

УДК 330.46

DOI: 10.34670/AR.2026.49.41.039

Многокритериальная оптимизация сетевой структуры цепей поставок

Соловьев Дмитрий Сергеевич

Аспирант,
кафедра логистики и управления цепями поставок,
Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30-32, литер А;
e-mail: m9679029@gmail.com

Аннотация

Формирование логистической сети – стратегически важная задача практически для любой компании. Существует множество моделей и алгоритмов для решения этой проблемы, которые различаются фундаментальными допущениями, постановкой задачи и математической сложностью. Основными трудностями при решении этой задачи являются ее многокритериальный характер и высокая размерность реальных логистических сетей крупных компаний. В работе представлен комбинированный алгоритм многокритериальной оптимизации сетевой структуры цепей поставок, который включает, во-первых, описание и анализ сети компании с помощью алгоритмов анализа сетей, что позволит на основе методов оценки важности участников сети и методов выделения подгрупп сократить размер логистической сети, оставив только значимые связи. Во-вторых, сформировать задачу оптимизации сетевой структуры цепи поставок как многокритериальную задачу смешанного целочисленного линейного программирования. В-третьих, рассмотреть различные сценарии поиска решения, то есть учесть в решении неопределенность внешней среды.

Для цитирования в научных исследованиях

Соловьев Д.С. Многокритериальная оптимизация сетевой структуры цепей поставок // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2026. Том 16. № 6А. С. 376-386. DOI: 10.34670/AR.2026.49.41.039

Ключевые слова

Управление цепями поставок, анализ сетей, модели, комбинированный алгоритм, оптимизация, многокритериальная оптимизация, логистическая сеть, смешанное целочисленное линейное программирование.

Введение

Проведенный в ранее опубликованных работах анализ работ по проблеме применения математических моделей и методов для решения задачи оптимизации сетевой структуры цепей поставок [Бочкарев, Соловьев, 2024; Бочкарев, Фу Циаций, 2023], а также анализ работ по проблеме применения моделей и алгоритмы для работы с сетями и графами в управлении цепями поставок [Соловьев, 2026] показал высокую актуальность данных направлений исследований. В частности, в работе [Соловьев, 2026] предложена классификация моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами, отражающая современное состояние и перспективы их развития и отмечено, что данные модели и алгоритмы могут быть полезны при оптимизации сетевой структуры цепей поставок.

Определение местоположения множества складов в цепи поставок традиционно рассматривается как задача смешанного целочисленного линейного программирования (англ. *mixed-integer linear programming* – *MILP*). Решаются данные задачи, как правило, симплексным методом или с помощью метода отсечений Гомори для задач целочисленного или смешанного целочисленного линейного программирования. Альтернативными методами решения данных задач являются алгоритмы для работы с сетями (графами), эвристические и мета-эвристические алгоритмы, а также имитационное моделирование [Бочкарев, Соловьев, 2024; Бочкарев, Фу Циаций, 2023].

Вместе с тем во многих исследованиях в связи со сложностью задач оптимизации сетевой структуры цепей поставок нашли применение так называемые гибридные или комбинированные алгоритмы, которые объединяют методы линейного программирования с эвристикой, мета-эвристикой или имитационным моделированием. В данной работе предлагается комбинированный алгоритм многокритериальной оптимизации сетевой структуры цепей поставок, объединить алгоритмы для работы с сетями (графами) с моделью смешанного целочисленного линейного программирования. При этом алгоритмы для работы с сетями (графами) используются для сокращения размера логистической сети, а алгоритм смешанного целочисленного линейного программирования – для определения оптимального местоположения множества складов в сети поставок.

Содержательная и математическая постановка задачи оптимизации сетевой структуры цепи поставок

Содержательная и математическая постановка данной задачи была рассмотрена ранее в работе [Бочкарев, Фу Циаций, 2023], поэтому ограничимся кратким ее описанием.

Содержательная постановка: дистрибьюторская компания должна создать сеть распределительных центров, из которых она будет поставлять свою продукцию на свои рынки с целью удовлетворения прогнозируемого спроса на следующий календарный период планирования (например, год).

