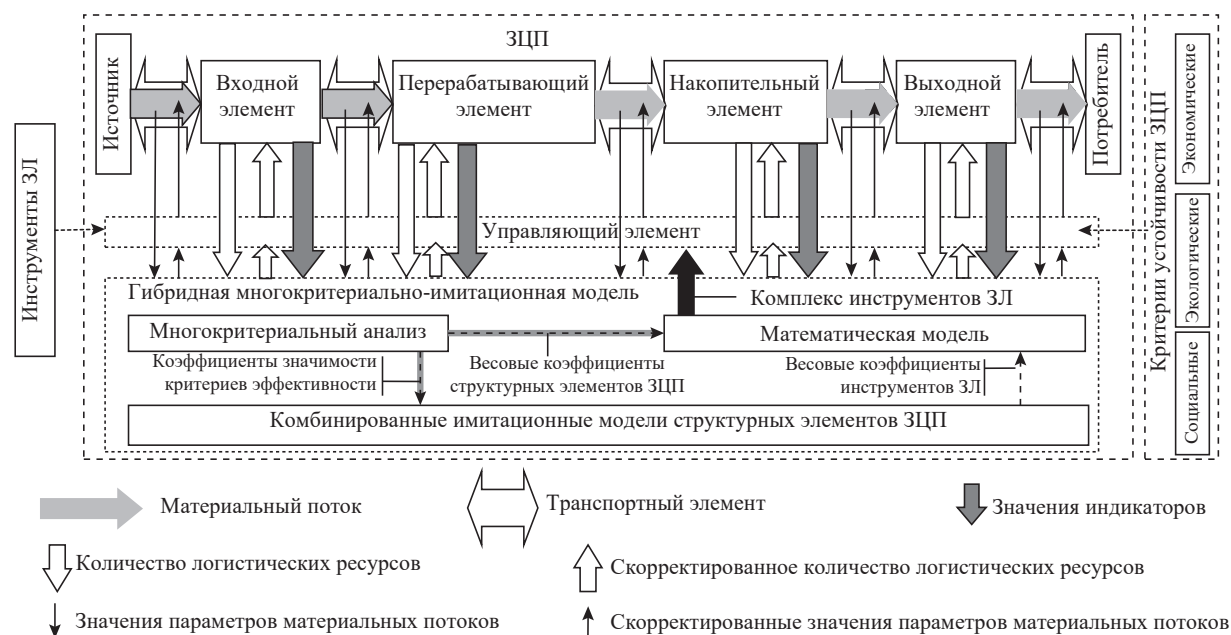


Рис. 1. Схема гибридной многокритериально-имитационной модели структурных элементов зеленых цепей поставок

экономического, экологического и социального критериев устойчивости ЗЦП.

На втором уровне оценивается использование логистических ресурсов при реализации инструментов ЗЛ для каждого элемента ЗЦП путем комбинирования имитационного моделирования и методов оптимизации. Результатами оценки являются скорректированные весовые коэффициенты инструментов ЗЛ в элементах ЗЦП. Данные коэффициенты определяются для условий высокой динамики переработки материальных потоков и интенсивности использования логистических ресурсов.

Оценка совокупного эффекта от реализации комплекса инструментов ЗЛ выполняется на третьем уровне разработанной гибридной модели. Достижимый эффект применения комплекса инструментов ЗЛ определяется на основе использования разработанной в работе [3] математической модели. Исходными данными модели являются результаты многокритериаль-

ного анализа, проведенного на первом уровне разработанной гибридной модели, и комбинированных имитационных моделей. В итоге определяются набор инструментов ЗЛ и совокупный потенциальный эффект от их комплексного использования в элементах ЗЦП.

Многокритериальный анализ ЗЦП

Функционал управляющего элемента ЗЦП состоит из широкого круга задач, одной из которых является формирование и оценка вариантов реализации инструментов ЗЛ для достижения целей устойчивого развития с учетом значений индикаторов устойчивости ЗЦП. Важным этапом при формировании комплекса инструментов ЗЛ является многокритериальный анализ ЗЦП.

