

MODELING OF THE DISTRIBUTION OF CARGO FLOWS OF COMBINED SHIPMENTS IN THE HINTERLAND AREA OF THE SEAPORT

O. A. Izotov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

This study focuses on assessing the potential for optimizing the utilization of the hinterland transport network when organizing the dispatch of combined cargo shipments from a seaport. The complexity of this task stems from the need to implement innovative methods to enlarge bulk shipments to facilitate their inland transportation using containerization. This approach promotes the development of new transportation routes and necessitates the evaluation of the transport characteristics of the shipping process. Modeling the transport network requires a comprehensive evaluation of factors, as well as economic and operational indicators that characterize the movement of cargo between origin points (sea container terminals) and destination points (consignee warehouses). This paper reviews existing models for assessing transport network utilization and provides a brief overview of each. In evaluating ongoing processes, it is emphasized that each specific origin-destination pair (sea container terminal to consignee warehouse) can be represented not only in terms of volume but also as a function of time. The possibility of developing a dynamic model based on various methods of unitizing cargo and evaluating the network's transport capabilities is also highlighted. The study concludes that, when addressing the problem of distributing flows across the transport network, considering different methods of organizing cargo units, and accounting for constraints on route capacity, time, or transportation costs, a projection method can be applied to identify the optimal transportation solution from a range of feasible options.

Keywords: modeling of the transport network, combined shipments, container technologies, container modules, vehicles, loading and unloading places, seaport, warehouse areas, cargo delivery, hinterland zone.

For citation:

Izotov, Oleg A. "Modeling of the distribution of cargo flows of combined shipments in the hinterland area of the seaport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 86–93. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-86-93.

УДК 656.073.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОТОКОВ СБОРНЫХ ПАРТИЙ В ЗОНЕ ХИНТЕРЛЕНДА МОРСКОГО ПОРТА

О. А. Изотов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является оценка возможности загрузки и оптимального использования транспортной сети хинтерленда при организации отправки сборных партий грузов с территории морского порта. Отмечается, что сложность такой задачи на текущий момент обусловлена необходимостью внедрения новых средств укрупнения сборных партий грузов в целях обеспечения их перевозок вглубь материка с применением контейнерных технологий, что способствует открытию новых маршрутов транспортировки и необходимости оценки транспортных характеристик перевозочного процесса. Указано, что моделирование транспортной сети требует всесторонней оценки различных факторов, а также экономических и эксплуатационных показателей, характеризующих транспортный процесс продвижения грузов между регионами зарождения (морской контейнерный терминал) и поглощения товаров (склад получателя). В предлагаемой работе рассмотрены существующие модели оценки загрузки транспортной сети и дана их краткая характеристика. В ходе оценки протекающих процессов подчеркивается, что каждая рассматриваемая корреспонденция между конкретным районом зарождения (морской контейнерный терминал) и поглощения (склад получателя) определенного грузопотока может быть представлена не только в объемных характеристиках, но и как функция времени, а также обращается внимание на то, что можно получить динамическую модель, базирующуюся на различных возможностях формирования грузовых мест и на оценке

транспортных возможностей сети. В ходе исследования сделан вывод о том, что при рассмотрении задачи распределения потоков по транспортной сети доставки с применением различных способов организации грузовых мест и ограничениями по пропускной способности маршрутов, по времени или стоимости перевозки, для нахождения оптимального показателя перевозки может быть использован метод проекции на множество допустимых решений.

Ключевые слова: моделирование транспортной сети, сборные партии грузов, контейнерные технологии, внутриконтейнерные модули, транспортные средства, погрузочно-разгрузочные места, морской порт, складские зоны, доставка грузов, зона хинтерленда.

Для цитирования:

Изотов О. А. Моделирование распределения грузовых потоков сборных партий в зоне хинтерленда морского порта / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 86–93. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-86-93. — EDN XSNRYA.

Введение (Introduction)

Загрузка транспортной сети определяется организацией грузовых мест, предъявляемых к перевозке, и количеством привлекаемых к перевозке транспортных средств, способных выполнять требуемый объем работ на каждом элементе рассматриваемой сети (контейнерных терминалах, складских зонах, погрузочно-разгрузочных местах, перегонах и т. д.).

