

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-352-356>

УДК 332.1

Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры

Докт. экон. наук, проф. Р. Б. Ивуть¹⁾, канд. техн. наук, доц. П. В. Попов²⁾,
канд. экон. наук П. И. Лапковская¹⁾, Н. Е. Шевелева²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Волжский филиал Волгоградского государственного университета
(Волгоград, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрен алгоритм решения задачи поиска оптимальной дислокации ключевых объектов транспортной и складской инфраструктур в рамках методологического подхода проектирования логистической инфраструктуры на территории регионов стран. Методологический подход включает в себя три этапа. На первом этапе определяются районы, где целесообразно размещение ключевых объектов региональной логистической инфраструктуры. Далее с использованием разработанных авторами моделей, осуществляется привязка объектов складской инфраструктуры на местности и с учетом спроектированной складской сети определяется оптимальная дислокация объектов транспортной инфраструктуры. Для поиска оптимальных мест расположения объектов региональной логистической инфраструктуры авторы предлагают алгоритм, применимый для построения как складской, так и транспортной инфраструктур вследствие схожести моделей. Алгоритм основан на методе построения последовательности планов. На первоначальном этапе для рассматриваемого множества планов строится конечное расширение. Для данного множества определяется миноранта для функции затрат, связанных с размещением и обслуживанием объектов инфраструктуры, перемещением грузов и перегонем порожнего транспортного средства. После этого формируется итеративный алгоритм, определяющий последовательность оптимумов миноранты на последовательности вложенных друг в друга множеств. На первом шаге находится элемент множества планов, минимизирующий миноранту, на следующем шаге из рассматриваемого множества исключается найденный элемент и на оставшемся множестве ищется новый оптимум, для которого миноранта принимает минимальное значение. Для элиминации множества планов целесообразно использовать процедуры динамического программирования. Границы применимости метода построения последовательности планов определяются возможностью сконструировать расширение множества планов размещения объектов, подобрать на нем миноранту и построить алгоритм упорядочивания оптимумов.

Ключевые слова: логистическая инфраструктура, метод построения последовательности планов, линейная миноранта, задача оптимизации

Для цитирования: Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры / Р. Б. Ивуть [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 352–356. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-352-356>

Algorithm for Solving Problem of Designing Regional Logistics Infrastructure

R. B. Ivut¹⁾, P. V. Popov²⁾, P. I. Lapkovskaya¹⁾, N. E. Sheveleva²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Volga Branch of Volgograd State University (Volgograd, Russian Federation)

Abstract. The paper considers an algorithm for solving the problem of finding the optimal location of key objects of transport and warehouse infrastructures within the framework of a methodological approach to designing logistics infrastructure

Адрес для переписки

Ивуть Роман Болеславович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

Address for correspondence

Ivut Roman B.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

in the territory of the region of the countries. The methodological approach includes three stages. At the first stage, areas are determined where it is advisable to locate key objects of the regional logistics infrastructure. Further, using the models developed by the authors, the linking of warehouse infrastructure objects on the ground has been carried out and, taking into account the designed warehouse network, the optimal dislocation of transport infrastructure objects has been determined. To find the optimal locations for the objects for regional logistics infrastructure facilities, the authors propose an algorithm that is applicable both for building warehouse and transport infrastructures due to the similarity of the models. The algorithm is based on the method of constructing a sequence of plans. At the initial stage, the final expansion is constructed for the set of plans under consideration. For a given set, a minorant has been determined for the cost function associated with the placement and maintenance of infrastructure facilities, the movement of goods, and the haul of an empty vehicle. After that, an iterative algorithm has been formed that determines the sequence of optima of the minorant on a sequence of nested sets. At the first step, an element of the set of plans has been found that minimizes the minorant, at the next step, the found element is excluded from the set under consideration, and a new optimum is sought on the remaining set for which the minorant takes the minimum value. To eliminate multiple plans, it is advisable to use dynamic programming procedures. The limits of applicability of the method for constructing a sequence of plans are determined by the ability to construct an extension of the set of plans for placing objects, select a minorant on it, and build an algorithm for ordering optima.

