

УДК 330.46

DOI: 10.34670/AR.2026.62.70.031

Модели и алгоритмы для работы с сетями и графами в управлении цепями 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

Методы оптимизации сетевой структуры цепей поставок в последнее десятилетие получили новый импульс в своем развитии, что связано, в первую очередь, с развитием алгоритмов искусственного интеллекта. Наиболее впечатляющие результаты получены в развитии алгоритмов эволюционной оптимизации, алгоритмов глубокого обучения и алгоритмов анализа сетей (графов). Проведенный анализ литературных источников показывает, что в настоящее время разработано множество моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами, которые, по нашему мнению, могут быть полезны для решения задачи оптимизации сетевой структуры цепей поставок, представлена классификация этих алгоритмов и рассмотрена проблема выбора программы для аналитической обработки графов и моделирования сетей.

Для цитирования в научных исследованиях

Соловьев Д.С. Модели и алгоритмы для работы с сетями и графами в управлении цепями поставок // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2026. Том 16. № 1А. С. 302-310. DOI: 10.34670/AR.2026.62.70.031

Ключевые слова

Управление цепями поставок, анализ сетей, модели, алгоритмы, классификация.

Введение

Оптимизация сетевой структуры цепей поставок в смысле методологии опирается на алгоритмы анализа сетей (англ. – *network analysis*) – отдельное научное направление со своими собственными теориями и методами, взятыми из других дисциплин, в частности из теории графов и топологии в математике, анализа социальных групп и процессов в социологии, анализа транспортных сетей в логистике. Существует большое количество конкретных прикладных задач, сформулированных с использованием графов, в частности, в логистике – это транспортная задача, транспортная задача с промежуточными пунктами, двухэтапная транспортная задача, задача о нахождении кратчайшего пути, задача коммивояжера, задачу определения местоположения множества складов в цепи поставок и другие.

В последние десятилетия в связи с резким ростом вычислительных мощностей компьютеров и развитием алгоритмов искусственного интеллекта методы анализа сетей получили новый импульс в своем развитии, в частности, это касается стохастических моделей (случайных, динамических и статистических сетей), которые нашли широкое применение в социологии. По нашему мнению, эти модели могут быть полезны при оптимизация сетевой структуры цепей поставок. Главное отличие стохастических моделей от детерминистических заключается в возможности исследования сложных связей и сетевой динамики, т.е. важной информации, содержащейся в исходных данных, которую невозможно выявить, исследуя детерминистические модели.

Метод исследования и исходные данные

Следует отметить, что данная работа является продолжением исследования, результаты которого были опубликованы ранее. В частности, в работе [Бочкарев, Соловьев, 2024] был представлен обзор литературы по проблеме применения моделей и методов оптимизации сетевой структуры цепей поставок, представленный в табл. 1, и предложена укрупненная классификация методов оптимизации сетевой структуры цепей поставок.

Таблица 1 – Анализ научных работ по проблеме применения моделей и методов оптимизации сетевой структуры цепей поставок

Критерии классификации		Количество работ	Удельная доля, %
1. Структура модели	а) Многоцелевая	24	85,71%
	б) Многоуровневая	15	53,57%
	в) Многопериодная	8	28,57%
2. Потоки в сети	а) Прямой	22	78,57%
	б) Возвратный	4	14,29%
3. Интеграция модели с задачей маршрутизации		14	50,00%
4. Учет неопределенностей		13	46,43%
5. Метод решения задачи	МILP	19	67,86%
	Эвристика	7	25,00%
	Метаэвристика	11	39,29%
	Симуляция	3	10,71%
	Декомпозиция	1	3,57%
	Другое	15	53,57%
6. Наличие в статье примера из практики		19	67,86%
Всего проанализировано работ:		28	100%

Источник: составлено автором по [Бочкарев, Соловьев, 2024].

