

<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-2-6>

УДК 338.2, 338.47, 332.1

JEL R13, R41, R4

А. Ю. Крылатов  , М. А. Федорова , А. П. Раевская 

^{а, б, в)} Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

^{а)} Институт проблем транспорта имени Н. С. Соломенко РАН,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР-ЮГ» НА ТРАНЗИТНОЕ ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ И МИРОВЫХ ГРУЗОПОТОКОВ¹

Аннотация. Современные глобальные и региональные вызовы сказываются на торговых связях, цепях поставок и маршрутах транспортировки грузов. В складывающихся на текущий момент условиях международный транспортный коридор (МТК) «Север-Юг» приобретает дополнительную политическую и экономическую значимость. Настоящее исследование направлено на оценку загрузки участков транспортного коридора с учётом спроса на перемещение и доступных инфраструктурных мощностей региональной транзитной транспортно-логистической системы. Применён теоретико-игровой подход к моделированию конкурентного поведения грузовых потоков в сети в условиях ограниченных пропускных способностей её элементов. В результате расчётов было установлено, что при прогнозируемом к 2030 г. спросе на перевозки между Санкт-Петербургом и Мумбаи в объёме 41 млн т в год движение грузов между Европой и Азией через МТК «Север-Юг» окажется быстрее на 20-40 %, чем через альтернативные маршруты, при этом выигрыш в транзитном времени движения через транспортный коридор на указанных направлениях будет сохраняться при наращивании транзитного грузопотока вплоть до 80 млн т в год, а при капитальных вложениях в пропускную способность 11 выявленных участков сети – вплоть до 100 млн т. Таким образом, в долгосрочной перспективе МТК «Север-Юг» сможет обслуживать 80-100 млн т грузов в год, оставаясь конкурентной транспортной магистралью в сети мировых грузопотоков и способствуя развитию бизнеса вкпе с ростом рабочих мест в регионе. Более того, при реализации крупных инвестиционных проектов по расширению ряда пограничных переходов и перевалочных узлов транспортный коридор будет оставаться конкурентоспособной альтернативой для направлений Азия – Европа и Индия – Северная Америка при транзитном грузопотоке даже большем, чем 100 млн т в год. Полученные результаты могут использоваться для корректировки проектов развития МТК «Север-Юг», программ развития транспортного комплекса стран-участниц и повышения уровня жизни населения рассматриваемого региона.

Ключевые слова: мультимодальные перевозки, интермодальные перевозки, распределение грузопотоков, моделирование, прогнозирование, оптимизация транспортной системы

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-71-10063 «Разработка интеллектуальных инструментов оптимизации мультимодальных систем распределения потоков в загруженных многопродуктовых сетях»).

Для цитирования: Крылатов, А. Ю., Федорова, М. А., Раевская А. П. (2025). Оценка влияния международного транспортного коридора «Север-Юг» на транзитное время движения региональных и мировых грузопотоков. *Экономика региона*, 21(2), 332-348. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-2-6>

¹ © Крылатов А. Ю., Федорова М. А., Раевская А. П. Текст. 2025.

RESEARCH ARTICLE

Alexander Yu. Krylatov ^{a)}, Marina A. Fedorova^{b)}, Anastasiya P. Raevskaya ^{c)}^{a, b, c)} St Petersburg University, Saint Petersburg, Russian Federation^{a)} Solomenko Institute of Transport Problems of RAS, Saint Petersburg, Russian Federation

Assessment of the Impact of the International North-South Transport Corridor on Transit Travel Time in Regional and Global Cargo Transportation

Abstract. Global and regional challenges are reshaping trade relations, supply chains, and cargo transportation routes. In this context, the International North-South Transport Corridor (INSTC) is gaining increased political and economic importance. This study evaluates congestion along sections of the corridor by analysing demand and infrastructure capacity in the regional transit logistics system. Using a game-theoretic model, the competitive behaviour of cargo flows under limited network capacity was simulated. Results indicate that with projected transportation demand between Saint Petersburg and Mumbai reaching 41 million tons per year by 2030, transit times between Europe and Asia via the INSTC could be reduced by 20–40 % compared to existing routes. The corridor remains attractive for transit volumes up to 80 million tons annually, and with targeted investments to expand capacity on 11 key network sections, it could handle up to 100 million tons per year. In the long term, the INSTC is expected to support 80 to 100 million tons annually, maintaining competitiveness in the global freight network and fostering regional economic development. Further investments in border crossings and transshipment hubs could expand capacity beyond 100 million tons, strengthening the corridor as a viable alternative for routes between Asia, Europe, India, and North America. These findings can inform development plans for the INSTC, transport policies of participating countries, and contribute to improving local living standards.

Keywords: multimodal transportation, intermodal transportation, freight flow assignment, modelling, prediction, optimization of the transportation system

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-71-10063, “Development of intelligent tools for optimization multimodal flow assignment systems in congested networks of heterogeneous products”.

For citation: Krylatov, A.Yu., Fedorova, M.A., & Raevskaya, A. P. (2025). Assessment of the Impact of the International North-South Transport Corridor on Transit Travel Time in Regional and Global Cargo Transportation. *Ekonomika regiona / Economy of regions*, 21(2), 332-348. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-2-6>

Введение

Международный транспортный коридор «Север-Юг» представляет собой мультимодальную транспортно-логистическую систему, способную повысить транспортную связность между Индией, Ираном, Азербайджаном, Центральной Азией, Россией и Европой с точки зрения грузоперевозок. С учётом наблюдаемого в мире роста востребованности мультимодальных и интермодальных грузовых перевозок развитие коридора соответствует актуальному тренду в транспортной сфере (Hosseini & Al Khaled, 2021). Естественно, что ключевым драйвером увеличения числа мультимодальных контейнерных перевозок грузов явилось снижение удельных затрат и сокращение простоев в сравнении с традиционными способами транспортировки (Agamez-Ariasa & Moyano-Fuentes^b, 2017). Сегодня вопрос мультимодальных контейнерных перевозок находится в фокусе внимания многих исследователей и лиц, принимающих решения на различных уровнях управления (Nekhoroshkov et al., 2022). В настоящей работе мы концентрируемся на стратеги-

ческом уровне управления и планирования работы мультимодальной транспортно-логистической сети МТК «Север-Юг» с учётом оценки потенциальных задержек в перемещении грузов на её участках при возрастающем грузопотоке (Zweers & van der Mei, 2022).

В литературе представлены разные подходы к развитию логистических цепей (Осинцев, Рахмангулов, 2025) и формализации процесса мультимодальной перевозки грузов (Alumur & Kara, 2008). Решения, принимаемые на стратегическом уровне управления, определяют контуры и топологию транспортно-логистической системы, требуют крупных капиталовложений и оказывают долгосрочное влияние на распределение потоков товаров и грузов (Li et al., 2023). Комплексный подход к решению задач проектирования мультимодальных транспортно-логистических сетей позволяет лицам, принимающим решения, получать оптимальные сценарии модификации сетевой инфраструктуры, увеличивающие её производительность при учёте эволюции спроса (Wang et al., 2023). С формальной точки зрения, в своём ис-

следовании мы моделируем мультимодальную логистическую сеть как граф, состоящий из узлов и дуг, обеспечивающих процесс доставки грузов из пунктов отправления в пункты прибытия напрямую или через промежуточные логистические узлы (Ishfaq & Sox, 2011). В своём анализе мы учитываем пропускную способность участков сети и оцениваем возможность возникновения заторов, фактически влияющих на конечные транспортные затраты. При моделировании распределения грузопотоков мы опираемся на принцип конкурентного выбора между имеющимися альтернативными маршрутами транспортно-логистической сети (Peng et al., 2024).

В качестве предмета исследования настоящей работы выступает международный транспортный коридор «Север-Юг» и потенциал его влияния на распределение региональных и мировых грузопотоков. В основу методологии проводимого исследования заложен теоретико-игровой подход к моделированию конкурентного распределения грузов в транспортно-логистической сети в виде задач поиска вычислимого общего равновесия.

Теория и методология

Современные глобальные и региональные рынки характеризуются пространственной удалённостью друг от друга производителей и потребителей товаров и услуг. В этом смысле транспорт сегодня играет во многом ключевую роль в обеспечении устойчивого экономического и территориального развития целых регионов, поскольку эффективность организации транспортного процесса напрямую влияет на рыночные цены и доступность предложения (Makarova et al., 2023). Неудивительно, в связи с этим, наблюдать растущий интерес государственных учреждений и международных государственных объединений к разработке новых моделей транспортной логистики (de Jong et al., 2013). В частности, на повестке дня всё чаще и чаще стоит вопрос трансформации мультимодальных грузоперевозок с целью повышения их эффективности (Real et al., 2021). Действительно, в настоящее время операционный механизм системы мультимодальных грузоперевозок не столь надежен с точки зрения оценок совокупных затрат, поскольку каждый этап транспортировки моделируется отдельно (Basallo-Triana et al., 2021). Необходим комплексный подход к моделированию процесса перевозок, реализация которого сегодня представляется вполне осуществимой благодаря внедрению новых цифровых технологий в транспортную отрасль (Fareed et al., 2024).

