



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 656.073.235

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276

EDN: <https://elibrary.ru/bpxeol>



СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ

О. В. Москвичев✉, Е. Е. Москвичева

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Формирование в Российской Федерации опорной сети узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров с организацией на ее основе скоростного грузового движения по расписанию требует разработки научно обоснованных предложений по созданию или модернизации соответствующей региональной транспортно-логистической инфраструктуры. Одной из важнейших задач при реализации данного проекта в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов является правильное обоснование количества и выбора мест размещения транспортно-логистических центров опорной сети на территории РФ, а также мест локаций транспортно-логистических центров в субъектах РФ.

Материалы и методы. В работе выполнены оценочный анализ классических методов нахождения оптимальных центров на плоскости и некоторое построение математических количественных моделей оптимального размещения транспортно-логистических объектов.

Результаты. Согласно данным оценочного анализа предложена научно обоснованная концепция системного подхода к вопросам рационального проектирования и размещения элементов транспортно-логистической инфраструктуры, в частности опорной сети узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров как части новой высокоэффективной транспортно-логистической инфраструктуры РФ и ее международных транспортных коридоров.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследования могут быть использованы для научно обоснованного принятия решений в инвестиционных проектах, связанных с развитием транспортно-логистической инфраструктуры как регионального, так и федерального уровня: обоснования мест размещения и технологических мощностей объектов транспортно-логистической инфраструктуры; определения потребности развития объектов региональной транспортно-логистической инфраструктуры с учетом устранения их лимитирующих узких мест; реализации поэтапного комплекса мероприятий по модернизации существующего терминально-логистического комплекса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: контейнерно-транспортная система, размещение транспортных объектов, математическая модель, кластерный анализ, контейнерные перевозки

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Москвичев О. В., Москвичева Е. Е. Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 267–276. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276>.

✉ moskvichev063@yandex.ru (О. В. Москвичев)

© Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., 2022



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 656.073.235

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276

EDN: <https://elibrary.ru/bpxeol>



SYSTEM ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF PLACEMENT OF TRANSPORT AND LOGISTICS FACILITIES OF DIFFERENT LEVELS

Oleg V. Moskvichev✉, Elena E. Moskvicheva

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The formation of an overarching network of nodal freight multimodal transport and logistics centres in the Russian Federation and organisation of high-speed freight traffic on schedule on its basis requires the development of science-based proposals for the creation or modernisation of the corresponding regional transport and logistics infrastructure. One of the most important tasks in the implementation of this project in the context of limited investment resources is the correct justification of the number and choice of locations for the transport and logistics centres of the overarching network in the Russian Federation, as well as the locations of transport and logistics centres in the constituent entities of the Russian Federation.

Materials and methods. This article provides an evaluation analysis of the classical methods for finding optimal centres on a plane and some construction of mathematical quantitative models for the optimal placement of transport and logistics facilities.

Results. According to the evaluation analysis, the authors have drafted a scientifically based concept of a systematic approach to the issues of rational design and placement of elements of transport and logistics infrastructure, in particular, the overarching network of nodal freight multimodal transport and logistics centres, as part of a new highly efficient transport and logistics infrastructure of the Russian Federation and its international transport corridors.

Discussion and conclusion. The obtained results of the study can be used for scientifically based decision-making in investment projects related to the development of transport and logistics infrastructure at both regional and federal levels: substantiation of locations and technological capacities of transport and logistics infrastructure facilities; determining the need for the development of objects of the regional transport and logistics infrastructure, while eliminating their bottlenecks; implementation of a phased set of measures to modernise the existing terminal and logistics complex.

KEYWORDS: container transport system, placement of transport facilities, mathematical model, cluster analysis, containerized shipment

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Moskvichev O.V., Moskvicheva E.E. System analysis of mathematical models of placement of transport and logistics facilities of different levels. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):267-276. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276>.

✉ moskvichev063@yandex.ru (O.V. Moskvichev)

© Moskvichev O.V., Moskvicheva E.E., 2022

Введение. Формирование в Российской Федерации опорной сети узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров (ТЛЦ) с организацией на ее основе скоростного грузового движения по расписанию требует разработки научно обоснованных предложений по созданию или модернизации соответствующей региональной транспортно-логистической инфраструктуры. Одной из важнейших задач при реализации данного проекта в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов является правильное обоснование количества и выбора мест размещения ТЛЦ опорной сети на территории РФ, а также мест локации ТЛЦ в субъектах РФ. При этом следует учитывать не только необходимость решения актуальных задач реализации транзитного потенциала страны, развития экспорта транспортных услуг, но и повышение уровня экономической связанности территории РФ. Очевидно, что сетевой подход к формированию инфраструктуры ТЛЦ должен предусматривать реализацию единого научно обоснованного системного подхода к вопросам размещения транспортно-логистической инфраструктуры различного уровня. Это обуславливает необходимость проведения оценочного анализа существующих методов определения оптимальных мест размещения транспортно-логистических объектов с последующей рекомендацией метода для сетевого подхода к формированию инфраструктуры ТЛЦ.