Keywords: logistics infrastructure, method of constructing a sequence of plans, linear minorant, optimization problem

For citation: Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I., Sheveleva N. E. (2021) Algorithm for Solving Problem of Designing Regional Logistics Infrastructure. *Science and Technique*. 20 (4), 352–356. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-352-356> (in Russian)

Введение

К ключевым факторам, оказывающим существенное влияние на социально-экономическое развитие региона, следует отнести логистическую инфраструктуру, включающую основную (складскую и транспортную) и обеспечивающую (информационную и финансовую) составляющие. Она позволяет не только снизить уровень издержек в сети распределения, поддерживать заданный уровень обслуживания, но и повысить инвестиционную привлекательность региона. В [1] De Prabir показывает, что совершенствование транспортной составляющей логистической инфраструктуры на 10 % приводит к росту экспорта на 2 % и импорта на 3 % соответственно. В исследованиях авторов [2–5] установлена линейная зависимость между социально-экономическими показателями Республики Беларусь, Российской Федерации и региональной логистической инфраструктурой, а в работах Ю. Н. Гольской [6] и Н. А. Росляковой [7] отмечено влияние уровня развития транспортной инфраструктуры на инвестиционную привлекательность регионов.

Значительное внимание логистической инфраструктуре уделяется в программах развития экономики Беларуси и России. Например, в Республиканской программе развития логистической системы и транзитного потенциала [8] отмечено, что совершенствование логистической инфраструктуры страны будет выступать ключевым драйвером ее социально-экономического развития. Инновационный сценарий социально-экономического развития Российской Федерации [9] включает в том чис-

ле и развитие транспортной инфраструктуры для устранения диспропорций в развитии регионов страны, повышения их транзитного потенциала. Таким образом, повышению уровня логистической инфраструктуры регионов уделяется значительное внимание на государственном уровне.

В [10] автором предложен методологический подход построения региональной логистической инфраструктуры. Подход включает в себя три этапа. На первом определяются районы, где целесообразно размещение ключевых объектов транспортной и складской инфраструктур. Для этого предлагается использовать совокупный потенциал метода ABC и кластерного анализа. На втором этапе на основании модели [11] определяются места расположения распределительно-подсортировочных складов. В качестве критерия оптимизации выступает минимум затрат, связанных со строительством и обслуживанием сети складов, грузопереработкой товаров и перемещением грузов. На третьем этапе с помощью модели [12] и с учетом имеющейся сети распределительно-подсортировочных складов определяется оптимальная дислокация ключевых объектов транспортной инфраструктуры.

Для решения поставленных задач оптимизации в статье рассматривается алгоритм, основанный на методе построения последовательности планов и позволяющий определить оптимальное место расположения объектов региональной логистической инфраструктуры, их мощности, вид товароносителя, а также количество транспортных средств для перевозки грузов. Учитывая схожесть моделей, включен-

ных в методологический подход построения региональной логистической инфраструктуры, данный алгоритм может быть применен для проектирования как складской, так и транспортной инфраструктур.

Основная часть

Метод построения последовательности планов представляет собой один из подходов к решению широкого класса задач оптимизации, основанный на составлении последовательности вариантов решения. Идея метода построена на замене исходной задачи оптимизации функции затрат $F(x)$ вспомогательной задачей поиска экстремума некоторой функции $Q(x)$, для которой проще найти оптимальное решение, а также построить и проанализировать упорядоченную в смысле ухудшения значений целевой функции последовательность неоптимальных вариантов.

Пусть задача оптимизации состоит в нахождении такого элемента p^* конечного множества P , на котором достигается минимум функции затрат $F(x)$, определенной на этом множестве. Общая схема решения с изложением основных способов реализации каждого шага выглядит следующим образом:

1) построение для рассматриваемого множества P конечного расширения $R: R \supseteq P$ (множество P является подмножеством R).

