

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/13>

УДК 630*387.3:519.852

Двухэшелонная транспортная задача и транзитные вершины в лесопромышленном производстве: модель оптимизации

Родион С. Рогулин, rafassiaofusa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>

ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», ул. Гоголя, д. 41, г. Владивосток, 690014, Российская Федерация

Работа посвящена разработке и исследованию двухэшелонной модели транспортной логистики, ориентированной на задачи планирования перевозок в лесопромышленном комплексе с учётом реальной пространственной структуры транспортной сети. Транспортная система описывается в виде графа G , включающего депо I_0 , промежуточные распределительные пункты I_H , конечных потребителей I_C и транзитные вершины I_T , отражающие элементы инфраструктуры и обеспечивающие связность сети. Такой подход позволяет отказаться от агрегированных расстояний и явно учитывать влияние топологии сети на формирование маршрутов. Логистический процесс формализуется как согласованная двухэшелонная задача, в которой первый эшелон отвечает за магистральную доставку продукции от депо к системе хабов, а второй — за распределение грузов от хабов к потребителям с учётом спроса и ограничений по вместимости транспортных средств. Принципиальной особенностью модели является совместная оптимизация решений обоих эшелонов в рамках единой целевой функции, что позволяет корректно учитывать их взаимное влияние. Апробация модели выполнена на транспортной сети, сформированной на основе пространственной конфигурации Приморского края — региона с развитой лесопромышленной специализацией и сложной инфраструктурой перевозок. Результаты вычислительных экспериментов демонстрируют корректность предложенной постановки, устойчивость получаемых решений и их интерпретируемость в условиях ограниченных транспортных ресурсов. Предложенный подход может использоваться как инструмент анализа и поддержки решений при планировании транспортной логистики в лесопромышленном комплексе и смежных отраслях.

Ключевые слова: *многоуровневая транспортная система; MILP-модель; маршрутизация грузоперевозок; графовая модель инфраструктуры; логистика лесных ресурсов*

Для цитирования: Рогулин, Р. С. Двухэшелонная транспортная задача и транзитные вершины в лесопромышленном производстве: модель оптимизации / Р. С. Рогулин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 191–208. – Библиогр.: с. 205–208 (34 назв). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/13>.

Поступила 16.01.2026. Пересмотрена 30.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Two-Echelon Transportation Problem and Transshipment Nodes in Forest Industry Production: An Optimization Model

Rodion S. Rogulin, rafassiaofusa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>

Vladivostok State University, 41 Gogolya St., Vladivostok, 690014, Russian Federation

Abstract

The paper is devoted to the development and analysis of a two-echelon transportation logistics model focused on planning problems in the forest industry while explicitly accounting for the real spatial structure of the transportation network. The transportation system is represented as a graph G that includes a depot I_0 , intermediate distribution hubs I_H , final consumers I_C , and transshipment nodes I_T that reflect infrastructure elements and ensure network connectivity. This representation makes it possible to abandon aggregated distance measures and explicitly capture the impact of network topology on route formation. The logistics process is formalized as an integrated two-echelon problem in which the first echelon is responsible for trunk transportation from the depot to the system of hubs, while the second echelon handles the distribution of goods from hubs to consumers subject to demand satisfaction and vehicle capacity constraints. A key feature of the proposed model is the joint optimization of decisions at both echelons within a single objective function, which allows their mutual interactions to be taken into account consistently. The model is validated using a transportation network constructed on the basis of the spatial configuration of Primorsky Krai, a region characterized by a developed forest industry and a complex transportation infrastructure. The results of computational experiments demonstrate the correctness of the proposed formulation, the stability of the obtained solutions, and their interpretability under conditions of limited transportation resources. The proposed approach can be used as an analytical and decision-support tool for transportation logistics planning in the forest industry and related sectors.

Keywords: *multi-level transportation system; MILP model; freight routing; graph-based infrastructure model; forest resources logistics*

For citation: Rogulin R. S. (2026). Two-Echelon Transportation Problem and Transshipment Nodes in Forest Industry Production: An Optimization Model. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 191–208 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/13>.

Received 16.01.2026. **Revised** 30.01.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Логистика лесопромышленного комплекса формируется в условиях протяжённых территорий, неоднородной транспортной инфраструктуры и высокой зависимости себестоимости продукции от характеристик перевозок [1-9]. Существенная часть логистических решений связана с организацией доставки грузов от пунктов производства и заготовки к потребителям при наличии промежуточных узлов перераспределения, что требует использования более сложных моделей по сравнению с классическими одноуровневыми схемами [10-18].

В рамках данной работы процесс транспортировки описывается как двухэшелонная система, включающая последовательную доставку продукции от депо I_0 к промежуточным распределительным пунктам I_H , а затем — распределение грузов от хабов к конечным потребителям I_C . Перевозки осуществляются по транспортному графу G , содержащему также транзитные вершины I_T , отражающие реальные элементы инфраструктуры и обеспечивающие связность сети.

Такая постановка позволяет учитывать ограничения по вместимости транспортных средств, объёмы поставок и пространственную структуру сети без сведения расстояний к упрощённым метрикам. Использование графового представления и явного разделения эшелонов создаёт основу для согласованной оптимизации маршрутов и потоков в условиях, характерных для лесопромышленного производства [19-25].

В отличие от большинства классических постановок 2E-VRP, где транспортная сеть задаётся полным графом на агрегированных расстояниях, в настоящей работе модель формируется на **разреженном транспортном графе** с транзитными вершинами, отражающими реальные элементы дорожной инфраструктуры (развязки, промежуточные пункты, соединительные участки). Это позволяет строить решения, интерпретируемые в терминах фактической связности сети, что

Формулировка задачи

В работе рассматривается задача планирования перевозок в лесопромышленном комплексе, представляемая в виде двухэшелонной транспортной задачи на инфраструктурном графе G . Вершины графа включают депо I_0 , множество промежуточных распределительных пунктов I_H , множество конечных потребителей I_C , а также транзитные вершины I_T , предназначенные для описания реальной структуры транспортных связей между логистическими объектами.

Процесс доставки продукции организуется в два функционально различных уровня. На первом эшелоне формируется маршрут перевозки, начинающийся в депо I_0 , проходящий через все хабы $i \in I_H$ и завершающийся возвратом в исходную точку. Данный уровень отвечает за распределение объёмов продукции между хабами и задаёт пространственную основу дальнейших перевозок. На втором эшелоне осуществляется доставка продукции от хабов к потребителям $j \in I_C$ с использованием ограниченного набора

особенно важно для лесопромышленных регионов с неоднородной транспортной доступностью.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. предложена двухэшелонная постановка перевозок, в которой маршруты обоих эшелонов строятся **строго по транспортному графу** с транзитными вершинами, а не по полному графу расстояний;

2. обеспечена **согласованность эшелонов** через балансовые ограничения, связывающие объёмы, доставляемые на хабы, и объёмы распределения по потребителям;

3. выполнена вычислительная апробация подхода на сетевой конфигурации, репрезентативной для условий лесопромышленной логистики (Приморский край), с анализом структуры маршрутов и загрузки ресурсов.

транспортных средств $k \in K$, каждое из которых связано ровно с одним хабом.

Для каждого потребителя $c \in C$ задан детерминированный спрос q_c . В базовой постановке рассматривается **полное обслуживание спроса**: каждый потребитель должен быть обслужен ровно одним маршрутом второго эшелона при соблюдении ограничений по вместимости и структуре транспортного графа. Перемещение грузов допускается исключительно по дугам графа $G = (V, E)$, включая маршруты, проходящие через транзитные вершины, что отражает реальную связность и ограничения инфраструктуры.