Материалы и методы. Проблемы, связанные с разработкой стратегических решений по развитию терминально-логистической инфраструктуры, характеризуются высокой сложностью из-за большой размерности и многовариантности решаемой задачи.

Проанализируем некоторые классические задачи, связанные с определением оптимального расположения точек на плоскости и реализующие алгоритмы, которые можно использовать в более общей постановке задачи оптимизации размещения транспортно-логистических объектов [1]:

1) Для заданных n точек найти один геометрический центр, сумма расстояний от которого до этих точек минимальна.

Решением задачи служит точка Торичелли [2]. При этом для $n \geq 5$ задача решается приближенно.

2) Для заданных k точек найти центр, лежащий на заданной прямой, чтобы суммарное расстояние от центра до точек было минимальным.

Решением является точка прямой l , для которой сумма проекций на прямую k единичных векторов, направленных из нее в данные точки, равна нулю. Если из данных k точек есть хотя бы одна, не лежащая на прямой l , то задача имеет единственное решение. Если $k \geq 3$, то такая точка, собственно говоря, не строится геометрически, а находится приближенно

(вычисление ее координаты приводит к уравнению высокой степени). Известно большое число эвристических алгоритмов, применяемых для решения данной задачи.

3) Для заданных n точек найти такую сеть дорог, чтобы общая длина дорог, соединяющая точки, была минимальной. Решение — сеть Штейнера [2]. При этом для $n \geq 5$ задача решается приближенно (перебором вариантов).

Таким образом, рассмотренные классические математические задачи определяют оптимальные свойства некоторых точек при заданном их множестве. Решение задач на основе подобных математических моделей, даже для небольшого числа центров, показывает высокую сложность вычислений. Кроме того, в реализующем алгоритме выбор центра является свободным на некоторой территории, что не соответствует основному требованию при создании транспортно-логистической инфраструктуры, предполагающему максимальную близость к магистральным транспортным (железнодорожным, водным, автодорожным) коммуникациям.

Анализ научных работ, посвященных проблеме выбора мест размещения транспортно-логистических объектов различного уровня, показывает, что эта задача принадлежит к более общей математической задаче оптимального выбора мест размещения центров обслуживания при заданных объектах обслуживания. При этом оптимальное решение размещения центров обслуживания потребителей зависит от выбранных критериев, принятых ограничений и основывается на применении различных подходов, среди которых можно отметить метод ветвей и границ, методы динамического программирования, методы целочисленного программирования, вероятностные методы, различные эвристические методы и т. п. [3–7]. Например, в обзоре М. Л. Брандо и С. С. Чина [8] представлено более 50 различных моделей, которые можно использовать для решения задач выбора размещения центров обслуживания.

В целом задачи подобного типа можно классифицировать следующим образом [1, 9]:

1) Оптимизация размещения центров для обслуживания конечного числа заданных потребителей при условии, что центры могут располагаться в некоторых точках заданного конечного множества. В результате эту задачу можно рассматривать как оптимизационную задачу, где центры обслуживания могут быть расположены в вершинах графа, а расстояния измеряются по длинам ребер графа. При такой постановке получаем так называемую дискретную модель.

2) Оптимизация размещения центров для обслуживания конечного числа заданных потребителей при условии, что центры могут располагаться в произвольных точках некоторой заданной области. При этом центр обслуживания может быть расположен в

любой точке области, а потребитель располагается в заданных точках, что приводит к решению непрерывной модели в виде задачи нелинейного программирования большой размерности. Расстояние перевозки измеряется по вводимой метрике, например по евклидовой или иной.

3) Оптимизация размещения центров для обслуживания конечного числа потребителей при условии, что потребители и центры могут располагаться в произвольных точках заданной области (расстояние измеряется по вводимой метрике). Такая постановка приводит к решению непрерывной модели в виде задачи нелинейного программирования сверхбольшой размерности.

Покажем возможность разработки математической модели оптимального выбора мест размещения ТЛЦ опорной сети в рамках подхода на основе модели математического программирования. Очевидно, что для решения такой задачи для всей территории РФ придется разбивать ее на определенные иерархические уровни. При этом необходимо определиться со средними статическими параметрами сети дорог и средними релевантными объемами перевозок грузов. В качестве центров (вершин сети перевозок) можно рассматривать субъекты РФ (области, республики и т. д.), а в качестве сети дорог лишь основные магистральные пути. Тогда можно поставить и решить задачу: найти места размещения ТЛЦ на всей территории страны, считая, что их количество много меньше, чем число субъектов (вершин). Здесь можно задать количество предполагаемых ТЛЦ или использовать ограничения на общий объем финансирования.