Моделирование используемой, исследуемой или формируемой на новом полигоне транспортной сети, призванной осуществить доставку грузов из морского порта до пункта назначения, первоначально требует оценки возможности распределения между грузовыми терминалами корреспонденций по выявленным путям сообщений, которые обеспечивают продвижение грузов между парами регионов зарождения (морской контейнерный терминал) и поглощения товаров (склад получателя) [1].

Таким образом, целью моделирования является определение для каждой рассматриваемой пары районов набора путей, которые могут быть включены в схемы продвижения грузов между регионами, выявление ограничений по привлечению того или иного рода транспортных средств к перевозке грузов по возможным путям сообщения, а также доли соотношений корреспонденций между маршрутами сообщений при различных вариантах организации грузовых мест, подлежащих транспортировке.

Построенная модель преследует целью обеспечение экспедитора (грузовладельца) информацией для всесторонней оценки ожиданий от принятия того или иного решения на перевозку малой (сборной) партии грузов. Обработка информации, сопутствующей транспортировке, призвана снизить риски, связанные с применением традиционных и новых средств укрупнения грузовых мест.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Специалистами выделены следующие виды существующих моделей оценки загрузки транспортной сети [2]:

- модели, в основу которых положен нормативный и оценочно-описательный (дескриптивный) подход;
- модели, построенные на основе обработки статистических данных и динамической информации.

Первый вид моделей описан в работах [3]–[5], предшествующих данной публикации. В частности, в них выбран основной показатель эффективности применения перспективных средства укрупнения сборных партий грузов, определено влияние внутриконтейнерных моделей¹ на организацию доставки грузов в условиях применения контейнерных технологий в новых для хинтерленда² морского контейнерного терминала регионах (рис. 1).

¹ Патент на полезную модель 207180 Российская Федерация МПК В65D 88/00 Складной грузовой контейнер / А. Л. Кузнецов, О. А. Изотов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». Заявл. 11.06.2021; опубл. 15.10.2021, Бюл. № 29. 6 с. EDN LJMJZF.

² Доставка сборных партий грузов в большегрузных контейнерах на короткие расстояния в данном примере не рассматривается, поскольку не нуждается в пересмотре условий транспортировки.

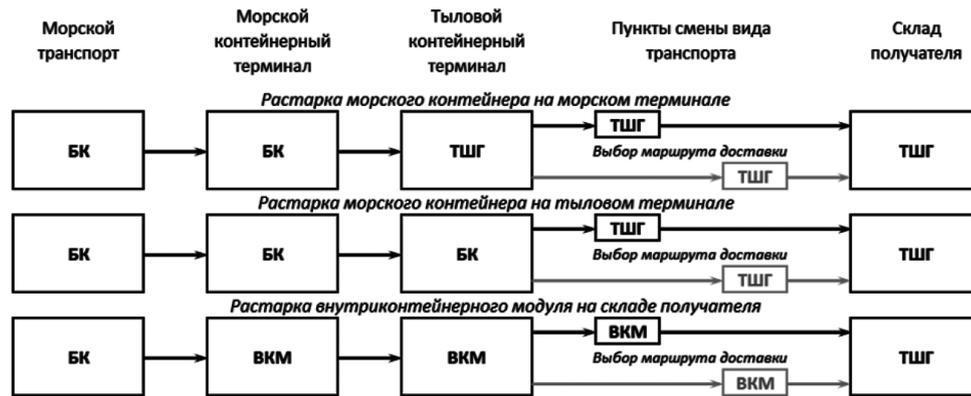


Рис. 1. Схемы транспортировки сборных партий грузов по транспортной системе хинтерленда:
 БК — большегрузный контейнер; ТШГ — тарно-штучные грузы;
 ВКМ — внутриконтейнерный модуль

Второй подход требует для перехода к построению статистической модели перехода к усредненным характеристикам продвижения сборных партий грузов на выбранном для моделирования полигоне. В частности, необходимо выявить долю α_{ij} межрайонных корреспонденций, которая использует тот или иной маршрут при том или ином способе организации грузовых мест. При этом предполагается, что доля α_{ij} отразится на загрузке каждого элемента транспортной инфраструктуры, как рассматриваемого маршрута, так и транспортной системы в целом, что обуславливает необходимость предварительного моделирования подобной системы. Такой подход не только оправдан, но и востребован при формировании новых вариантов организации транспортировки грузов, поскольку обеспечивает также учет ряда показателей работы, сформировавшейся или осваиваемой транспортной системы, таких как среднее расстояние доставки, время и стоимость перевозки грузов между районами зарождения и поглощения грузопотока Q_{ij} . В работе [6] выявлена алгебраическая зависимость количества погрузочно-разгрузочных операций и сроков доставки сборных партий грузов в тарно-штучном исполнении, большегрузных морских контейнерах и рассматриваемых средств укрупнения малых (сборных) партий грузов. Выявление усредненных показателей хода перевозки таких грузов до практического применения внутриконтейнерных модулей может быть получено на основе вероятностного моделирования поведения рассматриваемой транспортной системы.

С учетом того, что каждая рассматриваемая корреспонденция между конкретным районом зарождения и поглощения рассматриваемого грузопотока может быть представлена не только в объемных характеристиках, но и как функция времени, можно получить динамическую модель, опирающуюся как на различные возможности по формированию грузовых мест, так и на оценку транспортных возможностей сети.

Результаты и обсуждения (Results and Discussion)

Определение объемов загрузки транспортной сети требует описания правил и положений, в соответствии с которыми грузоотправитель выбирает конкретный маршрут отправки грузов с морского контейнерного терминала. Закономерности в поведении потребителей транспортных услуг изложены в трудах Вардропа [7], [8] и сводятся к следующим группам сценариев:

Первая группа — независимые грузоотправители (предприятия транспорта, логистические компании) как потребители транспортных услуг, ориентируясь на востребованные стоимостные и эксплуатационные показатели (количество рейсов, сроки доставки, стоимость грузовых работ и перевозки и др.), выбирают из возможных альтернатив приемлемые маршруты транспортировки.

Вторая группа — независимые грузоотправители (предприятия транспорта, логистические компании) выбирают маршруты транспортировки, ориентируясь на транспортные расходы, применяемые в рассматриваемой транспортной сети.

Первая группа получила название *пользовательской оптимизации (User Optimization)*. Она предполагает отсутствие коалиционного поведения в логистических и транспортных компаниях, привлекаемых к доставке грузов. Это требует предварительного сбора и обработки данных об эксплуатационных характеристиках, а также наличия резервов пропускной способности изучаемых маршрутов перевозок, что в условиях внедрения автоматизированных систем автонавигации, разработки и применения интеллектуальных транспортных систем не представляет сложности на этапах планирования и осуществления доставки грузов до потребителей. Такой принцип предполагает незначительное влияние возможных дополнительных затрат на одном из участков перевозки на стоимость транспортировки в целом.

Вторая группа получила название *системной оптимизации (System Optimization)*. Примером может служить организация движения железнодорожного транспорта. В любом случае такие перевозки в силу своих особенностей являются удобным объектом для моделирования, поскольку имеют регулярный характер и легко поддаются оценке связанных с транспортировкой затрат.

Экономико-математическую модель разделения потоков грузов на транспортном полигоне традиционно приводят в виде графа $\Gamma(V, E)$, где V — пункты зарождения и поглощения грузов, E — дуги сети, соответствующие каждому возможному участку маршрута, при этом траектория дуги отражает направление перемещения груза. Процесс перегрузки привязан к вершинам графа как к транспортным узлам (пунктам), обеспечивающим стыковку видов транспорта. Именно здесь происходит смена транспортных и эксплуатационных характеристик пути следования груза (условий доставки), а иногда и самого груза (применение иных средств укрупнения и т. п.). Из общей оценки показателей, оказывающих влияние на формирование того или иного потока грузов, можно выделить два подмножества: первый $S \subseteq V$ — пункты образования потоков грузов (истоки), второй $D \subseteq V$ — пункты поглощающие грузы (стоки).

В данном случае в качестве пунктов образования грузопотоков могут выступать морские порты и контейнерные терминалы, отгружающие грузы в зону хинтерленда. Тогда пунктами поглощения являются склады грузополучателей, логистические и распределительные центры и т. д.

Декартово произведение отражает множество пар грузопотоков, которые могут сформироваться между истоками и стоками:

$$W = S \times D = \{w = (i, j) : i \in S, j \in D\}. \quad (1)$$

Последовательность дуг, отражающих маршрут следования груза в сети Γ между вершинами i и j , можно обозначить:

$$e_1 = (i \rightarrow k_1), e_2 = (k_1 \rightarrow k_2), \dots, e_m = (k_{m-1} \rightarrow k_m), e_{m+1} = (k_m \rightarrow j). \quad (2)$$

Здесь $e_l \in E$ при всех $l = 1, \dots, m + 1$.

Обозначив P_w как множество независимых альтернативных маршрутов, связывающих пару $w \in W$, получим совокупность всех путей в сети Γ :

$$P = \bigcup_{w \in W} P_w. \quad (3)$$

Оценку загруженности всей сети можно получить, обозначив x_p как величину потока между пунктами образования и поглощения грузов, следующего по пути $p \in P$:

$$x = (x_p : p \in P). \quad (4)$$

Разработка маршрутов транспортировки должна включать всестороннюю оценку сопровождающих такую перевозку факторов, в том числе временных и финансовых затрат. Удельные затраты участников транспортного процесса по пути p можно обозначить как G_p . Тогда затраты по всей сети есть функция от ее загрузки $G_p = G_p(x)$.

Согласно первой группе сценариев участники перевозки выбирают маршрут с минимальными транспортными издержками, когда для каждой пары w выполняются условия: если по пути $p \in P$ идет ненулевой поток x_p , то и затраты по этому маршруту будут минимальными:

$$\text{если } x_p^T > 0, \text{ то } G_p(x^T) = \min_{q \in P_w} G_q(x^T) = u_w(x^T), \quad (5)$$

где $u_w(x^T)$ — минимальные транспортные издержки на дуге, соединяющей пары $w \in W$ при загрузке сети, определяемой вектором x^T .

Потоки $x^T = (x_p^T : p \in P)$, удовлетворяющие условию (1), называют *равновесными*, если определенные для каждой пары $w \in W$ соотношения задают условия равновесия транспортных потоков, а таких допустимых решений может быть значительное множество.

Решение условий транспортного равновесия состоит в сведении исходных постановочных вопросов к оптимизационной задаче. При этом на выбор эквивалентной формы оказывают влияние свойства функции транспортных расходов $G_p(x)$. Компоненты $G_p(x)$ могут быть объединены в вектор-функцию:

$$G(x) = (G_p(x) : p \in P). \quad (6)$$

Таким образом, при рассмотрении вопроса распределения потоков по транспортной сети доставки с применением различных способов организации грузовых мест и ограничений по пропускной способности маршрутов, по времени или стоимости перевозки для нахождения оптимального показателя может быть применен *метод проекции на множество допустимых решений* (рис. 2) [9]–[11].