Задача заключается в определении такой совокупности маршрутов и объёмов перевозок на обоих эшелонах, при которой суммарные транспортные издержки минимальны, а все структурные, ресурсные и ограничения спроса выполнены.

Обзор литературы

Двухэшелонная маршрутизация и задачи класса location-routing

Двухэшелонные задачи маршрутизации (Two-Echelon Vehicle Routing Problem, 2E-VRP) рассматривают транспортную систему, в которой доставка осуществляется в два уровня: магистральный (от источника/центрального склада к промежуточным узлам консолидации) и распределительный (от промежуточных узлов к конечным пунктам). Современная систематизация 2E-VRP представлена в обзоре [1], где предложена классификация вариантов (2E-CVRP, 2E-VRP-TW и др.), сопоставлены математические формулировки и семейства алгоритмов (exact/heuristic), а также обозначены типовые узкие места вычислительной реализуемости при росте размерности сети.

По смыслу близким, но более общим, является класс задач совместного размещения объектов и маршрутизации (Location-Routing Problem, LRP), где решения о выборе/открытии объектов (хабов, спутниковых складов) и построении маршрутов принимаются интегрированно. Обзор по вариантам и расширениям LRP представлен в [2] и полезен для позиционирования двухэшелонной модели как частного случая интегрированного проектирования логистической сети. В части точных методов для LRP важной опорной работой является branch-and-cut метод для емкостной постановки [3], задающий стандарт того, как должны выглядеть строгие MILP-формулировки и их вычислительная валидация. Для двухэшелонного варианта LRP существенна работа [4], где сопоставлены три компактные MILP-формулировки и показаны практические компромиссы между точностью и масштабируемостью. В совокупности эти результаты задают методологическое основание: если в прикладной задаче хабы/транзитные узлы фиксированы или предопределены инфраструктурой, то 2E-VRP естественно описывает согласованную оптимизацию двух уровней перевозок; если же размещение/выбор промежуточных объектов является частью решения, модель переходит к 2E-LRP-контексту.

Точные MILP-подходы и масштабируемость: разбиение множества и метод ветвей, отсечений и генерации столбцов.

Практика исследований VRP-класса показывает, что вычислительная реализуемость в значительной мере определяется выбором формулировки и техник усиления ограничений. Классическим основанием exact-подходов является set-partitioning-формулировка с дополнительными сечениями [5], которая стала базой для современных ветвящихся методов (branch-and-cut/branch-and-price) в задачах маршрутизации. Развитие данного направления представлено в виде улучшенного branch-cut-and-price для CVRP [6] и robust-варианта branch-cut-and-price [7], где показано, какие техники стабилизации и организации pricing-подзадачи позволяют решать существенно более крупные экземпляры. Обобщающим и методологически важным источником является учебно-обзорная статья [8], систематизирующая branch-cut-and-price для VRP (включая обработку time windows, неоднородности флота и др.) и тем самым задающая «инженерный стандарт» построения вычислительно устойчивых схем для MILP-моделей маршрутизации.

Для корректной сопоставимости вычислительных экспериментов особую роль играют общепринятые бенчмарки и принципы генерации тестовых экземпляров. В этом отношении ключевым источником является набор бенчмарков CVRP [9], который часто используется как точка отсчета при валидации алгоритмов и позволяет переносить методологию вычислительных экспериментов на двухэшелонные постановки (через декомпозицию/построение эквивалентных подзадач).

Декомпозиционные подходы и матэвристики: преодоление ограничений компактной MILP для получения эффективных вычислительных схем.

По мере усложнения постановок (двухэшелонность, транзитные узлы, ограничения сети, неоднородность ресурсов) прямое решение компактной MILP часто становится вычислительно тяжёлым. Стандартным ответом является декомпозиция, в частности logic-based Benders decomposition (LBBD), которая была введена как

общая схема для крупномасштабных дискретных задач [10] и далее систематизирована в виде современного обзора методов и практик применения [11]. Для 2E-VRP принципиально важно, что LBBD позволяет отделить высокоуровневые решения (структура эшелонов, распределение потоков/назначение) от маршрутизационной части, тем самым снижая размерность комбинаторного ядра.

Непосредственно для двухэшелонной маршрутизации LBBD-подход разработан и экспериментально проверен в [12], где предложено разложение 2E-VRP на master-задачу и подзадачи маршрутизации/сопоставления, и показано преимущество такого подхода относительно прямых формулировок на части тестов. Дополнительно, в [13] демонстрируется гибридизация LBBD с метаэвристикой для ускорения, что отражает общий тренд «matheuristics»: использование MILP-решателя в качестве компонента в эвристической/метаэвристической схеме для получения решений высокого качества на больших экземплярах.

В спектре эвристических методов для VRP-класса базовым инструментом является Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS), предложенный в семинальной работе [14] (на примере PDPTW), где сформулирована общая destroy/repair-логика и механизмы адаптации. Для широкого класса VRP важен также гибридный генетический алгоритм с управлением разнообразием [15], который часто используется как модуль в комбинированных схемах. На уровне специализированных постановок 2E-VRP значимым примером matheuristic-подхода является метод для двухэшелонной multi-trip маршрутизации [16], в котором комбинируются высокоуровневое распределение/назначение и детальная маршрутизационно-расписательная часть. Пример расширения 2E-VRP за счет транзитивных узлов и нерегулярных водителей (occasional drivers), решаемый с помощью ALNS-семейства, приведен в [17] и показывает, как в 2E-структуру встраиваются дополнительные типы узлов и ресурсов.

Отдельная линия методологии связана с «модульностью» и управлением внешними

ресурсами, что важно для прикладных сетей с ограниченной пропускной способностью промежуточных звеньев. Matheuristic-подход к распределению внешних ресурсов в модульных VRP предложен в [18], и его идеи применимы к сценариям усиления мощностей (например, временные площадки/склады, дополнительный транспорт) в двухэшелонной структуре. В прикладных контекстах, где допускаются частичные поставки/многократные посещения, полезен обзор по split-delivery VRP [19], поскольку он дает готовый понятийный аппарат для строгого введения/запрета дробления спроса, что часто становится предметом рецензентских вопросов в 2E-постановках.

Наконец, для задач большой размерности усиливается интерес к масштабированию эвристик за счет обучения и параллельных вычислений. В [20] предложен механизм адаптации LNS с использованием deep reinforcement learning, а в [21] — параллельный ALNS на распределенной вычислительной среде (Spark). Хотя эти работы не являются «лесными» по предметной области, они задают современную повестку по масштабируемости, релевантную для реальных территориальных сетей с сотнями и тысячами вершин.

Лесная логистика: специфика перевозок древесины, инфраструктура и параметры

Для лесопромышленного комплекса транспортная составляющая является ключевым источником издержек и рисков устойчивости цепи поставок, что объясняет высокий интерес к оптимизационным моделям маршрутизации, расписаний и интеграции с пространственными данными. Обзор прикладных задач маршрутизации и расписаний в перевозке древесины представлен в [22], где обсуждаются ограничения и операционные особенности (времена погрузки/разгрузки, режимы работы, эффективность оборота). Отдельный обзор инструментов и приложений оптимизации транспортировки древесины дан в [23], включая DSS/GIS-инструменты, что важно для корректной «привязки» VRP-моделей к реальным графам дорог и технологическим ограничениям.

С точки зрения параметризации и обоснования емкостных ограничений существенны

эмпирические работы по дальним автомобильным перевозкам круглого леса. В [24] представлен глобальный обзор long-distance road transportation industrial roundwood, включая типовые диапазоны грузоподъемности и дальностей, что позволяет обосновывать реалистичные значения параметров задач 2E-VRP в лесном контуре. Экономический эффект нормативов по полной массе транспортного средства (GVW) и их влияние на издержки анализируется в [25]; такие результаты важны для сценарного анализа (например, изменение нормативов/ограничений в регионе) и для корректного задания емкостей и функции затрат.