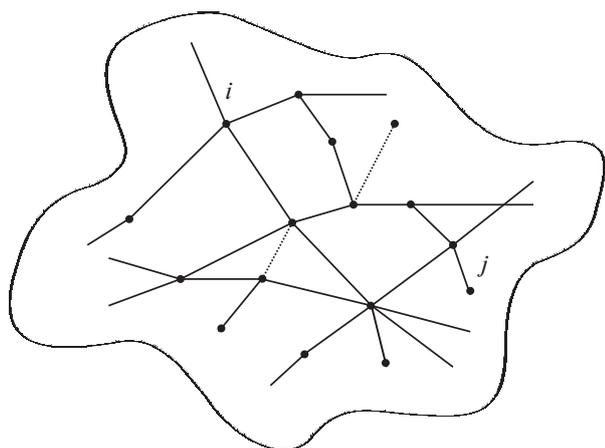


Рис. 1. Пункты (вершины) и неоднородная сеть дорог. Сплошная линия — железнодорожное сообщение, пунктирная — автомобильное

Fig. 1. Points (vertices) and heterogeneous road network. The solid line is rail traffic, the dotted line is road traffic

Решение такой задачи имеет оценочное значение, которое позволяет поставить и решать подобные задачи на нижних уровнях иерархии: для территории экономических округов, республик, областей. Сама задача оптимизации выбора размещения ТЛЦ должна обладать свойством подобия для постановок различного иерархического уровня. При этом решения на верхних уровнях дают лишь теоретические результаты, а не фактические проектные решения для построения физических ТЛЦ.

В целях получения единой математической модели ниже будем рассматривать некоторую ограниченную плоскую область, на которой задана сеть пунктов (вершин), соединенных неоднородными ребрами (одна- или двуправленными или двуправленными (рис. 1)).

Пункты (вершины), расположенные в рассматриваемой ограниченной области, описываются:

- 1) промышленные объекты;
- 2) города;
- 3) железнодорожные станции;
- 4) имеющиеся ТЛЦ.

Ребра графа описывают сеть железных и шоссейных дорог: пункты 1–4 определяются точками (вершинами графа) с заданными координатами; i — номер вершины; (x_i, y_i) — декартовы координаты. Ребра неоднородные. В каждой вершине i известен релевантный объем грузов. Обозначим его a_i . Данная величина включает как имеющиеся фактические объемы грузоперевозок, так и ожидаемые объемы на некоторый проектный период. Величина a_i отображает объем только собственно данной вершины без учета дополнительного объема грузопереработки, который образуется, если данная вершина будет ТЛЦ.

Известно расстояние перевозки грузов из точки i в точку j — c_{ij} . В простейшем случае c_{ij} — расстояние в километрах, но в реальных задачах c_{ij} может включать все трудности, возникающие при перевозке из i в j , а именно:

- 1) ограничения пропускной способности инфраструктуры из i в j ;
- 2) необходимость перевалки грузов — автомобиль — вагон и наоборот;
- 3) тарифы;
- 4) пробки на шоссейных дорогах и т. д.

Все это можно учесть в отдельной методике вычисления c_{ij} . Существуют методики определения c_{ij} по геоинформационным картам. В общем случае c_{ij} может зависеть от времени, графика движения поездов и др. Ниже будем считать, что c_{ij} известно и не зависит от времени, т. е. рассматривается статическая задача.

Предлагается экономико-математическая модель синтеза точек местонахождения ТЛЦ для некоторой территории (область, округ, республика, страна). Решить такую задачу — значит определить те точки i ,

которые и будут ТЛЦ. Пусть уже известно, сколько ТЛЦ должно быть в заданном районе — m .

Тогда задача ставится следующим образом: для заданного графа вершин и ребер найти такие вершины (всего их m), чтобы они в каком-либо оптимальном смысле покрывали все объемы грузопереработки всех узлов J ($j = \overline{1, n}$). Обозначим I — множество покрывающих вершин. Таким образом, I — подмножество вершин из J .

Существующие подходы для решения подобных задач используют методы оптимальных покрытий [10]. Вопрос о том, что некоторый узел j будет обслуживаться ТЛЦ i , не совсем связан с геометрической близостью пунктов i и j . Поэтому правильной ставить вопрос о мере c_{ij} , непосредственно учитывающей все многообразие факторов удобства обслуживания j -го узла i -м ТЛЦ. Это особенно проявляется при рассмотрении строительства ТЛЦ вблизи крупных городов. Поэтому c_{ij} это некоторая мера, выражающая общую экономическую эффективность того, что узел j обслуживается ТЛЦ i .

Введем управляемые переменные x_{ij} :

$x_{ij} = \{1\}$, если j -й узел будет обслуживаться i -м ТЛЦ;

$x_{ij} = \{0\}$ — в противном случае.

Матрица $X = \{x_{ij}\}$ — это решение. Матрица X содержит n строк и n столбцов, но так как $m < n$, некоторые строки состоят только из нулей.

Сформулируем некоторые ограничения на эти переменные и введем в рассмотрение целевую функцию $F(x_{ij})$, которая бы количественно выражала степень общей экономической эффективности от создания сети ТЛЦ именно при каждом решении $\{x_{ij}\}$.