Для конструирования множества R можно использовать достаточно очевидный способ. Задачи поиска оптимального размещения объектов логистической инфраструктуры характеризуются наличием ключевых объектов, обладающих конечными наборами их мощностей (ресурсами). Возможные сочетания этих мощностей составляют множество P . Тогда множество R можно составить, предполагая, что каждая из точек обладает одинаковым набором мощностей от минимально возможного уровня, определенного для совокупности предприятий в целом, до максимального. Очевидно, что при таком подходе множество R может полностью совпадать с P ;

2) определение на множестве R некоторой функции $Q(x)$, являющейся минорантой для функции $F(x)$ на множестве P :

$$Q(x) \leq F(x), \forall x \in P.$$

Как правило, основная задача состоит в минимизации суммарных производственно-транс-

портных затрат при заданных условиях производства и потребления. Построение вспомогательной функции (линейной миноранты) основано на двух известных фактах. Первый – сумма или произведение конечного набора элементарных функций определены на том же множестве, что и все слагаемые или сомножители

$$\begin{aligned} Df_1(x) \cap Df_2(x) \cap \dots \cap Df_n(x) = \\ = D[f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x)]. \end{aligned}$$

Поэтому чаще всего в качестве вспомогательной функции $Q(x)$ используется аддитивная или мультипликативная функция.

Второй факт – минимум суммарной функции не меньше суммы минимумов функций

$$\begin{aligned} \min_{x \in [a;b]} f_1(x) + \min_{x \in [a;b]} f_2(x) + \dots + \min_{x \in [a;b]} f_n(x) \leq \\ \leq \min_{x \in [a;b]} [f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x)]. \end{aligned}$$

Следовательно, в качестве линейной миноранты $Q(x)$ удобно выбирать сумму производственно-транспортных издержек по каждой производственной точке;

3) формирование итеративного алгоритма, определяющего последовательность оптимумов вспомогательной функции $Q(x)$ на последовательности вложенных друг в друга множеств:

$$\forall r_k \in R; Q(r_k) = \min_{x \in [R_k]} Q(x); k \geq 1,$$

$$R_1 = R, R_k = R_{k-1}/r_{k-1} (k = 2, 3, \dots).$$

Суть работы алгоритма упорядочения состоит в следующем: на первом шаге находится элемент множества R , минимизирующий функцию $Q(x)$. На следующем шаге из рассматриваемого множества исключается найденный элемент и на оставшемся множестве ищется новый оптимум, для которого $Q(x)$ принимает минимальное значение. Таким образом, составляется упорядоченная последовательность элементов множества R , которой соответствует неубывание функции $Q(x)$.

Возможны различные способы элиминации элементов множества R . Наиболее эффективным способом упорядочения планов (значений x) является процедура динамического программирования. Если рассматривать минимизацию функции $Q(x) = g_1(x) + g_2(x) + \dots + g_n(x)$

на множестве R векторов $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, удовлетворяющих условиям:

$$\sum_{i=1}^n x_i = b, \quad b > 0, \quad x_i \in \Gamma_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\},$$

$$1 \leq i \leq n, \quad a_{ij} \geq 0, \quad a_{ij} \in Z,$$

то используются следующие функциональные уравнения при:

$$0 \leq z \leq b; \quad k = 1:$$

$$f_1(z) = g_1(z);$$

$$0 \leq z \leq b; \quad 2 \leq k \leq n:$$

$$f_k(z) = \min [g_k(x_k) + f_{k-1}(z - x_k)].$$

После построения последнего функционала $f_n(z)$ выполняется следующий алгоритм.