Передовые цифровые технологии, которые внедряются в индустрию мультимодальных грузоперевозок, рассмотрены в работе (Medić et al., 2019). На операционно-тактическом уровне эффект от их внедрения заметен практически сразу (Battilani et al., 2022). Однако, результативность стратегических решений зависит не только от полноты и точности данных, но и от адекватности и вычислимости моделей, которые лежат в основе принимаемых решений. В настоящей статье предлагается опираться на модель равновесного распределения товарных потоков как модель вычислимого общего равновесия в задаче оценки влияния МТК «Север-Юг» на региональные и мировые грузопотоки. Впервые подобная модель была предложена в начале 1950-х годов экономистами Энке (Enke, 1951) в виде физической аналогии и Самуэльсоном (Samuelson, 1952) в виде задачи оптимизации. Исследователи отмечают, что в отличие от СВА-анализа, анализ на основе моделей равновесного распределения позволяет количественно оценить не только изменения общих экономических показателей, но и эффект по регионам присутствия пространственно распределённой экономической системы (Bröcker, 2021). В научной литературе можно найти результаты применения математических моделей равновесного распределения потоков при моделировании различных транспортных процессов и оценке производимых ими экономических эффектов (Zhang, 2020). Модели вычислимого общего равновесия обладают высокой объяснительной силой и существенным методологическим потенциалом для анализа развития региональных транспортно-логистических комплексов и оценки крупных инфраструктурных проектов (Branco et al., 2022).

Исследуемый в настоящей статье транспортный коридор «Север-Юг» представляется в виде ориентированного графа $G = (V, E)$, в узлах V которого расположены порты, железнодорожные станции, перевалочные пункты и пограничные переходы, а в качестве дуг E выступают доступные транспортные переходы между смежными узлами. Множество W задаёт пары узлов пунктов отправления и назначения с ненулевым спросом на перемещение $D^w > 0$, $w \in W$, а множество R^w , $w \in W$, задаёт все возможные маршруты движения между узлами пары $w \in W$:

$$\sum_{r \in R^w} f_r^w = D^w \quad \forall w \in W, \quad (1)$$

где $f_r^w \geq 0$ — переменная величина грузопотока по маршруту $r \in R^w$.

В свою очередь, переменную величину грузопотока по дуге $e \in E$ будем обозначать через x_e . В качестве функции временных затрат на дуге $e \in E$ будем использовать неотрицательную скалярную функцию $c_e(x_e)$ класса C^1 , первые производные которой строго положительны на множестве вещественных неотрицательных чисел. В то же время, затраты на движение по маршруту $r \in R^w, w \in W$, определим как следующую аддитивную по дугам функцию:

$$\sum_{e \in E} c_e(x_e) \delta_{e,r}^w \quad \forall r \in R^w, w \in W, \quad (2)$$

где, по определению,

$$\delta_{e,r}^w = \begin{cases} 1, & \text{дуга входит в маршрут } r \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

$\forall e \in E, r \in R^w, w \in W,$

в то время, как

$$x_e = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} f_r^w \delta_{e,r}^w \quad \forall e \in E, \quad (4)$$

т. е. поток грузов на участке сети является суммой потоков грузов по всем маршрутам, которые включают этот участок.

В настоящем исследовании мы опираемся на принцип равновесного распределения потоков:

$$\sum_{e \in E} c_e(x_e) \delta_{e,r}^w \begin{cases} = \pi^w, & \text{если } f_r^w > 0, \\ \geq \pi^w, & \text{если } f_r^w = 0, \end{cases} \quad \forall r \in R^w, w \in W, \quad (5)$$

т. е. временные затраты на всех используемых маршрутах (π^w), с учётом различных видов транспорта, одинаковы для каждой пары узлов пункт отправления и пункт прибытия и меньше или равны затратам на любых неиспользуемых маршрутах. Рассмотрим потенциальную игру единиц потока в виде следующей задачи нелинейной условной оптимизации:

$$\min_x \sum_{e \in E} \int_0^{x_e} c_e(u) du, \quad (6)$$

при условиях

$$\sum_{r \in R^w} f_r^w = D^w \quad \forall w \in W, \quad (7)$$

$$f_r^w \geq 0 \quad \forall r \in R^w, w \in W, \quad (8)$$

где

$$x_e = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} f_r^w \delta_{e,r}^w \quad \forall e \in E. \quad (9)$$

Решение представленной задачи оптимизации с необходимостью удовлетворяет условию равновесия (5). Другими словами, решением задачи оптимизации (6)-(8) является такое распределение потоков, при котором ни одной единице потока не выгодно отклоняться от выбранного маршрута. При этом важно заметить, что в рамках настоящего исследования издержки перевозчиков моделируются через временные затраты.

Сегодня, благодаря современным цифровым технологиям, в частности, геоинформационным технологиям, все необходимые параметры для модели (6)-(8) могут быть оценены и вычислены применительно к любой региональной или международной транспортно-логистической сети. Насколько нам известно, в литературе не представлено исследований, касающихся вопросов влияния МТК «Север-Юг» на региональные и международные грузоперевозки, с использованием описанного подхода. В то же время, исследователями активно обсуждаются вопросы оценки спроса на перевозки и методы получения соответствующих оценок как по видам транспорта (Широв и др., 2021), так и по контейнерным перевозкам в целом (Nikolaou & Dimitriou, 2024).

Данные и методы

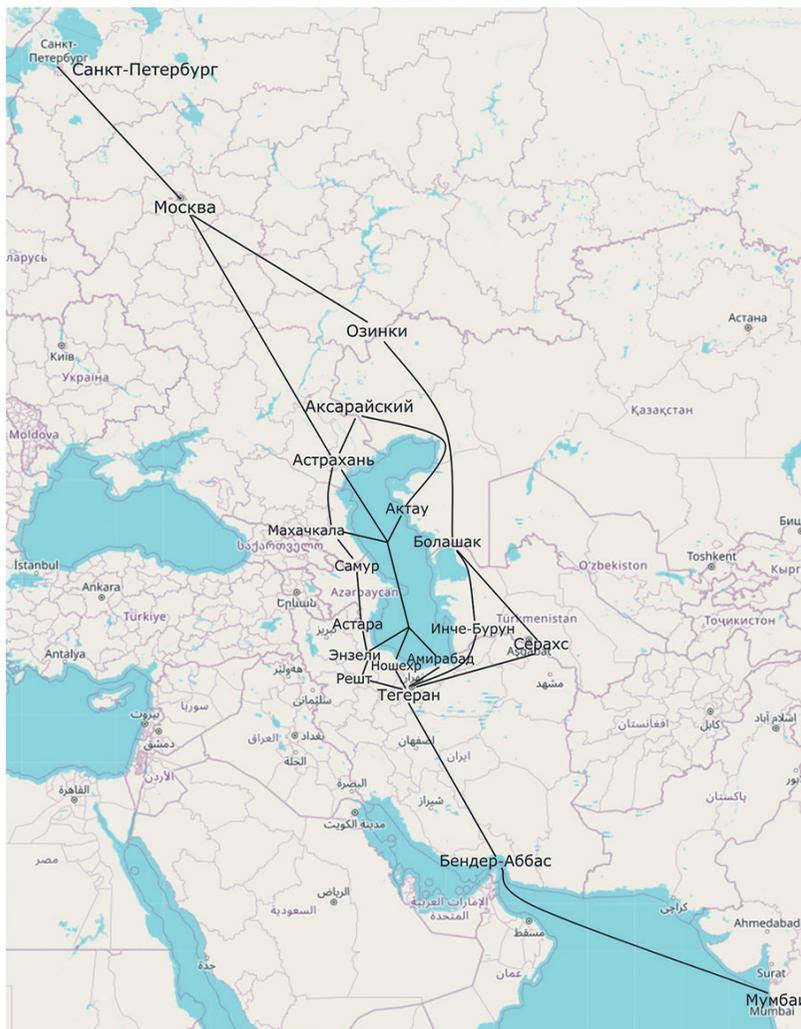
Схематичное представление МТК «Север-Юг» приведено на рисунке 1. Каждый узел сети ассоциирован с порядковым значением для целей моделирования и запуска вычислительных процедур.

В работе исследованы две версии МТК «Север-Юг»: версия коридора в существующем на сегодняшний день виде и версия коридора после ввода в эксплуатацию в 2028 г. железной дороги на перегоне Решт-Астара.