Каждый узел j прикрепляется только к одному ТЛЦ из I , поэтому

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Если можно, чтобы узел i прикреплялся хотя бы к одному ТЛЦ, то

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1, j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

$X = \{x_{ij}\}$ представляет собой матрицу нулей и единиц. Согласно (1) допустимой будет такая матрица, в которой в каждом столбце j будет лишь одна единица. Например,

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Очевидно $m \leq n$. Поэтому строк, содержащих хотя бы одну единицу, будет $m < n$, остальные — нулевые.

Таким образом, если количество ТЛЦ задано, а именно m , то

$$\sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^n x_{ij} \right|_{0,1} = m, \quad (3)$$

где $|a|_{0,1}$ означает

$$|a|_{0,1} = \begin{cases} 0, & \text{если } a = 0; \\ 1, & \text{если } a > 0. \end{cases}$$

Видно, что матрица X может изображать допустимое решение, когда m заранее не задано. Тогда (3) можно убрать из рассмотрения.

Общий объем переработки грузов в i -м ТЛЦ складывается из объемов тех вершин J , которые обрабатываются i -м ТЛЦ. Он определяется как

$$A_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij}, i = \overline{1, m}.$$

Если необходимо, чтобы $A_{\min} \leq A_i \leq A_{\max}$, то возникают ограничения:

$$\sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \leq A_{\max}, i = \overline{1, m}; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \geq A_{\min}, i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведен пример решения задачи для $m = 2, n = 10$.

При разработке целевой функции следует отметить два подхода: интегральный и гарантирующий (минимаксный).

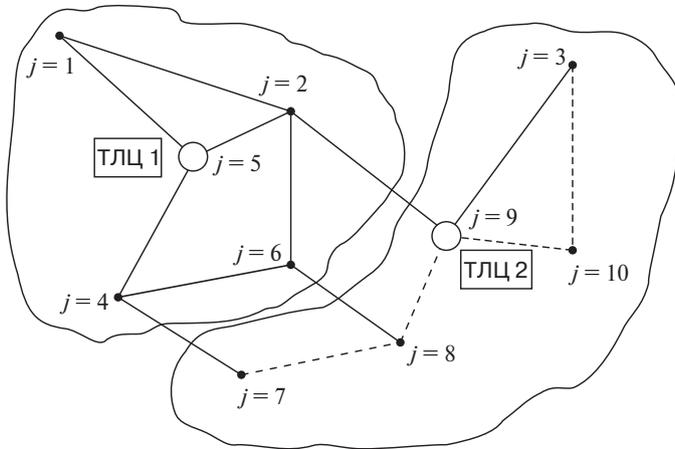
Первый подход основан на том, что проект создания сети ТЛЦ нацелен на получение синергетического эффекта в целом для системы. Обычно все стоимостные (экономические) критерии основываются на этом. В примере в качестве такой целевой функции $F(x_{ij})$ можно взять

$$F(x_{ij}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, j = 7, i = \{5, 9\}, \quad (6)$$

которая выражает потенциальные общие затраты на доставку и переработку грузов всеми ТЛЦ для всех узлов J .

Второй подход связан с тем, чтобы гарантировать величину максимального расстояния c_{ij} , которое присутствует в плане $\{x_{ij}\}$. Здесь план $\{x_{ij}\}$ будет выравнивать величины $\{x_{ij} c_{ij}\}$:

$$F(x_{ij}) = \max_{ij} \{x_{ij} c_{ij}\} \rightarrow \min.$$



$$X^* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Пример решения задачи ($m = 2, n = 10$)

Fig. 2. Example of the problem solution ($m = 2, n = 10$)

То есть

$$F_{\text{опт}}(x_{ij}^*) = \min_{\{x_{ij}\}} \max_{(ij)} \{x_{ij}c_{ij}\} = F_0. \quad (7)$$

Известно, что такая целевая функция потребует более сложного метода решения. Поэтому воспользуемся следующим приемом. Объявим оптимальное значение F_0 искомой переменной, которая добавляется к имеющимся переменным x_{ij} . Таким образом, в задаче будет следующая совокупность переменных $\{F_0, x_{ij}\}$, т. е. всего их будет $n^2 + 1$.

Тогда в качестве новой целевой функции возьмем

$$F = F_0 \rightarrow \min. \quad (8)$$

С дополнительными выражениями:

$$x_{ij}c_{ij} \leq F_0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Итак, в первом приближении задача выбора мест размещения ТЛЦ может быть записана в виде одной из двух задач математического программирования:

$$I. \quad F(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^n x_{ij} \right|_{0,1} = m; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i x_{ij} \leq A_{\max}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n a_i x_{ij} \geq A_{\min}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (15)$$

$$II. \quad F(x_{ij}) = F_0 \rightarrow \min; \quad (16)$$

$$x_{ij}c_{ij} \leq F_0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}; \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}; \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^n x_{ij} \right|_{0,1} = m; \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i x_{ij} \leq A_{\max}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n a_i x_{ij} \geq A_{\min}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (21)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (22)$$

Заметим, что в вышеприведенной модели считается, что ТЛЦ находится в одном из узлов $i = \overline{1, n}$. Возникает вопрос: а что если ТЛЦ можно построить в месте, где нет узла? Это может быть выгодно, если затраты на создание инфраструктуры для нового ТЛЦ (нового узла) будут меньше, чем дополнительная выгода от его функционирования. Такое может быть, если новый узел находится между большими скоплениями узлов с большими a_i . Чтобы учесть это, можно дополнять исходное множество узлов J новыми виртуальными узлами, находящимися в некоторых замечательных с точки зрения геометрии точках, например это «центры тяжести» узлов [11].

