

УДК 656.2

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-13-22

ОРГАНИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПЕРЕВОЗОК КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Камшилин Н.И.^{1,1}, Котенко А.Г.^{2,2}

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, Россия.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: ¹ kamshilin.nikita@vniizht.ru, ² kotenko@pgups.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения своевременности доставки контейнерных грузов в условиях инфраструктурных ограничений на сети ОАО «РЖД». Предложен системный подход к организации комбинированных железнодорожно-автомобильных перевозок с динамической переадресацией и перегрузкой грузов в пути следования для обхода загруженных участков инфраструктуры. На основе формализации маршрутной сети в виде взвешенного графа и использования алгоритмов поиска оптимальных маршрутов (Прима, Флойда-Уоршелла) разработана модель выбора рационального способа доставки, минимизирующего общее время доставки и издержки. Особое внимание уделено условиям принятия решений о перегрузе до входа на лимитирующий участок, что позволяет избежать простоев и обеспечить выполнение обязательств «точно в срок». Для практической реализации модели обозначены основные категории данных, необходимых для построения адекватной информационной основы.

Ключевые слова: инфраструктурные ограничения, рациональный способ доставки, комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки.

Введение

Объем перевозок контейнеров по сети РЖД растет со скоростью почти 6% в год и на сегодня достиг размеров порядка 8 миллионов штук в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ). При этом к 2030 году планируется увеличение контейнерных перевозок по железной дороге до 10 миллионов ДФЭ¹. Вместе с тем остаются острыми вопросы соблюдения сроков доставки контейнерных грузов в железнодорожном сообщении, связанные с точным выполнением расписаний движения контейнерных поездов в условиях действия различных, в частности, инфраструктурных ограничений. Такие ограничения зачастую становятся причинами задержек поездов в пути следования и, как следствие, возникновения ситуаций сдерживания приема груза к перевозке на лимитирующих железнодорожных направлениях, оттока высокодоходных грузов на автомобильный и авиационный транспорт [1].

Для цитирования:

Камшилин Н.И., Котенко А.Г. Организация комбинированных перевозок контейнерных грузов в условиях инфраструктурных ограничений. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 13–22. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-13-22.

¹[Электронный ресурс] URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=220838&ysclid=m7d79pu9ld59443018> (дата обращения: 19.02.2026)

В этой связи возникает необходимость в таких технологических решениях по доставке грузов в контейнерах, которые, снижая негативное влияние инфраструктурных ограничений, позволили бы устранить проблему задержек и нарушения сроков доставки контейнеров прежде всего с критически срочными грузами, а также исключить ситуации несвоевременного приема контейнерных грузов к перевозке железнодорожным транспортом.

Одним из возможных подходов к решению проблемы является организация комбинированных перевозок с переадресовкой груза в пути следования для объезда лимитирующих участков железнодорожной инфраструктуры. При этом возможны различные варианты комбинированной перевозки: использование автотранспорта на промежуточных участках маршрута с последующей повторной перегрузкой на железную дорогу; доставка автотранспортом на конечном отрезке маршрута, маршрутом, параллельном заявленному, без повторной перегрузки; смена маршрута на промежуточных участках с использованием поездов попутного следования с последующим возвратом на первоначальный маршрут автотранспортом [2].

Главной задачей в этом случае становится разработка рационального варианта организации комбинированной перевозки, основанного на анализе ограничений пропускной способности железнодорожных участков и участков автотрасс, и оценке возможностей по переадресовке и перегрузке контейнера.

1. Предварительные условия формирования комбинированной перевозки

Можно рассмотреть достаточно типичную ситуацию, когда в рамках транзитного контейнерного коридора P_T на направлении $S_1 - S_4$ образуется лимитирующий участок $S_2 - S_3$, где находится станция S_3 , которая представляет собой «узкое место» при организации перевозок [3]. При этом обходу его в железнодорожном сообщении препятствует лимитирующий участок $S_5 - S_6$ со своими «узкими местами» и исчерпание провозной способности на участке $S_7 - S_3$ (рис. 1).