Шаг 1. Среди множества полученных решений $W_1 = (*, *, \dots, *, a_{in})$ (где a_{in} – значение мощности объекта логистической инфраструктуры последнего объекта; * – условное обозначение комбинаций возможных мощностей оставшихся точек) выбирается такое, которое бы минимизировало функцию $Q(x)$ на рассматриваемом множестве при $r_1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$:

$$Q(r_1) = \min_{X \in W_1} Q(X).$$

Шаг 2. Полученное множество решений W_1 преобразуется в новое W_2 по правилу: полученное оптимальное решение предыдущего шага r_1 заменяется на систему решений, включающую в себя значение мощности последнего объекта точки, которое было получено в оптимальном решении предыдущего шага, в комбинации с возможными значениями предпоследней точки (это значения, в которых существует функция $f_2(z)$):

$$W_2 = (*, *, \dots, x_i, x_n^1),$$

$$\forall x_i \in \{x_i/x_i \in \Gamma, x_i \neq x_n^1\}.$$

Таким образом, происходит элиминирование найденного оптимального решения и осуществляется поиск следующего оптимального решения при r_2 :

$$Q(r_2) = \min_{X \in W_2} Q(X).$$

Значение функции при этом ухудшается (числовое значение становится больше).

На последующих шагах производятся аналогичные процедуры, пока не будут выстроены в последовательность решения, соответствующие неубыванию функции $Q(x)$;

4) проверка критерия оптимальности на каждом шаге алгоритма:

$$r_k \in P \Rightarrow F(r_{k-1}) = \min_{X \in R_{k-1} \cap P} F(x),$$

$$r_k \notin P \Rightarrow R_{k-1} \cap P = \emptyset.$$

Если полученная на очередном шаге оптимальная точка принадлежит не только множеству R , но и множеству P , это означает, что можно вычислить значение функции $F(x)$ в этой точке. Если на следующем шаге оказывается, что в следующем найденном оптимальном значении $Q(x)$ превышает значение функции $F(x)$ в предыдущей точке, значит, эта предыдущая точка является решением задачи – оптимальным планом.

Границы применимости метода построения последовательности планов определяются возможностью сконструировать расширение R , подобрать на нем миноранту $Q(x)$ и построить алгоритм упорядочивания оптимальных.

ВЫВОД

Представлен алгоритм решения задачи оптимизации региональной логистической инфраструктуры в рамках методологического подхода построения складской и транспортной инфраструктур. Алгоритм основан на методе построения последовательности планов и предполагает замену исходной задачи оптимизации функции затрат вспомогательной задачей поиска экстремума некоторой миноранты, а также возможность построить и проанализировать упорядоченную в смысле ухудшения значений целевой функции последовательность неоптимальных вариантов. Конечность метода (алгоритма решения) следует из условия проверки критерия оптимальности на каждом шаге алгоритма. Границы применимости метода построения последовательности планов определяются возможностью сконструировать расширение планов решения задачи, подобрать на нем миноранту и построить алгоритм упорядочивания оптимальных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prabir, De. The Importance of Trade Costs: a Gravity Model Applications [Electronic resource] / De Prabir // 3rd ARTNeT Capacity Building Workshop: UNESCAP, Bangkok, 26–30 March 2007. Access mode: http://artnet.unescap.org/tid/artnet/mtg/cb3_d2s3dea.pdf. Date of access: 20.12.2020.
2. Ивуть, Р. Б. Оценка влияния транспортно-логистической инфраструктуры регионов Республики Беларусь на ее социально-экономические показатели / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, П. И. Лапковская // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 2. С. 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100>.
3. Попов, П. В. Влияние транспортно-логистической инфраструктуры федеральных округов на социальные показатели Российской Федерации / П. В. Попов // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 10. С. 35–44.
4. Попов, П. В. Влияние транспортно-логистической инфраструктуры федеральных округов на экономические показатели Российской Федерации / П. В. Попов // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 12. С. 19–35.
5. Попов, П. В. Оценка влияния логистической инфраструктуры на социально-экономические показатели Астраханской области / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // Логистика. 2019. Т. 146, № 1. С. 46–50.
6. Гольская, Ю. Н. Оценка влияния транспорта на социально-экономическое развитие регионов / Ю. Н. Гольская, И. А. Кузнецова // Известия Байкальского государственного университета. 2010. № 5. С. 61–64.
7. Рослякова, Н. А. Оценка взаимосвязи параметров транспортного комплекса региона и его экономического роста / Н. А. Рослякова // Вестник СибАДИ. 2013. Т. 33, № 5. С. 156–162.
8. Об утверждении Республиканской программы развития логистической системы и транзитного потенциала на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 18 июля 2016 г. № 560 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/C21600560_1469134800.pdf. Дата доступа: 27.12.2020.
9. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (ред. от 28.09.2018) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/. Дата доступа: 27.12.2020.
10. Попов, П. В. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // Экономика региона. 2019. Т. 15, вып. 2. С. 483–492. <https://doi.org/10.17059/2019-2-13>.
11. Модель формирования складской инфраструктуры регионов / П. В. Попов [и др.] // Новости науки и технологий. 2016. Т. 37, № 2. С. 24–28.
12. Ивуть, Р. Б. Проектирование сети автотранспортных парков / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 5. С. 442–446. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-442-446>.