Координаты дополнительного узла $i = 0$ можно получить, зная координаты каждой i вершины (x_i, y_i) и объемы a_i , по формулам

$$x_0 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n a_i x_i; \quad (23)$$

$$y_0 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n a_i y_i; \quad (24)$$

$$V = \sum_{i=1}^n a_i, \quad (25)$$

где V — суммарный объем перерабатываемых грузов, т. Получим множество узлов. При этом необходимо задать проекты новых участков дорог из нового узла в некоторые вершины j . После этого можно дополнить матрицы X и C дополнительными элементами x_{0j} , x_{j0} и c_{0j} , c_{j0} .

Решая рассмотренные задачи на новом множестве J^+ , получаем новый оптимальный план $\{x_{ij}^{*+}\}$. При этом если новые значения критерия F^{*+} будут меньше F^* , то принимаем новое решение.

Задачи I и II принадлежат к классу задач линейного булева программирования (ЛБП). Известно, что эта задача принадлежит к так называемым NP трудным задачам. Это означает, что сложность решения подобных задач растет быстрее, чем любой полином от количества переменных. У задачи I — количество переменных n^2 , количество строк ограничений $3n + 1$. У задачи II — $n^2 + 1$ переменных и $n^2 + 3n + 1$ строк ограничений.

Реальные расчеты необходимо делать для n порядка от 10 до 100 и более.

Для количества узлов $n = 10$ получаем:

- задачу I с 100 переменными и 31 ограничением;
- задачу II с 101 переменной и 131 ограничением.

Для $n = 100$ соответственно имеем:

- для задачи I — 10^4 переменных и 301 ограничение;
- для задачи II — 10^4 переменных и 10 301 ограничение.

Из изложенного ясно, что приведенные математические модели в принципе позволяют решать поставленную задачу на основе алгоритмов решения задач ЛБП для небольших регионов. Известны многочисленные алгоритмы и компьютерные программы, применяемые для решения таких задач [10, 12, 13]. Точные решения можно получить, например, на основе так называемого аддитивного алгоритма при числе ограничений $N < 10^2$ [14].

Приближенные решения можно получить на основе «генетического» алгоритма, исследование возможностей которого дано в работах [12, 15].

Определение оптимальных мест размещения ТЛЦ в рамках федеральных округов или страны в целом в виде задач математического программирования приводит попытки строгого решения к неконструктивным, так как требуются сложные комбинаторные ограничения, формирование большого массива переменных, а также переборные алгоритмы решения сверхбольшой размерности.

Результаты и обсуждение. Оценочный анализ рассмотренных математических методов определения оптимальных мест размещения ТЛЦ [1] представлен в таблице.

Таблица

Анализ математических методов нахождения оптимальных центров обслуживания

Table

Analysis of mathematical methods for finding optimal service centres

Постановка задачи	Решение
Создание одного центра	
1. Для заданных n точек найти один геометрический центр, сумма расстояний от которого до этих точек минимальна	Решение — точка Торичелли. Для $n \geq 5$ задача решается приближенно
2. Для заданных k точек найти центр, лежащий на заданной прямой, чтобы суммарное расстояние от центра до точек было минимальным	Решение нелинейного уравнения высокой степени приближенными методами
3. Для заданных n точек найти такую сеть дорог, чтобы общая длина дорог, соединяющая точки, была минимальной	Решение — сеть Штейнера. Для $n \geq 5$ задача решается приближенно (перебором вариантов)
Создание многих центров	
4. Задано n вершин графа, ребра — это пути, соединяющие вершины. Найти подмножество расстояний от вершин до центров (количество их k может быть задано или не задано), чтобы суммарная длина пути от вершин до своих центров была минимальной	Решение в виде задачи математического программирования на основе переборных алгоритмов типа ветвей и границ. Высокая сложность решения задач большой размерности
5. Задано n точек, найти центры, располагающиеся в любой точке области, чтобы суммарное расстояние от точек до своих центров было минимальным	Решение в виде задачи нелинейного программирования большой размерности. Высокая сложность вычислений даже при небольших n и k
6. Найти n произвольных точек, находящихся в любых точках области, и центры, располагающиеся в любой точке области, чтобы суммарное расстояние от точек до своих центров было минимальным	Решение в виде задачи нелинейного программирования сверхбольшой размерности

В рамках настоящей работы в качестве примера прикладной методики рассмотрим подход по выбору мест размещения ТЛЦ, использованный в Генеральной схеме развития сети ТЛЦ, разработанной в рамках реализации федерального проекта «Транспортно-логистические центры».