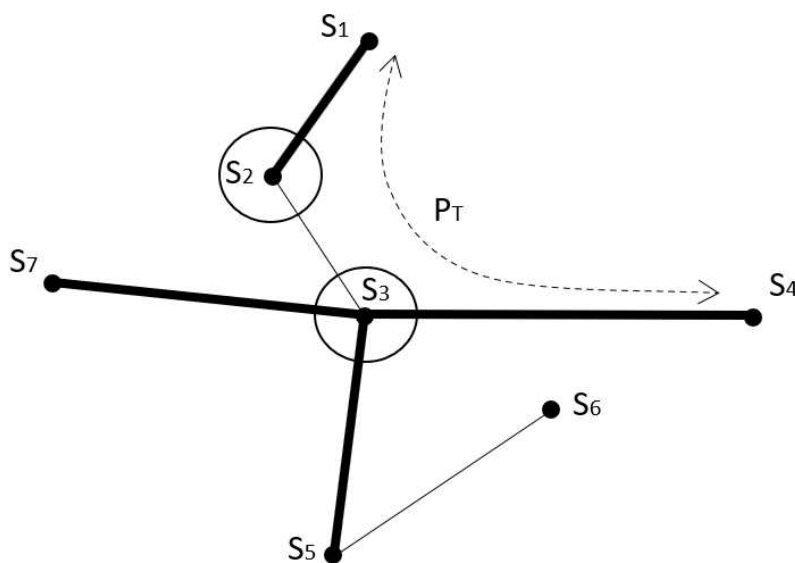


Рис. 1: Лимитирующие участки в рамках транзитного контейнерного коридора

Ограничивающим элементом пропускной способности станции S_3 выступает парк приёма-отправления станции, пропускная способность которого равняется примерно 30 грузовых поездов в направлении «туда» и приблизительно столько же – обратно, что существенно ниже требуемых размеров, поскольку превышение плановых объемов составляет около 20 пар поездов в сутки в грузовом движении при сохранении полного объёма пассажирских перевозок.

Дополнительную нагрузку на станцию оказывают технологические операции, связанные со стыкованием поездопотоков с электрифицированного и неэлектрифицированного направлений. Отсутствие электроснабжения на одном из подходов требует смены локомотивов, что приводит к увеличению времени обработки составов и созданию «бутылочного горлышка» в транзитном движении.

При этом, согласно действующим инвестиционным программам, развитие станции на ближайшее время не запланировано, что делает её критическим узлом на долгосрочную перспективу. Анализ прогнозных показателей показывает, что при сценарных объемах перевозок 150–160 млн тонн в год коэффициент заполнения пропускной способности достигнет 1,09–1,12, что свидетельствует о превышении наличных возможностей инфраструктуры.

Даже при достижении провозной способности направления в 120–130 млн тонн в год сохраняется высокий риск сбоев в графике движения, особенно в условиях пиковых нагрузок. Таким образом, участок $S_2 - S_3$, и, в частности, станция S_3 , демонстрирует устойчивую тенденцию к перегрузке, обусловленную инфраструктурными ограничениями.

Эти факторы создают предпосылки для системных задержек в продвижении поездов, и в том числе, контейнерных с высокодоходным грузом и обосновывают целесообразность применения альтернативных логистических решений, включая применение комбинированной железнодорожно-автомобильной перевозки с учетом рациональности ее организации.

2. Организация рациональной комбинированной перевозки

Задача организации рациональной комбинированной перевозки является многофакторной. Ее решение основывается применении механизмов переадресации и перегрузки контейнерного груза в пути следования, способных оперативно реагировать на изменения в загрузенности инфраструктуры и появление «узких мест» с целью обеспечить выполнение обязательств перед клиентами по доставке груза (рис. 2).

Согласно опыту, правильное сочетание переадресовки груза в контейнере с загруженной инфраструктуры и «бесшовной» перегрузки его между видами транспорта обеспечивает нужные условия для завершения перевозки в установленное время. При этом суммарные дополнительные затраты на необходимое изменение маршрутизации перевозки на промежуточных этапах оказываются ниже, чем полученный эффект от доставки груза «точно в срок» [2].

В этой связи может быть предложена формализация структуры маршрутной сети для моделирования задач комбинированных сообщений, где важными составляющими являются пропускные способности объектов железнодорожного и автомобильного видов транспорта, а также точки переадресации и перегрузки грузов на путях сообщения.

