

УДК 656.27

Совершенствование транспортных технологических процессов железнодорожной сети

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Совершенствование транспортных технологических процессов железнодорожной сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 178–186. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-178-186

Аннотация

Цель: повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной сети за счет взаимовыгодного взаимодействия линий различных категорий. **Методы:** применены методы теории управления, системного анализа, синтеза и математического моделирования. **Результаты:** усовершенствован инструментарий определения оптимального расположения логистических центров методом центра тяжести за счет учета критериев минимизации транспортных затрат, категории, специализации и социальной значимости линии, а также определения весовых значений критериев с использованием метода анализа иерархий. **Практическая значимость:** предлагаемый инструментарий позволяет определить местоположение логистического центра на пересечении интенсивных и малоинтенсивных железнодорожных линий с учетом критериев минимизации транспортных затрат, специализации линии и социальной значимости линий для рассматриваемых регионов.

Ключевые слова: малоинтенсивные железнодорожные линии, интенсивные линии, метод центра тяжести, метод анализа иерархий.

Введение

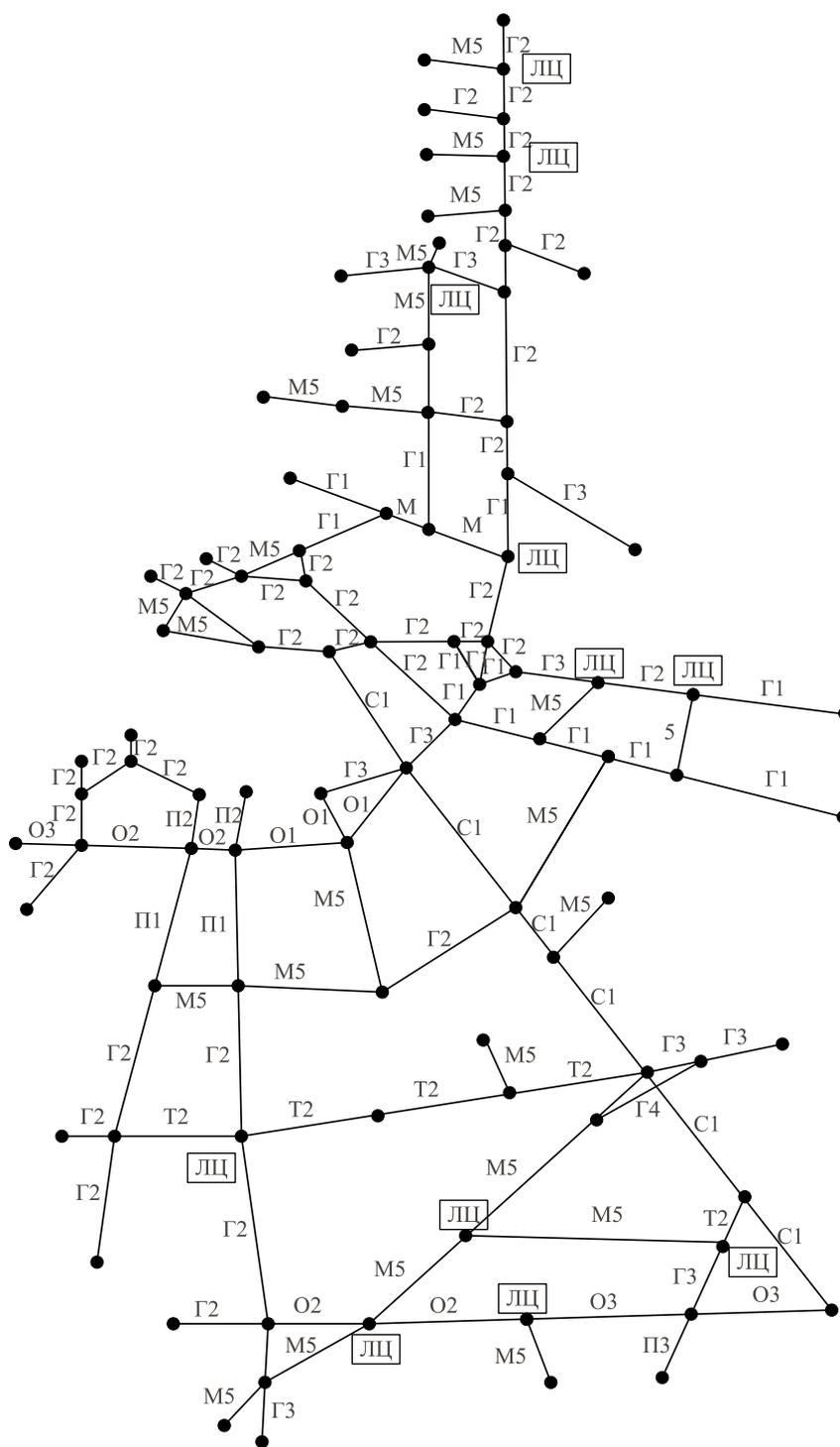
В соответствии с действующими нормативными документами железнодорожная транспортная сеть имеет следующую специализацию линий [1]: высокоскоростные; скоростные; с преимущественно пассажирским движением; с преимущественно грузовым движением; особо грузонапряженные; с тяжеловесным грузовым движением; малоинтенсивные линии, а также классы с 1-го до 5-го, в зависимости от приведенной грузонапряженности и технической скорости.