В соответствии с Генеральной схемой [16] процесс выбора площадки для размещения инфраструктуры ТЛЦ носит поэтапный характер и предполагает первоначально выбор региона, а затем площадки (конкретного земельного участка). Определение оптимальных мест размещения основывается на рейтинговой оценке по следующим критериям выбора регионов:

- численность населения региона;
- величина валовой добавленной стоимости региона (по обрабатывающей промышленности и сфере услуг);
- оборот розничной торговли;
- наличие крупных мультимодальных транспортных узлов на пересечении маршрутов международных транспортных коридоров, на грузонапряженных направлениях перевозок.

По результатам ранжирования были определены перспективные для размещения опорной сети инфраструктуры ТЛЦ регионы РФ.

Однако следует отметить, что представленный подход позволяет оценить лишь позицию регионов по шкале выбранных показателей, при этом не определяются количественные характеристики транспортно-логистической инфраструктуры (один регион — один ТЛЦ), не учитывается существующая топология магистральных транспортных путей, что, соответственно, приведет к необеспечению основного логистического принципа — минимизации затрат на перевозку грузов для ее участников. Кроме этого, при выборе регионов для размещения ТЛЦ не учитываются экономическая связанность регионов и текущее состояние рынка транспортно-логистических услуг: наличие схожих по функциональному назначению транспортно-логистических объектов; планов соседних регионов, других ведомств и иных операторов по их созданию. Указанный недостаток может привести к нарушению внутренних и международных кооперационных связей, необеспечению логистического принципа доставки «точно в срок».

Некоторые выбранные критерии не отвечают объективности в рамках поставленной задачи. Так, основу грузовой базы сети ТЛЦ составляют контейнеропригодные грузы, представляющие собой продукцию преимущественно несырьевых отраслей. В свою очередь, при сравнении показателей объема валового регионального продукта и оборота розничной торговли с контейнерным оборотом в отдельных регионах потенциального размещения ТЛЦ наблюдаются существенные различия (до 8 раз) между значениями приведенных показателей. Так, например, Республика Татарстан (пятое место в

рейтинге) по сравнению с Новосибирской областью (десятое место в рейтинге) при практически двукратном превышении экономических показателей имеет в 6 раз меньший контейнерный оборот. Очевидно, что оптимальный выбор потенциальных регионов для размещения опорной сети ТЛЦ должен был производиться относительно центров производства и потребления контейнеропригодной продукции, которая имеет большую удельную стоимость и к перевозке которой предъявляются более высокие требования по сравнению с продукцией сырьевых отраслей.

В работах [1, 9, 17, 18] представлен методологический подход, основанный на известных и развитых методах кластерного анализа, позволяющий решать оптимизационные задачи размещения объектов транспортно-логистической инфраструктуры очень большой размерности, в частности опорной сети узловых грузовых мультимодальных ТЛЦ, например, в рамках территорий федеральных округов или страны в целом. На основе классического метода кластеризации k-means разработан и обоснован новый метод кластеризации k-means pro, позволяющий решать задачу выбора оптимального места размещения ТЛЦ с проекцией на магистральную транспортную сеть. При этом применение единой методологии кластерного анализа обеспечивает возможность разбиения множества объектов на подмножества со своими центрами, обладающими оптимальными свойствами. Использование метрик близости точек моделирует минимизацию расстояний или затрат при перевозке, если в качестве «веса» каждой точки принять релевантные объемы грузоперевозок. Это позволяет определить количественные характеристики и мощность объектов опорной сети ТЛЦ, учитывая различные исходные параметры производства и потребления контейнеропригодной продукции, магистральных транспортных коммуникаций, существующих объектов транспортно-логистической инфраструктуры и взаимно увязывая их с разнообразными целевыми характеристиками. В разработанных моделях на основе методов кластерного анализа учтена универсальная возможность расширения пространства критериев.