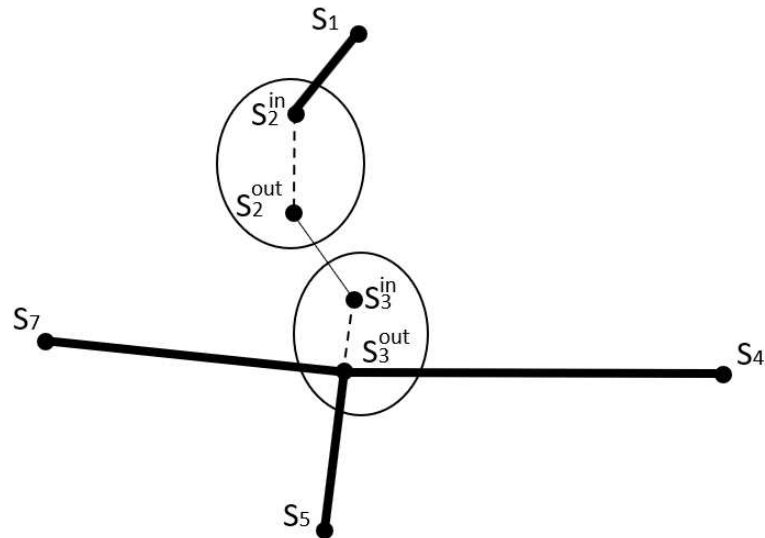


Рис. 2: Использование автотранспорта для обхода «узкого места» на участке $S_2 - S_3$ с двумя перегрузками $S_2^{in} - S_2^{out}$, $S_3^{in} - S_3^{out}$ и промежуточной переадресовкой груза

Практика моделирования показывает, что концептуальные графы, формируемые для описания комбинированной перевозки, должны быть значительно детализированы, чтобы отразить множество дополнительных параметров рассматриваемых объектов. Вместе с тем, базовая структура маршрутной сети достаточно проста:

$$M = \langle S, P \rangle, \quad (1)$$

где S – узлы (места, открытые для погрузочно-разгрузочных работ); P – ребра (пути сообщения: железные и автомобильные дороги).

Каждое ребро p ($p \in P$) характеризуется: T_p – временем перемещения транспортной единицы с установленной скоростью; N_p – наличной пропускной способностью; v_p – установленной маршрутной скоростью.

Множество узлов сети может быть представлено как

$$S = (S_i \cup S_i^a \cup S_i^{in/out}) \quad (2)$$

где S_i – железнодорожные станции; S_i^a – автомобильные терминалы; $S_i^{in/out}$ – железнодорожные станции, доступные для перегрузки (станции перегрузки).

Критериями выбора маршрута на сети являются, как требует практика организации перевозок, технико-экономические издержки [4]. Время доставки T_{total} является одним из наиболее важных и точно измеримых показателей качества перевозки, оказывающим существенное влияние на выбор [9].

При этом объективно, существуют две проблемы, серьезно усложняющие решение задачи организации рациональной комбинированной перевозки:

- во-первых, рациональная схема маршрута, как правило, не является кратчайшей, поскольку включает решения по обходам, а издержки на организацию такой схемы по сравнению с прямой доставкой могут существенно отличаться в большую сторону из-за необходимости учета дополнительных затрат в точках перегрузки, которые могут быть выражены как в деньгах, так и во времени; одним из критериев в этом случае может служить отношение пробега контейнеров по расчетной схеме маршрута к пробегу по кратчайшему маршруту

$$\alpha_{\text{конт}} = \frac{\sum n_{\text{прасч}}}{\sum n_{\text{кр}}};$$

- во-вторых, необходимо учитывать изменения в наборах данных с учетом требований, связанных с особенностями точек перегрузки: видами и типами транспортных и погрузо-разгрузочных средств, особенностей сообщений между терминалами и прочее (таблица 1).

В любом случае в основу организации комбинированной перевозки закладывается алгоритм поиска кратчайшего пути на графе, полученном из фрагментов железнодорожной сети. Такой алгоритм может использовать известные решения, такие как, например, алгоритм Прима, удобный для нахождения минимального остовного дерева графа по наименьшему весу подграфов, исходя из совместности условий $N_p \rightarrow \max$ и $T_p \rightarrow \min$, а, при появлении элементов сети, характеризующихся предельной загруженностью, алгоритм Флойда-Уоршелла – для последовательного изменения матрицы расстояний на основе оценки возможностей автодорог [5, 6].

Но, кроме того, такой алгоритм должен содержать эвристическую функцию оценки близости характеристик найденного маршрута оптимальным [7, 8].

При этом одним из условий рациональности перевозки становится положение точки перегрузки, которая, с одной стороны, должна находиться на кратчайшем расстоянии к «узкому месту», с другой стороны, отвечать требованиям по наличию погрузо-разгрузочных и транспортных средств, а также соответствовать ограничениям по пропускной способности.