Анализ данных работ показывает, что с точки зрения структуры подавляющее большинство из представленных в них моделей являются многоцелевыми (85,71%) и примерно половина из них являются многоуровневыми (53,57%) т.е. включают в себя производителей, потребителей, склады, депо и прочие узлы. Следовательно, оптимизация сетевой структуры цепей поставок – это оптимизация на графах (по крайней мере это утверждение верно для многоуровневых цепей поставок), поэтому, по нашему мнению, целесообразно рассмотреть существующие модели и алгоритмы для работы с сетями и графами, и предложить их классификацию.

Общая логика исследования представлена на рис. 1. В наиболее полном виде модели и алгоритмы для работы с сетями и графами представлены в пяти работах. Базовые алгоритмы для работы с графами представлены в книгах Томаса Кормена и др. и Дмитрия Бертсекаса [Кормен и др., 2009; Bertsekas, 1998], графовые платформы и особенности алгоритмической обработки графов – в книге Марка Нидхема и Эми Ходлера [[Нидхем, Ходлер, 2020], моделирование социальных сетей, в том числе построение моделей случайных, статистических и динамических сетей – в книге Дугласа Люка [Люк, 2017], а вероятностные графовые модели, используемые в процессах принятия решений – в книге Луиса Сукара [Сукар, 2021]. Выбор основополагающих работ обусловлен необходимостью классификации, прежде всего, компьютерных моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами.

Следует отметить, что в большинстве из 28 научных работ, анализ которых представлен в табл. 1, в том или ином виде рассматриваются сетевые графы, но не графовые алгоритмы, рассматриваемые в этих работах задачи решаются, как правило, с использованием того или иного метода математического программирования, эвристики, метаэвристики или имитационного моделирования.



Рисунок 1 – Диаграмма метода исследования (Источник: составлено автором)

Классификация моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами

Проанализированные работы по проблеме применения моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами, позволили нам разработать укрупненную классификацию соответствующих моделей и алгоритмов, представленную на рис. 2.

Анализ литературных источников показывает, что все моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами могут быть разбиты на две обширные группы: первая из которых включает в себя классические (детерминистические) графовые алгоритмы, а вторая – стохастические. К группе классических графовых алгоритмов относятся: элементарные алгоритмы для работы с графами; алгоритмы построения минимального остовного дерева; алгоритмы поиска кратчайших путей; алгоритмы поиска максимального потока; специальные алгоритмы поиска потока минимальной стоимости; нелинейные алгоритмы сетевой оптимизации [Кормен и др., 2009; Bertsekas, 1998].

Группа вероятностных моделей и алгоритмов работы с ними, в свою очередь, также делится на две большие подгруппы: модели поддержки принятия управленческих решений и модели анализа социальных сетей. Первая подгруппа этих методов подробно рассмотрена в книге Луиса Энрике Сукара [Сукар, 2021] и не имеют отношения к проблеме оптимизации сетевой структуры цепей поставок, поэтому не рассматриваются в настоящей статье. Вторая подгруппа – модели анализа социальных сетей – в наиболее полном виде рассмотрена в книге Дугласа Люка [Люк, 2017] и в укрупненном виде включает в себя три вида моделей и соответствующих им алгоритмов оптимизации: статистические модели сетей, модели динамических сетей и модели случайных сетей. В целом модели социальных сетей предназначены для понимания фундаментальных свойств социальных сетей и служат в качестве базовых или эталонных моделей для наблюдаемых социальных сетей [Люк, 2017, с. 157].

Модели случайных сетей основаны на *модели пуассоновского случайного графа* (англ. – *Poisson random graph model*), которая впервые была предложена Полом Эрдашем и Альфредом Реньи в конце 1950 – начале 1960-х годов [3, с. 158]. Другой моделью случайных сетей является *модель малого мира* (англ. – *small-world model*) Уотса-Строгацатца, предложенная в 1998 году, которая строит более реалистичные случайные графы, чем графы Эрдаша-Реньи [Люк, 2017, с. 162]. Важным ограничением как модели пуассоновского случайного графа, так и модели малого мира является то, что они строят графы со степенным распределением не характерным для многих реальных социальных сетей [Люк, 2017, с. 165].