В общем виде железнодорожную транспортную сеть можно представить в виде графика (рис. 1), состоящего из железнодорожных узлов и линий, имеющих буквенное

обозначение специализации линии и цифровое обозначение класса железнодорожной линии.

В результате анализа и обобщения работ по железнодорожным линиям различных классов и специализации [2–9] систематизированы научные исследования и представлены в виде матрицы (рис. 2).

На основании анализа следует, что требуют проведения дополнительных исследований малоинтенсивных линий (МИЛ). Под МИЛ понимается железнодорожный участок с низкими размерами движения грузовых и пассажирских поездов (не более 8 пар поездов/сутки и приведенная грузонапряженность менее



Условные обозначения:

Высокоскоростная железнодорожная линия (В); Скоростная железнодорожная линия (С); Железнодорожная линия с преимущественно пассажирским движением (П); Железнодорожная линия с преимущественно грузовым движением (Г); Особо грузонапряженная железнодорожная линия (О); Железнодорожная линия с тяжеловесным грузовым движением (Т); Малоинтенсивные линии (М); транспортные узлы — ●; железнодорожные линии — — ; ЛЦ — логистические центры, 1–5 классы железнодорожных линий.

Рис. 1. Железнодорожная транспортная сеть, состоящая из линий различных классов и специализации

Факторы Специализация линий	Политика	Экономика	Техника	Технологии	Социум	Параметры специализации	Математические модели и методы транспортно- технологических процессов	Теоретические основы
Высокоскоростные	■	■	■	■	■	■	■	■
Скоростные	■	■	■	■	■	■	■	■
С преимущественно пассажирским движением	■	■	■	■	■	■	■	■
С тяжеловесным грузовым движением	■	■	■	■	■	■	■	■
Особо грузонапряженные	■	■	■	■	■	■	■	■
С тяжеловесным грузовым движением	■	■	■	■	■	■	■	■
Малонитенсивные линии	■	■	■	■	■	■	■	■
Критерии	Законодательство, нормативные акты, тарифы	Объем инвестиций, стоимость услуг, доходы от перевозки грузов и пассажиров, уровень занятости населения	Производительность, эффективность, надежность, долговечность, простота использования	Эффективность, экономичность, удобство использования, экологичность	Уровень доходов, возрастная структура, плотность населения, транспортная мобильность населения	Грузооборот, пассажирооборот, скорость движения поездов, количество поездов	Математическое, имитационное моделирование	Концепции, подходы, закономерности

Степень изученности: ■ высокая ■ средняя ■ низкая

Рис. 2. Матрица исследований в области железнодорожных линий различной специализации

5 млн т-км брутто/км в год), при этом затраты на функционирование линии больше, чем получаемый доход от всех видов деятельности, либо затраты и доходы равны.

В связи с тем, что линия является убыточной или самоокупаемой, можно считать ее функционирование неэффективным. Эффективным же функционирование линии можно считать, если она приносит чистый доход. При этом доход может быть получен как от перевозочной деятельности, так и от непрофильной деятельности (предоставления прочих услуг).