При построении графа исследуемой сети пропускная способность портов (т/год) вычислялась по следующей формуле:

$$\left[\frac{l1}{l2} \right] \cdot m \cdot n \cdot \frac{365}{d}, \quad (10)$$

где $l1$ — длина причала, $l2$ — длина контейнеровоза, m , — средняя масса брутто одного контейнера, n — вместимость контейнеровоза, d — количество дней на обработку одного контейнеровоза. Длины причалов при-



Физический объект	Вершина графа
Мумбаи (порт)	1
Мумбаи (рейд)	2
Мумбаи (ж/д пути)	3
Бендер-Аббас (рейд)	4
Бендер-Аббас (порт)	5
Бендер-Аббас (ж/д пути)	6
Тегеран (автодорога)	7
Тегеран (ж/д пути)	8
Астара (Азербайджан)	9
Астара (Иран, ж/д пути)	10
Астара (Иран, автодорога)	11
Решт (ж/д пути)	12
Решт (автодорога)	13
Самур (РФ)	14
Яраг-Казмаляр (Азербайджан)	15
Астрахань (порт)	16
Астрахань (рейд)	17
Астрахань (ж/д пути)	18
Озинки (РФ)	19
Семиглавый Мар (Казасхстан)	20
Аксарайский (РФ)	21
Ганюшкино (Казасхстан)	22
Сарахс (Туркменистан)	23
Серахс (Иран)	24
Инче-Бурун (Туркменистан)	25
Гермсар (Иран)	26
Серхетяка (Туркменистан)	27
Болашак (Казасхстан)	28
Санкт-Петербург	29
Москва	30
Бендер-Энзели (порт)	31
Бендер-Энзели (рейд)	32
Бендер-Энзели (автодорога)	33
Махачкала (порт)	34
Махачкала (рейд)	35
Махачкала (ж/д пути)	36
Актау (порт)	37
Актау (рейд)	38
Актау (ж/д пути)	39
Ношехр (порт)	40
Ношехр (рейд)	41
Ношехр (автодорога)	42
Амирабад (порт)	43
Амирабад (рейд)	44
Амирабад (ж/д пути)	45

Рис 1. МТК «Север-Юг» (источник: составлено авторами с использованием OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, лицензия ODbL)

Fig. 1. International North–South Transport Corridor (source: compiled by the authors using OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, ODbL license)

ведены в таблице 1, m принята равной 28 тонн, а n принята равной 150 ДФЭ для портов Каспийского моря и 10 000 ДФЭ для портов Аравийского моря.

Пропускная способность (т/год) дуг между портами и зонами перегрузки с/на сухопутный транспорт рассчитывались по формуле:

$$n \cdot m \cdot 365, \tag{11}$$

где n — количество техники для перевалки в день, m — грузоподъемность одной единицы техники. В свою очередь, пропускная способность железнодорожных путей

Таблица 1
Длины причалов в портах МТК «Север-Юг»
Table 1
Berth lengths in the ports of the North-South Transport Corridor

Порт	Длина причала, м
Астрахань	500
Махачкала	300
Актау	550
Бендер-Энзели	400
Ношехр	250
Амирабад	600
Бендер-Аббас	2500
Мумбаи	2300

Источник: составлено авторами.

(т/год) и автомобильных дорог была рассчитана по формуле¹:

$$m \cdot a \cdot k \cdot 365, \quad (12)$$

где m — грузоподъемность транспортного средства, a — коэффициент надежности, k — количество полос движения. Наконец, время свободного движения по дугам сети рассчитывалось по формуле:

$$\frac{l}{v}, \quad (13)$$

где l — длина дуги, v — средняя скорость транспортного средства. Ниже приведены значения средней скорости движения для разных видов транспорта:

- автомобильный: 70 км/ч;
- железнодорожный: 50 км/ч;
- морской: 26 км/ч.

Результаты вычислений времени свободного движения и пропускных способностей участков мультимодальной сети МТК «Север-Юг» приведены в таблице 2. В каждой ячейке, стоящей на пересечении i и j , находится следующая пара значений: время свободного движения из узла i в узел j / пропускная способность дуги, идущей из узла i в узел j (см. рис. 1). Время свободного движения приведено в часах, пропускная способность — в млн тонн в год.

Рассчитанные характеристики дуг сети были необходимы для построения функций

¹ Министерство транспорта Российской Федерации. Приказ от 18 июля 2018 года № 266 «Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования». <https://docs.cntd.ru/document/542629643> (дата обращения: 31.05.2024).

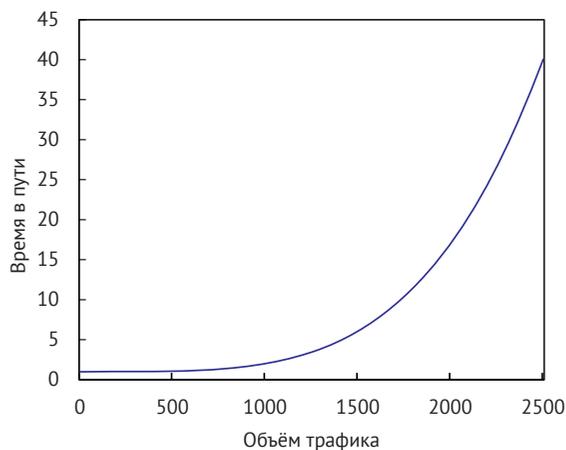


Рис. 2. Типичная функция затрат на участке сети (источник: составлено авторами)

Fig. 2. A typical cost function for network segment (source: compiled by the authors)

затрат, используемых в математической модели равновесного распределения потоков (6)–(8), при этом пропускную способность принято учитывать не как жёсткое ограничение, а как фактор замедления скорости движения по мере роста объёма потока (Boyce et al., 1981). В этой связи сегодня при моделировании временных затрат на участках сети, как правило, используют зависимости, описываемые графиком, приведенным на рисунке 2 (Hossam & Gazder, 2024).

В настоящем исследовании мы используем широко распространённую степенную зависимость для оценки времени движения через участки сети:

$$t_e^0 \left(1 + 0,15 \left(\frac{x_e}{b_e} \right)^4 \right),$$

где t_e^0 — время свободного движения, а b_e — пропускная способность дуги $e \in E$.

В качестве входных данных для модели (6)–(8) использовались данные о прогнозируемом транзите грузов через транспортный коридор: к 2030 г. экспорт по МТК может увеличиться до 35 млн т, импорт — до 6 млн т, а в долгосрочной перспективе ожидается увеличение грузопотока по МТК «Север-Юг» до 60–100 млн т в год².

Результаты исследования

На базе математической модели процесса распределения транспортных потоков (6)–(8)

² МТК «Север-Юг»: время реализовать потенциал. Портал «Транспорт России». <https://transportrussia.ru/razdely/avtomobilnye-dorogi/10995-mtk-sever-yug-vremya-realizovat-potentsial.html> (дата обращения: 06.11.2024).

**Время свободного движения и пропускная способность
участков МТК «Север-Юг»**

Table 2

Free-flow travel time and capacity of the sections of the North-South Transport Corridor

	3	4			10	15		
1	0,05 / 44,85	49,19 / 10 ⁶		9	0,05 / 1,4	9,6 / 32,6		
	1				9	11		
2	18,02 / 241,92			10	0,05 / 1,4	0,03 / 1,02		
	2				10	33		
3	0,05 / 44,85			11	0,03 / 14,76	3,36 / 0,451		
	5				8	13		
4	18,02 / 282,4			12	6,6 / 32,6	0,03 / 1,02		
	2	6			12	33		
5	49,19 / 10 ⁶	0,05 / 44,85		13	0,03 / 14,76	0,57 / 0,451		
	4	8			15	36		
6	0,05 / 44,85	21 / 32,6		14	0,05 / 3,75	3,6 / 32,6		
	8	42			9	14		
7	0,05 / 14,76	3,14 / 0,451		15	9,6 / 32,6	0,05 / 3,75		
	6	7	12	24	26	45		
8	21 / 32,6	0,05 / 1,02	6,6 / 32,6	18 / 32,6	13,4 / 32,6	8 / 32,6		
	18	32	41	44			16	
16	0,05 / 14,76	33,42 / 10 ⁶	44,96 / 10 ⁶	46,1 / 10 ⁶		17	18,02 / 7,66	
	17	21	30	36			30	
18	0,05 / 14,76	1 / 32,6	28,2 / 32,6	7,6 / 32,6		29	13 / 32,6	
	20	30			23	25	28	
19	0,05 / 3	21,4 / 32,6		27	22 / 32,6	17,2 / 32,6	0,05 / 5	
	19	28			20	27		
20	0,05 / 3	9,4 / 32,6		28	9,4 / 32,6	0,05 / 5		
	18	22			18	19	29	
21	1 / 32,6	0,05 / 2,5		30	28,2 / 32,6	21,4 / 32,6	13 / 32,6	
	21	39			11	13	32	
22	0,05 / 2,5	6,6 / 32,6		33	3,36 / 0,451	0,57 / 0,451	0,05 / 1,02	
	24	27			14	18	35	
23	0,05 / 2,21	22 / 32,6		36	3,6 / 32,6	7,6 / 32,6	0,05 / 14,76	
	8	23			22	38		
24	18 / 32,6	0,05 / 2,21		39	6,6 / 32,6	0,05 / 14,76		
	26	27			7	41		
25	0,05 / 2,5	17,2 / 32,6		42	3,14 / 0,451	0,05 / 1,02		
	8	25			8	44		
26	13,4 / 32,6	0,05 / 2,5		45	8 / 32,6	0,05 / 14,76		
	17	33	35	38			31	
31	33,42 / 10 ⁶	0,05 / 1,02	28,04 / 10 ⁶	26,88 / 10 ⁶		32	18,02 / 6,13	
	32	36	41	44			34	
34	28,04 / 10 ⁶	0,05 / 14,76	31,12 / 10 ⁶	32,7 / 10 ⁶		35	18,02 / 4,59	
	32	39	41	44			37	
37	26,88 / 10 ⁶	0,05 / 14,76	29,96 / 10 ⁶	30 / 10 ⁶		38	18,02 / 7,66	
	17	35	38	42			40	
40	44,96 / 10 ⁶	31,12 / 10 ⁶	29,96 / 10 ⁶	0,05 / 1,02		41	18,02 / 3,06	
	17	35	38	45			43	
43	46,12 / 10 ⁶	32,65 / 10 ⁶	29,96 / 10 ⁶	0,05 / 14,76		44	18,02 / 9,19	

Источник: составлено авторами.