Многочисленные исследования показали, большое количество существующих сетей имеют степенное распределение с «тяжелым хвостом», т.е. они являются свободно масштабируемыми сетями (англ. – *scale-free network*). Например, в сети интернет некоторые веб-сайты связаны с очень большим количеством других веб-сайтов, однако большинство веб-сайтов связано лишь с несколькими сайтами [Люк, 2017, с. 165]. В связи с необходимостью учета степенных законов при построении сетей в 1999 году появилась модель предпочтительного присоединения Барабаши-Альберта, в которой реализован более сложный алгоритм, чем в предыдущих моделях [Люк, 2017, с. 166].

Дальнейшим развитием моделей анализа социальных сетей явились статистические модели сетей, в частности, экспоненциальные модели случайных графов (англ. – *exponential random graph models* или EGRM) и модели динамических сетей, в частности, стохастические акторно-ориентированные модели сетевой динамики (англ. – *stochastic actor-based models for network*

dynamics). Статистические модели сетей базируются на эмпирических сетевых данных, в основе стохастического моделирования динамических сетей лежит агентно-ориентированная имитационная модель [Люк, 2017, с. 202].

По нашему мнению, модели анализа социальных сетей могут быть полезны при оптимизации сетевой структуры цепей поставок, например, при анализе существующей сети поставок, а также при решении задачи об оптимальном местоположении множества складов в цепи поставок.

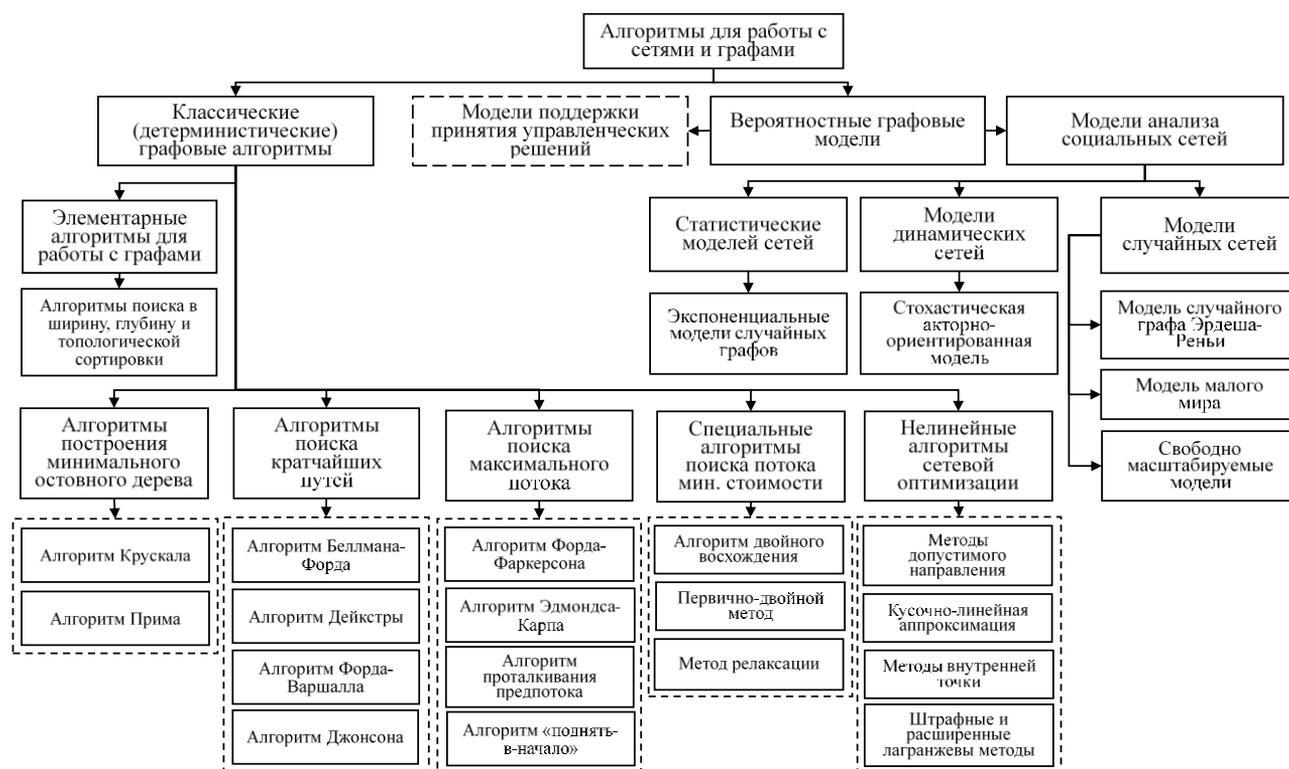


Рисунок 2 – Классификация моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами (Источник: составлено автором)