Данный этап обосновывается различной важностью как структурных элементов, критериев эффективности функционирования ЗЦП и показателей материальных потоков,

так и инструментов ЗЛ. Важность каждого из представленных элементов определяется на основе их ранжирования дискретными методами многокритериального анализа [3]. Результатом ранжирования являются коэффициенты значимости каждого элемента цепи, критерия устойчивости ЗЦП, показателя материального потока и инструмента ЗЛ. Коэффициенты служат исходными данными к математической модели выбора инструментов ЗЛ [3]. Однако использование субъективных экспертных оценок является основным недостатком дискретных методов многокритериального анализа, что приводит к ограничению точности выбора управленческих решений. Для повышения точности предлагается при определении весовых коэффициентов инструментов ЗЛ использовать метод имитационного моделирования.

Комбинированные имитационные модели элементов ЗЦП

Реализация инструмента ЗЛ сопровождается изменениями расхода логистических ресурсов при переработке материальных потоков в элементе ЗЦП. Динамические зависимости расхода логистических ресурсов от параметров материальных потоков и технологии их переработки в элементах ЗЦП определяют необходимость использования метода имитационного моделирования.

Для повышения точности определения оптимальных значений представленных параметров предлагается комбинировать имитационные модели структурных элементов ЗЦП и методы оптимизации. Основой данного подхода является способ описания технологии переработки материальных потоков и модели многоцелевой оптимизации параметров инструментов ЗЛ.

Технологические процессы структурных элементов ЗЦП, связанные с переработкой

материальных потоков, являются дискретными. Каждый процесс представляет собой последовательность технологических операций, которые начинаются и заканчиваются в определенных моменты времени. Для моделирования порядка этих операций применяется дискретно-событийный (процессный) подход [14]. Результатом использования процессного подхода является последовательность элементов модели, которая определяет фактическую технологию переработки материальных потоков. Плановые или случайные события, возникающие в определенные моменты времени, задают изменения параметров потоков и расхода ресурсов. В случае изменений порядка выполнения технологических операций последовательности элементов модели корректируются [24], что ограничивает универсальность использования имитационных моделей для оценки множества управленческих решений.

Разработан универсальный способ моделирования технологии переработки материальных потоков на основе использования агентного (объектно-ориентированного) подхода в имитационных моделях элементов ЗЦП. Результатом использования данного подхода является выделение в виде взаимосвязанных агентов управляющего объекта (диспетчера), отдельной технологической операции, элемента материального потока и ресурса. Структура агентов состоит из параметров, переменных и алгоритмов их корректировки, а также из списков взаимосвязанных агентов. Это позволяет выделить отдельного агента, который обладает своим поведением и характеристиками. Технология переработки материальных потоков в структурном элементе ЗЦП описывается статической последовательностью стандартных действий технологического процесса, в котором перерабатываются элементы материального потока. При планировании

изменений технологии работы элемента ЗЦП необходимо учитывать состояние каждого ресурса и материального потока. Поэтому порядок технологических операций моделируется динамическим списком агентов и алгоритмами его корректировки. Расход логистического ресурса задается для отдельной технологической операции.

Для реализации методов оптимизации в имитационной модели необходимо увязать сложную структуру взаимосвязей агентов с параметрами оптимизации и целевой функцией. Нужно установить обратные связи между параметрами оптимизации и результатами корректировок расхода логистических ресурсов на переработку материальных потоков и реализацию инструментов ЗЛ. Формализовать параметры оптимизации и целевую функцию предлагается на основе использования элементов системной динамики. Преимуществом системно-динамического подхода к построению имитационных моделей является способ описания структуры связей между элементами системы на основе использования динамических переменных и обратных связей. Динамические переменные и обратные связи являются одними из базовых объектов системной динамики, использование которых позволит настроить целевую функцию оптимизации.