Например, в обстановке высокой загруженности железнодорожного участка $S_i - S_j$, на подходе к «узкому месту» – станции C , особую значимость приобретает своевременное принятие решения по дальнейшему продвижению срочного контейнерного груза.

Одним из таких решений является организация перегрузки груза с железнодорожного на автомобильный транспорт в местах подхода к станции C , до входа на наиболее загруженный участок инфраструктуры. Такое решение позволяет не только снизить нагрузку на критически важный узел, но и гарантировать соблюдение сроков доставки, что особенно важно для высокоприоритетных грузов.

Исходя из технико-экономического анализа инфраструктуры участка в расчет вносится условие, что на подходе к станции C со стороны пункта S_i , существует техническая возможность, например, на промежуточной станции C' , расположенной на расстоянии нескольких километров от C , использовать существующую производственную площадку в качестве комбинированного перегрузочного узла. Перегрузка в этом случае может быть осуществлена до достижения поездом «узкого места», что исключает простой груза на станции C (рис. 3).

Таблица 1: Основные данные для организации комбинированной перевозки

Категория данных	Подкатегория	Поля данных
1. Точка перегрузки	1.1. Станция перегрузки	Код, наименование, пропускная способность
	1.2. Исполнитель перегрузки	ОКПО, ИНН, наименование
	1.3. Владелец инфраструктуры	ОКПО, ИНН, наименование
	1.4. Время нахождения до подачи	Время прибытия, время подачи к месту перегрузки
	1.5. Длительность перегрузки	Количество вагонов, варианты перегрузки, время подачи под выгрузку, время уборки после погрузки
	1.6. Перерабатывающая способность терминала в части перегрузки	Количество вагонов, варианты перегрузки, время
	1.7. Длина и вместимость путей для нахождения вагонов в ожидании перегрузки	Условные вагоны
	1.8. Длина и вместимость грузового фронта путей для перегрузки	Условные вагоны
	1.9. Емкость зоны хранения терминала перегрузки	ДФЭ
2. Точка переадресовки	2.1. Станция переадресовки	Код, наименование, пропускная способность, план формирования
3. Груз	3.1. Характеристики груза	Номенклатура, код груза, масса, объем, срок доставки, приоритет
	3.2. Маршрут груза	Идентификатор линии перевозок, начальная и конечная точки, регулярность использования, объекты
4. Данные о загруженности	4.1. Загруженность ж.д. направления	Код перегона / станции, степень текущей и прогнозируемой загруженности
	4.2. Загруженность автотрассы	Идентификатор участка, степень текущей и прогнозируемой загруженности
5. Данные по финансовым издержкам	5.1. Стоимость перевозок	Стоимость ж.д. перевозки / автоперевозки, стоимость перегрузки / переадресовки
	5.2. Штрафы	Штрафы за просрочку доставки, штрафы за простои

В общем случае для организации комбинированной перевозки контейнерного груза вычисляется маршрут с учётом T_p , N_p , v_p . Если $N_p < \text{порог}$, груз перенаправляется на автотранспорт [5, 6]. В основе модели рационального выбора способа доставки лежит формула

$$T_{total} = \sum_{\text{жд}} \frac{p_{ij}}{v_{\text{жд}}} \cdot x_{ij}^{\text{жд}} + \sum_{\text{авто}} \frac{p_{kl}}{v_{\text{авто}}} \cdot x_{kl}^{\text{авто}} + \sum t_{\text{переадрес}} + \sum t_{\text{перегруз}} \cdot y_m \quad (3)$$

где T_{total} – общее время доставки от начальной до конечной точки; p_{ij} – расстояние между узлами i и j по железной дороге; $V_{жд}$ – маршрутная скорость движения по железной дороге; $\sum_{жд}$ – общее время, затраченное на перемещение по всем железнодорожным участкам маршрута; p_{kl} – расстояние между узлами по автодороге; $V_{авто}$ – средняя скорость движения по автодорогам; $x_{ij}^{жд} \in \{0, 1\}$ – бинарная переменная 1, если груз перемещается по железной дороге (i, j) ; $x_{kl}^{авто}$ – бинарная переменная 1, если груз перемещается по автодороге (k, l) ; y_m – бинарная переменная 1, если перегрузка происходит в узле m ; $\sum_{авто}$ – общее время, затраченное на перемещение по всем автомобильным участкам маршрута; $\sum t_{переедрес}$ – время, затрачиваемое на одну переадресовку от станции начала переадресовки до станции окончания переадресовки; $\sum t_{переегруз}$ – время, затрачиваемое на одну перегрузку груза между видами транспорта.

