

УДК 620.179.16; 621.791.925
DOI: 10.37890/jwt.vi87.702

Современные подходы к управлению складскими процессами в контексте снижения углеродного следа

А. А. Умбетова

ORCID: 0009-0000-0146-6820

Ж. К. Кегенбеков

ORCID: 0000-0001-8175-7440

Казахстанско-Немецкий университет, Алматы, Казахстан

Аннотация. В условиях глобального перехода к устойчивому развитию и усилению экологических требований к логистической деятельности особую актуальность приобретает проблема снижения углеродного следа складских процессов, характеризующихся высокой энергоёмкостью и значительным вкладом в выбросы парниковых газов. Современные склады являются ключевым элементом цепей поставок, и эффективность управления ими напрямую влияет как на экономические показатели предприятий, так и на их экологическую ответственность. Целью статьи является анализ и систематизация современных подходов к управлению складскими процессами, ориентированных на снижение углеродного следа при сохранении операционной эффективности.

Методологическую основу исследования составляют методы системного и сравнительного анализа, контент-анализ научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, а также элементы моделирования логистических процессов. Рассматриваются основные направления экологизации складской деятельности, включая оптимизацию планировки складов, внедрение энергоэффективных и цифровых технологий, использование возобновляемых источников энергии и применение экологически ориентированных показателей эффективности в системе управления.

В результате исследования выявлены ключевые факторы формирования углеродного следа складов и определены управленческие инструменты, позволяющие снизить уровень выбросов углекислого газа на различных этапах складского цикла. Предложена концептуальная модель низкоуглеродного управления складскими процессами, основанная на интеграции экологических критериев в управленческие решения. Полученные выводы имеют практическую значимость для специалистов в области складской логистики и устойчивого развития.

Ключевые слова: управление складскими процессами, углеродный след, складская логистика, энергоэффективность склада.

Modern approaches to warehouse process management in the context of reducing the carbon footprint

Anel A. Umbetova

ORCID: 0009-0000-0146-6820

Zhandos K. Kegenbekov²

ORCID: 0000-0001-8175-7440

Kazakh-German University, Almaty, Kazakhstan

Abstract. In the context of the global transition to sustainable development and the strengthening of environmental requirements for logistics activities, the issue of reducing the carbon footprint of warehouse processes, which are characterized by high energy intensity and a significant contribution to greenhouse gas emissions, becomes particularly relevant. Modern warehouses represent a key element of supply chains, and the efficiency of their management directly affects both the economic performance of enterprises and their

environmental responsibility. The purpose of this article is to analyze and systematize modern approaches to warehouse process management aimed at reducing the carbon footprint while maintaining operational efficiency.

The methodological framework of the study is based on methods of systemic and comparative analysis, content analysis of scientific publications by domestic and foreign authors, as well as elements of logistics process modeling. The paper examines the main directions of warehouse activity environmentalization, including optimization of warehouse layout, implementation of energy-efficient and digital technologies, use of renewable energy sources, and application of environmentally oriented key performance indicators within the management system.

As a result of the study, key factors influencing the formation of the warehouse carbon footprint have been identified, and managerial tools have been determined that make it possible to reduce carbon dioxide emissions at various stages of the warehouse cycle. A conceptual model of low-carbon warehouse process management has been proposed, based on the integration of environmental criteria into managerial decision-making. The findings obtained are of practical significance for specialists in warehouse logistics and sustainable development.

Keywords: warehouse process management, carbon footprint, warehouse logistics, warehouse energy efficiency

Введение

В условиях трансформации мировой экономики в направлении устойчивого развития и декарбонизации хозяйственной деятельности вопросы снижения углеродного следа логистических систем приобретают особую научную и практическую значимость. Существенная часть совокупных выбросов парниковых газов в цепях поставок формируется на этапе складской обработки, что обусловлено высокой энергоёмкостью складской инфраструктуры, интенсивным использованием подъемно-транспортного оборудования, систем освещения, климат-контроля, а также возрастающим уровнем автоматизации и цифровизации складских операций. В этой связи управление складскими процессами все чаще рассматривается не только как инструмент повышения операционной эффективности, но и как важный элемент экологической политики предприятий.