Цель: минимизировать сумму складских и транспортных издержек при поддержании приемлемого уровня обслуживания покупателей и минимизации эмиссии выбросов парниковых газов от работы автотранспорта в атмосферу.

Рассмотрим постановку этой задачи на примере крупной российской компании сферы DIY-ритейла, которая ставит перед собой задачу оптимизации своей сети поставок, включающей два распределительных центра (РЦ), расположенных в Санкт-Петербурге и Москве, пятнадцать

региональных складов в городах Волгоград, Воронеж, Казань, Краснодар, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Самара, Уфа, Иркутск, Киров, Красноярск, Мурманск, Новосибирск, Омск, Пермь и более 80 регионов, в которые осуществляется доставка товаров как с региональных складов, так и напрямую из распределительных центров. Прикрепление регионов к региональным складам и региональных складов к распределительным центрам представлено в табл. 1.

Таблица 1 – Прикрепление регионов к региональным складам и региональных складов к распределительным центрам

Распределительный центр	Города, в которых расположены региональные склады, прикрепленные к РЦ	Количество снабжаемых регионов
РЦ Москва	→	76
	Волгоград	12
	Воронеж	6
	Казань	6
	Краснодар	6
	Нижний Новгород	8
	Ростов-на-Дону	7
	Самара	8
	Уфа	1
РЦ Санкт-Петербург	→	72
	Иркутск	1
	Киров	5
РЦ Санкт-Петербург	Красноярск	5
	Мурманск	1
	Новосибирск	6
	Омск	5
	Пермь	3

Источник: составлено автором на основании данных российской компании сферы DIY-ритейла.

Примечание – Символ → означает, что снабжение регионов осуществляется напрямую из распределительного центра.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, в рассматриваемой компании преобладают прямые поставки из распределительных центров региональным клиентам. Региональные склады, расположенные в Уфе, Иркутске и Мурманске снабжают только один регион – Республику Башкортостан, Иркутскую и Мурманскую область соответственно. Таким образом, основная нагрузка по снабжению клиентов лежит на распределительных центрах, а региональные склады загружены крайне неравномерно. Кроме того, сеть поставок данной компании характеризуется перемещением грузов между складами и неудовлетворительным качеством обслуживания отдельных клиентов, удаленных как от распределительных центров, так и от региональных складов.

Следовательно, необходимо построить многокритериальную модель линейного программирования, оптимизация которой позволит выбрать вариант оптимального размещения складов и оптимизировать грузопотоки в цепи поставок с целью минимизации затрат, повышения качества обслуживания клиентов в цепи поставок компании и минимизации выбросов в атмосферу диоксида углерода CO₂ от работы автотранспорта.

Математическая постановка многокритериальной транспортно-складской задачи в матричном виде выглядит следующим образом.

Найти значения переменных $x_{i,j}$, y_k , y_l , z_k и z_l , минимизирующих значение целевых функций (1), (2) и (3)

$$TLC = \sum_I \sum_J c_{i,j} x_{i,j} + \sum_K r_k y_k + \sum_L r_l y_l + \sum_K R_k z_k + \sum_L R_l z_l \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$TDT = \sum_I \sum_J t_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$ECO_2 = \sum_I \sum_J e_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min; \quad (3)$$

при ограничениях (4) – (10)

$$\sum_I x_{i,j} - S_k z_k \leq 0, \quad \forall i, j, k; \quad (4)$$

$$\sum_I x_{i,j} - S_l z_l \leq 0, \quad \forall i, j, l; \quad (5)$$

$$z_k + z_l \leq 1, \quad \forall k, l; \quad (6)$$

$$\sum_J x_{i,j} - D_i = 0, \quad \forall i; \quad (7)$$

$$\sum_I x_{i,j} - y_k - y_l = 0, \quad \forall j, k, l; \quad (8)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l \geq 0, \quad \forall i, j, k, l; \quad (9)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l - \text{целое}, \quad \forall i, j, k, l. \quad (10)$$

где

TLC – общие логистические затраты, тыс. руб.;

TDT – общее время доставки, дни;

ECO_2 – эмиссия выбросов CO_2 в атмосферу от работы автотранспорта, кг;

m – количество снабжаемых регионов;

n – количество мест размещения складов;

k – количество малых складов;

l – количество крупных складов;