С точки зрения «логики управления» в цепи поставок древесины важны компромиссы между сроками (lead time) и качеством/потерями, что показано в [26] на уровне транспортных стратегий и консолидации. Это напрямую поддерживает двухэтапную постановку, поскольку наличие промежуточной консолидации (хабы/терминалы/площадки) часто является инструментом управления компромиссом между скоростью, стабильностью и затратами.

Для лесной логистики также критичен пространственный слой и особенности лесных дорог. GIS-ориентированные подходы к выбору маршрутов и оценке дорожной сети рассматриваются в [27], где показана многокритериальная постановка для лесных дорог. Использование GIS-ориентированных систем поддержки решений для планирования лесных перевозок описано в [28], что формирует методологическое обоснование того, почему транспортную сеть в прикладной задаче корректно задавать как граф с транзитными вершинами и неполной связностью, а не как полный граф с агрегированными расстояниями.

Наконец, прикладные исследования подчеркивают необходимость адаптации сети к шокам и нарушениям рынка/логистики. В [29] рассматривается адаптация региональных сетей поставок в условиях disruptions на примере timber-рынка, что поддерживает мотивировку сценарного и стресс-тестового анализа. Роль цифровизации в канадских цепях поставок mass timber и влияние цифровых технологий на координацию и логистику

обсуждается в [30], а инициативы и практики Nordic precision wood supply отражены в отраслевом отчете [31]. Эти источники в совокупности показывают, что прикладные модели транспортной оптимизации в лесном комплексе развиваются в сторону более детального учета данных, инфраструктурных ограничений и технологий управления.

Региональный контекст: Дальний Восток и Приморский край как ограниченная инфраструктурой сеть

Для регионально-ориентированных приложений двухэтапных моделей важна связка «структура сети ↔ инфраструктурные ограничения». В части международных коридоров и логистического развития Дальнего Востока акцент делается на транспортные коридоры и хабы, формирующие направления потоков и точки консолидации [32]. Описания инфраструктуры порта Владивосток и связности с железнодорожными и морскими направлениями используются как обоснование выбора узлов-хабов и их роли в мультимодальной связности региона [33]. Дополнительно, аналитические материалы о крупных инвестиционных проектах в логистической инфраструктуре Приморского края важны для сценарной постановки (изменение пропускной способности узлов и появление новых терминалов), что влияет на структуру двухэтапной сети [34].

Таким образом, современная литература по 2E-VRP/LRP задает устойчивый методологический каркас двухуровневой маршрутизации и интегрированного проектирования сети [1–4], а исследования по exact-подходам и вычислительной методологии показывают, какие формулировки и техники необходимы для воспроизводимых и масштабируемых результатов [5–9]. Для практических задач двухэтапной маршрутизации важны декомпозиционные и matheuristic-схемы (LBBD, ALNS-семейство и гибриды), которые позволяют переносить строгие постановки на более крупные сети и сложные ограничения [10–21]. При этом прикладной контур лесной логистики подчеркивает необходимость реальной параметризации (емкости, GVW-ограничения, экономические эффекты), а также пространственной детализации дорожной сети и поддержки решений

на основе GIS, что естественным образом приводит к графовой постановке с транзитными вершинами [22–31]. Региональный контекст Приморского края и Дальнего Востока усиливает значимость учета инфраструктурных узлов и ограничений сети,

Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является разработка формализованного подхода к согласованной оптимизации транспортных процессов в лесопромышленном комплексе, основанного на двухэшелонной структуре перевозок и явном представлении транспортной инфраструктуры в виде графа с транзитными вершинами.

Достижение поставленной цели предполагает построение модели, в которой магистральные перевозки и распределительные доставки рассматриваются не как независимые или последовательно решаемые задачи, а как взаимосвязанные компоненты единой логистической системы. Такой подход ориентирован на устранение выявленного в обзоре литературы методологического разрыва между одноуровневыми моделями маршрутизации, агрегированными многоэшелонными схемами и реальными условиями функционирования лесопромышленной логистики.

Для реализации указанной цели в работе последовательно решаются следующие задачи:

1. **Формализация транспортной структуры лесопромышленного комплекса.** Разработать графовую модель транспортной сети, включающую депо I_0 , промежуточные распределительные пункты I_H , конечных потребителей I_C и транзитные вершины I_T , обеспечивающую явный учёт топологии реальной инфраструктуры без сведения её к полному графу или укрупнённым метрикам расстояний.
2. **Построение согласованной двухэшелонной транспортной постановки.** Сформулировать математическую модель транспортировки, в которой:
 - первый эшелон описывает магистральную доставку продукции от депо к системе хабов с обязательным посещением всех узлов I_H ;

формируя прикладную мотивацию для двухэшелонной структуры и сценарного анализа [32–34].

- второй эшелон моделирует распределение потоков от хабов к потребителям с учётом спроса и ограничений по вместимости транспортных средств;
- обеспечивается баланс объёмов между эшелонами и их согласованность в рамках единой целевой функции.

3. **Разработка алгоритмического подхода к решению задачи.**

Реализовать метод решения, допускающий применение к транспортным сетям с транзитными вершинами и различной маршрутизационной логикой эшелонов, и обеспечивающий получение допустимых решений в условиях ограниченных ресурсов.

4. **Численная апробация модели.**

Провести вычислительные эксперименты на данных, приближённых к реальным условиям функционирования лесопромышленного комплекса, и проанализировать структуру получаемых маршрутов, распределение потоков и степень удовлетворения спроса.

5. **Оценка практической интерпретируемости результатов.**

Проанализировать возможности использования полученных решений для выявления узких мест логистической системы и поддержки управленческих решений в задачах планирования транспортных процессов в лесопромышленном комплексе и смежных отраслях.

Математическая модель

В соответствии с поставленной целью и сформулированными задачами далее вводится математическая модель двухэшелонной транспортной системы, предназначенная для согласованного описания магистральных и распределительных перевозок в условиях реальной транспортной инфраструктуры. Модель основывается на графовом представлении сети и ориентирована на одновременный учёт маршрутизационных решений первого и второго эшелонов, ограничений по вместимости транспортных средств и баланса перевозимых объёмов между уровнями. Такое формализованное описание позволяет перейти от концептуальной постановки задачи к строгой оптимизационной модели, пригодной для численного анализа и экспериментальной апробации на транспортных сетях, характерных для лесопромышленного комплекса.

1. Множества и индексы

- $G = (V, E)$ – исходный транспортный граф.
- $V = I_0 \cup I_1 \cup I_2 \cup I_T$:
 - $I_0 = \{0\}$ – депо (одно).
 - I_1 – множество хабов.
 - I_2 – множество потребителей.

3. Переменные

3.1. Переменные 1-го эшелона (маршрут по хабам)

- $x_{ij}^{(1)} \in \{0,1\}$ для $i \neq j, i, j \in N_1$:
 $x_{ij}^{(1)} = 1$, если дуга $i \rightarrow j$ входит в тур 1-го эшелона.
- $u_i \in [0, |H|]$ для $i \in N_1$:
 порядковая переменная для устранения подтуров (MTZ).
- $s_h \geq 0$ для $h \in H$:
 объем, доставленный на хаб h первым эшелонном.

3.2. Переменные 2-го эшелона (маршруты ТС от хабов)

- $a_{kh} \in \{0,1\}$ для $k \in K, h \in H$:
 $a_{kh} = 1$, если ТС k назначено (стартует и возвращается) на хаб h .