Критерии устойчивости описываются динамическими переменными, значения которых зависят от величины расхода логистических ресурсов, параметров материальных потоков и технологических процессов. Целевая функция (V) описывается суммой произведений динамических переменных и коэффициентов значимости экономического, экологического и социального критериев устойчивости (см. формулу 1). Коэффициенты значимости критериев устойчивости для отдельного структурного элемента ЗЦП определяются по результа-

там многокритериального анализа на первом уровне разработанной гибридной многокритериально-имитационной модели.

$$V = 1 - \left(\frac{k_{\text{э}} \cdot J_{\text{э}}}{a_{\text{э}}} + \frac{k_{\text{экол}} \frac{1}{J_{\text{экол}}}}{a_{\text{экол}}} + \frac{k_{\text{соц}} \cdot J_{\text{соц}}}{a_{\text{соц}}} \right) \rightarrow \max, (1)$$

где V — весовой коэффициент ЗЛ;

$k_{\text{э}}, k_{\text{экол}}, k_{\text{соц}}$ — значимость экономического, экологического и социального критериев устойчивости, соответственно;

$J_{\text{э}}, J_{\text{экол}}, J_{\text{соц}}$ — экономический, экологический и социальный критерии устойчивости функционирования элемента ЗЦП при реализации инструмента ЗЛ;

$a_{\text{э}}, a_{\text{экол}}, a_{\text{соц}}$ — переводные коэффициенты критериев устойчивости в безразмерную величину, которые определяются экспертной оценкой результатов экспериментов на комбинированных имитационных моделях.

Результатом использования комбинированной имитационной модели является скорректированное значение весового коэффициента инструмента ЗЛ с учетом потенциального экономического, экологического и социального эффекта от его реализации в элементе ЗЦП при рациональном использовании логистических ресурсов как на реализацию инструмента ЗЛ (V), так и на переработку материальных потоков.

Оценка реализации комплекса инструментов ЗЛ

Оценка совокупного эффекта от реализации комплекса инструментов ЗЛ выполняется на основе использования математической модели, разработанной в работе [3]. Оптимальная комбинация инструментов ЗЛ, которые необходимо реализовать в структурных элементах ЗЦП при имеющихся логистических ресурсах,

определяется математической моделью. Исходными данными математической модели являются результаты первого и второго уровня разработанной гибридной многокритериально-имитационной модели. Целевая функция оценки совокупного эффекта от реализации комплекса инструментов ЗЛ выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \sum_{j=1}^m (V_{ij} \cdot x_{ij}) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где x_{ij} — применение в i -м элементе ЗЦП j -го инструмента ЗЛ (если инструмент ЗЛ не применяется, $x_{ij} = 0$; если инструмент ЗЛ применяется, $x_{ij} = 1$ [3]);

ω_i — значимость i -го элемента ЗЦП, безразмерная величина, измеряемая в долях единицы, $i = 1, 2, \dots, n$;

V_{ij} — весовой коэффициент j -го инструмента ЗЛ, полученный на втором уровне разработанной гибридной модели, на основе оценки потенциального эффекта от его реализации в i -м элементе ЗЦП, $j = 1, 2, \dots, m$;

n — количество элементов ЗЦП;

m — количество инструментов ЗЛ.

Заключение

Предложен подход к формированию гибридных многокритериально-имитационных моделей структурных элементов ЗЦП, основанный на комплексном использовании метода имитационного моделирования с многокритериальными методами оценки управленческих решений для выбора эффективного варианта реализации комплекса инструментов ЗЛ в структурных элементах ЗЦП.

Численные эксперименты на разработанной модели, результаты которых будут представлены во второй части настоящей статьи, показали возможность устанавливать реалистичный набор инструментов зеленой

логистики в условиях ограниченных логистических ресурсов и обеспечивать развитие зеленых цепей поставок для достижения целей экономической, социальной и экологической устойчивости.

Список источников

1. 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. № 3 (21). С. 180–196.
2. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 86. Pp. 360–377.
3. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. Устойчивое развитие логистических цепей грузопотоков: монография. М.: Инфра-М, 2025. 303 с.
4. A systematic literature review on green supply chain management: Research implications and future perspectives / U. R. de Oliveira [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 187. Pp. 537–561.
5. Lu K., Liao H., Zavadskas E. K. An overview of fuzzy techniques in supply chain management: bibliometrics, methodologies, applications and future directions // Technological and Economic Development of Economy. 2021. Vol. 27 (2). Pp. 402–458.
6. Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (93). С. 90–104.
7. Hoffa-Dabrowska P., Grzybowska K. Simulation modeling of the sustainable supply chain // Sustainability. 2020. Vol. 15 (12). P. 6007.
8. External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro [et al.] // Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 2016. Vol. 2 (10). Pp. 311–322.

9. Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong [et al.] // *Annals of Operations Research*. 2019. Vol. 275. Pp. 339–366.
10. Van Der Vorst J. G. A. J., Tromp S. O., Zee D. J. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics // *International Journal of Production Research*. 2009. Vol. 23 (47). Pp. 6611–6631.
11. Eising J. W., Van Onna T., Alkemade F. Towards smart grids: Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains // *Applied Energy*. 2014. Vol. 123. Pp. 448–455.
12. Moradi S., Sierpiński G., Masoumi H. System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company // *Energies*. 2022. Vol. 13 (15). P. 4917.
13. Sahay N., Ierapetritou M. Supply chain management using an optimization driven simulation approach // *AIChE Journal*. 2013. No. 2 (59). Pp. 4612–4626.
14. Bi-objective decision support tool based on system dynamics and discrete event modelling for sustainable supply chain / J. Yu [et al.] // *Journal of circular economy*. 2023. Pp. 1–20.
15. Vieira A. A. C., Figueira J. R., Fragoso R. A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals // *Expert Systems with Applications*. 2023. P. 120757.
16. Tao Z., Li M. What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak // *Energy Policy*. 2007. Vol. 6 (35). Pp. 3145–3154.
17. Orji I. J., Wei S. An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection: A case on manufacturing industry // *Computers & Industrial Engineering*. 2015. Vol. 88. Pp. 1–12.
18. Guo W., Chen S., Lei M. Evolutionary game and strategy analysis of carbon emission reduction in supply chain based on system dynamic model // *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (11). P. 8933.
19. Kumar A., Rahman S. RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 85. Pp. 382–394.
20. Jing L., Felix T. S. Chan. An agent-based model of supply chains with dynamic structures // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 7 (37). Pp. 5403–5413.
21. Manufacturers' green decision evolution based on multi-agent modeling / Z. Li [et al.] // *Complexity*. 2019. Vol. 14. P. 3512142.
22. Осинцев Н. А. Концепция системы управления логистическими потоками в «зеленых» цепях поставок // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2020. № 2 (46). С. 81–92.
23. Корнилов С. Н., Рахмангулов А. Н., Шаульский Б. Ф. Основы логистики. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. 302 с.
24. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов [и др.] // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2022. № 3 (55). С. 43–59.

Дата поступления: 01.12.2025

Решение о публикации: 11.02.2026

Контактная информация:

МИШКУРОВ Павел Николаевич — канд. техн.

наук, доцент; p.mishkurov@magtu.ru

ОСИНЦЕВ Никита Анатольевич — д-р техн. наук,

профессор; osintsev@magtu.ru

РАХМАНГУЛОВ Александр Нельевич — д-р техн.

наук, профессор; ran@magtu.ru

КОРНИЛОВ Сергей Николаевич — д-р техн. наук,

профессор; kornilov_sn@mail.ru

A hybrid multi-criteria simulation model of green supply chain components

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

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), 38 Lenin pr., Magnitogorsk, 455000, Russia

For citation: *Mishkurov P. N., Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N. A hybrid multi-criteria simulation model of green supply chain components // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 50–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-50-61. (In Russian)*

Abstract

Objective: to develop a hybrid multi-criteria simulation model for a green supply chain aimed at identifying an optimal combination of green logistics tools. **Methods:** an analysis of current approaches that integrate multi-criteria decision-making methods with simulation modelling and linear programming was performed. The research explored the application of multi-criteria simulation models to represent the dynamic interactions among green supply chain indicators, material flow parameters, and green logistics tools. A major drawback of current integrated models lies in the selection of green logistics instruments: they often omit comprehensive assessments of sustainability indicators specific to each supply chain component and inadequately incorporate constraints arising from logistics resources. Consequently, creating a unified framework that combines multi-criteria analysis, optimization techniques, and simulation modelling is essential to advance the sustainability of green supply chains. **Results:** a method for integrating multi-criteria analysis, linear programming, and simulation modelling techniques has been proposed. **Practical significance:** the model developed in this research facilitates multi-criteria decision-making regarding the selection and application of effective green logistics tools within the supply chain.