мы разработали вычислительные процедуры для оценки изменения объёма грузопотока на участках МТК «Север-Юг». Результаты запуска разработанных процедур для прогнозиру-

емого к 2030 г. спроса на транзит грузов представлены на рисунке 3.

Видно, что для текущей версии сети в условиях ожидаемого к 2030 г. увеличения грузопотока существенно возрастёт востребо-

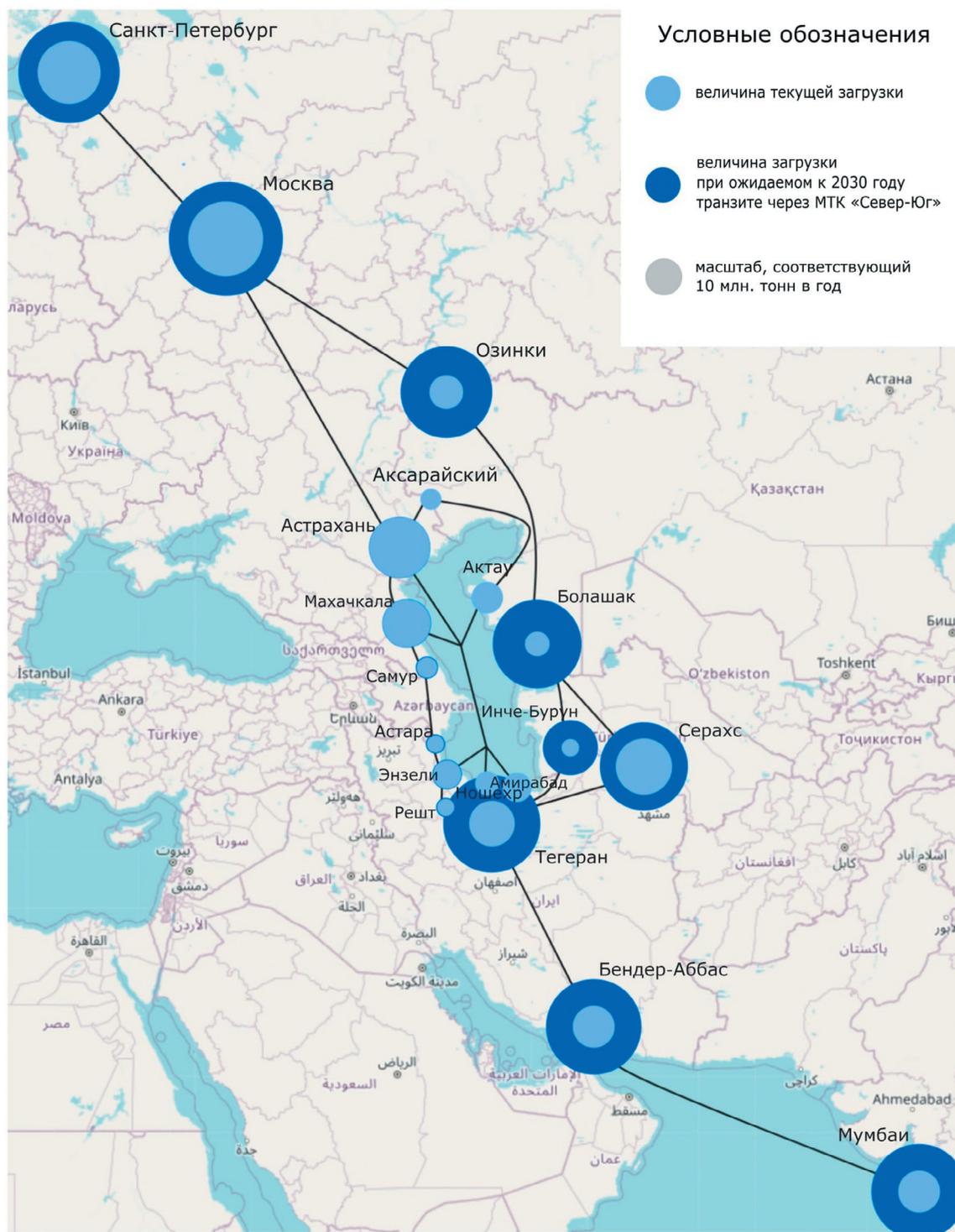


Рис. 3. Оценки изменений объёма грузопотока на участках МТК «Север-Юг» при возрастании годового транзита до 41 млн тонн (источник: составлено авторами с использованием OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, лицензия ODbL)

Fig. 3. Estimated changes in cargo volume on sections of the North–South Transport Corridor with an increase in annual transit to 41 million tons (source: compiled by the authors using OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, ODbL license)

ванность участков Восточного маршрута МТК «Север-Юг». С одной стороны, рост грузопотока приводит к росту рабочих мест и развитию малого и среднего бизнеса в регионе, с другой стороны, может возникнуть необходимость в дополнительных капитальных вложениях в инфраструктуру. При этом, закладывая инвестиции в план по увеличению пропускных способностей выявленных участков сети, необходимо оценивать не только локальный эффект (снижение заторов) от капитальных вложений, но и то, каким образом увеличение пропускных способностей отдельных узлов мультимодальной сети сможет повлиять на грузопоток через МТК «Север-Юг» в целом. Важно отметить, что в рамках настоящей статьи оценка минимальных временных затрат на транзит грузов из пункта отправления в пункт прибытия через МТК «Север-Юг» делается в предположении, что процесс транспортировки будет организован бесшовным образом¹.

С учётом прогнозируемого к 2030 г. спроса на перевозки модель грузопотоков позволяет оценить средние временные затраты (5) на проход через текущую версию МТК «Север-Юг» к началу тридцатых годов. Согласно оценкам модели, принимающей во внимание возможные задержки в узлах сети из-за недостаточных пропускных способностей, к 2030 г. минимальное транзитное время на перемещение грузов из Санкт-Петербурга в Мумбаи окажется равным 223 часам (~9 дней), а из Мумбаи в Санкт-Петербург — 183 часам (~8 дней). Если же вложиться в увеличение пропускных способностей выявленных 25 проблемных участков сети, то транзитное время снизится не более, чем на 15 %. Полученные оценки наглядно демонстрируют, что решение проблемы локальных заторов потребует существенных капитальных вложений, но довольно ограничено отразится на транзитном времени между Санкт-Петербургом и Мумбаи. В то же время, на 2028 г. уже запланированы изменения в текущей версии сети, а именно — ввод в эксплуатацию участка железной дороги на перегоне Решт — Астара². Если учесть соответствующее изменение и пересчитать распределение пото-

ков, то окажется, что введение в эксплуатацию указанного участка железной дороги заметным образом отразится на перераспределении грузопотоков (рис. 4).

Изменения в распределении грузопотоков после ввода в эксплуатацию железной дороги между Рештом и Астарой не приведут при этом к уменьшению транзитного времени движения через транспортный коридор без капитальных вложений в ряд других участков сети. Действительно, если предположить, что операторы ожидаемого грузопотока сделают выбор в пользу железнодорожного транспорта на рассматриваемом участке, то транзитное время на перемещение грузов из Санкт-Петербурга в Мумбаи будет равным 200 часам, а из Мумбаи в Санкт-Петербург — 183 часам. Полученные высокие оценки временных затрат прежде всего связаны с превышением величины ожидаемого потока над величиной пропускной способности таких узких мест, как пограничные переходы Самур (РФ) — Яраг-Казмаляр (Азербайджан) и Астара (Азербайджан) — Астара (Иран). Прочие узкие места сети после ввода в эксплуатацию ж/д перегона Решт — Астара представлены на гистограммах (рис. 5).

Сравним временные затраты на движение грузов из Китая и Индии в Европу и Северную Америку через Суэцкий канал с временными затратами на этих направлениях при движении через МТК «Север-Юг» к началу 2030-х гг. (рис. 6).

С учётом прогнозируемого спроса на перевозки, движение грузов через МТК окажется быстрее, чем через Суэцкий канал на

- 21 % при движении из Китая в Европу,
- 19 % при движении из Европы в Китай,
- 41 % при движении из Индии в Европу,
- 37 % при движении из Европы в Индию,
- 15 % при движении из Индии в Северную Америку,
- 13 % при движении из Северной Америки в Индию.