Проблема выбор программы для аналитической обработки графов и моделирования сетей

Существуют специализированные и универсальные программы (которые также называют платформами), предназначенные для аналитической обработки графов. В настоящее время наиболее распространенными специализированными инструментами, в которых реализованы основные методы обработки графов, являются платформы Apache Spark и Neo4j. Среди универсальных инструментов наибольшую популярность получил язык программирования R с пакетами расширения, предназначенными для обработки графов и моделирования сетей.

По мнению Марка Нидхема и Эми Ходлера аналитической обработке графов присущи уникальные особенности, такие как вычисления, основанные на структуре, необходимость глобального охвата объекта анализа и трудность парсинга данных, что требует разработки специального программного обеспечения – вычислительных графовых платформ. В настоящее время наиболее распространенными вычислительными графовыми платформами, в которых

реализованы основные методы обработки графов, являются платформы Apache Spark и Neo4j [Нидхем, Ходлер, 2020, с. 46].

Apache Spark – это программа для крупномасштабной обработки данных, которая использует табличную абстракцию, называемую Data Frame, для представления и обработки данных в строках именованных и типизированных столбцов. Платформа Spark интегрирует различные источники данных и поддерживает такие языки, как Scala, Python и R, а также различные аналитические библиотеки.

Графовая платформа Neo4j – это программа, которая поддерживает транзакционную и аналитическую обработку графовых данных. Она включает в себя хранение графов и вычисления с помощью инструментов анализа и управления данными. Neo4j популярна при разработке приложений на основе графов и включает в себя библиотеку графовых алгоритмов, настроенную для собственной графовой базы данных.

По мнению Дугласа Люка язык программирования R идеально подходит для анализа сетей, поскольку имеется широкий выбор пакетов расширения, которые в данный момент позволяют управлять сетевыми данными, а также осуществлять визуализацию, интерпретацию и моделирование сетей. В частности, благодаря пакетам network и igraph с сетевыми данными можно работать как с объектами R, с помощью пакета intergraph объекты одного класса можно преобразовать в объекты другого класса. Базовый анализ и визуализацию сетей можно выполнить с помощью пакета sna, который входит в более широкий комплект пакетов для анализа сетей statnet, а также в igraph. Более сложное моделирование сетей можно выполнить с помощью пакета ergm и сопутствующих библиотек, модели динамических сетей строятся с помощью пакета RSiena [Люк, 2017, с. 17].

Сравнение наиболее популярных программ (платформ), предназначенных для аналитической обработки графов и моделирования сетей, представлено в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнение популярных программ (платформ), предназначенных для аналитической обработки графов и моделирования сетей

Название программы (платформы)	Сфера рационального применения и функциональные возможности
Apache Spark	Предназначена для высокоуровневой фильтрации, предварительной обработки массивных наборов и объединения данных. В Apache Spark реализованы элементарные алгоритмы для работы с графами, алгоритмы построения минимального островного дерева, алгоритмы поиска кратчайших путей, алгоритмы поиска максимального потока, алгоритмы выделения центральности и алгоритмы выделения сообществ (кластеризации).
Neo4j	Предназначена для хранения графов и вычисления с помощью инструментов анализа и управления данными. В Neo4j реализованы те же алгоритмы для работы с графами, что и в Apache Spark.
R с пакетами расширения: network, igraph, intergraph, ergm, RSiena и др.	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.

Источник: составлено автором.