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

* *The study was supported by a grants from the Russian Science Foundation:
№ 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>,
№ 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.*

References

1. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. Otsenka ustojchivosti tsepej postavok na osnove serogo relyatsionnogo analiza // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova. 2023. No. 3 (21). S. 180–196. (In Russian)
2. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 86. Pp. 360–377.
3. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. Ustojchivoe razvitie logisticheskikh tsepej gruzopotokov: monografiya. M.: Infra-M, 2025. 303 c. (In Russian)
4. A systematic literature review on green supply chain management: Research implications and future perspectives / U. R. de Oliveira [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 187. Pp. 537–561.
5. Lu K., Liao H., Zavadskas E. K. An overview of fuzzy techniques in supply chain management: bibliometrics, methodologies, applications and future directions // Technological and Economic Development of Economy. 2021. Vol. 27 (2). Pp. 402–458.
6. Kontseptsiya gibridnoj mnogokriterial'noj modeli ustojchivoj tsepi postavok / N. A. Osintsev [i dr.] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. No. 1 (93). S. 90–104. (In Russian)

7. Hoffa-Dabrowska P., Grzybowska K. Simulation modeling of the sustainable supply chain // *Sustainability*. 2020. Vol. 15 (12). P. 6007.
8. External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro [et al.] // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2016. Vol. 2 (10). Pp. 311–322.
9. Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong [et al.] // *Annals of Operations Research*. 2019. Vol. 275. Pp. 339–366.
10. Van Der Vorst J. G. A. J., Tromp S. O., Zee D. J. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics // *International Journal of Production Research*. 2009. Vol. 23 (47). Pp. 6611–6631.
11. Eising J. W., Van Onna T., Alkemade F. Towards smart grids: Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains // *Applied Energy*. 2014. Vol. 123. Pp. 448–455.
12. Moradi S., Sierpiński G., Masoumi H. System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company // *Energies*. 2022. Vol. 13 (15). P. 4917.
13. Sahay N., Ierapetritou M. Supply chain management using an optimization driven simulation approach // *AIChE Journal*. 2013. No. 2 (59). Pp. 4612–4626.
14. Bi-objective decision support tool based on system dynamics and discrete event modelling for sustainable supply chain / J. Yu [et al.] // *Journal of Circular Economy*. 2023. Pp. 1–20.
15. Vieira A. A. C., Figueira J. R., Fragoso R. A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals // *Expert Systems with Applications*. 2023. P. 120757.
16. Tao Z., Li M. What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak // *Energy Policy*. 2007. Vol. 6 (35). Pp. 3145–3154.
17. Orji I. J., Wei S. An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection: A case on manufacturing industry // *Computers & Industrial Engineering*. 2015. Vol. 88. Pp. 1–12.
18. Guo W., Chen S., Lei M. Evolutionary game and strategy analysis of carbon emission reduction in supply chain based on system dynamic model // *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (11). P. 8933.
19. Kumar A., Rahman S. RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 85. Pp. 382–394.
20. Jing L., Felix T. S. Chan. An agent-based model of supply chains with dynamic structures // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 7 (37). Pp. 5403–5413.
21. Manufacturers' Green Decision Evolution Based on Multi-Agent Modeling / Z. Li [et al.] // *Complexity*. 2019. Vol. 14. P. 3512142.
22. Osintsev N. A. Kontsepsiya sistemy upravleniya logisticheskimi potokami v "zelenykh" tsepyakh postavok // *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2020. No. 2 (46). S. 81–92. (In Russian)
23. Kornilov S. N., Rakhmangulov A. N., Shaul'skij B. F. Osnovy logistiki. M.: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2016. 302 s. (In Russian)
24. Imitatsionnye modeli v tsifrovyykh dvojnnykh zheleznodorozhnykh uzlov / A. N. Rakhmangulov [i dr.] // *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2022. No. 3 (55). S. 43–59. (In Russian)

Received: 01.12.2025

Accepted: 11.02.2026

Author's information:

Pavel N. MISHKUROV — PhD in Engineering, Associate Professor; p.mishkurov@magtu.ru

Nikita A. OSINTSEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; osintsev@magtu.ru

Aleksandr N. RAKHMANGULOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ran@magtu.ru

Sergey N. KORNILOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; kornilov_sn@mail.ru