Поступила 04.02.2021

Подписана в печать 20.04.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Prabir De. (2007) *The Importance of Trade Costs: a Gravity Model Applications*. 3rd ARTNeT Capacity Building Workshop: UNESCAP, Bangkok, 26–30 March 2007. Available at: http://artnet.unescap.org/tid/artnet/mtg/cb3_d2s3dea.pdf. (Accessed 20 December 2020).
2. Ivut R. B., Popov P. V., Lapkovskaya P. I. (2020) Estimation of Transport and Logistics Infrastructure Impact of Regions in the Republic of Belarus on its Socio-Economic Indicators. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (2), 93–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-2-93-100> (in Russian).
3. Popov P. V. (2019) Influence of Transport and Logistics Infrastructure of the Federal Districts on the Social Indicators of the Russian Federation. *Transport: Nauka, Tekhnika, Upravlenie = Transport: Science, Equipment, Management*, (10), 35–44 (in Russian).
4. Popov P. V. (2019) Influence of Transport and Logistics Infrastructure of the Federal Districts on the Economic Indicators of the Russian Federation. *Transport: Nauka, Tekhnika, Upravlenie = Transport: Science, Equipment, Management*, (12), 19–35 (in Russian).
5. Popov P. V., Miretsky I. Yu. (2019) Assessment of the Impact of the Logistics Infrastructure on the Socio-Economic Indicators of the Astrakhan Region. *Logistika = Logistics*, 146 (1), 46–50 (in Russian).
6. Golskaya Yu. N., Kouznetsova I. A. (2010) Assessment of the Impact of Transport on the Socio-Economic Development of Regions. *Izvestiya Baikalskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of Baikal State University*, (5), 61–64 (in Russian).
7. Roslyakova N. A. (2013) Assessment of the Relationship Between the Parameters of the Transport Complex of the Region and its Economic Growth. *Vestnik SibADI = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 33 (5), 156–162 (in Russian).
8. On Approval of the Republican Program for the Development of the Logistics System and Transit Potential for 2016–2020: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus Dated July 18, 2016, No 560. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: https://pravo.by/upload/docs/op/C21600560_1469134800.pdf (Accessed 27 December 2020) (in Russian).
9. *The Concept of Long-Term Socio-Economic Development of the Russian Federation for the Period up to 2020* (As Amended on 28.09.2018). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/ (Accessed 27 December 2020) (in Russian).
10. Popov P. V., Miretsky I. Yu. (2019) Methodology for Constructing the Region's Logistics Infrastructure. *Ekonomika Regiona = Economy of Region*, 15 (2), 483–492. <https://doi.org/10.17059/2019-2-13> (in Russian).
11. Popov P. V., Miretskii I. Yu., Ivut' R. B., Lapkovskaya P. I. (2016) Model of Warehouse Infrastructure Formation for Regions. *Novosti Nauki i Tekhnologii* [News of Science and Technologies], 37 (2), 24–28 (in Russian).
12. Ivut R. B., Popov P. V., Miretskii I. Yu. (2016) Designing of an Automobile Fleet Network. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (5), 442–446. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-442-446> (in Russian).

Received: 04.02.2021

Accepted: 20.04.2021

Published online: 30.07.2021