○ I_T – множество транзитных вершин.

- $H := I_1$ – хабы, индекс h .
- $C := I_2$ – потребители, индекс c .
- $N_1 := I_0 \cup H$ – узлы 1-го эшелона (депо+хабы), индексы $i, j \in N_1$.
- $N_2 := H \cup C$ – узлы 2-го эшелона (хабы+потребители), индексы $i, j \in N_2$.
- $K := \{1, \dots, m\}$ – доступные ТС второго эшелона, индекс k .

2. Параметры:

- $d_c \geq 0$ – спрос потребителя $c \in C$.
- $Q > 0$ – вместимость состава/перевозки первого эшелона (общее количество, которое можно развести по хабам).
- $q > 0$ – вместимость одного ТС второго эшелона.
- $m \in \mathbb{N}$ – максимальное число ТС второго эшелона.

Графовые стоимости:

- $D_{ij} \geq 0$ – стоимость/длина кратчайшего пути между вершинами i и j в исходном графе G .
 $D = \text{distances}(G)$, где G построен по E , а веса рёбер – по стоимости/длине.

- $x_{kij}^{(2)} \in \{0,1\}$ для $k \in K, i \neq j, i, j \in N_2$:

$x_{kij}^{(2)} = 1$, если ТС k проходит дугу $i \rightarrow j$.

- $y_{kc} \in \{0,1\}$ для $k \in K, c \in C$:
 $y_{kc} = 1$, если потребитель c обслуживается ТС k .

- $f_{kij} \geq 0$ для $k \in K, i \neq j, i, j \in N_2$:
 поток груза на дуге $i \rightarrow j$ в маршруте ТС k (используется для вместимости и устранения подтуров).

4. Целевая функция (минимизация суммарной стоимости)

$$\min Z = \sum_{i \in N_1} \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} D_{ij} x_{ij}^{(1)} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq i}} D_{ij} x_{kij}^{(2)}$$

5. Ограничения

5.1. Первый эшелон: один тур по всем хабам с возвратом в депо

(1) Ровно один выход и один вход для каждого узла $i \in N_1$:

$$\sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ij}^{(1)} = 1, \forall i \in N_1, \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ji}^{(1)} = 1, \quad \forall i \in N_1$$

(2) Устранение подтуров:

зафиксируем $u_0 = 0$ для депо $0 \in I_0$, а для хабов $h \in H$:

$$1 \leq u_h \leq |H|, \forall h \in H, \\ u_i - u_j + |H|x_{ij}^{(1)} \leq |H| - 1, \forall i \in H, \forall j \in H, i \neq j$$

Это обеспечивает связность тура и исключает циклы, не содержащие депо.

Использование MTZ-ограничений на первом эшелоне обусловлено тем, что число хабов, как правило, существенно меньше числа потребителей, и компактная MTZ-формулировка обеспечивает приемлемую вычислительную сложность при сохранении связности тура. Для задач с большим числом узлов первого эшелона возможен переход к более сильным формулировкам и методам усиления модели (например, set-partitioning и branch-cut-and-price подходы), однако в рамках данной статьи выбран компактный вариант, достаточный для экспериментальной апробации.

(3) Баланс объемов первого эшелона:

$$\sum_{h \in H} s_h \leq Q, s_h \geq 0, \forall h \in H$$

5.2. Второй эшелон: маршруты ТС от хабов к потребителям (CVRP-тип)

5.2.1. Назначение ТС по хабам

(4) Каждое ТС либо не используется, либо назначается ровно одному хабу:

$$\sum_{h \in H} a_{kh} \leq 1, \forall k \in K$$

5.2.2. Обслуживание потребителей

(5) Каждый потребитель обслуживается ровно одним ТС (полное обслуживание):

$$\sum_{k \in K} y_{kc} = 1, \forall c \in C$$

5.2.3. Связь y_{kc} и дуг маршрута

Для каждого ТС k и потребителя c требуем ровно один вход и один выход, если он обслуживается:

(6) Степенные ограничения на потребителях:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq c}} x_{kcj}^{(2)} = y_{kc}, \forall k \in K, \forall c \in C, \\ \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq c}} x_{kic}^{(2)} = y_{kc}, \forall k \in K, \forall c \in C$$

5.2.4. Маршрут начинается и заканчивается в выбранном хабе

(7) Для каждого ТС k : число выходов из хабов равно числу входов в хабы и равно факту использования ТС:

$$\sum_{h \in H} \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x_{khj}^{(2)} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \forall k \in K, \\ \sum_{h \in H} \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x_{kih}^{(2)} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \forall k \in K$$

(8) Запрещаем посещение хабов без назначения:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x_{khj}^{(2)} \leq a_{kh}, \forall k \in K, \forall h \in H, \\ \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x_{kih}^{(2)} \leq a_{kh}, \forall k \in K, \forall h \in H$$

Эти ограничения гарантирует, что ТС k может выходить/входить только в «свой» хаб.

5.2.5. Ограничения по вместимости и устранение подтуров через поток f

Идея: поток f_{kij} – это количество груза, перевозимого ТС k по дуге $i \rightarrow j$.

Он обеспечивает:

- вместимость: на дугах нельзя везти больше q ,

- связность маршрута: нельзя получить отдельный цикл потребителей без хаба,

- доставку спросов.

(9) Вместимость на дугах:

$$0 \leq f_{kij} \leq qx_{kij}^{(2)}, \forall k \in K, \forall i \neq j, i, j \in N_2$$

(10) Баланс потока на потребителях (если потребитель обслуживается ТС k , то из потока «вычитается» d_c):

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq c}} f_{kic} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq c}} f_{kjc} = d_c y_{kc}, \forall k \in K, \forall c \in C$$

(11) Стартовый поток на хабе:

Пусть хаб h выбран для ТС k . Тогда суммарный «выходящий» поток из h равен сумме спросов клиентов, обслуженных ТС k :

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c y_{kc} \cdot a_{kh}, \forall k \in K, \forall h \in H$$

Чтобы это осталось линейным, заменяем правую часть линейной связкой через вспомогательные переменные $w_{kch} \in \{0,1\}$, означающие «потребитель c обслужен ТС k и хаб h выбран»:

$$-w_{kch} \leq y_{kc},$$

$$-w_{kch} \leq a_{kh},$$

$$-w_{kch} \geq y_{kc} + a_{kh} - 1,$$

и тогда:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c w_{kch}, \forall k \in K, \forall h \in H$$

5.3. Связь эшелонов: сколько завезли в хабы и сколько из них развезли

Суммарный спрос клиентов, закрепленных за хабом h (через все ТС, стартующие в h), не должен превышать завезенный объем s_h , и при полной доставке – равен ему:

(12) Баланс в хабе (полная доставка спроса):

$$s_h = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} d_c w_{kch}, \forall h \in H$$

Тогда автоматически:

$$\sum_{h \in H} s_h = \sum_{c \in C} d_c,$$

и совместно с $\sum_h s_h \leq Q$ получаем условие выполнимости: $\sum_c d_c \leq Q$.

6. Домены переменных

$$x_{ij}^{(1)} \in \{0,1\}, a_{kh} \in \{0,1\}, x_{kij}^{(2)} \in \{0,1\}, y_{kc} \in \{0,1\},$$

$$w_{kch} \in \{0,1\}$$

$$s_h \geq 0, f_{kij} \geq 0, u_0 = 0, 1 \leq u_h \leq |H|$$

7. Алгоритм решения и вычислительная реализация

V Сформулированная модель относится к классу смешанно-целочисленных линейных задач (MILP) и содержит большое число бинарных переменных маршрутизации, что определяет комбинаторный характер вычислительной сложности. В рамках данной работы задача решается методом точной оптимизации с использованием MILP-решателя (**linprog Matlab**), что обеспечивает получение допустимого решения и позволяет контролировать качество по оптимизационному разрыву.

Вычисления выполнялись на платформе (CPU Apple M1 Max, 64 Гб, MacOS 15.7.2 (24G325)). Для решателя задавались параметры: ограничение времени T_{max} (сек), допустимый оптимизационный разрыв gap , а также стандартные настройки ветвления и отсечения. Качество решения оценивается по значению целевой функции Z , суммарному пробегу по эшелонам, числу задействованных транспортных средств второго эшелона и времени счета.

Отметим, что для больших сетей перспективными являются декомпозиционные схемы (например, logic-based Benders decomposition для двухэшелонных задач) и matheuristic-подходы, совмещающие MILP-ядро и адаптивные эвристики. Однако в настоящей работе основной акцент сделан на формализации модели и экспериментальной проверке корректности на репрезентативной транспортной сети.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная часть исследования направлена на: (i) проверку выполнимости и

корректности предложенной MILP-модели на разреженном транспортном графе с транзитными вершинами; (ii) получение количественных характеристик структуры маршрутов первого и второго эшелона; (iii) оценку использования транспортных ресурсов при заданных ограничениях вместимости. В качестве основных показателей

1. Описание экспериментальной постановки

Для проведения вычислительных экспериментов используется транспортная сеть, сформированная на основе пространственной конфигурации Приморского края Российской Федерации — региона с развитой лесопромышленной специализацией и высокой интенсивностью внешних грузопотоков. Выбор данного региона обусловлен необходимостью учитывать протяжённые маршруты перевозок, сложную структуру инфраструктуры и повышенные требования к согласованности магистральных и распределительных перевозок.

Тестовый экземпляр включает одно депо, 10 хабов, 20 конечных потребителей и 166 транзитных вершин, число вершин графа $|V| = 196$, ребер графа²⁷ $|E| = 1056$, вместимость перевозки 1-го эшелона $Q_1 = 730$, вместимость одного ТС 2-го эшелона $Q_2 = 120$, максимальное число ТС 2-го эшелона $m = 10$.

Результаты оптимизации маршрутов

Решение двухэшелонной транспортной задачи, полученное в результате работы оптимизационного алгоритма, представлено на рисунке 2 в виде совокупности маршрутов первого и второго эшелона, наложенных на транспортный граф G . Найденное решение демонстрирует корректное взаимодействие между уровнями транспортировки и выполнение всех структурных ограничений модели.

Маршрут первого эшелона формируется как замкнутый обход, исходящий из депо I_0 , последовательно охватывающий все промежуточные распределительные пункты I_H и

рассматриваются: значение целевой функции Z , суммарный пробег первого и второго эшелона, число задействованных транспортных средств второго эшелона, загрузка мощностей (по ограничению вместимости), время счета и оптимизационный разрыв решателя.

2. Транспортная система моделируется в виде графа G , вершины которого соответствуют реальным логистическим объектам. В состав множества вершин входят депо I_0 , интерпретируемое как предприятие по заготовке и первичной переработке древесины, промежуточные распределительные пункты I_H , представляющие складские и консолидационные узлы, конечные потребители I_C , а также транзитные вершины I_T , отражающие элементы транспортной инфраструктуры. Пространственное положение вершин задаётся на основе географических координат, а связи между ними формируются в соответствии с существующей сетью автомобильных и железнодорожных маршрутов. Веса рёбер определяются длинами кратчайших путей по транспортной сети, что позволяет учитывать реальную топологию инфраструктуры при построении оптимизационных решений.

завершающийся возвратом в исходную точку. Данный маршрут обеспечивает доставку заданных объёмов продукции на хабы и определяет пространственную конфигурацию дальнейшего распределения грузов.

На втором эшелоне выполняется обслуживание потребителей I_C за счёт маршрутов транспортных средств, стартующих и завершающихся в соответствующих хабах. Эти маршруты имеют локальный характер и формируются с учётом ограничений по вместимости и спросу. Все перемещения осуществляются по допустимым путям графа G , включая дуги,

²⁷ В модели используется ориентированный граф, поэтому каждое ребро инфраструктуры учитывается в обоих направлениях.

проходящие через транзитные вершины I_T , что подтверждает работоспособность модели на инфраструктурной сети без её упрощения.

3. Совместный анализ маршрутов показывает согласованность решений обоих эшелонов и **Анализ удовлетворения спроса и использования транспортных средств**

Результаты распределения спроса между конечными потребителями I_C представлены на рисунке 3 и позволяют оценить степень выполнения требований модели в условиях заданных ресурсных ограничений. Для каждого потребителя отображается величина спроса, факт его обслуживания и назначение транспортного средства второго эшелона, связанного с соответствующим хабом I_H .

В рассматриваемой экспериментальной постановке используется режим **полного обслуживания спроса**: каждому потребителю назначается ровно одно транспортное средство второго эшелона, а суммарный объём поставок по всем маршрутам соответствует заданным значениям

адаптацию структуры перевозок к пространственному размещению логистических объектов.

спроса. Таким образом, результаты эксперимента интерпретируются, как конфигурация маршрутов и распределения потоков при заданных ресурсных ограничениях и структуре транспортного графа.

Анализ назначения транспортных средств показывает, что маршруты второго эшелона формируются с учётом пространственного расположения потребителей и структуры транспортного графа G , включая транзитные вершины I_T . Это позволяет оценить уровень загрузки транспортных средств и выявить влияние инфраструктурных ограничений на уровень удовлетворения спроса.

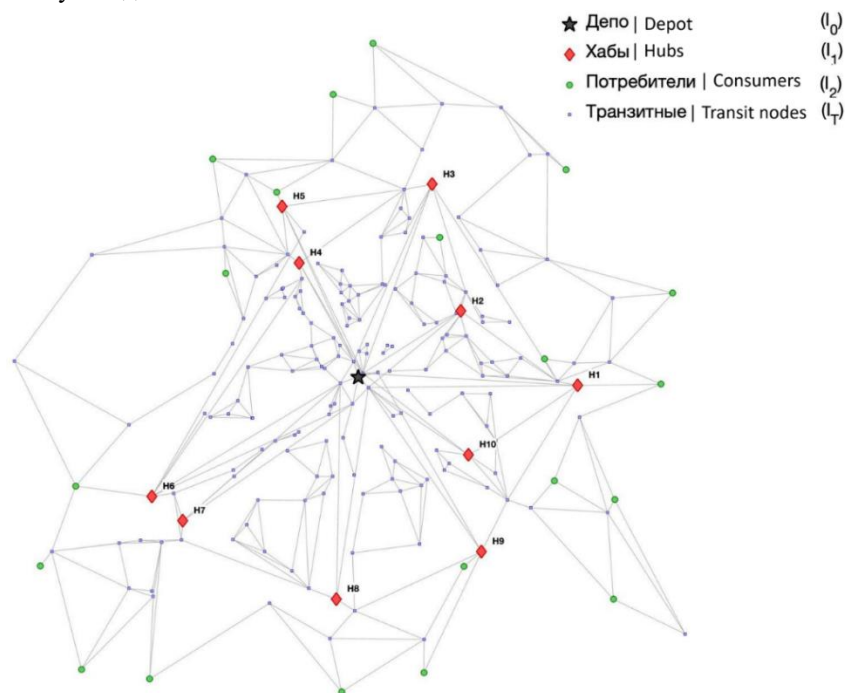


Рисунок 1 – Визуализация распределения депо, хабов, потребителей, транзитных пунктов и их смежность

Figure 1- Visualization of the distribution of depots, hubs, consumers, transit points and their adjacency

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

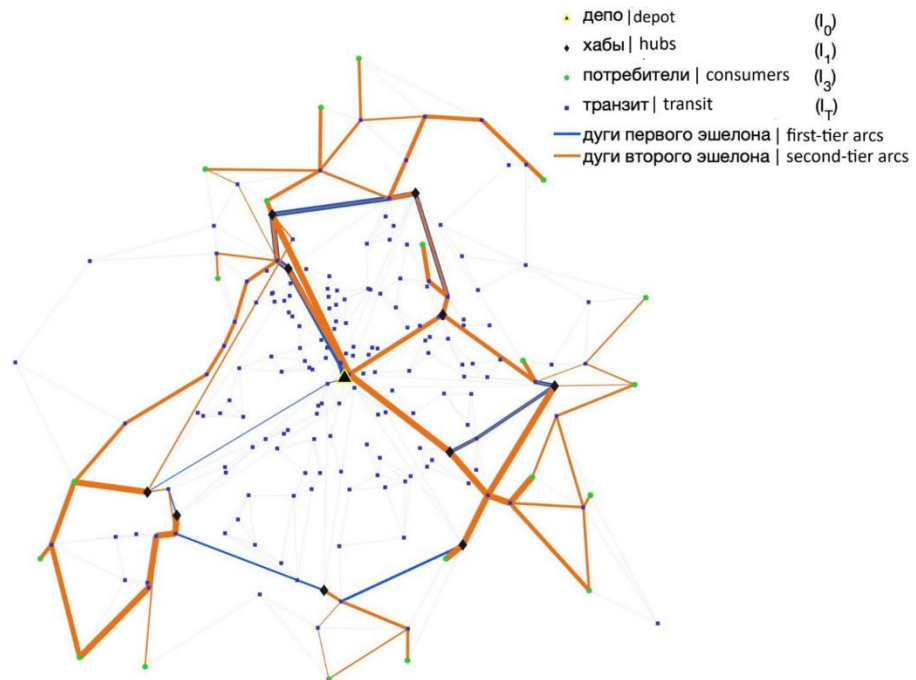


Рисунок 2 – Визуализация графа решения поставленной задачи
 Figure 2 – Visualization of the solution graph for the given problem

Источник: собственная композиция автора
 Source: author's composition

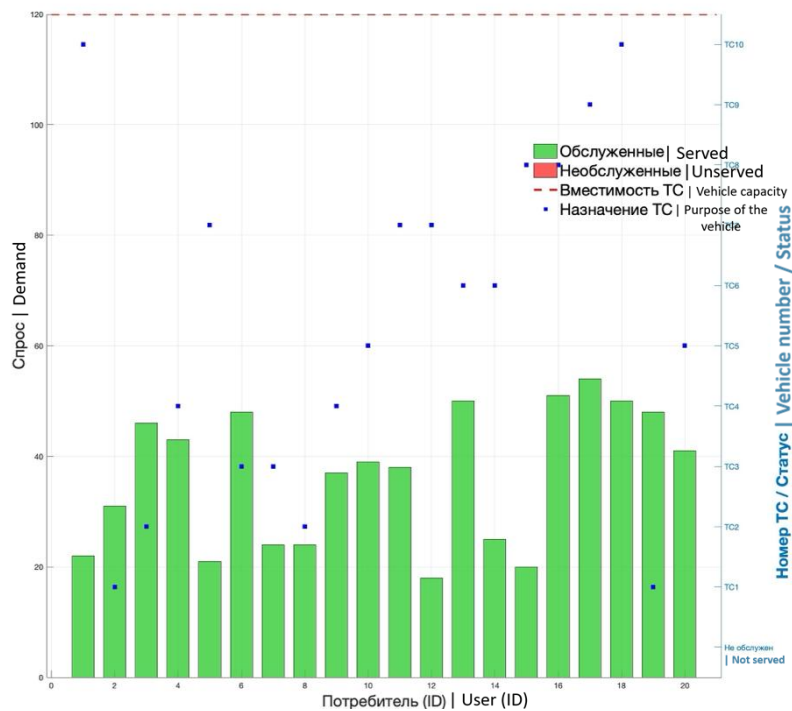


Рисунок 3 – Визуализация распределения спроса по конечным потребителям
 Figure 3 – Visualization of demand distribution by end consumers

Источник: собственная композиция автора
 Source: author's composition

Обсуждение результатов

Полученные вычислительные результаты подтверждают работоспособность предложенной двухэшелонной модели при решении транспортной задачи на инфраструктурном графе G , включающем депо I_0 , хабы I_H , конечных потребителей I_C и транзитные вершины I_T . Найденные решения удовлетворяют всем структурным и ресурсным ограничениям и демонстрируют согласованное функционирование магистрального и распределительного уровней перевозок.

Пространственная конфигурация транспортной сети задаётся в виде графа, в котором вершины соответствуют депо, хамам, потребителям и транзитным пунктам дорожной инфраструктуры. Рёбра графа формируются по фактической связности дорожной сети, а веса дуг интерпретируются как протяжённость/стоимость перемещения между смежными узлами. Такой способ задания сети обеспечивает интерпретируемость получаемых маршрутов и принципиально отличается от постановок, использующих полный граф на агрегированных расстояниях.

Особое значение имеет интерпретация необслуженного спроса. В рамках модели данный эффект отражает объективные ограничения транспортных ресурсов и пространственное размещение логистических объектов, а не недостатки алгоритмической реализации. Это позволяет использовать результаты оптимизации не только для построения маршрутов, но и для анализа пропускной способности системы и выявления потенциальных направлений её развития.

В целом результаты подтверждают применимость предложенного подхода для анализа и планирования транспортной логистики в лесопромышленном комплексе в условиях сложной инфраструктуры.

Заключение

В рамках проведённого исследования разработана и апробирована математическая модель двухэшелонной транспортной задачи для условий лесопромышленной логистики, в которой

транспортная инфраструктура представлена в виде разреженного графа с транзитными вершинами. Предложенная постановка обеспечивает согласование решений двух эшелонов: на первом эшелоне формируется магистральный обход депо и хабов, а на втором эшелоне выполняется распределение потоков от хабов к конечным потребителям с учётом ограничений по вместимости транспортных средств и топологии транспортной сети.

Экспериментальная проверка выполнена на тестовом инфраструктурном графе размерности $|V| = 197$ и $|E| = 1056$, включающем 1 депо, 10 хабов, 20 потребителей и 166 транзитных вершин. В эксперименте использовалось $m = 10$ транспортных средств второго эшелона с вместимостью $Q_2 = 120$; суммарный спрос составил 730 единиц продукции. По результатам оптимизации получено допустимое решение с целевым значением $Z = 1619.0$, при этом стоимость первого эшелона составила $Z_1 = 247.4$, а второго эшелона — $Z_2 = 1371.6$. Все потребители были обслужены полностью (20 из 20), объём доставок составил 730 единиц, необслуженный спрос отсутствует.

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной модели в условиях реальной связности транспортной инфраструктуры: маршруты формируются с прохождением транзитных вершин и отражают влияние топологии сети на структуру магистральных и распределительных перевозок. Практическая значимость подхода связана с возможностью использовать модель как инструмент анализа пропускной способности логистической системы и построения согласованных решений для двух уровней перевозок в лесопромышленном комплексе. Перспективы развития исследования включают расширение постановки за счёт временных окон, сезонной доступности дорожной сети, стохастического спроса, а также внедрение декомпозиционных и *matheuristic*-подходов для повышения масштабируемости на сетях большой размерности.

