

ОТРАСЛЕВЫЕ И МЕЖОТРАСЛЕВЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Для цитирования: Попов П. В., Мирецкий И. Ю. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона // Экономика региона. — 2019. — Т. 15, вып. 2. — С. 483-492

doi 10.17059/2019-2-13

УДК 658.78.011.1

П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий

Волгоградский государственный университет, Волжский филиал
(Волжский, Российская Федерация; e-mail: donpascha@vgsu.ru).

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РЕГИОНА¹

В статье рассматривается проблема эффективного размещения ключевых объектов логистической инфраструктуры, способствующих уменьшению общих издержек в сети распределения, повышению транзитного потенциала региона и его инвестиционной привлекательности, интеграции региона в глобальную цепочку поставок. Для ее решения авторами предлагается методологический подход формирования логистической инфраструктуры на территории региона. Данный подход, в отличие от существовавших ранее, взаимоувязывает месторасположение транспортной и складской инфраструктур и позволяет определить мощности ключевых объектов логистической инфраструктуры на территории регионов и вид товароносителя. В качестве критерия рассматриваются общие затраты, связанные с продвижением материального потока до потребителя. Подход включает два этапа. На первом этапе с использованием значений основных социально-экономических показателей региона определяются города областного подчинения и районы, на территории которых целесообразно размещение объектов инфраструктуры. Для решения этой задачи предлагается использовать совокупный потенциал двухэтапного кластерного, дискриминантного анализа и методов ABC (классического и современного). Совместное использование этих методов позволяет получить согласованный результат, обеспечивающий оптимальный выбор районов для размещения основных составляющих складской (распределительного центра и распределительно-подсортировочных складов) и транспортной сети (транспортные парки и терминалы). На втором этапе осуществляется географическая привязка объектов инфраструктуры на территории административно-территориальных единиц, определенных на первом этапе. Для определения месторасположения и мощности распределительно-подсортировочных складов ставится задача математического программирования, для решения которой предлагается использовать разработанный авторами подход; в качестве критерия выступают затраты по доставке и грузопереработке товаров. Для формирования транспортной инфраструктуры, привязанной к сформированной складской сети, предлагается использовать разработанный авторами подход, обеспечивающий минимизацию затрат на грузоперевозки и обслуживание автопарков и терминалов. Для решения задач оптимизации, поставленных на втором этапе, предлагается использовать методы сепарабельного программирования и ветвей и границ. В работе показано применение предложенного подхода на примере Волгоградской области. Полученные результаты исследования могут быть использованы для формирования логистической инфраструктуры на территории региона страны.

Ключевые слова: методологический подход, логистическая инфраструктура, складская и транспортная сеть, двухэтапный кластерный анализ, метод ABC, дискриминантный анализ, математическая модель, непрерывная релаксация, сепарабельное программирование, задача оптимизации

¹ © Попов П. В., Мирецкий И. Ю. Текст. 2019.

Введение

С целью повышения благосостояния российских граждан и динамичного развития экономики Российской Федерации была разработана Концепция долгосрочного развития РФ до 2020 года, которая предполагает переход к инновационному социально ориентированному типу экономического развития¹. В рамках данной модели предполагаются создание и активизация новых факторов экономического роста, что будет способствовать долгосрочному устойчивому росту экономики около 6,4–6,5 % в год.

Для достижения целевых макроэкономических параметров в Концепции определены основные направления деятельности в области внутренней и внешней политики. Существенное внимание уделяется устранению дисбаланса в социально-экономическом развитии регионов Российской Федерации и созданию предпосылок для их сбалансированного территориального развития.

Политика государства в области сбалансированного социально-экономического развития регионов направлена на решение ряда задач, включающих развитие логистической инфраструктуры регионов для повышения их конкурентоспособности и крупных транспортно-логистических узлов.

В логистической инфраструктуре принято выделять основную составляющую, включающую транспортную и складскую сеть, и вспомогательную, оказывающую косвенное влияние на продвижение материального потока до конечного потребителя. К важнейшим задачам в рамках проектирования региональной логистической инфраструктуры следует отнести построение региональной складской и транспортной сети.

В настоящее время формирование логистической инфраструктуры на территории региона рассматривается с позиций проектирования региональной складской сети и отдельно транспортной инфраструктуры в разрезе определения месторасположения основных объектов с использованием экономико-математических моделей и стратегий размещения объектов инфраструктуры [1]. Однако методологический подход к построению взаимоувязанной транспортной и логистической инфраструктуры на территории региона не разработан.

¹ Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (ред. от 10.02.2017) [Электронный ресурс]. URL: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/strategicplanning/concept/doc20081117_01 (дата обращения: 20.04.2017).

Месторасположение транспортно-логистических узлов и их мощность на территории Российской Федерации определяется с учетом национальных транспортных сетей участников Евразийского экономического союза и транзитного потенциала страны. Виды узлов, их возможное месторасположение и предполагаемая мощность описаны в Комплексном плане развития инфраструктуры автомобильных и железных дорог, включенных в Перечень транспортных маршрутов ЕврАзЭС². Однако в этом плане не рассмотрены методологические подходы и не даны рекомендации по развитию логистической инфраструктуры регионов. Это и определило проблему, поставленную в рамках данной статьи, главная идея которой состоит в разработке методологического подхода по решению задачи эффективного размещения объектов логистической инфраструктуры на территории региона Российской Федерации. Решение данной проблемы позволит создать условия для реализации проектов «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года»³ и «Стратегия развития торговли в Российской Федерации на 2015–2016 годы и период до 2020 года»⁴. В настоящей работе использование предлагаемого методологического подхода рассмотрено на примере Волгоградской области.