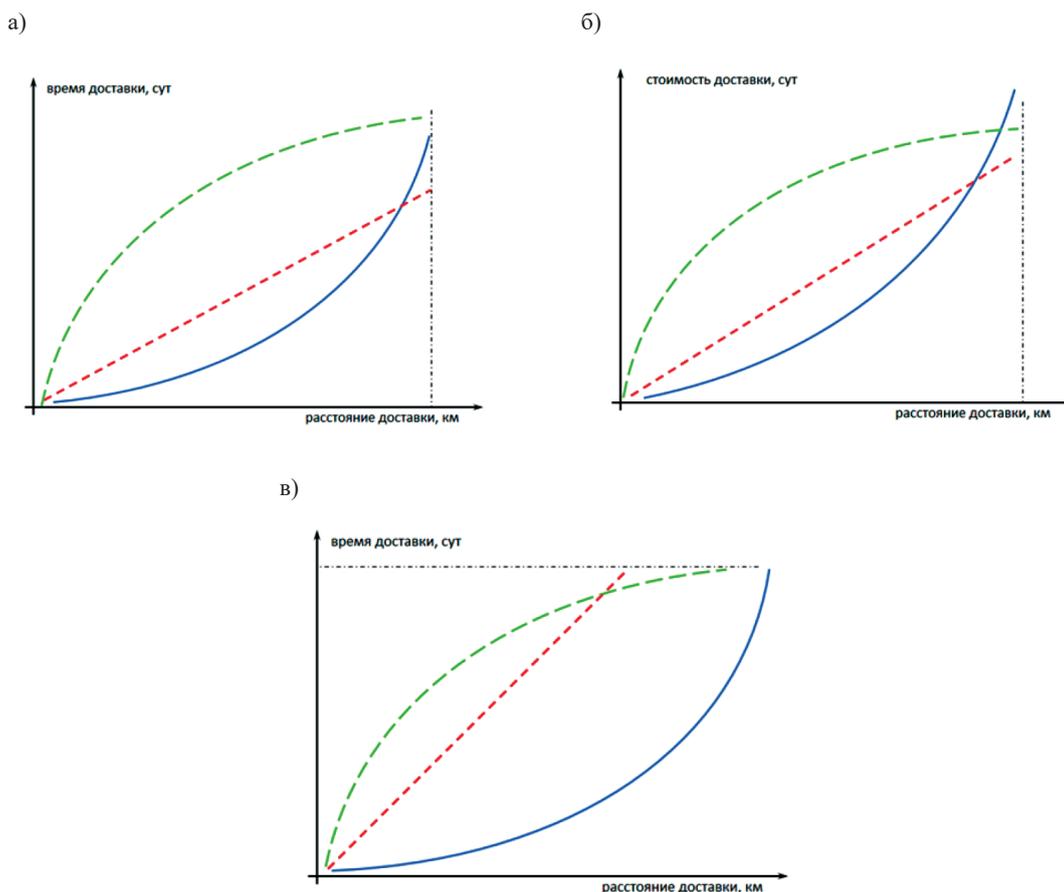


Рис. 2. Поведение характеристик доставки сборных партий грузов:

а — время доставки на одинаковое расстояние; б — стоимость доставки на одинаковое расстояние;

в — время доставки до пункта назначения

Условные обозначения:

- — — — — доставка в тарно-штучном виде;
- - - - - доставка во внутриконтейнерных модулях;
- — — — — доставка в контейнерах и тарно-штучном виде;
- · · · · — ограничения по доставке сборной партии груза

Результаты данной работы могут быть получены в конечном евклидовом пространстве R^n со скалярным произведением x, y и нормой $x = \sqrt{xx}$, $x, y \in R^n$ (рис. 3).

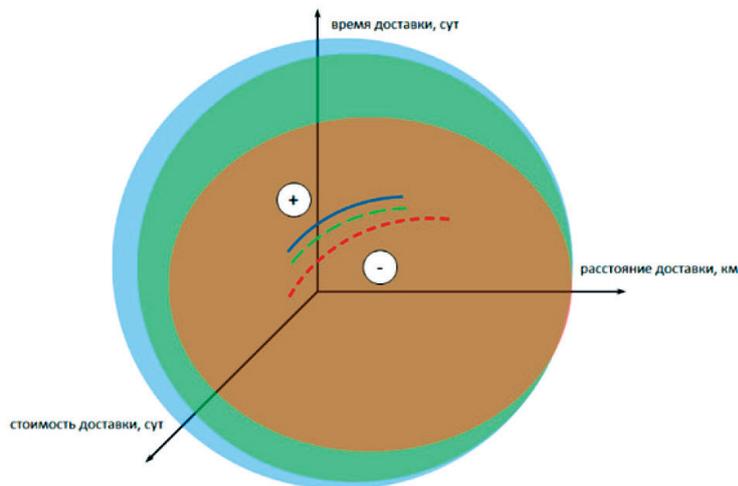


Рис. 3. Минимизации функций на выпуклом множестве и их интегральное обобщение

Условные обозначения:

- доставка в тарно-штучном виде;
- доставка во внутриконтейнерных модулях;
- доставка в контейнерах и тарно-штучном виде

Таким образом, из ранее изложенного видно, что доставка малых партий грузов во внутриконтейнерных модулях имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными вариантами транспортировки и может обеспечить сокращение как временных, так и стоимостных показателей.