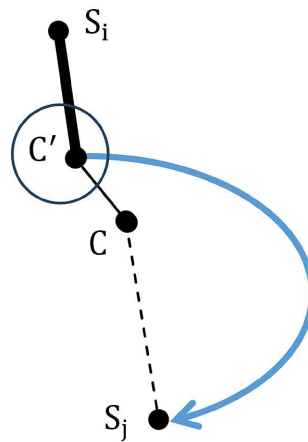


Рис. 3: Перегрузка на подходе к «узкому месту» участка $S_i - S_j$ (станции C) с использованием для перегрузки возможностей на ближайшей станции C'

Одним из основных ограничений становится доступность точек перегрузки, когда контейнер может быть перегружен между видами транспорта только в узле $B_{переегруз}$

$$x_{ij}^{жд} + x_{kl}^{авто} \leq y_m \quad \forall m \in B_{переегруз}, (i, j). \quad (4)$$

При этом максимальное число перегрузок должно быть ограничено для сохранения заданного уровня издержек

$$\sum m \in B_{переегруз} \leq K_{max} \quad (5)$$

где K_{max} – максимально допустимое количество перегрузок.

Заключение

В работе изложены основные положения, при которых действительны расчеты, использующие модель выбора рационального варианта контейнерной перевозки при возникновении инфраструктурных ограничений.

При этом, как показывает практика, технико-экономические издержки, полученные за счет изменения схемы маршрута в пути следования, оказываются ниже, чем суммарный эффект от доставки груза «точно в срок».

Приведенные примеры иллюстрируют необходимость разработки динамических механизмов управления продвижением срочных грузов в контейнерах в части вариантов формирования рациональной схемы маршрута и способов бесшовной перегрузки. Это позволит оперативно реагировать на изменения в загрузженности инфраструктуры и обеспечивать выполнение обязательств перед клиентами по условиям доставки.

Список литературы

- [1] Вакуленко С.П., Насыбуллин А.М., Айсина Л.Р., Роменский Д.Ю., Мехедов М.И. Новый взгляд на технологию контейнерных перевозок железнодорожным транспортом // Техника и технология транспорта. – 2022. – № 1 (24). – С. 12-16.
- [2] Иванов Б.И., Мехедов М.И., Федюлин В.Г., Тимченко А.Ю., Бирюкова В.В., Камшилин Н.И. Новые подходы к организации контейнерных железнодорожных перевозок // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник тр. Всерос. науч.-практ. конф. с международ. уч. / Уральск. гос. ун-т путей сообщ. – Екатеринбург, 2024. – С. 309-313.
- [3] Арипов Н.М., Камалетдинов Ш.Ш. Моделирование процессов автоматизированного сменного суточного планирования погрузки грузов на железнодорожном транспорте // Инновационный транспорт. – Екатеринбург: УрГУПС: Рос. акад. трансп. – 2023. – № 3 (49). – С. 55-59.
- [4] Котенко А.Г., Сатторов С.Б. К вопросу усиления пропускной способности линии при введении ускоренных грузовых перевозок // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 44-56.
- [5] Турдиев С.С., Исломова М.Н. Оптимизация перевозок: нахождение оптимальных путей и маршрутов с помощью алгоритмов Дейкстры и Флойда-Уоршелла // Ресурсосберегающие технологии на транспорте. – 2023. – Т. 2023. – № 2023. – С. 365-369.
- [6] Goryainov S., Konstantinova E.V., Li H., Zhao D. Integral graphs obtained by dual Seidel switching // Linear Algebra and its Applications. – 2020. – V. 604. – P. 476-489.
- [7] Nutz M., Wang R. The directional optimal transport // Annals of Applied Probability. – 2022. – № 32 (2). – P. 1400-1420.
- [8] Chen S., Liu Y., Zou L., Wang Z., Lin Y., Chen Y., Pan A. Combining optimal transport and embedding-based approaches for more expressiveness in unsupervised graph alignment // arXiv:2406.13216v1 [cs.LG]. – 2024. – 51 p. – DOI:10.48550/arXiv.2406.13216.
- [9] Kotenko A.G., Malakhova T.A., Shmatkov R.N., Tushin N.A. Description of multimodal transport networks by means of graph models // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2131. – № 3. – P. 032009.