Предлагается в рамках данного исследования декомпозировать специализацию железнодорожных линий на две категории:

линии других специализаций (ЛДС) и малонитенсивные (МИЛ). Декомпозиция вызвана тем, что МИЛ и ЛДС испытывают различные (зачастую противоречивые) проблемы функционирования. В этой связи объектом исследования являются пункты их стыкования.

Представленная декомпозиция упрощает выбор инструментария решения задач идентификации и управления перевозочными процессами для обеспечения эффективного функционирования железнодорожной транспортной сети.

К проблемам функционирования ЛДС относятся: потребность в больших объемах пропускной способности и высокой степени надежности инфраструктуры; большое

негативное воздействие на экологию; необходимость обеспечения высокого уровня безопасности объектов транспортной инфраструктуры; потребность в большом количестве квалифицированного персонала.

К проблемам функционирования МИЛ относятся: низкие размеры движения пассажирских и грузовых поездов; низкая грузо-напряженность; высокая социальная значимость линии для проживающего населения; большой срок окупаемости инвестиционных проектов ввиду низкой доходности линии; убыточность линий; кадровые проблемы; существенные затраты на содержание инфраструктуры.

Перечисленные проблемы функционирования ЛДС и МИЛ можно устранить за счет развития логистических центров на пересечении линии различных категорий, для повышения эффективности процесса перегрузки грузов и сокращения времени простоя подвижного состава, что позволит формировать новые услуги и продукты, к которым относятся: экспресс-перевозки в труднодоступные регионы, контейнерные перевозки, доставка грузов от двери до двери. Реализация новых услуг позволит привлечь дополнительных клиентов и повысить эффективность функционирования МИЛ.

Логистические центры на пересечении линии различных категорий позволяют консолидировать грузы с других видов транспорта, в том числе в адрес железнодорожных станций, расположенных на МИЛ, что позволит использовать транзитный потенциал таких линий.

1. Инструментарий определения расположения логистических центров

Наиболее востребованный инструментарий определения расположения логистических центров включает следующие методы:

1. Метод центра тяжести, основанный на том, что грузопоток между двумя точками пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.
2. Метод сетевого анализа для моделирования транспортных сообщений и определения оптимального распределения ресурсов с учетом сетевой структуры.
3. Определение оптимального местоположения логистического центра на основе использования пространственных данных, картографии и геоинформационных систем.

В результате исследования определен адаптивный метод для определения расположения логистических центров реализации транспортных технологических процессов железнодорожной сети. В этой связи предлагается усовершенствовать метод центра тяжести за счет учета нескольких критериев, таких как минимизация транспортных затрат, категории и специализации и социальной значимости линии.

2. Задача определения оптимального расположения опорного логистического центра в условиях взаимодействия линий различных категорий

Решение задачи рассмотрим на примере. Имеется три потенциальных местоположения для опорного логистического центра ОЛЦ (А, В, С), расположенных в разных регионах с различной транспортной доступностью (рис. 3).

Опорный логистический центр (ОЛЦ) представляет собой комплекс сооружений и устройств, предназначенный для хранения, обработки, переработки, распределения грузов и оптимизации транспортных процессов для снижения затрат на перевозку.

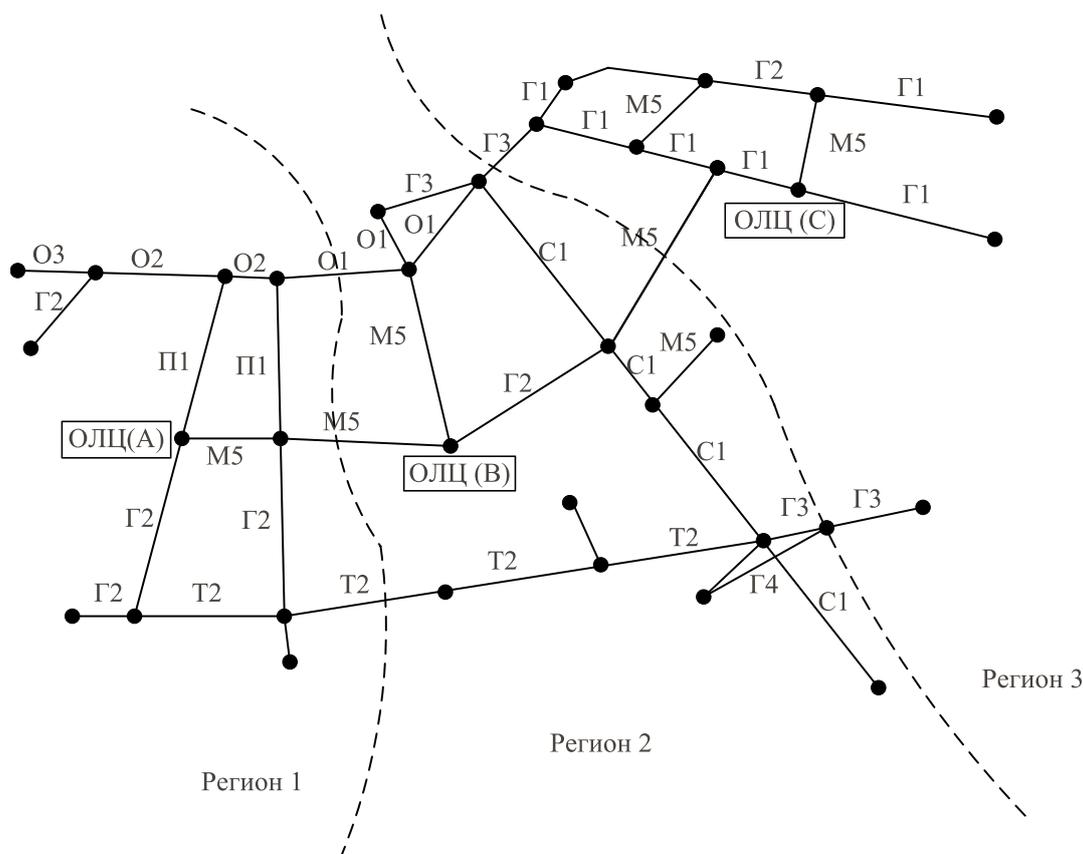


Рис. 3. Схема расположения потенциальных опорных логистических центров (ОЛЦ)

Необходимо найти наилучшее расположение ОЛЦ с учетом критериев транспортных затрат на переработку 1 т груза, категории и специализации примыкающих железнодорожных линий, а также социальной значимости линии.

Решение задачи осуществляется поэтапно.

Этап 1. Исходные данные представлены в табл. 1.

Этап 2. Определение значимости ОЛЦ на основе усовершенствованного метода центра тяжести.

Для усовершенствования метода центра тяжести и решения задачи векторной оптимизации увеличено количество учитываемых критериев, а также предложено определять их весовые коэффициенты с помощью метода анализа иерархий.

Значимость каждого из ОЛЦ определяется по выражению:

$$X_{\text{ОЛЦ}} = k_T \cdot T + k_K \cdot K + k_C \cdot C + k_A \cdot A \rightarrow \min, \quad (1)$$

где k_T, k_K, k_C, k_A — весовые значения каждого из критериев.

Для определения весовых значений критериев существуют математические методы экспертных оценок, анализа иерархий, машинного обучения, нечеткой логики, генетических алгоритмов и другие.

Этап 3. Определение весовых значений критериев.

Для определения весовых значений критериев выбран метод анализа иерархий (МАИ) [10], позволяющий структурировать сложные задачи, разбивая их на более мелкие

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные

ОЛЦ	Транспортные затраты на переработку 1 т груза, руб./т (Т)	Категории примыкающих железнодорожных линий (в диапазоне от 1 до 5) (К)	Специализация примыкающих железнодорожных линий (в диапазоне от 1 до 7) (С)	Социальная значимость линии (в диапазоне от 1 до 10) (А)
А	84	2,4,5,5	3,2,7,7	8
В	84	5,5,2	7,7,3	4
С	84	2,2,5	2,2,7	7

элементы, устанавливая иерархию критериев и альтернатив. МАИ позволяет выполнять вычисления в условиях неопределенности и нечеткости экспертных оценок и исходных данных. Выбранный метод определения весовых значений критериев позволяет вносить корректирующие воздействия в иерархию при изменении внешних условий и появлении дополнительных критериев.