Таким образом, если для аналитической обработки графов предполагается использовать

классические (детерминистические) графовые алгоритмы, то наилучшим выбором будут платформы Apache Spark или Neo4j, если исследователю необходимы продвинутые методы исследования (стохастическое, динамическое или имитационное моделирования сетей), то наилучшим выбором будет программа R с пакетами расширения, такими как network, igraph, intergraph, ergm, RSiena и другими.

Заключение

Проведенный анализ работ по проблеме применения моделей и алгоритмы для работы с сетями и графами в управлении цепями поставок показал высокую актуальность данного направления исследований. Отмечено, что алгоритмы анализа сетей еще недостаточно используются при оптимизации сетевой структуры цепей поставок, исследователи предпочитают традиционные методы оптимизации, такие как метода математического программирования, эвристики, метаэвристики или имитационного моделирования.

Предложена классификация моделей и алгоритмов для работы с сетями и графами, отражающая современное состояние и перспективы их развития. По нашему мнению, модели анализа социальных сетей, которые бурно развиваются в последнее десятилетие, могут быть полезны при оптимизации сетевой структуры цепей поставок, в частности, при анализе существующей сети поставок, а также при решении задачи об оптимальном местоположении множества складов в цепи поставок.

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. Кормен Т., Лайзерсон Ч. И., Ривест Р. Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд., пер. с англ. Москва: Вильямс, 2009. 1296 с.
3. Люк Д. А. Анализ сетей (графов) в среде R. Руководство пользователя / пер. с англ. А. В. Груздева. Москва: ДМК Пресс, 2017. 250 с.
4. Нидхем М., Ходлер Э. Графовые алгоритмы. Практическая реализация на платформах Apache Spark и Neo4j / пер. с англ. В. С. Яценкова. Москва: ДМК Пресс, 2020. 258 с.
5. Сукар Л. Э. Вероятностные графовые модели. Принципы и приложения / пер. с англ. А. В. Снастина. Москва: ДМК Пресс, 2021. 338 с.
6. Bertsekas D. P. Network Optimization: Continuous and Discrete Models. Athena Scientific, 1998. 585 p.

Models and Algorithms for Working with Networks and Graphs in Supply Chain Management

Dmitrii S. Solov'ev

Postgraduate Student,
Department of Logistics and Supply Chain Management,
Saint Petersburg State University of Economics,
191023, 30-32, Liter A, Griboedov canal embankment, Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: m9679029@gmail.com

Abstract

Methods for optimizing the network structure of supply chains have received a new impetus in their development over the last decade, which is primarily associated with the development of artificial intelligence algorithms. The most impressive results have been obtained in the development of evolutionary optimization algorithms, deep learning algorithms, and network (graph) analysis algorithms. The conducted analysis of literary sources shows that many models and algorithms for working with networks and graphs have currently been developed, which, in our opinion, can be useful for solving the problem of optimizing the network structure of supply chains. A classification of these algorithms is presented, and the problem of choosing a program for analytical graph processing and network modeling is considered.

For citation

Solov'ev 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), pp. 302-310. DOI: 10.34670/AR.2026.62.70.031

Keywords

Supply chain management, network analysis, models, algorithms, classification.

References

1. Bertsekas, D. P. (1998). *Network Optimization: Continuous and Discrete Models*. Athena Scientific.
2. Bochkarev, A. A., & Solov'ev, 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*, 14(5A), 502-511.
3. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Algoritmy: postroyeniye i analiz* [Introduction to Algorithms] (2nd ed.). Vil'yams.
4. Luke, D. A. (2017). *Analiz setey (grafovy) v srede R. Rukovodstvo pol'zovatelya* [Analysis of networks (graphs) in the R environment. User's Guide]. DMK Press.
5. Needham, M., & Hodler, E. (2020). *Grafovyye algoritmy. Prakticheskaya realizatsiya na platformakh Apache Spark i Neo4j* [Graph algorithms. Practical implementation on Apache Spark and Neo4j platforms]. DMK Press.
6. Sucar, L. E. (2021). *Veroyatnostnyye grafovyye modeli. Printsipy i prilozheniya* [Probabilistic graph models. Principles and applications]. DMK Press.