I – множество индексов снабжаемых регионов, $I = \overline{1, m}$;

J – множество индексов мест размещения складов, $J = \overline{1, n}$;

K – множество индексов малых складов, $K = \overline{1, k}$;

L – множество индексов крупных складов, $L = \overline{1, l}$;

R_k – ежегодные складские затраты для k -го малого склада, тыс. руб.;

R_l – ежемесячные складские затраты для l -го крупного склада, тыс. руб.;

$c_{i,j}$ – средние затраты на доставку одной партии товаров из j -го склада в регион i , тыс. руб.;

$t_{i,j}$ – средние затраты времени на доставку одной партии товаров из j -го склада в регион i , дни;

$e_{i,j}$ – величина выбросов в атмосферу CO_2 от работы автотранспорта при доставке одной партии товаров из j -го склада в регион i , кг;

r_k – удельные складские затраты на грузопереработку одной партии товаров (равной грузоподъемности одного автомобиля) для k -го малого склада, тыс. руб.;

r_l – удельные складские затраты на грузопереработку одной партии товаров (равной грузоподъемности одного автомобиля) для l -го крупного склада, тыс. руб.;

S_k	– пропускная способность (мощность) k -го малого склада, ед.;
S_l	– пропускная способность (мощность) l -го крупного склада, ед.;
D_i	– общий спрос i -го региона, ед.;
$x_{i,j}$	– переменная – количество партий товара (количество автомобилей), отправленных из j -го склада в регион i , ед.;
y_k	– переменная – количество единиц товара (количество автомобилей), переработанных на k -м малом складе, ед.;
y_l	– переменная – количество единиц товара (количество автомобилей), переработанных на l -м крупном складе, ед.;
z_k	– двоичная переменная, которая принимает значение 1, если малый k -й склад открыт, 0 – в противном случае;
z_l	– двоичная переменная, которая принимает значение 1, если крупный l -й склад открыт, 0 – в противном случае.

Целевая функция (1) – общие логистические затраты – представляет собой сумму транспортных затрат, затрат на грузопереработку на складах и затрат на содержание или аренду складов. Целевая функция (2) представляет собой общее время доставки, а целевая функция (3) – эмиссию выбросов CO₂ в атмосферу от работы автотранспорта.

Ограничения вида (4) и (5) требуют, чтобы отправка товаров осуществлялась только с открытых складов. Ограничение вида (6) указывает, что в каждом городе-кандидате на открытие склада может быть открыт один малый склад или один крупный склад, либо не открыт ни одного склада. Ограничение вида (7) требует, чтобы спрос регионов был бы удовлетворен в полном объеме. Ограничение вида (8) – это ограничение баланса потоков, которое указывает на то, что товары, доставленные региональным клиентам, обрабатываются либо на k -ом малом, либо на l -ом крупном складе. Ограничения вида (9) и (10) – это обычные для транспортно-складской задачи ограничения на неотрицательность и целочисленность переменных.

Таким образом, проблемы определения оптимального местоположения множества складов в зелёной цепи поставок компании сферы DIY-ритейла сформулирована как трехкритериальная задача смешанного целочисленного линейного программирования. Существуют различные методы решения задач многокритериальной оптимизации, в частности метод уступок, метод минимального отклонения от идеальной точки, метода аддитивной свертки целевых функций и ряд других, но рассмотрение этих методов выходит за рамки данной статьи.

Комбинированный алгоритм многокритериальной оптимизации сетевой структуры цепи поставок

Одна из проблем оптимизации сетевой структуры цепи поставок заключается в большой размерности данных задач. В частности, в работе [Бочкарев, Фу Циаций, 2023] рассматривается пример оптимизации относительно небольшой цепи поставок компании сферы DIY-ритейла, которая имеет 414 переменных ($m \times n + 2k + 2l = 42 \times 9 + 18 + 18 = 414$), где $m = 42$ – количество снабжаемых регионов, а $n = 9$ – количество складов. Реальные сети поставок крупных компаний, как правило, включают в себя большее количество складов и снабжаемых регионов (потребителей), поэтому количество переменных в них может достигать нескольких тысяч. По нашему мнению, эффективными методами решения проблемы большой размерности подобных задач является такие методы сетевого анализа как фильтрация сетевых данных на

основе значений атрибутов вершин и ребер.