Таким образом, матрица попарных сравнений критериев для ОЛЦ, составленная с использованием метода экспертных оценок, имеет вид:

$$E_{\text{лц}} = \begin{matrix} & T & K & C & A \\ T & 1 & 3 & 3 & 4 \\ K & 1/3 & 1 & 2 & 5 \\ C & 1/3 & 1/2 & 1 & 6 \\ A & 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1 \end{matrix}$$

Собственный вектор матрицы [10]:

$$V = (7,856; 4,203; 3,209; 1).$$

Сумма элементов матрицы:

$$W_s = \begin{pmatrix} 11 \\ 8,333 \\ 7,833 \\ 1,617 \end{pmatrix}$$

$$S = 11 + 8,333 + 7,833 + 1,617 = 28,783.$$

Приближенное значение главного собственного вектора:

$$W = \begin{pmatrix} 0,382 \\ 0,29 \\ 0,272 \\ 0,0562 \end{pmatrix}.$$

Приближенное значение максимального собственного значения:

$$\lambda_{\text{max}} = E_{\text{лц}} \cdot W;$$

$$\lambda_{\text{max}} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 6 \\ 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,382 \\ 0,29 \\ 0,272 \\ 0,0562 \end{pmatrix} = 4,672.$$

Нормированный собственный вектор:

$$W = (0,382; 0,29; 0,272; 0,0562);$$

$$\lambda_{\text{max}} = 4,672.$$

Согласованность суждения оценивается индексом однородности:

$$UC = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} = \frac{4,672 - 4}{4 - 1} = 0,224.$$

Отношение однородности:

$$OC = \frac{UC}{M(uo)} = \frac{0,224}{0,9} = 0,249.$$

где $M(uo)$ — среднее значение индекса однородности случайным образом составленной

ТАБЛИЦА 2. Значения индекса однородности

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$M(uo)$	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

матрицы парных сравнений, основанное на экспериментальных данных в соответствии с табл. 2.

На основе иерархического синтеза путем последовательного определения вектора приоритетов альтернатив W , относительно элементов $E_{\text{ЛЦ}}$, находящихся на всех иерархических уровнях проводится в направлении от нижних уровней к верхним с учетом конкретных связей между элементами, принадлежащими различным уровням и определяются весовые значения критериев, таким образом, получены следующие весовые значения критериев: $T = 0,382$; $K = 0,29$; $C = 0,272$; $A = 0,0562$.

Этап 4. Определение общего веса каждого местоположения ОЛЦ.

По выражению (1) определим общий вес каждого местоположения ОЛЦ:

$$A = 42,344;$$

$$B = 40,416;$$

$$C = 38,082.$$

По усовершенствованному методу центра тяжести с учетом критериев транспортных затрат на переработку, категории, специализации и социальной значимости линии ОЛЦ (C) является оптимальным в рассматриваемых условиях.

Заключение

На основании проведенных исследований размещение опорных логистических центров на пересечении ЛДС и МИЛ целесообразно при оптимизации транспортных затрат и использовании мультимодальных логистических сервисов.

ЛДС могут использоваться для транспортировки больших объемов грузов, в то время как транзитные МИЛ могут использоваться для вариантных маршрутов доставки в условиях проведения ремонтных работ и технологических окон.

Расположение ОЛЦ на пересечении ЛДС и МИЛ позволяет гибко реагировать на изменения спроса в транспортной сфере. Размещение ЛЦ на пересечении ЛДС и МИЛ позволяет обеспечить эффективное функционирование логистических систем и железнодорожной транспортной сети на основе привлечения объемов перевозок на МИЛ.

Разработан инструментарий нахождения наилучшего расположения ОЛЦ на основе критериев транспортных затрат, категории, специализации и социальной значимости железнодорожных линий с использованием усовершенствованного метода центра тяжести решения задачи векторной оптимизации и определения весовых значений критериев на основе метода анализа иерархий.

Библиографический список

1. Методика классификации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» № 551р от 04.03.2015.
2. Вакуленко С. П., Колин А. В., Евреенова Н. Ю. и др. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий. Монография; под ред. С. П. Вакуленко. Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)). М.: ВИНТИ РАН, 2018. 218 с.
3. Шарапов С. Н., Лялько М. В. Классификация и специализация железнодорожных линий —

основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60.

4. Терещнев Л. В. Малодеятельные железнодорожные линии или неинтенсивная экономика // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 6 (19). С. 20–24.