Заключение. Проведенный оценочный анализ основных математических и практических методов определения оптимальных мест размещения транспортно-логистических объектов дает основу для выбора метода в качестве универсального для сетевого подхода к формированию инфраструктуры ТЛЦ в рамках региональных и федеральных проектов. По результатам исследования предложена научно обоснованная концепция системного подхода к вопросам рационального проектирования и размещения элементов транспортно-логистической инфраструктуры на основе комплексного использования известных и развитых методов кластерного анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Москвичев О.В. Методология организации функционирования контейнерно-транспортной системы на основе клиентоориентированности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. М., 2019. 417 с.
2. Протасов В.Ю. Максимумы и минимумы в геометрии. М.: Изд-во Моск. центра непрерыв. мат. образования, 2005. 56 с.
3. Ishfaq R., Sox C.R. Hub location – allocation in intermodal logistic networks // *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 210, issue 2. P. 213–230.
4. Lin C.C., Chiang Y.I., Lin S.W. Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem // *Computers and Operations Research*. 2014. Vol. 51. P. 41–54.
5. Abbassi A., Hilali Alaoui A.E., Boukachour J. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach // *Journal of Computational Science*. 2019. Vol. 30. P. 127.
6. Lin C.C., Lin S.W. Two-stage approach to the intermodal terminal location problem // *Computers and Operations Research*. 2016. Vol. 67. P. 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.09.009>.
7. Kumar A., Anbanandam R. Location selection of multimodal freight terminal under STEEP sustainability // *Research in Transportation Business and Management*. 2019. Vol. 33. P. 33.
8. Brandeau M.L., Chin S.S. An overview of representative problems in location research // *Management Science*. 1989. Vol. 35, no. 6. P. 645–674.
9. Москвичев О.В. Клиентоориентированная контейнерная транспортная система. М.: ВИНТИ РАН, 2018. 186 с.
10. Еремеев А.В., Заозерская Л.А., Колоколов А.А. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования // *Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2*. 2000. Т. 7, № 2. С. 22–46.
11. Кириллова А.Г. Методология организации контейнерных и контейлерных перевозок в мультимодальных автомобильно-железнодорожных сообщениях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. М., 2010. 47 с.
12. Есипов Б.А. Исследование алгоритмов решения обобщенной задачи о минимальном покрытии // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. № 4 (2). С. 308–312.
13. Есипов Б.А. Методы исследования операций: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2013. 304 с.
14. Кузнецов А.В., Сакович В.А., Холод Н.И. Высшая математика. Математическое программирование: учеб. / под общ. ред. А.В. Кузнецова. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2010. 352 с.
15. Нгуен М.Х. Применение генетического алгоритма для задачи нахождения покрытия множества // *Труды Института системного анализа Российской академии наук*. 2008. № 33. С. 206–219.
16. Генеральная схема развития сети транспортно-логистических центров (ТЛЦ) / Министерство транспорта Российской Федерации, ФКУ «Ространсmodernизация». М., 2019. 49 с.
17. Moskvichev O., Nikishchenkov S., Moskvicheva E. Optimization of production and transport infrastructure based on cluster analysis methods // *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019 (Moscow, 20–22 November 2019)*. Moscow: EDP Sciences, 2020. P. 03008.
18. Moskvichev O., Moskvicheva E., Bulatov A. Clustering Methods for Determination of Optimal Locations of Container Storage and Distribution Centers // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. P. 461–469.

REFERENCES

1. Moskvichev O.V. Metodologiya organizatsii funktsionirovaniya konteynerno-transportnoy sistemy na osnove klientoorientirovannosti [Methodology for organizing the functioning of a container-transport customer-oriented system]. Dr. of Sci. thesis: 05.22.01. Moscow; 2019. 417 p. (In. Russ.).

2. Protasov V. Yu. Maksimumy i minimumy v geometrii [Maxima and Minima in Geometry]. Moscow: Moscow Centre of Cont. Math. Ed. Publ.; 2005. 56 p. (In. Russ.).
3. Ishfaq R., Sox C.R. Hub location – allocation in intermodal logistic networks. *European Journal of Operational Research*. 2011; 210(2):213-230.
4. Lin C.C., Chiang Y.I., Lin S.W. Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*. 2014;(51):41-54.
5. Abbassi A., Hilali Alaoui A.E., Boukachour J. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach. *Journal of Computational Science*. 2019;(30):127.
6. Lin C.C., Lin S.W. Two-stage approach to the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*. 2016;(67):113-119. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.09.009>.
7. Kumar A., Anbanandam R. Location selection of multimodal freight terminal under STEEP sustainability. *Research in Transportation Business and Management*. 2019;(33):33.
8. Brandeau M.L., Chin S.S. An overview of representative problems in location research. *Management Science*. 1989;35(6):645-674.
9. Moskvichev O.V. Klientoorientirovannaya konteynernaya transportnaya sistema [Client-oriented container transport system]. Moscow: VINITI RAN Publ.; 2018. 186 p. (In. Russ.).
10. Eremeev A.V., Zaozerskaya L.A., Kolokolov A.A. Zadacha o pokrytii mnozhestva: slozhnost', algoritmy, eksperimental'nye issledovaniya [Set Covering Problem: Complexity, Algorithms, Experimental Investigations]. *Diskretnyy analiz i issledovanie operatsiy. Seriya 2 = Discrete Analysis and Operations Research. Series 2*. 2000;7(2):22-46. (In. Russ.).
11. Kirillova A.G. Metodologiya organizatsii konteynerykh i kontreylernykh perevozok v mul'timodal'nykh avtomobil'no-zheleznodorozhnykh soobshcheniyakh [Methodology for organizing container and piggyback transportation in multimodal road and rail communications]. Dr. of Sci. thesis synopsis: 05.22.01. Moscow; 2010. 47 p. (In. Russ.).
12. Esipov B.A. Issledovanie algoritmov resheniya obobshchennoy zadachi o minimal'nom pokrytii [Investigation of algorithms for solving the generalized minimum coverage problem]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestia RAS SamSC)*. 2014;4(2):308-312. (In. Russ.).
13. Esipov B.A. Metody issledovaniya operatsiy [Operations research methods]. Textbook. 2nd ed. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2013. 304 p. (In. Russ.).
14. Kuznetsov A.V., Sakovich V.A., Kholod N.I. Vysshaya matematika. Matematicheskoe programmirovaniye [Higher Mathematics. Mathematical programming]. Textbook. 3rd ed. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2010. 352 p. (In. Russ.).
15. Nguen M. Kh. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya zadachi nakhozhdeniya pokrytiya mnozhestva [Application of a genetic algorithm for the problem of finding a set cover]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*. 2008;(33):206-219. (In. Russ.).
16. General'naya skhema razvitiya seti transportno-logisticheskikh tsentrov (TLTs) [General scheme for the development of a network of transport and logistics centres (TLC)]. Ministry of Transport of the Russian Federation. Moscow: Rostransmodernizatsiya Publ.; 2019. 49 p. (In. Russ.).
17. Moskvichev O., Nikishchenkov S., Moskvicheva E. Optimization of production and transport infrastructure based on cluster analysis methods. *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019 (Moscow, November 20–22, 2019)*. Moscow: EDP Sciences; 2020. P. 03008.
18. Moskvichev O., Moskvicheva E., Bulatov A. Clustering Methods for Determination of Optimal Locations of Container Storage and Distribution Centers. *Transportation Research Procedia*. 2021;(54):461-469.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Олег Валерьевич МОСКВИЧЕВ,