Современные исследования в области логистики и управления цепями поставок указывают на необходимость интеграции экологических критериев в систему принятия управленческих решений. В научных работах отмечается, что традиционные подходы к управлению складами, ориентированные преимущественно на минимизацию издержек и сокращение времени обработки заказов, в условиях усиления экологического регулирования оказываются недостаточными и требуют существенного пересмотра [1]. Особое внимание уделяется вопросам энергоэффективности складских зданий, оптимизации внутренней логистики, внедрения цифровых технологий мониторинга энергопотребления и выбросов, а также использованию экологически ориентированных показателей эффективности.

Анализ зарубежных и отечественных публикаций показывает, что в последние годы активно развиваются концепции «зеленой логистики» и «устойчивого склада», предполагающие снижение негативного воздействия складской деятельности на окружающую среду при одновременном сохранении или повышении экономической эффективности логистических операций [2]. Вместе с тем, несмотря на наличие значительного числа исследований, остается недостаточно проработанным вопрос комплексного управления складскими процессами с позиции системного снижения углеродного следа, учитывающего взаимосвязь стратегических, тактических и операционных решений.

Нерешенной научной проблемой является отсутствие универсальных управленческих моделей, позволяющих интегрировать экологические показатели, в том числе показатели углеродного следа, в систему управления складскими процессами на практике. Недостаточно разработаны методические подходы к выбору и применению экологически ориентированных управленческих инструментов, адаптированных к условиям конкретных логистических систем и уровню их цифровой зрелости [3].

Целью настоящего исследования является анализ и систематизация современных подходов к управлению складскими процессами в контексте снижения углеродного следа. Для достижения поставленной цели в статье решаются следующие задачи: выявление ключевых факторов формирования углеродного следа складов; анализ современных управленческих и технологических решений, направленных на его сокращение; формирование концептуального подхода к низкоуглеродному управлению складскими процессами.

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении научных представлений о роли складской логистики в системе устойчивого развития. Практическая значимость состоит в возможности использования полученных выводов и предложений при разработке и реализации программ экологической модернизации складской инфраструктуры и систем управления логистическими процессами.

Методы

Методологическая база настоящего исследования сформирована с учётом комплексного характера задачи снижения углеродного следа складских процессов, которая затрагивает технологические, управленческие, энергетические и информационные аспекты функционирования складских систем. Для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов применялся совокупный подход, включающий методы анализа, моделирования и обобщения, а также элементы прикладных управленческих исследований.

В качестве основного методологического подхода использовался системный анализ, позволяющий рассматривать склад как многоуровневую логистическую систему, функционирование которой определяется взаимодействием материальных, энергетических и информационных потоков. Применение данного метода обусловлено необходимостью выявления взаимосвязей между параметрами складских процессов и показателями углеродного следа на различных этапах складского цикла — от приёма грузов до их отгрузки конечным потребителям.

На первом этапе исследования был проведён контент-анализ научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, посвящённых проблемам устойчивой логистики, «зелёных» складов и экологизации цепей поставок. Анализ охватывал статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах за последние пять лет, что позволило выявить актуальные направления исследований, применяемые методы оценки углеродного следа, а также существующие ограничения и пробелы в научных подходах [4]. Данный этап послужил основой для формирования теоретической рамки исследования и уточнения понятийного аппарата.

На втором этапе использовался сравнительный анализ, направленный на сопоставление традиционных и экологически ориентированных методов управления складскими процессами. В рамках данного анализа рассматривались различные модели организации складской деятельности, уровни автоматизации, схемы энергоснабжения и используемые показатели эффективности. Особое внимание уделялось выявлению различий в структуре энергопотребления и уровне выбросов углекислого газа при применении различных управленческих решений.

Для структурирования факторов, влияющих на формирование углеродного следа склада, был применён метод факторного анализа, результаты которого представлены в таблице 1. Данный метод позволил классифицировать факторы по функциональным группам и определить степень их воздействия на экологические показатели складской деятельности.

Таблица 1

Классификация факторов формирования углеродного следа складских процессов

Группа факторов	Содержание факторов	Характер воздействия	Управляемость
Технологические	Тип складского оборудования, уровень автоматизации, износ техники	Прямое влияние на энергопотребление	Высокая
Энергетические	Источники энергии, энергоэффективность систем освещения и отопления	Прямое	Средняя
Организационные	Планировка склада, маршруты перемещения, графики работы	Косвенное	Высокая
Информационные	Уровень цифровизации, системы мониторинга	Косвенное	Высокая
Экологические	Используемые стандарты, экологические регламенты	Косвенное	Средняя

На следующем этапе исследования применялось **моделирование складских процессов**, которое позволило оценить влияние управленческих решений на величину углеродного следа. В качестве инструмента моделирования использовались логистические схемы, отражающие последовательность операций складского цикла. Моделирование проводилось с целью определения наиболее энергоёмких операций и выявления потенциальных резервов снижения выбросов CO₂ за счёт оптимизации процессов [5].

Для оценки эффективности управленческих решений был использован метод анализа показателей эффективности (КPI), адаптированных к экологическим целям. В рамках исследования применялись показатели удельного энергопотребления, удельных выбросов углекислого газа на единицу складской операции, а также интегральные показатели экологической эффективности. Система используемых показателей представлена в таблице 2.

Таблица 2

Экологически ориентированные показатели оценки складских процессов

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Назначение
Удельное энергопотребление	E _s	кВт·ч/м ²	Оценка энергоэффективности
Выбросы CO ₂ на операцию	C _o	кг CO ₂ /операция	Экологическая нагрузка
Интегральный экологический KPI	EKPI	баллы	Комплексная оценка
Доля ВИЭ в энергобалансе	R	%	Устойчивость энергоснабжения
Коэффициент цифровизации	D	%	Уровень управляемости

Дополнительно применялся метод **экспертных оценок**, использованный для обоснования выбора управленческих инструментов снижения углеродного следа. Экспертная группа формировалась из специалистов в области складской логистики и управления устойчивым развитием. Экспертные оценки позволили ранжировать управленческие меры по степени их экологической и экономической эффективности.

Заключительным этапом исследования стало обобщение и синтез полученных результатов, на основе которых была сформирована концептуальная модель низкоуглеродного управления складскими процессами. Концептуальная модель

представлена на рисунке 1, а её структура и последовательность реализации раскрыты в таблице 3, отражающей логическую схему внедрения экологически ориентированных управленческих решений.

Предлагаемая модель объединяет пять взаимосвязанных контуров управления: входные факторы формирования углеродного следа, аналитико-диагностический блок, блок принятия управленческих решений, технологический блок внедрения и блок мониторинга результатов. Принципиальной особенностью модели является наличие обратной связи: результаты цифрового мониторинга и оценки КРП используются для оперативной корректировки режимов работы склада, маршрутов перемещения и энергетических параметров складской инфраструктуры



Рис. 1. Концептуальная модель низкоуглеродного управления складскими процессами

Таблица 3

Структура и последовательность реализации концептуальной модели низкоуглеродного управления складскими процессами

Блок	Содержание	Методы и инструменты	Ожидаемый эффект
Диагностика	Анализ текущего состояния склада, картирование процессов и выявление наиболее энергоёмких операций	Системный анализ, аудит процессов, сбор исходных КРП	Выявление экологических и операционных проблем
Аналитика	Оценка углеродного следа по этапам складского цикла и формирование базового сценария	КРП-анализ, расчёт удельных выбросов CO ₂ , цифровой мониторинг	Количественная база для принятия решений
Проектирование	Выбор решений по планировке, маршрутизации, режимам работы оборудования и энергоснабжению	Экспертная оценка, сценарное моделирование, многофакторное сравнение	Оптимизация складских процессов
Внедрение	Реализация энергоэффективных и цифровых технологий в операционной деятельности склада	WMS/EMS, автоматизация, LED-освещение, модернизация HVAC, ВИЭ	Снижение энергопотребления и выбросов
Контроль и коррекция	Мониторинг достигнутых показателей и корректировка регламентов управления	Цифровые панели управления, повторный анализ, корректирующие меры	Устойчивый долгосрочный эффект

Выбор перечисленных методов обусловлен их универсальностью, практической применимостью и соответствием целям исследования. Комплексное использование аналитических, моделирующих и экспертных методов позволило обеспечить системность исследования и достоверность полученных выводов [6].

Результаты

В соответствии с поставленной целью и задачами исследования в качестве рабочей гипотезы было выдвинуто предположение о том, что интеграция экологических критериев и цифровых инструментов в систему управления складскими процессами позволяет существенно снизить углеродный след складской деятельности без ухудшения операционных показателей. Для проверки данной гипотезы были получены и проанализированы теоретические и расчетные данные, отражающие влияние управленческих решений на ключевые экологические и производственные параметры складов.

В ходе системного анализа складских процессов установлено, что наибольший вклад в формирование углеродного следа вносят операции, связанные с энергопотреблением складской инфраструктуры и подъемно-транспортного оборудования. Результаты обобщения данных, полученных на основе моделирования типового крытого универсального склада класса В/В+, предназначенного для хранения паллетированных сухих штучных грузов при стандартном температурном режиме и использовании электрических погрузчиков, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Структура углеродного следа складских процессов для крытого универсального склада

Этап складского цикла	Доля энергопотребления, %	Доля выбросов CO ₂ , %
Прием и разгрузка	17	15
Внутреннее перемещение	29	31
Хранение	31	30
Комплектация	15	16
Отгрузка	8	8

Примечание – расчеты выполнены для крытого склада площадью 5000 м² с паллетным хранением непродовольственных сухих грузов; для открытых складов, площадок хранения пиломатериалов и холодильных комплексов структура энергопотребления и выбросов CO₂ будет отличаться.

Анализ данных таблицы 4 показывает, что процессы хранения и внутреннего перемещения в совокупности формируют 60 % энергопотребления и 61 % выбросов CO₂ в рассматриваемом сценарии, что подтверждает целесообразность приоритетной оптимизации данных операций. Данный результат согласуется с выводами ряда зарубежных исследований, указывающих на ключевую роль энергоэффективности складских зданий и логистической планировки в снижении углеродного следа [7].

В рамках исследования была проведена оценка влияния внедрения энергоэффективных и цифровых решений на основные экологические показатели складской деятельности. В качестве базового сценария рассматривалась традиционная модель управления складом, ориентированная преимущественно на минимизацию издержек. Альтернативный сценарий предполагал использование экологически ориентированных KPI, систем мониторинга энергопотребления и оптимизированной логистической планировки. Сравнительные результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнительная оценка показателей эффективности управления складом

Показатель	Базовый сценарий	Низкоуглеродный сценарий	Изменение, %
Удельное энергопотребление, кВт·ч/м ²	245	190	-22,4
Выбросы CO ₂ , кг/м ²	98	72	-26,5
Производительность операций	100	103	+3,0
Доля цифровых процессов, %	45	75	+30

Полученные данные свидетельствуют о том, что внедрение низкоуглеродного управления позволяет снизить удельные выбросы CO₂ более чем на 25 % при одновременном незначительном росте производительности складских операций. Это подтверждает выдвинутую гипотезу о возможности совмещения экологических и экономических целей в управлении складскими процессами.

Дополнительно были рассчитаны интегральные показатели экологической эффективности, отражающие совокупное влияние управленческих решений на устойчивость складской системы. Расчеты показали, что применение экологически ориентированных KPI способствует более стабильному контролю энергопотребления и снижению вариативности выбросов в долгосрочной перспективе. Данный эффект обусловлен повышением управляемости процессов за счёт цифровизации и автоматизации, что подтверждается результатами исследований в области устойчивой логистики [8].

На основе обобщения полученных результатов была сформирована концептуальная зависимость между уровнем цифровизации склада и величиной его углеродного следа, демонстрирующая обратную корреляцию между данными параметрами. Рост уровня цифровизации позволяет оптимизировать маршруты перемещения, снизить время простоя оборудования и повысить точность планирования складских операций, что в конечном итоге приводит к снижению энергопотребления и выбросов парниковых газов.

Результаты исследования подтверждают, что комплексное применение управленческих, технологических и цифровых инструментов является эффективным механизмом снижения углеродного следа складских процессов.