Более того, исследование показало, что при увеличении грузопотока по МТК «Север-Юг»

- до 95 млн т в год транспортный коридор перестанет обеспечивать меньшее значение величины транзитного времени на направлении Индия — Северная Америка;
- до 103 млн т в год транспортный коридор перестанет обеспечивать меньшее значение величины транзитного времени на направлении Китай — Европа;
- до 106 млн т в год транспортный коридор перестанет обеспечивать меньшее значение ве-

¹ МТК «Север-Юг»: развитие сотрудничества. Портал «Росконгресс». <https://roscongress.org/sessions/spief-2023-mezhdunarodnyy-transportnyy-koridor-sever-yug-razvitiye-sotrudnichestva/about/> (дата обращения: 07.12.2024).

² Стартовали работы по проектированию ж/д линии Решт — Астара на территории Ирана. Портал «РЖД-Партнер». <https://www.rzd-partner.ru/logistics/news/startovali-raboty-po-proektirovaniyu-zhd-linii-resht-astara-na-territorii-irana/> (дата обращения: 07.12.2024).

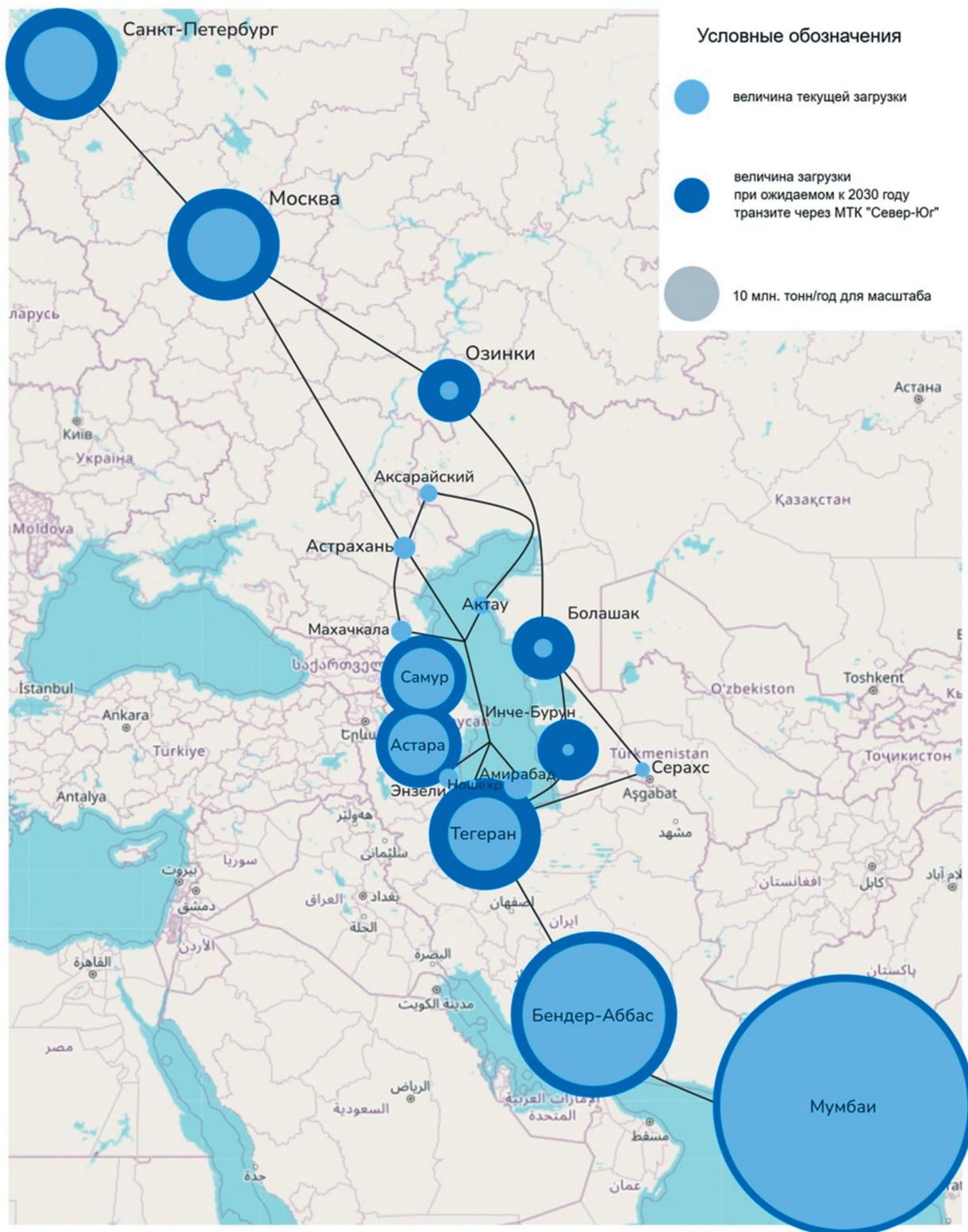


Рис. 4. Оценки изменений объёма грузопотока на участках МТК «Север-Юг» при возрастании годового транзита до 41 млн т после ввода в эксплуатацию ж/д перегона Решт — Астара (источник: составлено авторами с использованием OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, лицензия ODbL)

Fig. 4. Estimated changes in cargo volume on sections of the North–South Transport Corridor with an increase in annual transit to 41 million tons after the launch of the Rasht–Astara railway section (source: compiled by the authors using OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, ODbL license)

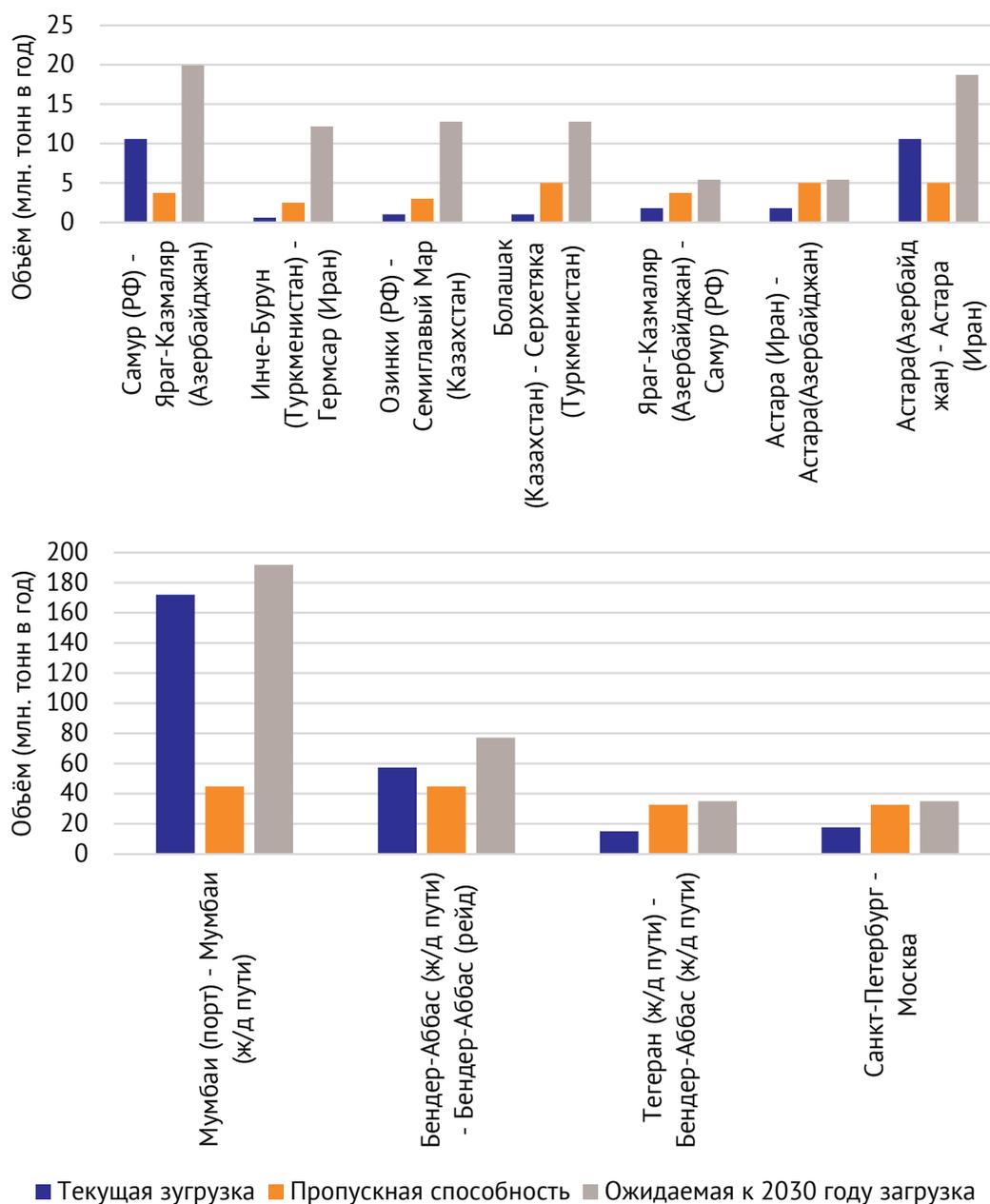


Рис. 5. Соотношение пропускных способностей, текущих загрузок и ожидаемых к 2030 г. загрузок участков МТК «Север-Юг» после ввода ж/д перегона Решт — Астара, для которых величина грузопотока выше величины пропускной способности (источник: составлено авторами)

Fig. 5. Ratio of throughput capacities, current loads, and expected loads by 2030 for segments of the International North-South Transport Corridor following the commissioning of the Rasht-Astara railway section, where the volume of freight traffic exceeds the throughput capacity (source: compiled by the authors)

личины транзитного времени на направлении Индия — Европа, даже при капитальных вложениях в пропускные способности выявленных узких мест (см. гистограммы, представленные на рис. 5). При этом приведённые выше оценки получены в предположении, что нарастать будет только импорт. Если предположить, что нарастать будет и экспорт, то транспортный коридор перестанет обеспечивать меньшее значение величины транзитного времени на направлениях

— Индия — Северная Америка при 80 млн т грузопотока через МТК «Север-Юг»;

— Китай — Европа при 88 млн т грузопотока через МТК «Север-Юг»;

— Индия — Европа при 91 млн т грузопотока через МТК «Север-Юг», при условии инвестирования в проекты по увеличению пропускных способностей выявленных узких мест.

Проведённое исследование, помимо прочего, показывает, что при капитальных вложениях

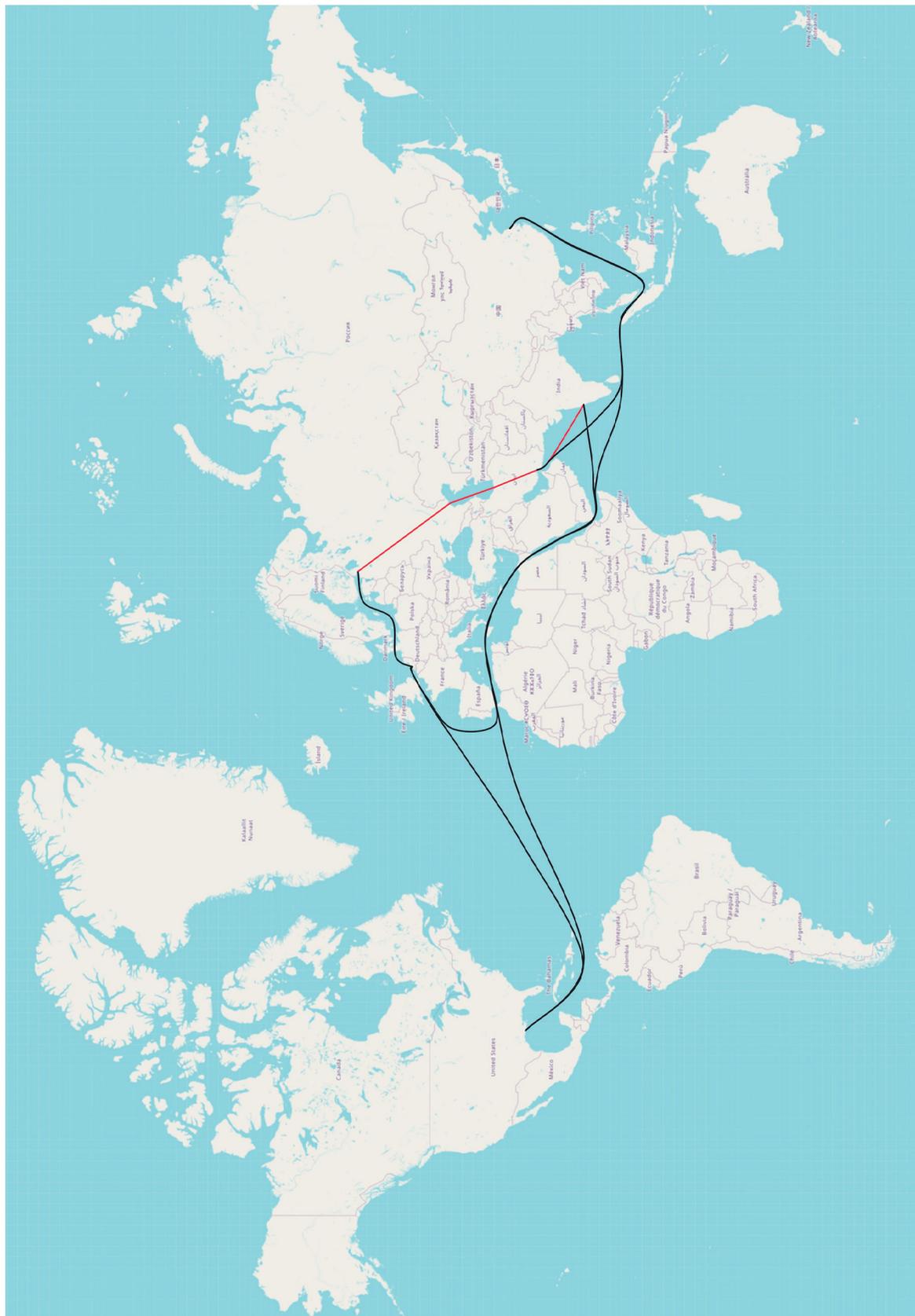


Рис. 6. Рассматриваемые маршруты международных грузоперевозок (источник: составлено авторами с использованием OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, лицензия ODbL)
Fig. 6. Routes for international cargo transportation under consideration (source: compiled by the authors using OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, ODbL license)

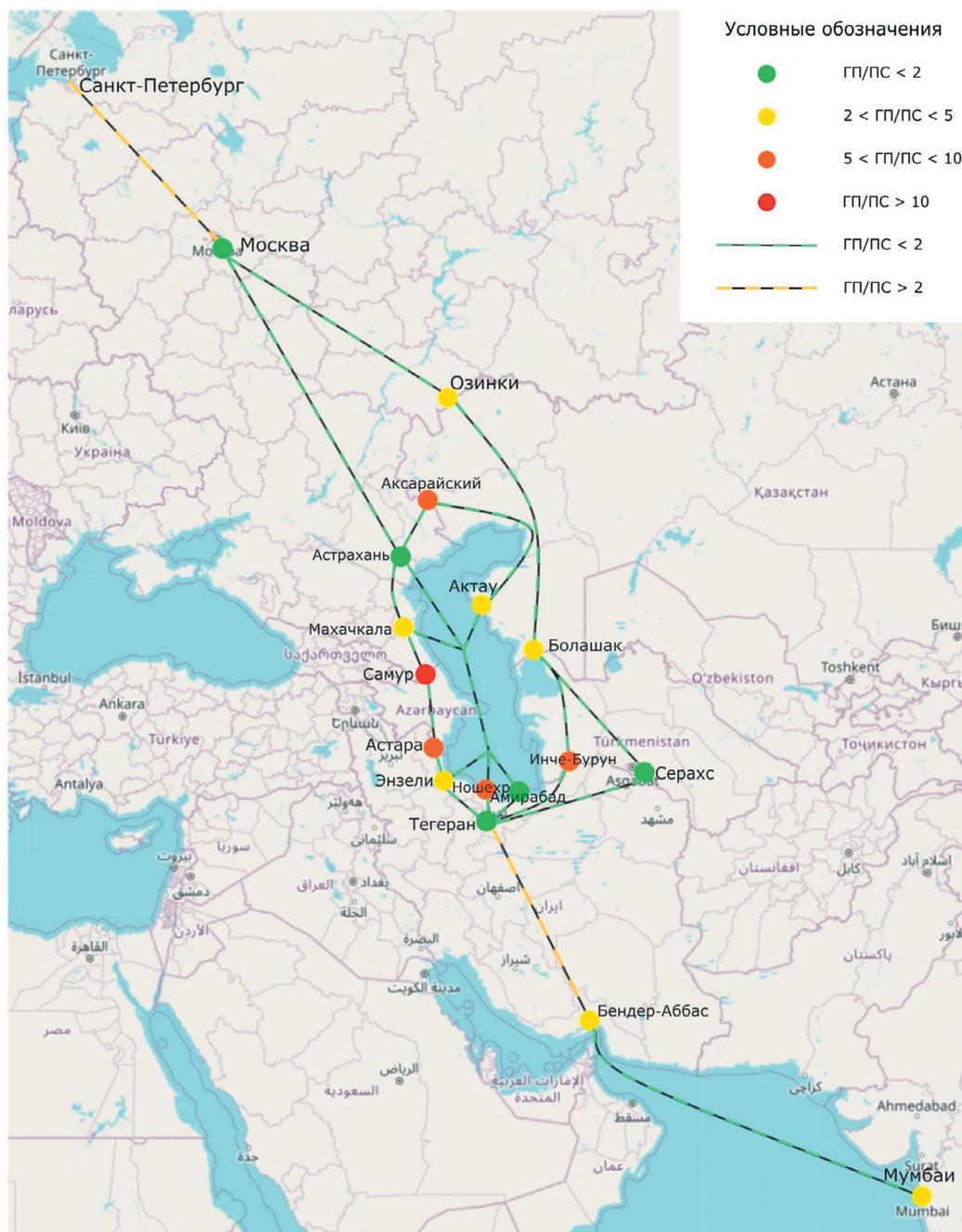


Рис. 7. Отношения величин грузопотока к величинам пропускных способностей на участках МТК «Север-Юг» при годовом транзите в 100 млн т (источник: составлено авторами с использованием OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, лицензия ODbL)

Fig. 7. Ratios of freight traffic volumes to throughput capacities on segments of the International North–South Transport Corridor with an annual transit of 100 million tons (source: compiled by the authors using OpenStreetMap: OpenStreetMap contributors, ODbL license)

в узкие места, создаваемые грузопотоком в 41 млн т в год, МТК «Север-Юг» потеряет свою привлекательность как маршрут для грузоперевозок между Индией/Китаем и Европой/Северной Америкой, оставшись важным региональным транспортно-логистическим комплексом, если грузопоток возрастёт до 100 млн т в год.

В самом деле, с учётом ожидаемого к 2028 г. ввода в эксплуатацию железной дороги на пе-

регоне Решт-Астара и капитальных вложений под грузопоток в 41 млн т в год, появление грузопотока в 100 млн т в год создаст порядка 20 узких мест в сети, характеризующихся большим 1 значением отношения величины грузопотока (ГП) к величине пропускной способности (ПС) (рис. 7). При грузопотоке в 100 млн т в год наиболее проблемными участками окажутся пограничные переходы Самур

(Российская Федерация) — Яраг-Казмаляр (Азербайджан) и Озинки (Российская Федерация) — Семиглавый Мар (Казахстан). Решение проблемы заторов на данных локальных участках сети потребует увеличения пропускных способностей пунктов пропуска в каждом из направлений в 8 раз. В то же время, примерно в 6 раз придётся увеличить пропускную способность в обоих направлениях таких пограничных переходов как

— Инче-Бурун (Туркменистан) — Гермсар (Иран),
— Астара (Азербайджан) — Астара (Иран).

В таблице 3 приведены участки, которые требуют увеличения пропускных способностей менее чем в 6 раз.

Таблица 3
Участки МТК «Север-Юг»

Table 3
Sections of the North-South Transport Corridor

Участок МТК «Север-Юг»	Требуемое увеличение, раз
Серхетяка (Туркменистан)-Болашак (Казахстан)	5
Мумбаи (порт)-Мумбаи (ж/д пути)	4
Болашак (Казахстан)-Серхетяка (Туркменистан)	4
Бендер-Энзели (рейд)-Бендер-Энзели (порт)	2
Бендер-Аббас (рейд)-Бендер-Аббас (порт)	2
Бендер-Аббас (ж/д пути)-Бендер-Аббас (рейд)	2
Бендер-Аббас (ж/д пути)-Тегеран (ж/д пути)	2
Мумбаи (ж/д пути)-Мумбаи (рейд)	1,8
Москва-Санкт-Петербург	1,6
Тегеран (ж/д пути)-Бендер-Аббас (ж/д пути)	1,5
Санкт-Петербург – Москва	1,4
Бендер-Аббас (порт)-Бендер-Аббас (ж/д пути)	1,3
Мумбаи (рейд)-Мумбаи (порт)	1,2

Источник: составлено авторами.

Если увеличить пропускные способности выявленных участков сети в среднем в 4 раза, то движение через МТК «Север-Юг» будет оставаться привлекательной альтернативой для перевозки грузов на направлениях Индия — Европа, Китай — Европа и Индия — Северная Америка даже при 100 млн т в год транзитного грузопотока через транспортный коридор.

Выводы и обсуждение

Проведённое исследование показало, что моделирование МТК «Север-Юг» с использованием теории игр и теории графов делает возможным оценить динамику транспортно-логистического процесса в долгосрочной перспективе с учётом взаимного влияния региональных и международных грузоперевозок. Как было показано, благодаря такому подходу удаётся выявлять узкие места сети и способствовать поддержке процесса принятия решений по оптимизации работы транспортно-логистической системы. В этом смысле, если планируемые за пределами 2030 г. мероприятия будут направлены на устранение выявленных узких мест, то такие мероприятия, как показало исследование, приведут к положительному эффекту с точки зрения транзитного времени движения. В то же время, вложения в инфраструктуру на других участках сети могут привести к перераспределению потоков, в результате чего число узких мест и их расположение может измениться. В будущих работах мы планируем сконцентрироваться на общей оценке необходимых производственно-технологических и организационно-институциональных работ по оптимизации коридора с целью повышения его конкурентной способности в борьбе с другими маршрутами и различными видами транспорта в глобальной системе передвижения товаров и грузов.

Список источников

- Осинцев, Н. А., Рахмангулов, А. Н. (2025). *Устойчивое развитие логистических цепей грузопотоков*. Москва: Инфра-М, 303.
- Широв, А. А., Сапова, Н. Н., Узякова, Е. С., Узяков, Р. М. (2021). Комплексный прогноз спроса на межрегиональные грузовые железнодорожные перевозки. *Экономика региона*, 17(1), 1–15. <http://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-1>
- Agamez-Ariasa, A. del M., & Moyano-Fuentes, J. (2017). Intermodal transport in freight distribution: a literature review. *Transport Reviews*, 37(6), 782–807. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297868>
- Alumur, S., & Kara, B. Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art. *European Journal of Operational Research*, 190(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.008>
- Basallo-Triana, M. J., Vidal-Holguín, C. J., & Bravo-Bastidas, J. J. (2021). Planning and design of intermodal hub networks: A literature review. *Computers & Operations Research*, 136, 105469. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105469>
- Battilani, C., Galli, G., Arecco, S., Casarino, B., Granero, A., Lavagna, K., Varna, R., Ventura, M., Revetria, R., & Damiani, L. (2022). Business process re-engineering in public administration: The case study of Western Ligurian Sea Port Authority. *Sustainable Futures*, 4, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100065>

- Boyce, D. E., Janson, B. N., & Eash, R. W. (1981). The effect on equilibrium trip assignment of different link congestion functions. *Transportation Research Part A: General*, 15(3), 223–232. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(81\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0191-2607(81)90003-0)
- Branco, J. E. H., Bartholomeu, D. B., Junior, P. N. A., & Filho, J. V. C. (2022). Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the Brazilian's transportation network: An application of a network equilibrium model. *Transport Policy*, 124, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.03.011>
- Bröcker, J. (2021). Computable general equilibrium analysis in transportation economics. *International encyclopedia of transportation*, 520–526. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10096-X>
- de Jong, G., Vierth, I., Tavasszy, L., & Ben-Akiva, M. (2013). Recent developments in national and international freight transport models within Europe. *Transportation*, 40(2), 347–371. <http://doi.org/10.1007/s11116-012-9422-9>
- Enke, S. (1951). Equilibrium among spatially separated markets: Solution by electric analogue. *Econometrica*, 19(1), 40–47. <https://doi.org/10.2307/1907907>
- Fareed, A. G., De Felice, F., Forcina, A., & Petrillo, A. (2024). Role and applications of advanced digital technologies in achieving sustainability in multimodal logistics operations: A systematic literature review. *Sustainable Futures*, 8, 100278. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100278>
- Hossam, N., & Gazder, U. (2024). Estimation of time delay functions for design of traffic systems. *Examples and Counterexamples*, 6, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.exco.2024.100151>
- Hosseini, S., & Al Khaled, A. (2021). Freight flow optimization to evaluate the criticality of intermodal surface transportation system infrastructures. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107522. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107522>
- Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2011). Hub location-allocation in intermodal logistic networks. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 213–230. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.017>
- Li, L., Wang, J., Wang, H., Jin, X., & Du, L. (2023). Intermodal transportation hub location optimization with government subsidies under the Belt and Road Initiative. *Ocean & Coastal Management*, 231, 106414. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106414>
- Makarova, I., Serikkaliyeva, A., Gubacheva, L., Mukhametdinov, E., Buyvol, P., Barinov, A., Shepelev, V., & Mavlyautdinova, G. (2023). The role of multimodal transportation in ensuring sustainable territorial development: Review of risks and prospects. *Sustainability*, 15(7), 6309. <https://doi.org/10.3390/su15076309>
- Medić, N., Anišić, Z., Lalić, B., Marjanović, U., & Brezocnik, M. (2019). Hybrid fuzzy multi-attribute decision making model for evaluation of advanced digital technologies in manufacturing: Industry 4.0 perspective. *Advances in Production Engineering and Management*, 14(4), 483–493. <https://doi.org/10.14743/apem2019.4.343>
- Nekhoroshkov, V., Vakulenko, S., Kurenkov, P., Nekhoroshkov, E., Deruzhinskiy, G., Ignatenko, A., Aroshidze, A., Astafiev, A., Seryapova, I., & Solskaya, I. (2022). Optimization of the international multimodal container transportation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 114, 103–114. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.9>
- Nikolaou, P., & Dimitriou, L. (2024). Temporal integration of the spatial autoregressive model for analyzing European multimodal freight transport demand. *Multimodal Transportation*, 3(3), 100149. <https://doi.org/10.1016/j.multra.2024.100149>
- Peng, Z., Jia, P., Jin, L., Guo, Z., & Shan, W. (2024). Stable container-route matching in multimodal transport: A case of Yangtze River Economic Belt. *Computers & Industrial Engineering*, 192, 110218. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110218>
- Real, L. B., Contreras, I., Cordeau, J.-F., de Camargo, R. S., & de Miranda, G. (2021). Multimodal hub network design with flexible routes. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 146, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102188>
- Samuelson, P. A. (1952). Spatial price equilibrium and linear programming. *The American Economic Review*, 42(3), 283–303.
- Wang, Z., Zhang, D., Tavasszy, L., & Fazi, S. (2023). Integrated multimodal freight service network design and pricing with a competing service integrator and heterogeneous shipper classes. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 179, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103290>
- Zhang, R. (2020). The role of the transport sector in energy transition and climate change mitigation: Insights from an integrated assessment model. In J. Zhang (Ed.), *Transport and Energy Research* (pp. 15–30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815965-1.00002-8>
- Zweers, B. G., & van der Mei, R. D. (2022). Minimum costs paths in intermodal transportation networks with stochastic travel times and overbookings. *European Journal of Operational Research*, 300(1), 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.042>

References

- Agamez-Ariasa, A. del M., & Moyano-Fuentes, J. (2017). Intermodal transport in freight distribution: a literature review. *Transport Reviews*, 37(6), 782–807. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297868>
- Alumur, S., & Kara, B. Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art. *European Journal of Operational Research*, 190(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.008>
- Basallo-Triana, M. J., Vidal-Holguín, C. J., & Bravo-Bastidas, J. J. (2021). Planning and design of intermodal hub networks: A literature review. *Computers & Operations Research*, 136, 105469. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105469>
- Battilani, C., Galli, G., Arecco, S., Casarino, B., Granero, A., Lavagna, K., Varna, R., Ventura, M., Revetria, R., & Damiani, L. (2022). Business process re-engineering in public administration: The case study of Western Ligurian Sea Port Authority. *Sustainable Futures*, 4, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2022.100065>

- Boyce, D. E., Janson, B. N., & Eash, R. W. (1981). The effect on equilibrium trip assignment of different link congestion functions. *Transportation Research Part A: General*, 15(3), 223–232. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(81\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0191-2607(81)90003-0)
- Branco, J. E. H., Bartholomeu, D. B., Junior, P. N. A., & Filho, J. V. C. (2022). Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the Brazilian's transportation network: An application of a network equilibrium model. *Transport Policy*, 124, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.03.011>
- Bröcker, J. (2021). Computable general equilibrium analysis in transportation economics. *International encyclopedia of transportation*, 520–526. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10096-X>
- de Jong, G., Vierth, I., Tavasszy, L., & Ben-Akiva, M. (2013). Recent developments in national and international freight transport models within Europe. *Transportation*, 40(2), 347–371. <http://doi.org/10.1007/s11116-012-9422-9>
- Enke, S. (1951). Equilibrium among spatially separated markets: Solution by electric analogue. *Econometrica*, 19(1), 40–47. <https://doi.org/10.2307/1907907>
- Fareed, A. G., De Felice, F., Forcina, A., & Petrillo, A. (2024). Role and applications of advanced digital technologies in achieving sustainability in multimodal logistics operations: A systematic literature review. *Sustainable Futures*, 8, 100278. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100278>
- Hossam, N., & Gazder, U. (2024). Estimation of time delay functions for design of traffic systems. *Examples and Counterexamples*, 6, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.exco.2024.100151>
- Hosseini, S., & Al Khaled, A. (2021). Freight flow optimization to evaluate the criticality of intermodal surface transportation system infrastructures. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107522. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107522>
- Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2011). Hub location-allocation in intermodal logistic networks. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 213–230. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.017>
- Li, L., Wang, J., Wang, H., Jin, X., & Du, L. (2023). Intermodal transportation hub location optimization with government subsidies under the Belt and Road Initiative. *Ocean & Coastal Management*, 231, 106414. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106414>
- Makarova, I., Serikkaliyeva, A., Gubacheva, L., Mukhametdinov, E., Buyvol, P., Barinov, A., Shepelev, V., & Mavlyautdinova, G. (2023). The role of multimodal transportation in ensuring sustainable territorial development: Review of risks and prospects. *Sustainability*, 15(7), 6309. <https://doi.org/10.3390/su15076309>
- Medić, N., Anišić, Z., Lalić, B., Marjanović, U., & Brezocnik, M. (2019). Hybrid fuzzy multi-attribute decision making model for evaluation of advanced digital technologies in manufacturing: Industry 4.0 perspective. *Advances in Production Engineering and Management*, 14(4), 483–493. <https://doi.org/10.14743/apem2019.4.343>
- Nekhoroshkov, V., Vakulenko, S., Kurenkov, P., Nekhoroshkov, E., Deruzhinskiy, G., Ignatenko, A., Aroshidze, A., Astafiev, A., Seryapova, I., & Solskaya, I. (2022). Optimization of the international multimodal container transportation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 114, 103–114. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.9>
- Nikolaou, P., & Dimitriou, L. (2024). Temporal integration of the spatial autoregressive model for analyzing European multimodal freight transport demand. *Multimodal Transportation*, 3(3), 100149. <https://doi.org/10.1016/j.multra.2024.100149>
- Osintsev, N. A., & Rakhmangulov, A. N. (2025). *Ustoychivoe razvitie logisticheskikh tsepey gruzopotokov [Sustainable development of logistics chains of cargo flows]*. Moscow: Infra-M Publ., 303. (In Russ.)
- Peng, Z., Jia, P., Jin, L., Guo, Z., & Shan, W. (2024). Stable container-route matching in multimodal transport: A case of Yangtze River Economic Belt. *Computers & Industrial Engineering*, 192, 110218. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110218>
- Real, L. B., Contreras, I., Cordeau, J.-F., de Camargo, R. S., & de Miranda, G. (2021). Multimodal hub network design with flexible routes. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 146, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102188>
- Samuelson, P. A. (1952). Spatial price equilibrium and linear programming. *The American Economic Review*, 42(3), 283–303.
- Shirov, A. A., Sapova, N. N., Uzyakova, E. S., & Uzyakov, R. M. (2021). Comprehensive Forecast of Demand for Inter-regional Rail Freight Transport. *Ekonomika Regiona [Economy of Region]*, 17(1), 1–15. <http://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-1> (In Russ.)
- Wang, Z., Zhang, D., Tavasszy, L., & Fazi, S. (2023). Integrated multimodal freight service network design and pricing with a competing service integrator and heterogeneous shipper classes. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 179, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103290>
- Zhang, R. (2020). The role of the transport sector in energy transition and climate change mitigation: Insights from an integrated assessment model. In J. Zhang (Ed.), *Transport and Energy Research* (pp. 15–30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815965-1.00002-8>
- Zweers, B. G., & van der Mei, R. D. (2022). Minimum costs paths in intermodal transportation networks with stochastic travel times and overbookings. *European Journal of Operational Research*, 300(1), 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.042>

Информация об авторах

Крылатов Александр Юрьевич — доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет; ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук (РАН); Scopus Author ID: 56104299500; <https://orcid.org/0000-0002-6634-1313> (Российская

Федерация, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9; Российская Федерация, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; e-mail: a.krylatov@spbu.ru, aykrylatov@yandex.ru).

Федорова Марина Андреевна — бакалавр, Санкт-Петербургский государственный университет (Российская Федерация, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9; e-mail: mfedor1532@gmail.com).

Раевская Анастасия Павловна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет; Scopus Author ID: 57192959034; <https://orcid.org/0000-0002-6240-177X> (Российская Федерация, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9; e-mail: a.raevskaya@spbu.ru).

About the authors

Alexander Yu. Krylatov — Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Professor, Saint Petersburg State University; Leading Research Associate, Solomenko Institute of Transport Problems of RAS; Scopus Author ID: 56104299500; <http://orcid.org/0000-0002-6634-1313> (7-9, Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation; 13, 12 line, Vasilevsky Ostrov, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: a.krylatov@spbu.ru, aykrylatov@yandex.ru).

Marina A. Fedorova — Bachelor, Saint Petersburg State University (7-9, Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: mfedor1532@gmail.com).

Anastasiya P. Raevskaya — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Associate Professor, Saint Petersburg State University; Scopus Author ID: 57192959034; <http://orcid.org/0000-0002-6240-177X> (7-9, Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: a.raevskaya@spbu.ru).

Использование средств ИИ

Авторы заявляют о том, что при написании этой статьи не применялись средства генеративного искусственного интеллекта.

Use of AI tools declaration

All authors declare that they have not used Artificial Intelligence (AI) tools for the creation of this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Дата поступления рукописи: 16.12.2024.

Прошла рецензирование: 14.02.2025.

Принято решение о публикации: 26.03.2025.

Received: 16 Dec 2024.

Reviewed: 14 Feb 2025.

Accepted: 26 Mar 2025.