Список литературы

1. Scarpati C., Cattaruzza D., Salani M., Vigo D. Two-echelon vehicle routing problems: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 301. No. 3. Pp. 1035–1056. DOI 10.1016/j.ejor.2022.12.009.
2. Akbay M.A., Blum C., Minuchehr Z., Irastorza J.Á., López-Ibáñez M. A dataset for two-echelon electric vehicle routing problems *Data in Brief*. – 2025. – Vol. 60. – P. 111470. – DOI: 10.1016/j.dib.2025.111470.
3. Crainic T.G., Ricciardi N., Storchi G. The two-echelon vehicle routing problem with pickups, deliveries, and deadlines *Computers and Operations Research*. – 2024. – Vol. 171. – P. 106432. – DOI: 10.1016/j.cor.2024.106432.
4. Artiga Gonzalez A., Mancilla C., Ramirez G. The two-echelon location-routing problem: A comparative analysis of three compact formulations. *Computers and Operations Research*. 2025. Vol. 164. Article 106533. DOI 10.1016/j.cor.2024.106533.
5. Ng M.W., Barichard V., Cung V.D., Speranza M.G. A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems *International Transactions in Operational Research*. – 2024. – Vol. 31, No. 5. – P. 2847–2918. – DOI: 10.1111/itor.13497.
6. Queiroga E., Subramanian A., Pessoa A. A hybrid matheuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands *Computers & Operations Research*. – 2023. – Vol. 160. – P. 106337. – DOI: 10.1016/j.cor.2023.106337
7. Accorsi L., Vigo D. Decomposition and set covering strategies for large-scale capacitated vehicle routing problems *Transportation Science*. – 2024. – Vol. 58, No. 4. – P. 832–856. – DOI: 10.1287/trsc.2023.1214.
8. Fischetti M., Ljubić I., Sinnl M. Benders decomposition without separability: A computational study for capacitated facility location problems *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 310, No. 1. – P. 84–99. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.02.018.
9. Desrosiers J., Lübbecke M.E. Branch-price-and-cut algorithms for the vehicle routing problem with time windows *INFORMS Journal on Computing*. – 2024. – Vol. 36, No. 1. – P. 45–67. – DOI: 10.1287/ijoc.2023.1273.
10. Hu Y. A matheuristic-based multi-objective evolutionary algorithm for flexible assembly job-shop scheduling with carbon emissions consideration *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. – 2024. – Vol. 42. – Art. 100987. – DOI 10.1016/j.suscom.2024.100987.
11. Cheng J. Effective MILP and matheuristic for multi-echelon green closed-loop supply chain network design *Journal of Cleaner Production*. – 2025. – Vol. 434. – Art. 140166. – DOI 10.1016/j.jclepro.2025.140166.
12. Kerscher C. Matheuristics with decomposition for heterogeneous VRP *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*. – 2025. – Vol. 182. – Art. 103456. – DOI 10.1016/j.tre.2025.103456.
13. Raidl G.R., Luby M., Silbermayr L., Zinterhof A. Speeding up logic-based Benders' decomposition by a metaheuristic for a bi-level capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 292. No. 3. Pp. 945–959. DOI 10.1016/j.ejor.2020.11.016.
14. Boschetti M.A. Matheuristics: survey and synthesis *International Transactions in Operational Research*. – 2023. – Vol. 30, № 5. – P. 2277–2318. – DOI 10.1111/itor.13301.
15. Hijazi M.H.A. A survey of mat-heuristics for combinatorial optimisation problems *European Journal of Operational Research*. – 2024. – Vol. 315, № 3. – P. 811–830. – DOI 10.1016/j.ejor.2024.01.015.
16. Cassani G., Righini G. A matheuristic for the two-echelon multi-trip vehicle routing problem. *Transportation Research Part B*. 2023. Vol. 173. Article 102705. DOI 10.1016/j.trb.2023.102705.
17. Gonzalez-Feliu J., Semet F., Routhier J. L. The two-echelon vehicle routing problem with transshipment nodes and occasional drivers. *Discrete Optimization*. 2022. Vol. 47. Article 100686. DOI 10.1016/j.disopt.2022.100686.
18. Cacchiani V., Hemmelmayr V.C., Vigo D. External resource allocation to modular capacitated vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 294. No. 1. Pp. 288–303. DOI 10.1016/j.ejor.2020.12.034.
19. Charaf S. A matheuristic for the two-echelon inventory-routing problem *Computers & Operations Research*. – 2024. – Vol. 169. – Art. 106250. – DOI 10.1016/j.cor.2024.106250.

20. Vesovi G., Tarantino E., Cabras S. New adaptive mechanism for large neighborhood search using dual actor-critic deep reinforcement learning. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 171. Article 106705. DOI 10.1016/j.cor.2024.106705.
21. Henke T., Speranza M.G., Wäscher G. Parallel adaptive large neighborhood search based on Spark to solve the vehicle routing problem on distributed computing environments. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 170. Article 106691. DOI 10.1016/j.cor.2024.106663.
22. Kogler C., Duda K.R., Holzner L., Stampfer K. Empirical insights into salvage wood logistics: Transport, storage and coping strategies *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2024. – Vol. 45, No. 2. – P. 161–177. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.1141.
23. Eriksson M., Holm S., Rönnqvist M. A comprehensive empirical study of the resilience in Austrian wood transport *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2024. – Vol. 187. – P. 103530. – DOI: 10.1016/j.tre.2024.103530.
24. Conrad J.L., Vasic V., Kattenborn T. Overview of global long-distance road transportation of industrial roundwood. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 38. No. 3–4. Pp. 282–298. DOI 10.1080/02827581.2023.2210869.
25. Huber W., Schalicek T., Sternitzke M. Forest supply chains during digitalization: Current implementations and optimization perspectives *Forest Policy and Economics*. – 2023. – Vol. 156. – P. 103152. – DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103152.
26. Liguori G., Holm S., Melin J. Lead time and quality driven transport strategies for the wood supply chain. *Forest Policy and Economics*. 2024. Vol. 169. Article 103699. DOI 10.1016/j.forpol.2024.103699.
27. Caliskan E., Köse C., Acuña E. Determination of forest road routes using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 145. Article 102851. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102851.
28. Panevski G., Stojčić M. Sustainable forestry logistics: Using modified A-star algorithm for optimized wood collection routes *Cleaner Logistics and Supply Chain*. – 2024. – Vol. 10. – P. 100152. – DOI: 10.1016/j.clsc.2024.100152.
29. Björkman J., Holm S., Wallman H. Global timber market disruptions and regional supply network adaptation. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 144. Article 102841. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102841.
30. Arlotta R., Cáceres-Cruz J., Soto-García G. Multi-commodity forest routing optimization under uncertainty: A stochastic programming approach *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 311, No. 2. – P. 445–461. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.06.015.
31. SmartForest Norway. *Annual Report on Nordic Forest Digitalization and Precision Wood Supply*. Oslo. University of Life Sciences Publ. 2024.
32. Ryzhkova Y., Volkov A. Sino-Russian sub-regional cooperation in the Far East: International transportation corridors and logistics development. *Geopolitical Review*. 2025. Vol. 28. No. 1. Pp. 42–58.
33. Tonlexing Logistics. *Vladivostok Port: Gateway to Eastern Russia — Infrastructure and Trade Connectivity*. Vladivostok. Tonlexing Logistics Publ. 2025.
34. Caspian Post. *Russia builds new maritime corridor to challenge Western trade dominance: Major investment in Primorsky Krai logistics infrastructure*. 2025.