ORGANIZATION OF COMBINED CONTAINER CARGO TRANSPORTATION UNDER INFRASTRUCTURE CONSTRAINTS

Kamshilin N. I.^{1,1}, Kotenko A. G.^{2,2}

¹ Joint Stock Company «All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport» (JSC «VNIIZhT»), Moscow, Russia.

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, Russia.

E-mail: ¹ kamshilin.nikita@vniizht.ru, ² kotenko@pgups.ru

Abstract. The article considers the urgent problem of ensuring timely delivery of container cargo under infrastructure constraints on the Russian Railways network. A systematic approach to the organization of combined rail-road transportation with dynamic re-routing and reloading of cargo en route to bypass congested infrastructure sections is proposed. Based on the formalization of the route network as a weighted graph and the use of optimal route search algorithms (Prim, Floyd-Warshall), a model for choosing a rational delivery method that minimizes total delivery time and costs is developed. Special attention is paid to the conditions for making decisions about reloading before entering the limiting section, which allows avoiding downtime and fulfilling «just-in-time» obligations. For practical implementation of the model, the main categories of data necessary for building an adequate information base are identified.

Keywords: *infrastructure constraints, rational delivery method, combined rail-road transportation.*

References

- [1] Vakulenko S.P., Nasybullin A.M., Aysina L.R., Romenskiy D.Yu., Mekhedov M.I. Novyy vzglyad na tekhnologiyu konteynernykh perevozok zheleznodorozhnym transportom (A new look at the technology of container transportation by rail). Tekhnika i tekhnologiya transporta (Equipment and Technology of Transport), 2022, no. 1 (24), pp. 12-16. (in Russian)
- [2] Ivanov B.I., Mekhedov M.I., Fedulin V.G., Timchenko A.Yu., Biryukova V.V., Kamshilin N.I. Novyye podkhody k organizatsii konteynernykh zheleznodorozhnykh perevozok (New approaches to the organization of container rail transportation). Zheleznodorozhnyy transport i tekhnologii: sbornik tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarod. uch. (Railway Transport and Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation), Ekaterinburg, 2024, pp. 309-313. (in Russian)
- [3] Aripov N.M., Kamaletdinov Sh.Sh. Modelirovaniye protsessov avtomatizirovannogo smenno-sutochnogo planirovaniya pogruzki грузов na zheleznodorozhnom transporte (Modeling of automated shift-daily planning processes for cargo loading in railway transport). Innovatsionnyy transport (Innovative Transport), Ekaterinburg: UrGUPS: Ros. akad. transp., 2023, no. 3 (49), pp. 55-59. (in Russian)
- [4] Kotenko A.G., Sattorov S.B. K voprosu usileniya propusknoy sposobnosti linii pri vvedenii uskorennykh грузовykh perevozok (On the issue of increasing line capacity with the introduction of accelerated freight transportation). Izvestiya Transsiba (Proceedings of Transsib), 2023, no. 4 (56), pp. 44-56. (in Russian)

For citation:

Kamshilin N. I., Kotenko A. G. Organization of Combined Container Cargo Transportation under Infrastructure Constraints. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 13-22. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-13-22. (in Russian)

- [5] Turdiev S.S., Islomova M.N. Optimizatsiya perevozok: nakhozhdeniye optimal'nykh putey i marshrutov s pomoshch'yu algoritmov Deykstry i Floyda-Uorshella (Optimization of transportation: finding optimal paths and routes using Dijkstra and Floyd-Warshall algorithms). *Resursosberegayushchiye tekhnologii na transporte (Resource-Saving Technologies in Transport)*, 2023, vol. 2023, no. 2023, pp. 365-369. (in Russian)
- [6] Goryainov S., Konstantinova E.V., Li H., Zhao D. Integral graphs obtained by dual Seidel switching. *Linear Algebra and its Applications*, 2020, vol. 604, pp. 476-489.
- [7] Nutz M., Wang R. The directional optimal transport. *Annals of Applied Probability*, 2022, no. 32 (2), pp. 1400-1420.
- [8] Chen S., Liu Y., Zou L., Wang Z., Lin Y., Chen Y., Pan A. Combining optimal transport and embedding-based approaches for more expressiveness in unsupervised graph alignment. *arXiv:2406.13216v1 [cs.LG]*, 2024, 51 p. DOI:10.48550/arXiv.2406.13216.
- [9] Kotenko A.G., Malakhova T.A., Shmatkov R.N., Tushin N.A. Description of multimodal transport networks by means of graph models. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2131, no. 3, p. 032009.