Теоретические методы формирования логистической инфраструктуры

Проведенный анализ научной литературы позволил выявить значительное количество работ, в которых предложены математические методы и модели или подходы к определению месторасположения сети складов и транспортно-логистических терминалов на территории региона. В литературе представлена следующая классификация математических моделей и методов.

² Комплексный план развития инфраструктуры автомобильных и железных дорог, включенных в Перечень транспортных маршрутов ЕврАзЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2010/wp5/ECE-TRANS-WP5-GE2-05-pres03r.pdf> (дата обращения: 01.11.2017 г.)

³ Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Ред. 12.05.2018 [Электронный ресурс] URL: http://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION_ID=2203# (дата обращения: 20.06.2018).

⁴ Стратегия развития торговли в Российской Федерации на 2015–2016 годы и период до 2020 года [Электронный ресурс] URL: <http://base.garant.ru/70836814/#friends> (дата обращения: 04.11.2017).

1. Простые методы и модели. Данные методы позволяют определить месторасположение как отдельных объектов логистической инфраструктуры, так и их сети. Среди моделей и методов, получивших широкое практическое применение, следует выделить метод Ардалана [2], позволяющий определить оптимальное месторасположение складов в сети распределения с учетом влияния факторов, модели «Общей оптимальной рыночной зоны обслуживания» Эрленкоттера [3], коммерческого притяжения и методы Артура Геоффриона [4], центра тяжести. Они основаны на большом количестве допущений и предполагают экспресс оценку предполагаемой логистической инфраструктуры.

2. Сложные методы и модели. Исследователи А. Клозе и А. Дрексиль предложили все сложные методы и модели разделить на три большие группы: методы сетевого моделирования, непрерывной и дискретной оптимизации¹.

Применение методов сетевого моделирования основано на построении сети, узлам которой соответствуют объекты логистической инфраструктуры, а ребрам — дороги между объектами (известной протяженности) или каналы распределения (заданной мощности). Методы сетевого моделирования позволяют определить месторасположение и мощности основных объектов логистической инфраструктуры. Недостатком этих методов является ограниченность пространства узлами графа и низкая эффективность решения при значительном количестве вариантов месторасположения ключевых составляющих транспортной и складской инфраструктуры.

Использованию методов и моделей непрерывной оптимизации для поиска оптимального месторасположения объектов логистической инфраструктуры посвящены работы А. Вебера. Его математическая модель позволяла определить месторасположение одного или двух производственных объектов, исходя из минимизации суммарных транспортных затрат на перевозку товаров. Модель также может применяться для определения месторасположения распределительного центра или транспортного терминала при складской схеме поставки. Для численного решения задач используют методы Хука — Дживса, Лууса — Яколы, Партан-методы и др. При большом количестве объектов имеющиеся алгоритмы и подходы не

позволяют получить оптимальное решение за приемлемое время.

Для решения задач размещения используют методы и модели математического программирования и дискретной оптимизации. В частности, этот аппарат применим для определения оптимального месторасположения объектов логистической инфраструктуры; его использование позволяет учесть специальные ограничения и условия, накладываемые на решение задачи. В зависимости от сложности практической задачи для ее решения можно использовать точный или приближенный подход. Для точного решения задачи дискретной оптимизации можно использовать методы ветвей и границ [5], динамического программирования.

При значительном количестве возможных мест расположения объектов логистической инфраструктуры для решения используют приближенные эвристические и метаэвристические методы [6]. Данные методы позволяют «за разумное время» получить приближенное к оптимальному месторасположение сети объектов транспортной и складской инфраструктуры. К ним относят генетические алгоритмы, алгоритмы поиска в локальной окрестности, имитации отжига и табу-поиска.

Один из современных подходов к построению логистической инфраструктуры на ограниченной территории предложен американским экономистом Э. Гувером и обобщен российскими учеными В.И. Сергеевым и В.В. Дыбской. Определение месторасположения и количества объектов инфраструктуры основано на анализе основных социально-экономических параметров территории. Кроме этого, учитываются дислокация покупателей, объемы спроса, необходимый уровень логистического сервиса и др. Главным фактором является приближенность географической территории, на которой предполагается размещение объекта, к рынку потенциальных клиентов [1].

Вопросы проектирования эффективной распределительной и складской сети рассмотрены в работах [8–10]. Авторы предлагают математические модели соответствующих задач и дают оценки сложности алгоритмов решения этих задач.

В работах А.Н. Рахмангулова и О.А. Копыловой предложен подход к формированию транспортно-логистических центров на территории Уральского федерального округа. На первоначальном этапе оценивалась привлекательность региона на основе ключевых социально-экономических факторов. Расчет про-

¹ Klose A., Drexel A. Facility location models for distribution system design // European Journal of Operational Research. 2005. № 162. P. 4–29.