5. Вакуленко С. П. Высокоскоростная магистраль Санкт-Петербург — Москва: проблемы и перспективы / Вакуленко С. П., Колин А. В. // Железнодорожный транспорт. 2006. № 6. С. 47–51.

6. Ковалев К. Е. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, О. А. Медведь // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 2. С. 150–161. DOI: 10.20295/2412–9186–2022–8–2–150–161.

7. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 2. С. 252–267. DOI: 10.20295/2412–9186–2021–7–2–252–267.

8. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 402 LNNS. P. 701–709. DOI: 10.1007/978–3–030–96380–4_76.

9. Kovalev K. E. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742–6596/2131/3/032008.

10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Дата поступления: 30.01.2023

Решение о публикации: 22.02.2024

Контактная информация:

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук; kovalev@pgups.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — докт. техн. наук, доцент; novichihin@bk.ru

Improving transport technological processes of the railway network

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Improving transport technological processes of the railway network // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 178–186. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-178-186.

Abstract

Purpose: To increase the efficiency of the railway transport network through the mutually beneficial interaction of lines of various categories. **Methods:** Methods of control theory, system analysis, synthesis and mathematical modeling were used. **Results:** The tools for determining the optimal location of logistics centers using the center of gravity method have been improved by taking into account the criteria for minimizing transport costs, category, specialization and social significance of the line, as well as determining the weight values of the criteria using the hierarchy analysis method. **Practical significance:** The proposed

tools allow you to determine the location of the logistics center at the intersection of intensive and low-intensity railway lines, taking into account the criteria for minimizing transport costs, the specialization of the line and the social significance of the lines for the regions under consideration.

Keywords: low-intensity railway lines, intensive lines, center of gravity method, hierarchy analysis method.

References

1. Metodika klassifikacii zhelezodorozhnyh linij OAO "RZhD", utverzhennaja rasporyazheniem OAO "RZhD" № 551r ot 04.03.2015. (In Russian)
2. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Ju. i dr. Jefferktivnost' jekspluatacii i obsluzhivanija malointensivnyh zhelezodorozhnyh linij. Monografija; pod red. S. P. Vakulenko. Rossijskij universitet transporta (RUT (MIIT)). M.: VINITI RAN, 2018. 218 s. (In Russian)
3. Sharapov S. N., Ljal'ko M. V. Klassifikacija i specializacija zhelezodorozhnyh linij — osnova optimizacii jekspluatacionnyh rashodov // Zhelezodorozhnyj transport. 2016. № 7. S. 50–60. (In Russian)
4. Terebnev L. V. Malodejatel'nye zhelezodorozhnye linii ili neintensivnaja jekonomika // Transport Rossijskoj Federacii. 2008. № 6 (19). S. 20–24. (In Russian)
5. Vakulenko S. P. Vysokoskorostnaja magistral' Sankt-Peterburg — Moskva: problemy i perspektivy / Vakulenko S. P., Kolin A. V. // Zhelezodorozhnyj transport. 2006. № 6. S. 47–51. (In Russian)
6. Kovalev K. E. Razrabotka mehanizmov povysheniya jefferktivnosti funkcionirovanija malointensivnyh zhelezodorozhnyh linij / K. E. Kovalev, A. V. Novichihin, O. A. Medved' // Avtomatika na transporte. 2022. T. 8. № 2. S. 150–161. DOI: 10.20295/2412–9186–2022–8–2–150–161. (In Russian)
7. Kovalev K. E. Kompleksnyj sinergetiko-indikatornyj podhod k upravleniju processami perevozok na intensivnyh i malodejatel'nyh liniyah / K. E. Kovalev, A. V. Novichihin // Avtomatika na transporte. 2021. T. 7. № 2. S. 252–267. DOI: 10.20295/2412–9186–2021–7–2–252–267. (In Russian)
8. Kovalev K., Novichihin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. T. 402 LNNS. S. 701–709. DOI: 10.1007/978–3–030–96380–4_76.
9. Kovalev K. E. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichihin // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742–6596/2131/3/032008.
10. Saati T. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij. M.: Radio i svjaz', 1993. 278 s. (In Russian)

Received: 30.01.2023

Accepted: 22.02.2024

Author's information:

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering;

kovalev_kostia@mail.ru

Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novichihin@bk.ru