Обсуждение

Полученные в ходе исследования результаты подтверждают выдвинутую рабочую гипотезу о том, что интеграция экологических критериев в систему управления складскими процессами позволяет достичь значимого снижения углеродного следа без негативного влияния на операционную эффективность. Предложенная концептуальная модель (рис. 1) демонстрирует возможность перехода от традиционных, преимущественно затратных моделей управления складской логистикой к более устойчивым и экологически ориентированным управленческим подходам.

Снижение удельных выбросов CO₂, зафиксированное при реализации низкоуглеродного сценария управления, может быть интерпретировано как результат комплексного воздействия нескольких факторов: оптимизации планировки склада, сокращения внутренних перемещений, внедрения цифровых систем мониторинга энергопотребления и применения экологически ориентированных KPI. Аналогичные выводы представлены в исследованиях зарубежных авторов, где подчеркивается, что наибольший экологический эффект достигается не за счёт изолированных технологических решений, а в результате системного изменения управленческой логики складских процессов [9].

Сопоставление результатов настоящего исследования с данными, представленными в научной литературе, позволяет отметить их высокую степень согласованности. Так, в работах, посвящённых концепции «зелёного склада», отмечается, что процессы хранения и внутреннего перемещения являются основными источниками энергопотребления и, следовательно, ключевыми объектами для экологической оптимизации [10]. Полученные в данной работе данные, согласно которым данные операции формируют более 60 % совокупного углеродного следа, подтверждают справедливость данного подхода и обосновывают целесообразность концентрации управленческих усилий именно на этих этапах складского цикла.

Особого внимания заслуживает выявленная в исследовании взаимосвязь между уровнем цифровизации складских процессов и снижением углеродного следа. Рост доли цифровых и автоматизированных операций способствует более точному планированию, снижению избыточных перемещений и простоев оборудования, а также повышению прозрачности управления энергопотреблением. Данный вывод согласуется с результатами исследований, посвящённых внедрению цифровых платформ и интеллектуальных систем управления в логистике, где цифровизация рассматривается как один из ключевых драйверов устойчивого развития цепей поставок [11].

В то же время необходимо отметить, что полученные результаты носят обобщённый характер и в значительной степени зависят от исходных условий функционирования конкретного склада. Уровень технической оснащённости, климатические условия, тип обрабатываемых грузов и организационная структура предприятия могут существенно влиять на масштаб достигаемого экологического эффекта. В этом контексте результаты исследования следует рассматривать как методическую и концептуальную основу, требующую адаптации к конкретным условиям практического применения.

Сравнение с альтернативными подходами, представленными в литературе, показывает, что ряд авторов делает акцент преимущественно на технологических аспектах снижения углеродного следа, таких как использование энергоэффективного оборудования или возобновляемых источников энергии [12]. В отличие от них, в настоящем исследовании обоснована необходимость управленческого подхода, предполагающего интеграцию экологических показателей в систему принятия решений на всех уровнях управления складскими процессами. Такой подход позволяет обеспечить более устойчивый и долгосрочный эффект по сравнению с фрагментарным внедрением отдельных технических решений.

Полученные результаты также позволяют выдвинуть предположение о том, что дальнейшее развитие низкоуглеродного управления складскими процессами будет связано с расширением использования цифровых двойников, прогнозных моделей энергопотребления и автоматизированных систем поддержки управленческих решений. Данные направления уже находят отражение в современных исследованиях в области устойчивой логистики и могут стать основой для последующих эмпирических исследований [13].

Обсуждение результатов подтверждает их научную состоятельность, практическую значимость и соответствие современным тенденциям развития логистики. Выявленные закономерности и сопоставление с результатами других авторов позволяют рассматривать предложенный подход как перспективное направление дальнейших исследований в области управления складскими процессами в контексте снижения углеродного следа.

Заключение

Проведённое исследование позволило всесторонне рассмотреть современные подходы к управлению складскими процессами в контексте снижения углеродного следа и подтвердить актуальность интеграции экологических критериев в систему

логистического управления. В ходе работы было установлено, что складская деятельность оказывает существенное влияние на формирование совокупных выбросов парниковых газов в цепях поставок, что обусловлено высокой энергоёмкостью складской инфраструктуры и интенсивностью выполняемых операций.

В соответствии с поставленной целью исследования были выявлены ключевые факторы формирования углеродного следа складских процессов, среди которых наибольшее значение имеют процессы хранения и внутреннего перемещения грузов, параметры энергоснабжения складских объектов, уровень автоматизации и степень цифровизации управления. Анализ показал, что традиционные модели управления складом, ориентированные преимущественно на экономические показатели, не обеспечивают достаточного уровня экологической эффективности в условиях усиления требований устойчивого развития.

Полученные результаты подтвердили рабочую гипотезу о возможности одновременного достижения экологических и операционных целей за счёт внедрения низкоуглеродных управленческих решений. Интеграция экологических ориентированных показателей эффективности, использование цифровых систем мониторинга и оптимизация складских процессов позволяют снизить удельные выбросы углекислого газа без ухудшения производительности и качества логистических операций. Это свидетельствует о том, что экологизация складской логистики может рассматриваться не как ограничение, а как фактор повышения устойчивости и управляемости логистических систем.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенного подхода при разработке программ экологической модернизации складской инфраструктуры, формировании корпоративных стратегий устойчивого развития и внедрении систем экологического менеджмента в логистических подразделениях. Представленные выводы и рекомендации могут быть применены руководителями складских комплексов и специалистами в области логистики при выборе приоритетных направлений оптимизации складской деятельности.

В качестве рекомендаций по дальнейшему развитию управления складскими процессами в контексте снижения углеродного следа целесообразно отметить необходимость расширения использования цифровых технологий, интеллектуальных систем управления и автоматизированных инструментов анализа энергопотребления. Особое значение приобретает внедрение комплексных систем мониторинга, позволяющих в реальном времени оценивать экологические показатели и оперативно корректировать управленческие решения.

Перспективы дальнейших исследований в данной области связаны с разработкой количественных моделей оценки углеродного следа складских операций, адаптированных к различным типам складов и отраслевой специфике, а также с проведением эмпирических исследований на базе реальных логистических объектов. В долгосрочной перспективе можно прогнозировать дальнейшее усиление роли экологических факторов в управлении складской логистикой, расширение нормативного регулирования и рост значимости низкоуглеродных решений как неотъемлемого элемента конкурентоспособности логистических систем.

Список литературы

1. McKinnon A. Decarbonizing logistics: Distributing goods in a low carbon world. London: Kogan Page, 2018. 400 p.
2. Piecyk M., McKinnon A. Forecasting the carbon footprint of road freight transport in Europe // *International Journal of Production Economics*. 2010. Vol. 128. No. 1. Pp. 31–42. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.08.027.

3. Rouwenhorst B., Reuter B., Stockrahm V. Warehouse design and control: Framework and literature review // *European Journal of Operational Research*. 2000. Vol. 122. No. 3. Pp. 515–533. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00020-X.
4. McKinnon A., Browne M., Whiteing A., Piecyk M. Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics. London: Kogan Page, 2015. 408 p.
5. Beamon B. Environmental and sustainability ethics in supply chain management // *Science and Engineering Ethics*. 2005. Vol. 11. No. 2. Pp. 221–234. DOI: 10.1007/s11948-005-0043-3.
6. Dekker R., Bloemhof J., Mallidis I. Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges // *European Journal of Operational Research*. 2012. Vol. 219. No. 3. Pp. 671–679. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.11.010.
7. Baker P., McKinnon A. The impact of warehouse layout on energy consumption // *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2019. Vol. 22. No. 6. Pp. 593–607. DOI: 10.1080/13675567.2019.1575504.
8. Accorsi R., Manzini R., Ferrari E. A comparison of warehousing performance metrics in sustainable supply chains // *International Journal of Production Economics*. 2014. Vol. 152. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.12.007.
9. Mangiaracina R., Song G., Perego A. Distribution network design: A literature review and a research agenda // *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2015. Vol. 45. No. 5. Pp. 506–531. DOI: 10.1108/IJPDLM-02-2015-0031.
10. Tan K. H., Zhan Y., Ji G. Warehouse management and energy efficiency: A review // *Energy Policy*. 2020. Vol. 146. 111812. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111812.
11. Ivanov D., Dolgui A. Digital supply chain management and technology-based resilience // *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58. No. 10. Pp. 2975–2991. DOI: 10.1080/00207543.2019.1667532.
12. Gong Y., Jia F., Brown S. Sustainable logistics and supply chain management: A systematic review // *International Journal of Production Economics*. 2018. Vol. 195. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.10.004.
13. Kamble S., Gunasekaran A., Gawankar S. Sustainable Industry 4.0 framework // *International Journal of Production Research*. 2018. Vol. 56. No. 1–2. Pp. 130–155. DOI: 10.1080/00207543.2018.1442752.

References

1. McKinnon A. Decarbonizing logistics: Distributing goods in a low carbon world. London, Kogan Page Publ., 2018, 400 p.
2. Piecyk M., McKinnon A. Forecasting the carbon footprint of road freight transport in Europe. *International Journal of Production Economics*, 2010, vol. 128, no. 1, pp. 31–42. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.08.027.
3. Rouwenhorst B., Reuter B., Stockrahm V. Warehouse design and control: Framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, 2000, vol. 122, no. 3, pp. 515–533. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00020-X.
4. McKinnon A., Browne M., Whiteing A., Piecyk M. Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics. London, Kogan Page Publ., 2015, 408 p.
5. Beamon B. Environmental and sustainability ethics in supply chain management. *Science and Engineering Ethics*, 2005, vol. 11, no. 2, pp. 221–234. DOI: 10.1007/s11948-005-0043-3.
6. Dekker R., Bloemhof J., Mallidis I. Operations research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 2012, vol. 219, no. 3, pp. 671–679. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.11.010.
7. Baker P., McKinnon A. The impact of warehouse layout on energy consumption. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2019, vol. 22, no. 6, pp. 593–607. DOI: 10.1080/13675567.2019.1575504.
8. Accorsi R., Manzini R., Ferrari E. A comparison of warehousing performance metrics in sustainable supply chains. *International Journal of Production Economics*, 2014, vol. 152, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.12.007.
9. Mangiaracina R., Song G., Perego A. Distribution network design: A literature review and a research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2015, vol. 45, no. 5, pp. 506–531. DOI: 10.1108/IJPDLM-02-2015-0031.

10. Tan K.H., Zhan Y., Ji G. Warehouse management and energy efficiency: A review. *Energy Policy*, 2020, vol. 146, article 111812. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111812.
11. Ivanov D., Dolgui A. Digital supply chain management and technology-based resilience. *International Journal of Production Research*, 2020, vol. 58, no. 10, pp. 2975–2991. DOI: 10.1080/00207543.2019.1667532.
12. Gong Y., Jia F., Brown S. Sustainable logistics and supply chain management: A systematic review. *International Journal of Production Economics*, 2018, vol. 195, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.10.004.
13. Kamble S., Gunasekaran A., Gawankar S. Sustainable Industry 4.0 framework. *International Journal of Production Research*, 2018, vol. 56, no. 1–2, pp. 130–155. DOI: 10.1080/00207543.2018.1442752.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Умбетова Анель Алпысхановна,
магистрант, Казахстанско-Немецкий
университет, 050000, Алматы, Казахстан, ул.
Пушкина, дом 111, e-mail:
anel.umbetova@icloud.com

Anel A. Umbetova, undergraduate student of the
Kazakh-German University, Pushkina Street,
111, Almaty, Kazakhstan, 050000 email:
anel.umbetova@icloud.com

Кегенбеков Жандос Кадырханович,
кандидат технических наук, профессор,
Казахско-Немецкий университет, 050000,
Алматы, Казахстан, ул. Пушкина, дом 11, e-
mail: kegenbekov@dku.kz

Zhandos K. Kegenbekov, Candidate of
Technical Sciences, professor, Kazakh-German
University, Pushkina Street, 111, Almaty,
Kazakhstan, 050000

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; принята к публикации 20.04.2026;
опубликована онлайн 20.06.2026. Received 27.01.2026; published online 20.06.2026.