водился с помощью метода Паттерн. На втором этапе строилась целевая функция, минимизирующая суммарные затраты, связанные с перемещением товаров от поставщиков до конечных потребителей с использованием методов дискретной оптимизации. В качестве алгоритма решения поставленной задачи оптимизации использовалось имитационное моделирование [7].

Методологический подход к формированию логистической инфраструктуры на территории региона

Рассмотренные подходы ориентированы на формирование складской сети на территории региона и не предполагают возможности построения взаимоувязанной со складской инфраструктурой транспортной сети. Кроме этого, в них не учтена возможность поставки товара на различных типах товароносителей и определения мощностей распределительно-подсортировочных складов.

Широко применяемые на практике модели и методы определения оптимального месторасположения объектов логистической инфраструктуры дают приближенное решение, не позволяют одновременно определять их мощность и вид товароносителя. Кроме этого, в них не предусмотрено формирование на территории региона взаимоувязанных складской и транспортной инфраструктур.

Исходя из этого, авторы предлагают методологический подход, позволяющий определить оптимальное месторасположение складской сети (распределительно-подсортировочных складов) и взаимоувязанной с ней транспортной сети (транспортно-логистических терминалов и автомобильных парков), а также их мощности и видов товароносителя.

Методологический подход предполагает складскую схему поставки товаров от поставщиков (производителей) до конечных потребителей. В рамках данной схемы товар от поставщиков (производителей) поступает в логистический центр и (или) на транспортно-логистический терминал. Далее он поступает на распределительно-подсортировочные склады и после этого потребителям. Кроме этого, товар может быть доставлен потребителям с распределительно-подсортировочных складов, минуя логистический центр и (или) транспортно-логистический терминал.

Месторасположение логистического центра и (или) транспортно-логистического терминала предлагается определять в соответствии с системой, предложенной Э. Гувером и

обобщенной В.И. Сергеевым и В.В. Дыбской, а также с учетом Комплексного плана развития инфраструктуры автомобильных и железных дорог, включенных в Перечень транспортных маршрутов ЕврАзЭС2, и проекта ECE/TRANS/WP.24/2011¹.

Разработанный авторами методологический подход включает два этапа:

— определение районов и городов областного подчинения, где целесообразно размещение объектов основной составляющей логистической инфраструктуры;

— привязка объектов на местности и определение их мощности, вида товароносителя и транспортных средств.

Первый этап. Первоначально на территории региона определяются все площадки, где возможно размещение объектов основной составляющей логистической инфраструктуры. Исходя из того, что количество площадок может быть достаточно большим, предлагается разделить все города и районы региона на группы со схожими значениями социально-экономических показателей [13]. После этого в качестве возможных площадок под размещение распределительно-подсортировочных складов и грузовых автомобильных терминалов и парков следует оставить только те, которые расположены в районах и городах региона, отнесенных в группу с наибольшими значениями ключевых социально-экономических показателей. В соответствии с системой размещения объектов инфраструктуры [11, 12] в качестве таких показателей предлагается принять [13]:

— объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами (обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды), млн руб.;

— численность трудоспособного населения, тыс. чел.;

— среднемесячная заработная плата на одного работника, руб.;

— число жителей на 1 км²;

— объем работ, выполненных по виду экономической деятельности «Строительство», млн руб.;

— перевозки грузов автомобильным транспортом, тыс. т;

— оборот розничной торговли, млн руб.;

¹ Роль терминалов и логистических центров в интермодальных перевозках // Economic Commission for Europe. [Электронный ресурс] URL: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp24/ECE-TRANS-WP24-2011-03e.pdf> (дата обращения 04.11.2017)

— грузооборот автомобильного транспорта, тыс. т/км;

— инвестиции в основной капитал, млн руб.

Для разбиения и городов областного подчинения и районов на группы (кластеры) со схожими значениями заданных показателей предлагается применить подход, основанный на использовании совокупного потенциала двухэтапного кластерного, дискриминантного анализа и методов ABC. Данные методы предполагают получение приближенного решения, а их совместное использование позволяет получить согласованный результат, обеспечивающий оптимальный выбор районов для размещения основных составляющих складской и транспортной сети.

Применение классического и современного методов ABC дает возможность разбиения районов и городов областного подчинения на группы по степени их влияния на изучаемый признак. Классический метод ABC следует проводить отдельно по каждому социально-экономическому показателю. После этого необходимо определить районы и города, которые относились к группе А в 80 % случаев и более. Современный метод ABC должен проводиться для распределения районов и городов областного подчинения на группы, аналогично классическому методу ABC. Распределение на группы осуществляется с использованием графика зависимости нарастающего итога от объекта исследования. В районах и городах областного подчинения, которые были отнесены в группу А более чем в 80 % случаев целесообразно размещение объектов логистической инфраструктуры [13].

Двухэтапный кластерный анализ дает возможность разделить города областного подчинения и районы на классы таким образом, чтобы объекты в одном кластере были более похожи друг на друга, чем на объекты из другого кластера, а также оценить степень влияния каждого показателя на разбиение объектов на классы. Данный метод позволяет работать с категориальными и непрерывными переменными, автоматически осуществлять выбор числа кластеров и обеспечивает масштабируемость данных¹. Зависимая (классифицирующая) переменная может быть выражена в номинативной шкале. Расчет рекомендуется проводить в пакете прикладных программ STATISTICA или IBM SPSS Statistics. В качестве метода кластеризации необходимо

выбирать иерархические агломеративные методы [14].

С помощью дискриминантного анализа множество объектов исследования можно разделить на группы, а также оценить степень влияния вклада ключевых показателей в разделение объектов и вероятность отнесения районов и городов областного подчинения к каждому классу [15]. Применение дискриминантного, а не множественного регрессионного анализа обусловлено тем, что зависимая переменная (районы и города областного подчинения) выражена в номинативной шкале. Оценка степени влияния вклада ключевых показателей в разделение объектов на группы производится с помощью нормированных коэффициентов канонической дискриминантной функции. Расчет рекомендуется проводить в пакете прикладных программ STATISTICA или IBM SPSS Statistics, так как данные программы позволяют получить уравнения канонических функций со значениями важных статистических показателей качества классификации λ -Вилкса и χ^2 -тест.

В работах [13, 16] на примере Волгоградской области была показана согласованность результатов при одновременном использовании кластерного, дискриминантного анализа и методов ABC. В результате проведенных расчетов за 2010–2015 гг. были определены районы (Жирновский, Городищенский и Котельниковский) и города областного подчинения (Волжский, Камышин и Михайловка), где целесообразно размещение основных объектов складской и транспортной сети, а также дана оценка степени влияния социально-экономических показателей на разбиение объектов исследования на группы со схожими значениями рассматриваемых показателей.

В формируемую выборку районов Волгоградской области и городов областного подчинения не был включен г. Волгоград, так как целесообразность размещения объектов логистической инфраструктуры на его территории была показана в работе [16].

Второй этап. После определения районов и городов областного подчинения с площадками под возможное размещение основных объектов логистической инфраструктуры необходимо осуществить их географическую привязку на местности. Географическую привязку на местности ключевых объектов складской сети и основных объектов транспортной инфраструктуры (грузовых автомобильных терминалов и парков) необходимо выполнять в следующей последовательности. На первона-

¹ IBM SPSS Statistics Base 20: Практическое руководство к применению. Copyright IBM Corporation USA 1989, 2011

чальном этапе определяются места расположения сети распределительно-подсортировочных складов с одновременным определением их мощности и вида товароносителя.

В работах [17–19] предложен подход к решению проблемы определения оптимальных мощности и расположения объектов складской сети на территории регионов. Как реализация этого подхода авторами разработана математическая модель в виде задачи математического программирования. Целевая функция модели [17]

$$Z = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 \quad (1)$$

описывает суммарные затраты на содержание складов, грузопереработку и транспортировку товаров: z_1 — приведенные затраты на размещение складов; z_2 — затраты на грузопереработку товаров на складах; z_3 — транспортные затраты на доставку товаров со складов в розничную торговую сеть; z_4 (z_5) — транспортные затраты на доставку товаров от производителей (поставщиков) на склады.

Минимизация функции Z осуществляется при ограничениях на тип товароносителей (задан набор), мощности складов (задан набор), объем ввозимых на склад и вывозимых со склада товаров, спрос на товар (потребность клиентов в товаре должна быть удовлетворена) [17].

Модель используется в предположении, что известно месторасположение производственных предприятий, поставщиков и потребителей, определены места возможного расположения распределительно-подсортировочных складов, заданы затраты, связанные с перевозкой и грузопереработкой товаров.

Представленная оптимизационная модель [17] позволяет определить месторасположение сети распределительно-подсортировочных складов на территории региона, их мощности, вид товароносителя исходя из минимума суммарных затрат, связанных с транспортировкой, грузопереработкой товаров и размещением складов заданной мощности, ресурсных ограничений и потребительского спроса.

На основании сформированной складской сети на территории региона определяют месторасположение автомобильных грузовых терминалов и парков, их количество и мощность.

Задача оптимизации транспортной инфраструктуры региона рассмотрена в работе [18] и поставлена как задача математического программирования. Здесь разработана математическая модель для минимизации затрат Z на

функционирование транспортного парка, сети складов и грузопереработку. В целевой функции модели [18]

$$Z = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (2)$$

представлены приведенные затраты на размещение сети автотранспортных парков (F_1), суммарные затраты на перевозку грузов (F_2), суммарные затраты на перегон порожнего транспорта (F_3), затраты на грузопереработку (F_4).

Минимизация функции затрат должна проводиться при соблюдении следующих условий [18]:

— выбор товароносителей можно осуществлять только из заданного набора, в зависимости от товара;

— потребность каждого магазина розничной торговли в товарах должна быть полностью удовлетворена;

— объем продукции, вывозимой с каждого производственного предприятия, не должен превосходить объемов его производства;

— объемы поставок товаров на склады и со складов магазинам розничной торговли должны быть неотрицательными.

Модель используется в предположении, что известно месторасположение региональной сети распределительно-подсортировочных складов, поставщиков и потребителей, задан тип товароносителя, определены затраты, связанные с транспортировкой и грузопереработкой товаров.

Модель [18] позволяет определить оптимальное количество и месторасположение автотранспортных грузовых терминалов и парков с учетом возможных мест их размещения, их мощность и учитывает ограничение по типам и количеству транспортных средств.

В связи с тем, что предложенная модель впервые учитывает возможность применения разных типов товароносителей и определение мощности основных объектов логистической инфраструктуры, для численного решения задач оптимизации региональной складской и объектов транспортной инфраструктуры (грузовых автомобильных терминалов и парков) предлагается использовать разработанный авторами математический подход [19].

Оригинальность модели состоит в том, она впервые дает возможность одновременно, во-первых, учесть использование разных типов товароносителей и, во-вторых, определить мощности основных объектов логистической инфраструктуры. Оригинальность модели предполагает использование специального математического аппарата для численного реше-

ния задач оптимизации региональной складской и транспортной инфраструктуры (грузовых автомобильных терминалов и парков), а именно, предлагается использовать разработанный авторами математический подход [19].

В указанных моделях [17, 18] все функции являются сепарабельными, большинство из них — линейные. Осложняют процесс поиска оптимального решения задач дополнительные условия: 1) некоторые функции являются нелинейными (например, функции z_1, z_2, F_1), 2) на некоторые переменные наложено требование целочисленности (переменные, определяющие количество используемых единиц автотранспорта каждого вида и количество складов), 3) некоторые переменные могут принимать значения только из дискретного множества (переменные, связанные с видом товароносителя, с мощностью складов). Модели формирования элементов региональной логистической инфраструктуры схожи между собой с формальной точки зрения и могут быть представлены в следующем общем виде [20]:

минимизировать

$$f^0(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n f_j^0(x_j), \quad (3)$$

при условиях

$$f^i(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n f_j^i(x_j) R_i b_i, i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

где R_i есть либо «≤», либо «=»,

$$x_j \in \mathbb{Z}_{\geq 0}, j = \overline{1, n_1}, \quad (5)$$

$$x_j \in W_j = \{w_j^1, w_j^2, \dots, w_j^{s_j}\}, j = \overline{n_1 + 1, n_2}, \quad (6)$$

где $w_j^k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}, k = \overline{1, s_j}$,

$$x_j \geq 0, j = \overline{n_2 + 1, n}. \quad (7)$$

Опишем кратко математический аппарат для численного решения задач оптимизации складской и автотранспортной инфраструктур [20].

В силу высокой размерности рассматриваемой задачи, наличия нелинейных функций в ее постановке, а также ограничений (5), (6) на переменные (целочисленность, принадлежность дискретному множеству) от поиска оптимального решения резонно отказаться. Будем использовать приближенный подход к решению поставленной задачи (3)–(7). Предложенный подход нацелен на использование эффективных вычислительных схем решения многомерных и высокоразмерных оптимизационных задач [20].

Для приближенного решения задачи рассмотрим ее непрерывную релаксацию (НР): от-

кажемся от требования целочисленности (дискретности) переменных и заменим условия (5)–(7) условием [20]:

$$x_j \geq 0, j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Таким образом, НР исходной задачи (3)–(7) есть задача (3), (4), (8).

В качестве приближенного решения исходной задачи примем приближенно оптимальное решение НР. В случае получения неудовлетворительного по качеству приближения (по ограничениям, по переменным) НР разбивается на две подзадачи, каждая из которых решается отдельно и т. д. до тех пор, пока не будет получено приемлемое по качеству решение. Предлагаемый подход сочетает в себе идеи метода сепарабельного программирования [21, 22] и метода ветвей и границ [5, 23–25].

В силу сепарабельности функций $f_j^i(x_j)$, $i = \overline{0, m}, j = \overline{1, n}$ для получения приближенно оптимального решения задачи НР воспользуемся методом сепарабельного программирования, выполнив предварительно линеаризацию НР. Для линеаризации задачи каждая из нелинейных функций $f_j^i(x_j)$, $i = \overline{0, m}, j = \overline{1, n}$ заменяется ее кусочно-линейной аппроксимацией. Таким образом, исходная задача НР заменяется приближенной задачей линейного программирования, которая решается специальным вариантом симплекс-метода [21].

Если найденные значения переменных удовлетворяют условиям (5)–(7), то приближенно оптимальное решение исходной задачи (3)–(7) найдено. Если это не так, для получения решения используется схема ветвей и границ для решения задач частично целочисленного линейного программирования [2, 5]. Если точность решения не является критичной (задача состоит в получении примерных оценок параметров реальной системы), то для ускорения процесса поиска решения резонно отсекал еще не исследованные вершины графа ветвлений с «плохими» оценками.

Заключение

В статье исследована проблема формирования логистической инфраструктуры на территории региона Российской Федерации. Для ее решения авторами предлагается методологический подход, позволяющий определить месторасположение ключевых объектов логистической инфраструктуры: складской (построение сети распределительно-подсортировочных складов) и транспортной (сеть автотранспортных грузовых терминалов и парков).

Предлагаемый методологический подход состоит из двух этапов. На первом этапе определяются районы и города областного подчинения, где целесообразно размещение ключевых объектов логистической инфраструктуры. Для решения данной задачи авторы предлагают использовать подход, основанный на использовании совокупного потенциала двухэтапного кластерного, дискриминантного анализа и методов ABC. Согласованность результатов совместного использования указанных методов продемонстрирована авторами на примере Волгоградской области.

На втором этапе осуществляется географическая привязка объектов логистической инфраструктуры на местности. Авторами разработаны математические модели для определе-

ния оптимальных параметров складской сети и автотранспортных грузовых терминалов и парков. Соответствующие задачи оптимизации решаются с целью минимизации затрат на продвижение материального потока от поставщиков (производителей) к потребителям.

Оригинальность моделей состоит в том, что они впервые дают возможность одновременно учесть использование разных типов товароносителей и определить мощности основных объектов логистической инфраструктуры.

Для решения указанных задач оптимизации предложен разработанный авторами подход, включающий представление задачи в виде непрерывной релаксации и использование методов сепарабельного программирования и ветвей и границ.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-010-00182.

Список источников

1. *Сверчков П. А.* Анализ применимости существующих подходов к проектированию сети распределения для компаний сетевой розничной торговли // *Логистика и управление цепями поставок.* — 2017. — № 1 (78). — С. 98–106.
2. *Ardalan A.* An Efficient Heuristic for Service Facility Location // *Proceedings, Northeast Decision Sciences Institute Conference, 1984.* — P. 181–182.
3. The Extension of GOMA Model for Determining the Optimal Number of Depots / *Rutten W. G. M. M., Van Laarhoven P. J. M., Vos B.* // *IE Transactions.* — 2001. — Vol. 33, iss. 11. — Pp. 1031–1036.
4. *Geoffrion A. M., Morris J., Webster S.* Distribution System Design // *Facility Location: A Survey of Applications and Methods* / Ed. Z. Drezner. — New York : Springer, 1995. — 572 p. — Pp. 181–198.
5. *Land A. H., Doig A. G.* An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems // *Econometrica.* — 1960. — Vol. 28. — № 3. — Pp. 497–520.
6. *Megiddo N., Supowit K. J.* On the complexity of some common geometric location problems // *SIAM. Journal on Computing.* — 1984. — Vol. 13, № 1. — Pp. 182–196.
7. *Копылова О. А., Рахмангулов А. Н.* Методика выбора мест размещения транспортно-логистических центров // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования.* — 2011. — № 1. — С. 13–16.
8. *Romeijn H. E., Shu J., Teo C.-P.* Designing Two-Echelon Supply Network // *Eur. J. of Operational Research.* — 2007. — V. 178, iss. 2. — Pp. 449–462. — DOI: 10.1016/j.ejor.2006.02.016.
9. *Romeijn H. E., Al-Gwaiz M., Chao X.* Capacity Expansion and Cost Efficiency Improvement in the Warehouse Problem // *Naval Research Logistics.* — 2016. — V. 63, iss. 5. — Pp. 367–373. — DOI: 10.1002/nav.21703.
10. *Geunes J., Romeijn H. E., Van Den Heuvel W.* Improving the Efficiency of Decentralized Supply Chains with Fixed Ordering // *Eur. J. of Operational Research.* — 2016. — V. 252, iss. 3. — Pp. 815–828. — DOI: 10.1016/j.ejor.2016.02.004.
11. *Hoover E. M.* The Location of Economic Activity. — New York: McGraw Hill Book Company, 1948. — 336 p.
12. *Дыбская В. В.* Логистика складирования для практиков. — М.: Альфа-Пресс, 2005. — 208 с.
13. *Попов П. В., Мирецкий И. Ю., Логинова Е. В.* Эффективное размещение распределительно-подсортировочных складов на территории региона // *Экономика региона.* — 2017. — Т. 13, вып. 3. — С. 871–882. — doi: 10.17059/2017–3-19.
14. *Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р.* Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. — М.: Финансы и статистика, 2009. — 215 с.
15. *Дубров А. М., Мхитарян В. С., Трошин Л. И.* Многомерные статистические методы: учебник. — М.: Финансы и статистика, 2000. — 352 с.
16. *Попов П. В., Мирецкий И. Ю.* Влияние социально-экономических показателей на формирование складской инфраструктуры региона // *Вестник МГСУ.* — 2017. — Т. 12, № 2 (101). — С. 222–229. — doi 10.22227/1997–0935.2017.2.222–229.
17. Модель формирования складской инфраструктуры регионов / *Попов П. В., Мирецкий И. Ю., Ивуть Р. Б., Лапковская П. И.* // *Новости науки и технологий.* — 2016. — № 2 (37). — С. 24–28.
18. *Ивуть Р. Б., Попов П. В., Мирецкий И. Ю.* Проектирование сети автотранспортных парков // *Наука и техника.* — 2016. — Т. 15, № 5. — С. 442–446. — doi 10.21122/2227–1031–2016–15–5-442–446.

19. Попов П. В., Мирецкий И. Ю. Об оптимизации логистической инфраструктуры региона // *Логистика*. — 2017. — № 7. — С. 37–39.
20. Мирецкий И. Ю., Попов П. В., Ивуть Р. Б. К проблеме оптимизации региональной складской и автотранспортной инфраструктуры // *Наука и техника*. — 2017. — Т. 16, № 6. — С. 532–536. — DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-6-532-536.
21. Miller C. E. The Simplex Method for Local Separable Programming // *Recent Advances in Mathematical Programming* / Eds. R.L Graves and P. Wolfe. — New York: McGraw-Hill, 1963. — 366 p. — Pp. 89–100.
22. Муртаф Б. Современное линейное программирование. — М.: Мир, 1984. — 224 с.
23. LP Modelling and Simulation of Supply Chain Networks / Preusser P., Almeder C., Hartl R. F., Klug M. // *Supply Chain Management und Logistik: Optimierung Simulation, Decision Support* / Eds. H.O. Günther, D.C. Mattfeld, L. Suhl. — Heidelberg : Physica-Verlag HD, 2005. — 578 p. — Pp. 95–113.
24. Miranda P.A., Garrido R. A. Inventory Service-Level Optimization within Distribution Network Design Problem // *Production Economics*. — 2009. — № 122. — Pp. 276–285.
25. Daskin M. *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications* (2nd Edition) — New York : John Wiley & Sons Inc., 2013. — 536 p.

Информация об авторах

Попов Павел Владимирович — кандидат технических наук, научный сотрудник, Волжский филиал, Волгоградский государственный университет (Российская Федерация, 404132, г. Волжский, ул. Мира, 90; e-mail: donpascha@vgi.volsu.ru).

Мирецкий Игорь Юрьевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры математики, информатики и естественных наук, Волжский филиал, Волгоградский государственный университет; Scopus Author ID: 6506429112 (Российская Федерация, 404121, г. Волжский, ул. 40 лет Победы, 11; e-mail: igor.miretskiy@vgi.volsu.ru).

For citation: Popov, P. V. & Miretskiy, I. Yu. (2019). Methodology for Constructing the Region's Logistics Infrastructure. *Ekonomika regiona* [Economy of region], 15(2), 483-492

P. V. Popov, I. Yu. Miretskiy

Volzhsy Branch, Volgograd State University
(Volzhsy, Russian Federation; e-mail: donpascha@vgi.volsu.ru)

Methodology for Constructing the Region's Logistics Infrastructure

The article discusses determining the location of the key logistics infrastructure in regions in order to reduce the distribution network's costs, increase the region's transit potential and investment appeal, and integrate the region into the global supply chain. We suggest the methodological approach to developing the models of the region's logistics infrastructure. It efficiently connects transport and storage networks in the region and allows determining the capacity of the key infrastructure. As the criterion, we consider the total costs of delivering the material flow to the consumer. The method includes two stages. At the first stage, using the region's main socio-economic indicators, we determine the cities and districts, where the placement of the infrastructure will be more profitable. To solve this problem we suggest implementing the two-step cluster analysis, discriminant analysis, and ABC methods. The joint use of those methods allows achieving a coherent result that ensures the optimal choice of areas for locating the main elements of warehouse (distribution center, and distribution and sorting warehouses) and transport networks (car fleets and terminals). The second stage involves geo-referencing of the infrastructure on the administrative territorial units, defined at the first stage. For determining the location and capacity of the distribution and sorting warehouses, we propose to apply mathematic programming, using the total costs of the delivery and transshipment of goods as the criterion. For organizing the transport infrastructure, linked to the generated warehouse network, we suggest an approach, which allows minimizing cargo shipping's costs and car fleet and terminals' maintenance. To solve the optimization problems we suggest using the method of separable programming and branch-and-bound method. The article demonstrates the appliance of the proposed method on the example of Volgograd oblast. The obtained results can be used to form the region's logistics infrastructure.

Keywords: methodological approach, logistics infrastructure, warehouse and transport network, two-stage cluster analysis, ABC method, discriminant analysis, mathematical model, continuous relaxation, separable programming, optimization problem

References

1. Sverchkov, P. A. (2017). Analiz primenimosti sushchestvuyushchikh podkhodov k proektirovaniyu seti raspredeleniya dlya kompanii setevoy roznichnoy trgovli [Analysis of an Applicability of Existing Approaches to the Distribution Network Design for Retail]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and Supply Chain Management], 1(78), 98–106. (In Russ.)
2. Ardalan, A. (1984). An Efficient Heuristic for Service Facility Location. *Proceedings, Northeast Decision Sciences Institute Conference*, 181–182.
3. Rutten, W. G. M. M., Van Laarhoven, P. J. M. & Vos, B. (2003). The extension of GOMA model for determining the optimal number of depots. *IIE Transactions*, 33, 1031–1036.

4. Geoffrion, A. M., Morris, J. & Webster, S. (1995). Distribution System Design. In: Z. Drezner (Ed.), *Facility Location: A Survey of Applications and Methods* (pp. 181–198). NY: Springer.
5. Land, A. H. & Doig, A. G. (1960). An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica*, 28(3), 497–520.
6. Megiddo, N. & Supowit, K. J. (1984). On the complexity of some common geometric location problems. *Siam J. Comput.*, 13(1), 182–196.
7. Kopylova, O. A. & Rahmangulov, A. N. (2011). Metodika vybora mest razmeshcheniya transportno-logisticheskikh centrov [The method of choosing the location of transport and logistics centers]. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya [Actual problems of modern science, technology and education]*, 1, 13–16. (In Russ.)
8. Romeijn, H. E., Shu, J. & Teo, C.-P. (2007). Designing Two-Echelon Supply Network. *European Journal of Operational Research*, 178(2), 449–462. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.02.016.
9. Romeijn, H. E., Al-Gwaiz, M. & Chao, X. (2016). Capacity Expansion and Cost Efficiency Improvement in the Warehouse Problem. *Naval Research Logistics*, 63(5), 367–373. DOI:10.1002/nav.21703.
10. Geunes, J., Romeijn, H. E. & Van Den Heuvel, W. (2016). Improving the Efficiency of Decentralized Supply Chains with Fixed Ordering Costs. *European Journal of Operational Research*, 252(3), 815–828. DOI:10.1016/j.ejor.2016.02.004.
11. Hoover, E. M. (1948). *The Location of Economic Activity*. New York: McGraw Hill Book Company, 336.
12. Dybskaya, V. V. (2005). *Logistika skladirovaniya dlya praktikov [Warehousing logistics for experts]*. Moscow: Alfa-Press, 208. (In Russ.)
13. Popov, P. V., Miretskiy, I. Yu. & Loginova, E. V. (2017). Effektivnoe razmeshchenie raspredelitelno-podsortirovochnykh skladov na territorii regiona [Efficient Location of Distribution Centres and Warehouses in the Territory of a Region]. *Ekonomika regiona [Economy of Region]*, 13(3), 871–882. DOI: 10.17059/2017–3-19. (In Russ.)
14. Kim, J.-O., Mueller, Ch. W. & Klekka, W.R. (2009). *Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz [Factor, discriminant and cluster analysis]*. Moscow: Finance and Statistics, 215. (In Russ.)
15. Dubrov, A. M., Mkhitarjan, V. S. & Troshin, L. I. (2000). *Mnogomernyye statisticheskie metody: uchebnik [Multidimensional Statistical Methods: A Textbook]*. Moscow: Finance and Statistics, 352. (In Russ.)
16. Popov, P. V. & Miretskiy, I. Yu. (2017). Vliyanie sotsialno-ekonomicheskikh pokazateley na formirovanie skladskey infrastruktury regiona [Influence of socioeconomic indicators on the regional warehouse infrastructure formation]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, 12(2), 222–229. DOI: 10.22227/1997–0935.2017.2.222–229. (In Russ.)
17. Popov, P. V., Miretskiy, I. Yu., Ivut, R. B. & Lapkouskaya, P. I. (2016). Model formirovaniya skladskey infrastruktury regionov [The model of formation of warehouse infrastructure for regions]. *Novosti nauki i tekhnologii [News of science and technologies]*, 2(37), 24–28. (In Russ.)
18. Ivut, R. B., Popov, P. V. & Miretskiy, I. Yu. (2016). Proektirovanie seti avtotransportnykh parkov [Designing of an Automobile Fleet Network]. *Nauka i Tekhnika [Science & Technique]*, 15(5), 442–446. DOI: 10.21122/2227–1031–2016–15–5-442–446. (In Russ.)
19. Popov, P. V. & Miretskiy, I. Yu. (2017). Ob optimizatsii logisticheskoy infrastruktury regiona [On optimization of the region's logistics infrastructure]. *Logistika [Logistics]*, 7, 37–39. (In Russ.)
20. Miretskiy, I. Yu., Popov, P. V. & Ivut, R. B. (2017). K probleme optimizatsii regionalnoy skladskey i avtotransportnoy infrastruktury [On Problem of Regional Warehouse and Transport Infrastructure Optimization]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 16(6), 532–536. DOI:10.21122/2227–1031–2017–16–6-532–536. (In Russ.)
21. Miller, C. E. (1963). The Simplex Method for Local Separable Programming. In: R. L. Graves, P. Wolfe (Eds.), *Recent Advances in Mathematical Programming* (pp. 89–110). NY: McGraw-Hill.
22. Murtagh, B. A. (1981). *Advanced Linear Programming: Computation and Practice*. McGraw-Hill International Book Company, 202.
23. Preusser, P., Almeder, C., Hartl, R. F. & Klug, M. (2005). LP Modelling and Simulation of Supply Chain Networks. In: H. O. Günther, D. C. Mattfeld, L. Suhl (Eds.), *Supply Chain Management und Logistik: Optimierung Simulation, Decision Support* (pp. 95–113). Heidelberg: Physica-Verlag HD.
24. Miranda, P. A. & Garrido, R. A. (2009). Inventory Service-Level Optimization within Distribution Network Design Problem. *Int. J. Production Economics*, 122, 276–285.
25. Daskin, M. (2013). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications (2nd Edition)*. NY: John Wiley & Sons, Inc., 536.

Authors

Pavel Vladimirovich Popov — PhD in Engineering, Research Associate, Volzhsky Branch, Volgograd State University (90, Mira st., Volzhsky, 404132, Russian Federation; e-mail: donpascha@vgi.volsu.ru).

Igor Yuryevich Miretskiy — Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Mathematics, Informatics and Natural Sciences, Volzhsky Branch, Volgograd State University; Scopus Author ID: 6506429112 (11, 40-let Pobedy st., Volzhsky, 404121, Russian Federation; e-mail: igor.miretskiy@vgi.volsu.ru).