Заключение (Conclusion)

Моделирование распределения грузовых потоков сборных партий в трех измерениях дает необходимую информацию грузоотправителю (транспортному агенту, экспедитору) о возможных задержках и издержках при организации доставки малых (сборных) партий грузов в глубь хинтерленда контейнерного терминала, что позволяет принять решение на перевозку в условиях осознанно возможного риска снижения одной из качественных характеристик транспортировки с учетом загрузки транспортной сети, организации грузовой единицы транспортировки и количества привлекаемых к перевозке транспортных средств, способных выполнять требуемый объем работ на каждом элементе рассматриваемой сети (контейнерных терминалах, складских зонах, погрузочно-разгрузочных местах, перегонах и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкин Э. А. Управление цепями поставок: лучшая российская и мировая практика / Э. А. Черкин // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 5(48). — С. 52–54. — EDN RSSCEF.
2. Ветрова Е. Н. Методические подходы к локализации промышленного производства на современном этапе / Е. Н. Ветрова, Г. С. Азиров // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. — 2023. — № 1. — С. 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12. — EDN QYCLSD.
3. Изотов О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза / О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261. — EDN VILYCW.
4. Изотов О. А. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов // Вестник Астраханского государственного технического университета.

Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 1. — С. 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148. — EDN OSRNVS.

5. *Изотов О. А.* Роль транспортно-логистических кластеров в формировании контейнерных коридоров перевозок сборных грузов / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, Д. Л. Головцов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 2. — С. 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136. — EDN CFBNXS.

6. *Кузнецов А. Л.* Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.

7. *Lv B.* Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // *Computers & Industrial Engineering*. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

8. *Kuzmicz K. A.* Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation / K. A. Kuzmicz, E. Pesch // *Omega*. — 2019. — Vol. 85. — Pp. 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.

9. *Almetova Z.* Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes / Z. Almetova, V. Shepelev, S. Shepelev // *Transportation Research Procedia*. — 2017. — Vol. 27. — Pp. 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

10. *Lee C-Y.* Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities / C-Y. Lee, D-P. Song // *Transportation Research Part B: Methodological*. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

11. *Изотов О. А.* Управление морскими контейнерными системами перевозок сборных партий грузов: монография / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, О. В. Соляков. — М: МОРКНИГА, 2024. — 296 с.

REFERENCES

1. Cherkin, E. A. “Managing the supply chain: best practice in Russia and internationally.” *Transport Rossiyskoy Federatsii* 5(48) (2013): 52–54.

2. Vetrova, E. N. and G. S. Azirov. “Methodological approaches to localization of industrial production at the present stage.” *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment* 1 (2023): 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12.

3. Izotov, O. A., Yu. I. Vasil’ev and O. A. Razhev. “Processes for forming groupage container consignments.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.

4. Izotov, O. A. and A. L. Kuznetsov. “Development prospects of technologies of grouped cargo containerization.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2020): 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.

5. Izotov, O. A., A. L. Kuznetsov and D. L. Golovtsov. “Role of transport and logistics clusters in creating container corridors for groupage cargo transportation.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2020): 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.

6. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. “Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.

7. Lv, B., B. Yang, X. Zhu and J. Li. “Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport.” *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

8. Kuzmicz, K. A. and E. Pesch. “Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation.” *Omega* 85 (2019): 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.

9. Almetova, Z., V. Shepelev and S. Shepelev. “Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes.” *Transportation Research Procedia* 27 (2017): 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

10. Lee, C-Y. and D-P. Song. “Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities.” *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017): 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

11. Izotov, O. A., A. L. Kuznetsov and O. V. Solyakov. *Upravlenie morskimi konteynernymi sistemami perevozok sbornykh partiy грузов: monografiya* M: Morkniga, 2024: 296.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Изотов Олег Альбертович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Izotov, Oleg A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 06 декабря 2024 г.

Received: Dec. 6, 2024.