Следовательно, целесообразно разработать комбинированный алгоритм многокритериальной оптимизации сетевой структуры цепи поставок, который объединяет методы сетевого анализа и многокритериальные методы решения задач смешанного целочисленного линейного программирования, блок-схема которого представлена на рисунке 1.

Данный алгоритм включает в себя следующие этапы (шаги):

1. Формирование базы данных (БД) показателей в таком объеме, в каком это необходимо для решения проблемы. Конкретное наполнение базы данных зависит от рассматриваемой сети поставок и, как минимум, она включает в себя: данные расстояниях или о затратах на доставку одной партии товаров от каждого склада до региональных клиентов, данные о времени доставки одной партии товаров от каждого склада до региональных клиентов, затраты на содержание складов; пропускную способность (мощность) складов и спрос региональных клиентов.

2. Формирование объекта-сети и ее анализ. Целью данного этапа является подготовка данных для включения в модель многокритериальной транспортно-складской задачи. Методы формирования объектов-сетей и их анализа рассматриваются в специальной литературе [Кормен и др., 2009; Люк, 2017; Нидхем, Ходлер, 2020; Сукар, 2021; Bertsekas, 1998], в частности в книге Дугласа Люка [Люк, 2017, с. 59] рассматриваются методы сетевого анализа в среде R.

Подзадачами данного этапа являются:

2.1. Преобразование исходных данных в сетевой граф и задание атрибутов вершин и ребер.

2.2. Подготовка данных для дальнейшего анализа базовое описание сети. Базовое описание сети проводится на основании так называемой «пятичисловой сводки», включающей следующие характеристики: размер сети, плотность, компоненты (подгруппы), диаметр и коэффициент кластеризации.

2.3. Фильтрация сетевых данных на основе значений атрибутов вершин с целью удаления изолированных вершин.

2.4. Фильтрация сетевых данных на основе значений атрибутов ребер с целью удаления связей, значения которых ниже определенного порога.

2.6. Формирование данных, подготовленные для включения в модель многокритериальной транспортно-складской задачи.

2.7. Графическое представление сети: позволяет визуально оценить качество сети, полученной с помощью алгоритмов фильтрация сетевых данных на основе значений атрибутов вершин и ребер. 3. Формирование модели многокритериальной транспортно-складской задачи, сценариев поиска решения и выбор метода ее решения.

3. Формирование модели многокритериальной транспортно-складской задачи, сценариев поиска решения и выбор метода ее решения.

Возможными сценариями являются:

- пессимистический: спроса региональных клиентов снижен на 10%;
- базовый: спрос региональных клиентов не изменяется;
- оптимистический: спрос региональных клиентов увеличен на 10%.

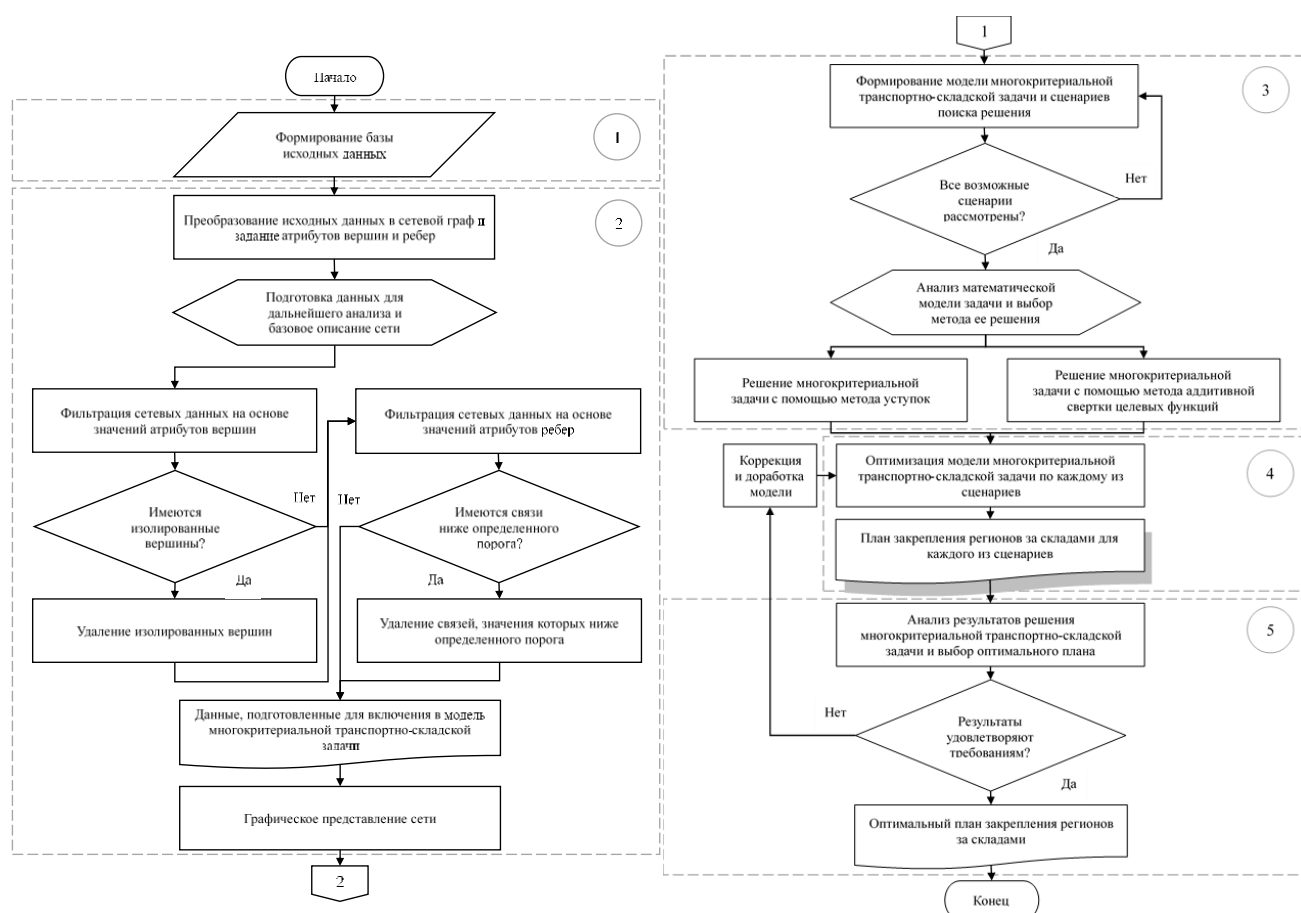
Возможно рассмотрение и других сценариев, формирование которых зависит от складывающейся рыночной ситуации, действий конкурентов, последствий введения экономических санкций в отношении Российской Федерации и других факторов.

Подзадачами этого этапа являются:

3.1. Построение модели многокритериальной транспортно-складской задачи и формирование набора исходных данных (в рамках различных сценариев поиска решения);

3.2. Анализ математической модели задачи и выбор метода ее решения.

Существуют несколько методов решения многокритериальных оптимизационных задач, но для многокритериальных задач, представленных в виде модели смешанного целочисленного линейного программирования, альтернатива заключается в выборе метода уступок или метода аддитивной свертки целевых функций.



Источник: разработано автором

Рисунок 1 – Комбинированный алгоритм многокритериальной оптимизации сетевой структуры цепи поставок (окончание)

4. Следующим этапом является оптимизация модели многокритериальной транспортно-складской задачи по каждому из сценариев. Результатом этого этапа является план закрепления регионов за складами для каждого из сценариев.

Как было указано выше, задачи такого типа имеют большую размерность, поэтому для поиска решения целесообразно использовать системы компьютерной математики, например MATLAB, или универсальные языки программирования Python, R и другие.

5. Анализ результатов решения многокритериальной транспортно-складской задачи и выбор оптимального плана – заключительный этап алгоритма.

На данном этапе лицо, принимающее решение, должно оценить удовлетворяет ли

полученного решения всем трем критериям: общие логистические затраты, общее время доставки и эмиссия выбросов CO₂ в атмосферу от работы автотранспорта. Вполне вероятно, возникновение такой ситуации, когда решение, оптимальное по затратам, может являться неприемлемым решением с точки зрения времени обслуживания клиентов или эмиссия выбросов CO₂ в атмосферу от работы автотранспорта. Возможна и обратная ситуация, когда решение приемлемое по затратам оказывается неприемлемым по двум другим критериям. При подобном исходе необходимо перейти к этапу 6.

6. Коррекция и доработка модели. Если среди сценариев, построенных на этапе 4, не нашлось ни одного сценария, удовлетворяющего требованиям лица, принимающего решения, то необходимо увеличить уступку по первой целевой функции и повторить процедуру начиная с шага 4.

Возможности языка программирования R для создания сетевых графов

Язык программирования R является единственным общедоступным программным пакетом, который обладает всесторонними возможностями для проведения стохастического моделирования сетей, (например, в R можно создавать экспоненциальные модели случайных графов), построения моделей динамических сетей (что позволяет исследовать изменение сети с течением времени) и имитационного моделирования сетей.

Алгоритм анализа сетей в R включают в себя следующие этапы:

- 1) Подготовка данных.
- 2) Создание объекта-сети в statnet и igraph.
- 3) Визуализация сети.
- 4) Базовое описание сети (определение размера сети, плотности сети, диаметра сети и коэффициента кластеризации).
- 5) Обнаружение подгрупп (сообществ).
- 6) Моделирование случайных сетей и сравнение моделей случайных сетей с наблюдаемыми сетями.
- 7) Имитационное моделирование сетевой динамики.

Рассмотрим возможности языка программирования R для создания сетевых графов на примере сети поставок компании АДМ. Компания АДМ является крупным дистрибутором на рынке строительных материалов и товаров для дома в Российской Федерации.

Создадим средствами языка программирования R объект сетевого графа ADM_network и визуализируем сетевой граф с помощью следующего скрипта:

```
op <- par(mar = rep(0,4))
gplot(ADM_network, gmode = "graph", thresh = 100,
      displaylabels = TRUE,
      vertex.col = "lightblue", vertex.cex = 2.0,
      label.cex = 0.4, label.pos = 5, mode = "fruchtermanreingold",
      displayisolates = FALSE)
par(op)
```

Результаты построения сетевого графа и его укладки с помощью алгоритма Фрюхтермана-Рейнгольда представлены на рис. 2. Функции gplot() передается параметр thresh = 100, который позволяет провести фильтрацию исходных данных и удалить связи, значения которых ниже

Следовательно, сеть поставок компании АДМ должна быть оптимизирована.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показывает, что встречающиеся на практике задачи многокритериальной оптимизации сетевой структуры цепи поставок, как правило, являются задачами большой размерности, а эффективными методами снижения размерности подобных задач является такие методы сетевого анализа как фильтрация сетевых данных на основе значений атрибутов вершин и ребер.

В статье рассмотрена общая математическая постановка трехкритериальной транспортно-складской задачи для компании сферы DIY-ритейла и разработан комбинированный алгоритм многокритериальной оптимизации сетевой структуры цепи поставок, который позволяет, во-первых, сократить размерность решаемой задачи путем исключения изолированных вершин сетевого графа и удаление связей, значения которых ниже определенного порога, во-вторых, сформировать задачу оптимизации сетевой структуры цепи поставок как многокритериальную задачу смешенного целочисленного линейного программирования, в-третьих, рассмотреть различные сценарии поиска решения, то есть учесть в решении неопределенность внешней среды.

Библиография

1. Бочкарев А.А., Соловьев Д.С. Проблема оптимизации сетевой структуры цепей поставок и методы ее решения // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Т. 14. № 5А. С. 502–511.
2. Бочкарев А.А., Фу Циаций. Определение оптимального местоположения множества складов в контексте зеленой цепи поставок // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 7А. С. 110–138. DOI: 10.34670/AR.2023.70.98.012.
3. Кормен Т., Лайзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2009. 1296 с.
4. Люк Д.А. Анализ сетей (графов) в среде R. Руководство пользователя / пер. с англ. А.В. Груздева. М.: ДМК Пресс, 2017. 250 с.
5. Нидхем М., Ходлер Э. Графовые алгоритмы. Практическая реализация на платформах Apache Spark и Neo4j / пер. с англ. В.С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2020. 258 с.
6. Соловьев Д.С. Модели и алгоритмы для работы с сетями и графами в управлении цепями поставок // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2026. Т. 16. № 1А. С. 302–310. DOI: 10.34670/A R.2026.62.70.031.
7. Сукар Л.Э. Вероятностные графовые модели. Принципы и приложения / пер. с англ. А.В. Снастина. М.: ДМК Пресс, 2021. 338 с.
8. Bertsekas D.P. Network Optimization: Continuous and Discrete Models. Athena Scientific, 1998. 585 p.

Multi-Criteria Optimization of the Network Structure of Supply Chains

Dmitrii S. Solov'ev

Postgraduate Student,
Department of Logistics and Supply Chain Management,
Saint Petersburg State University of Economics,
191023, 30-32, letter A, Griboedova Canal Embankment,
Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: m9679029@gmail.com

Abstract

The formation of a logistics network is a strategically important task for virtually any company. There are many models and algorithms for solving this problem, which differ in fundamental assumptions, problem statement, and mathematical complexity. The main difficulties in solving this task are its multi-criteria nature and the high dimensionality of real logistics networks of large companies. The paper presents a combined algorithm for multi-criteria optimization of the network structure of supply chains, which includes, firstly, the description and analysis of the company's network using network analysis algorithms, which will allow, based on methods for assessing the importance of network participants and methods for identifying subgroups, to reduce the size of the logistics network, leaving only significant connections. Secondly, to formulate the task of optimizing the network structure of the supply chain as a multi-criteria mixed-integer linear programming problem. Thirdly, to consider various scenarios for finding a solution, that is, to take into account the uncertainty of the external environment in the solution.

For citation

Solov'ev D.S. (2026) Mnogokriterial'naya optimizatsiya setevoy struktury tsepey postavok [Multi-Criteria Optimization of the Network Structure of Supply Chains]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 16 (6A), pp. 376-386. DOI: 10.34670/AR.2026.49.41.039

Keywords

Supply chain management, network analysis, models, combined algorithm, optimization, multi-criteria optimization, logistics network, mixed-integer linear programming.

References

1. Bertsekas, D. P. (1998). *Network Optimization: Continuous and Discrete Models*. Athena Scientific.
2. Bochkarev, A. A., & Fu, Ciaci. (2023). Opredeleniye optimal'nogo mestopolozheniya mnozhestva skladov v kontekste zelenoy tsepi postavok [Determining the optimal location of multiple warehouses in the context of a green supply chain]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today, and Tomorrow], *13*(7A), 110–138. <https://doi.org/10.34670/AR.2023.70.98.012>
3. Bochkarev, A. A., & Solovyov, D. S. (2024). Problema optimizatsii setevoy struktury tsepey postavok i metody yeye resheniya [The problem of optimizing the network structure of supply chains and methods of its solution]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today, and Tomorrow], *14*(5A), 502–511.
4. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Algoritmy: postroyeniye i analiz* [Introduction to algorithms] (2nd ed.). Williams Publishing House.
5. Luke, D. A. (2017). *Analiz setey (grafov) v srede R. Rukovodstvo pol'zovatelya* [A user's guide to network analysis in R]. DMK Press.
6. Needham, M., & Hodler, E. (2020). *Grafovyie algoritmy. Prakticheskaya realizatsiya na platformakh Apache Spark i Neo4j* [Graph algorithms: Practical implementation on Apache Spark and Neo4j platforms]. DMK Press.
7. Solovyov, D. S. (2026). Modeli i algoritmy dlya raboty s setyami i grafami v upravlenii tsepyami postavok [Models and algorithms for working with networks and graphs in supply chain management]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today, and Tomorrow], *16*(1A), 302–310. <https://doi.org/10.34670/AR.2026.62.70.031>
8. Sukar, L. E. (2021). *Veroyatnostnyye grafovyie modeli. Printsipy i prilozheniya* [Probabilistic graphical models: Principles and applications]. DMK Press.