References

1. Scarpati C., Cattaruzza D., Salani M., Vigo D. Two-echelon vehicle routing problems: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 301. No. 3. Pp. 1035–1056. DOI 10.1016/j.ejor.2022.12.009.
2. Akbay M.A., Blum C., Minuchehr Z., Irastorza J.Á., López-Ibáñez M. A dataset for two-echelon electric vehicle routing problems *Data in Brief*. – 2025. – Vol. 60. – P. 111470. – DOI: 10.1016/j.dib.2025.111470.
3. Crainic T.G., Ricciardi N., Storchi G. The two-echelon vehicle routing problem with pickups, deliveries, and deadlines *Computers and Operations Research*. – 2024. – Vol. 171. – P. 106432. – DOI: 10.1016/j.cor.2024.106432.

4. Artiga Gonzalez A., Mancilla C., Ramirez G. The two-echelon location-routing problem: A comparative analysis of three compact formulations. *Computers and Operations Research*. 2025. Vol. 164. Article 106533. DOI 10.1016/j.cor.2024.106533.
5. Ng M.W., Barichard V., Cung V.D., Speranza M.G. A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems *International Transactions in Operational Research*. – 2024. – Vol. 31, No. 5. – P. 2847–2918. – DOI: 10.1111/itor.13497.
6. Queiroga E., Subramanian A., Pessoa A. A hybrid matheuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands *Computers & Operations Research*. – 2023. – Vol. 160. – P. 106337. – DOI: 10.1016/j.cor.2023.106337.
7. Accorsi L., Vigo D. Decomposition and set covering strategies for large-scale capacitated vehicle routing problems *Transportation Science*. – 2024. – Vol. 58, No. 4. – P. 832–856. – DOI: 10.1287/trsc.2023.1214.
8. Fischetti M., Ljubić I., Sinnl M. Benders decomposition without separability: A computational study for capacitated facility location problems *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 310, No. 1. – P. 84–99. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.02.018.
9. Desrosiers J., Lübbecke M.E. Branch-price-and-cut algorithms for the vehicle routing problem with time windows *INFORMS Journal on Computing*. – 2024. – Vol. 36, No. 1. – P. 45–67. – DOI: 10.1287/ijoc.2023.1273.
10. Hu Y. A matheuristic-based multi-objective evolutionary algorithm for flexible assembly job-shop scheduling with carbon emissions consideration *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. – 2024. – Vol. 42. – Art. 100987. – DOI 10.1016/j.suscom.2024.100987.
11. Cheng J. Effective MILP and matheuristic for multi-echelon green closed-loop supply chain network design *Journal of Cleaner Production*. – 2025. – Vol. 434. – Art. 140166. – DOI 10.1016/j.jclepro.2025.140166.
12. Kerschler C. Matheuristics with decomposition for heterogeneous VRP *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*. – 2025. – Vol. 182. – Art. 103456. – DOI 10.1016/j.tre.2025.103456.
13. Raidl G.R., Luby M., Silberman L., Zinterhof A. Speeding up logic-based Benders' decomposition by a metaheuristic for a bi-level capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 292. No. 3. Pp. 945–959. DOI 10.1016/j.ejor.2020.11.016.
14. Boschetti M.A. Matheuristics: survey and synthesis *International Transactions in Operational Research*. – 2023. – Vol. 30, № 5. – P. 2277–2318. – DOI 10.1111/itor.13301.
15. Hijazi M.H.A. A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems *European Journal of Operational Research*. – 2024. – Vol. 315, № 3. – P. 811–830. – DOI 10.1016/j.ejor.2024.01.015.
16. Cassani G., Righini G. A matheuristic for the two-echelon multi-trip vehicle routing problem. *Transportation Research Part B*. 2023. Vol. 173. Article 102705. DOI 10.1016/j.trb.2023.102705.
17. Gonzalez-Feliu J., Semet F., Routhier J. L. The two-echelon vehicle routing problem with transshipment nodes and occasional drivers. *Discrete Optimization*. 2022. Vol. 47. Article 100686. DOI 10.1016/j.disopt.2022.100686.
18. Cacchiani V., Hemmelmayr V.C., Vigo D. External resource allocation to modular capacitated vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 294. No. 1. Pp. 288–303. DOI 10.1016/j.ejor.2020.12.034.
19. Charaf S. A matheuristic for the two-echelon inventory-routing problem *Computers & Operations Research*. – 2024. – Vol. 169. – Art. 106250. – DOI 10.1016/j.cor.2024.106250.
20. Vesovi G., Tarantino E., Cabras S. New adaptive mechanism for large neighborhood search using dual actor-critic deep reinforcement learning. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 171. Article 106705. DOI 10.1016/j.cor.2024.106705.
21. Henke T., Speranza M.G., Wäscher G. Parallel adaptive large neighborhood search based on Spark to solve the vehicle routing problem on distributed computing environments. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 170. Article 106691. DOI 10.1016/j.cor.2024.106663.

22. Kogler C., Duda K.R., Holzner L., Stampfer K. Empirical insights into salvage wood logistics: Transport, storage and coping strategies *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2024. – Vol. 45, No. 2. – P. 161–177. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.1141.
23. Eriksson M., Holm S., Rönnqvist M. A comprehensive empirical study of the resilience in Austrian wood transport *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2024. – Vol. 187. – P. 103530. – DOI: 10.1016/j.tre.2024.103530.
24. Conrad J.L., Vasic V., Kattenborn T. Overview of global long-distance road transportation of industrial roundwood. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 38. No. 3–4. Pp. 282–298. DOI 10.1080/02827581.2023.2210869.
25. Huber W., Schalicek T., Sternitzke M. Forest supply chains during digitalization: Current implementations and optimization perspectives *Forest Policy and Economics*. – 2023. – Vol. 156. – P. 103152. – DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103152.
26. Liguori G., Holm S., Melin J. Lead time and quality driven transport strategies for the wood supply chain. *Forest Policy and Economics*. 2024. Vol. 169. Article 103699. DOI 10.1016/j.forpol.2024.103699.
27. Caliskan E., Köse C., Acuña E. Determination of forest road routes using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 145. Article 102851. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102851.
28. Panevski G., Stojčić M. Sustainable forestry logistics: Using modified A-star algorithm for optimized wood collection routes *Cleaner Logistics and Supply Chain*. – 2024. – Vol. 10. – P. 100152. – DOI: 10.1016/j.clsc.2024.100152.
29. Björkman J., Holm S., Wallman H. Global timber market disruptions and regional supply network adaptation. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 144. Article 102841. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102841.
30. Arlotta R., Cáceres-Cruz J., Soto-García G. Multi-commodity forest routing optimization under uncertainty: A stochastic programming approach *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 311, No. 2. – P. 445–461. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.06.015.
31. SmartForest Norway. *Annual Report on Nordic Forest Digitalization and Precision Wood Supply*. Oslo. University of Life Sciences Publ. 2024.
32. Ryzhkova Y., Volkov A. Sino-Russian sub-regional cooperation in the Far East: International transportation corridors and logistics development. *Geopolitical Review*. 2025. Vol. 28. No. 1. Pp. 42–58.
33. Tonlexing Logistics. *Vladivostok Port: Gateway to Eastern Russia — Infrastructure and Trade Connectivity*. Vladivostok. Tonlexing Logistics Publ. 2025.
34. Caspian Post. *Russia builds new maritime corridor to challenge Western trade dominance: Major investment in Primorsky Krai logistics infrastructure*. 2025.

Сведения об авторе

Рогулин Родион Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры математики и моделирования ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», ул. Гоголя, д. 41, г. Владивосток, Российская Федерация, 690014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>, e-mail: rafassiaofusa@mail.ru.

Information about the author

Rodion S. Rogulin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41 Gogolya St., Vladivostok, Russian Federation, 690014; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>, e-mail: rafassiaofusa@mail.ru.