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой», Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), Author ID: 388509, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

Елена Евгеньевна МОСКВИЧЕВА,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы», Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), Author ID: 498417, <https://orcid.org/0000-0002-4729-7695>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg V. MOSKVICHEV,

Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Operations Management Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Svobody St.), Author ID: 388509, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

Elena E. MOSKVICHEVA,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Freight and Commercial Work Technologies, Stations and Junctions, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Svobody St.), Author ID: 498417, <https://orcid.org/0000-0002-4729-7695>

ВКЛАД АВТОРОВ

Олег Валерьевич МОСКВИЧЕВ. Систематизация и анализ существующих математических моделей и методов оптимизации размещения терминально-логистических объектов транспортной системы, выбор и обоснование корректности предлагаемых подходов и методов. Разработка методологического подхода, основанного на известных и развитых методах кластерного анализа, позволяющего решать оптимизационные задачи размещения объектов транспортно-логистической инфраструктуры очень большой размерности (80%).

Елена Евгеньевна МОСКВИЧЕВА. Анализ основных отечественных и зарубежных работ, относящихся к тематике настоящего исследования; систематизация и обобщение практических решений определения оптимальных мест размещения транспортно-логистических объектов (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Oleg V. MOSKVICHEV. Systematisation and analysis of existing mathematical models and methods for optimising the placement of terminal and logistics facilities of the transport system, selection and justification of the correctness of the proposed approaches and methods. Development of a methodological approach based on well-known and developed methods of cluster analysis, which allows solving optimisation problems of locating objects of transport and logistics infrastructure of a very large scale (80%).

Elena E. MOSKVICHEVA. Analysis of the main scientific works related to the subject of this study; systematisation and generalisation of practical solutions for determining the optimal locations for transport and logistics facilities (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022, первая рецензия получена 24.03.2022, вторая рецензия получена 05.04.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 22.03.2022, first review received 24.03.2022, second review received 05.04.2022, accepted for publication 29.08.2022.



ТРУДЫ ВНИИЖТ

Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 1. Грузовые вагоны / пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. — Москва : АО «ВНИИЖТ», 2021. — 456 с.

Рассмотрены базовые аспекты, связанные с созданием и эксплуатацией грузовых вагонов. Приведены общие соображения, касающиеся способов повышения провозной способности железных дорог, производительности перевозочного процесса. Представлен пример обзора конструкций грузовых вагонов. Даны методические основы анализа и испытаний, проводимых с целью выяснения эксплуатационного ресурса по усталостной долговечности грузовых вагонов и их компонентов. Приведены экономические соображения, касающиеся применения затрат жизненного цикла для определения суммарной стоимости владения вагоном до конца срока службы. Кратко описаны современные методы компьютерного

моделирования усталостных проявлений в контактах качения и процедуры испытаний. Освещается передовой опыт контроля технического состояния, технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов. Рассмотрены мероприятия технического обслуживания и ремонта и особенности нормативно-правового регулирования технической эксплуатации грузовых вагонов разных стран. Описаны средства мониторинга технического состояния грузовых вагонов и поездов непосредственно в процессе движения. Приведена информация о ряде напольных систем мониторинга.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся вопросами железнодорожного транспорта, и студентов, изучающих данные проблемы.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru