ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК: 625.74:656.07
EDN: NCNXRQ

Применение взвешенных графов для рационального распределения инертных материалов в филиальной сети дорожной организации

Рахматуллина Э.В.[1], Зиннуров Т.А.[2]
[1]АО «Татавтодор», г. Казань, Российская Федерация
[2] Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена критической зависимостью стоимости и сроков дорожного строительства от эффективности логистического обеспечения инертными материалами (песок, щебень, гравий), доля которых в общем объёме перевозок превышает 80%. В условиях дефицита складских площадей, роста транспортных плеч и территориальной разобщённости производственных филиалов, традиционные методы планирования поставок не позволяют своевременно выявлять узкие места и минимизировать совокупные затраты. Целью работы является разработка математически обоснованного способа принятия решений для рационального распределения сыпучих материалов между производственными объектами на примере крупнейшей дорожной организации Республики Татарстан АО «Татавтодор», включая оптимизацию маршрутов и перераспределение потоков внутри филиальной сети. Результаты исследования включают: построение ориентированного взвешенного графа логистических связей с идентификацией критических узлов (Мензелинский филиал) и зон транспортной уязвимости; разработку целевой функции, агрегирующей расстояние, время, стоимость, риск и пропускную способность в единый обобщённый вес ребра; создание двухуровневого алгоритма (стратегическое закрепление объектов + оперативное планирование рейсов), позволяющего сократить избыточные запасы и снизить логистические издержки на 20–30% на отдельных этапах. Предложенный подход на основе теории графов доказал свою практическую применимость для дорожных организаций с разветвлённой филиальной структурой. Он даёт возможность обоснованно перераспределять грузопотоки, резервировать маршруты и управлять страховыми запасами без экстенсивного расширения складского хозяйства.
Ключевые слова: сыпучие материалы, доставка, теория графов, объект строительства, филиал, транспорт.

Ссылка для цитирования статьи: Рахматуллина Э.В., Зиннуров Т.А. Применение взвешенных графов для рационального распределения инертных материалов в филиальной сети дорожной организации // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2026. № 3 (15). С. 48-59. EDN: NCNXRQ.

The use of weighted graphs for the rational distribution of inert materials in the branch network of a road organization

Rahmatullina E.V.[1], Zinnurov T.A.[2]
[1] JSC "Tatavtodor", Kazan, Russian Federation
[2] Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is due to the critical dependence of the cost and timeline of road construction on the efficiency of logistics support for inert materials (sand, crushed stone, gravel), whose share in the total volume of transportation exceeds 80%. Given the shortage of warehouse space, the growth of transport routes, and the territorial dispersion of production branches, traditional supply planning methods do not allow for the timely identification of bottlenecks and the minimization of total costs. The aim of the work is to develop a mathematically grounded decision making method for the rational distribution of bulk materials between production facilities, using the example of the largest road organization in the Republic of Tatarstan, JSC "Tatavtodor", including route optimization and the redistribution of flows within the branch network. The research results include: constructing a directed weighted graph of logistics connections with the identification of critical nodes (the Menzelinsky branch) and traffic zones.
Keywords: bulk materials, delivery, graph theory, construction site, branch, transport.

For citation: Rahmatullina I, Zinnurov T.A. The use of weighted graphs for the rational distribution of inert materials in the branch network of a road organization // Roads and transport infrastructure. 2026. No. 3 (15). P. 48-59. EDN: NCNXRQ.

1. Введение

Существенную долю рынка транспортно-логистических услуг занимают перевозки инертных строительных материалов (песка, щебня, гравия), формирующих несущий каркас дорожного полотна. Эффективность логистического обеспечения в данном сегменте выступает ключевым фактором, определяющим итоговую стоимость строительства и соблюдение графиков ввода объектов. В условиях нарастающей турбулентности рыночной конъюнктуры и ужесточения сервисных стандартов, исследование прикладных аспектов логистики инертных грузов, включая оптимизацию маршрутов, обоснование парка подвижного состава и управление складскими остатками, приобретает стратегическое значение. Это обусловлено не только ростом физических объемов транспортировки, но и необходимостью реинжиниринга внутрипроизводственных логистических цепочек для обеспечения конкурентных преимуществ и выработки обоснованных управленческих решений.

Логистика, с экономической точки зрения, представляет собой деятельность по организации, управлению и оптимизации движения разного рода потоков от их источника до непосредственного потребителя. Транспортная логистика − своеобразная система, которая отвечает за организацию доставки по наиболее оптимальному маршруту движения, таким образом, грамотная транспортная логистика снижает себестоимость товара [1]. Основные задачи логистики заключаются в создании минимального уровня запасов, сокращение временного периода, необходимого для осуществления перевозок, и многие другие [2]. Построение логистических систем начинается с изучения макроокружения и функционирования окружающей среды, далее переходят к изучению внутренних взаимосвязей и взаимодействий между элементами системы. На всех иерархических уровнях логистической системы должно поддерживаться постоянное согласование информационных, ресурсных, энергетических и иных показателей.

Организация транспортной логистики на производственном предприятии включает в себя следующие ключевые шаги [3]:

- выбор подходящего способа транспортировки;
- определение оптимального типа транспорта;
- оптимизация и разработка условий транспортного процесса.

Уже несколько десятилетий многие ученые Г.Л. Бродецкого, В.Д. Герами и И.Г. Шидловского бьются над разработкой комплексных методов оптимизации логистических процессов [2, 3]. Комплексный подход позволит создать инструментарий для анализа и оптимизации грузовых перевозок с учетом финансовых факторов, таких как сроки оплаты, кредитование, страхование и прочие элементы финансового цикла.

Авторы в работе [4] предлагают совокупность организационно-управленческих мер, реализация которых, по их оценке, позволит одновременно достичь двух целевых эффектов: с одной стороны, повысить надежность и пропускную способность

транспортных систем, с другой, существенно снизить финансовые убытки и риски, обусловленные дорожно-транспортными происшествиями и технологическими сбоями. Многие исследователи пытаются найти оптимальные пути выхода из найденной проблемы, поэтому для обоснования используют математический аппарат.

С точки зрения математической логики логистика на производственных объектах была изучена в диссертации Когана Д.И. [5] основная идея заключается в исследовании и разработке эффективных методов для решения сложных многокритериальных задач, возникающих в логистике и транспортных системах. Автор предлагает новые алгоритмы оптимизации и создание моделей для анализа различных сценариев распределений ресурсов между складами, выбор оптимальных маршрутов перевозок и обменов и упорядочивания операций в рамках транспортной сети. Для решения поставленных задач автор применяет методы теории графов. Работа акцентирует внимание на построении моделей транспортного типа, позволяющих учитывать множественность критериев оценки качества принимаемых решений через матрицу смежности. Сам подход получился универсальным, но достаточно громоздким, что требует дополнительной оптимизации под технологические процессы.

В статье Ивановой Л.Н. и Иванова С.Е. [6] предлагается альтернативный подход к оптимизации на основе теории графов. В отличие от классической постановки задачи маршрутизации, авторы применяют многофакторную оценку параметров перевозки в сочетании с адаптивным эвристическим алгоритмом. Такой комбинированный метод позволяет построить более детализированную модель транспортной сети и находить оптимальные маршруты, обеспечивающие сокращение как временных, так и стоимостных издержек. В исследовании Павлова Д.А. [7] получила дальнейшее развитие методология теории графов применительно к проектированию крупномасштабных транспортных сетей. Предложенная автором модель базируется на аппарате предфрактальных графов, представляющих собой конечный аналог фрактальных структур и сочетающих свойства как фрактальных множеств, так и классических графов. Основу модели составляет принцип иерархической территориальной организации, отражающий многоуровневую структуру реальных транспортных систем. Кректунова М.А., Солнцева М.О., Кухаренко Б.Г. [8, 9] в исследованиях применяют OpenStreetMap для построения графов дорожной сети, этот продукт позволяет не только количественно, но визуально продемонстрировать работу транспортной системы.

Рассматривая исследования иностранных авторов нужно отметить работу Bhagwat S.B. [10]. В ней как раз оценивается стоимость транспортировки строительных заполнителей (щебня, песка и гравия) в Иллинойсе в 2014 году. Установлено, что на стоимость транспортировки строительных материалов влияет комплекс факторов. В первую очередь это логистика, а именно расстояние до объекта, естественно, чем дальше пункт назначения от места добычи, тем выше стоимость. Например, средние транспортные затраты на поставку щебня удваиваются при удалении карьера примерно на 75 км, для песка и гравия аналогичный рост стоимости фиксируется уже на расстоянии порядка 37 км. Существенное влияние на итоговую стоимость перевозки оказывает сложность маршрута, которая определяется совокупностью факторов: состоянием дорожной сети, наличием объездных путей, принадлежностью дорог к федеральной или региональной сети, действующими ограничениями по массе и габаритам транспортных средств, а также локальными особенностями трассы (в том числе узкими участками).

В настоящее время теория графов приобретает статус одного из наиболее востребованных инструментов решения задач транспортной инфраструктуры. Оптимизация в рамках данного подхода реализуется посредством эвристических алгоритмов, функционирующих на уровне правил принятия решений при планировании логистических событий и технологических операций.

Целью исследования является разработка способа принятия решений для рационального распределения инертных материалов по производственным объектам на примере организации АО «Татавтодор».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– рассмотреть теоретические основы транспортной логистики, принципы и функции при доставке сыпучих материалов;

– провести анализ структуры и логистической деятельности организации АО «Татавтодор»;

– предложить решение по оптимизации логистических цепочек доставки сыпучих материалов по производственным базам.

2. Материалы и методы

Выбор вида транспорта является одним из ключевых элементов логистической системы. Существенный вклад в решение данной проблемы внесён в диссертационном исследовании Н.В. Соловьева [11], где предложен универсальный подход к оценке эффективности транспортных систем, применимый вне зависимости от вида используемого подвижного состава. Автором разработан оригинальный методический инструментарий, позволяющий агрегировать разнородные технико-эксплуатационные характеристики (стоимостные, скоростные, грузоподъемностные, энергетические и др.) в единый интегральный показатель. Необходимость подобного подхода обусловлена существующей в современных транспортных системах проблемой несопоставимости измерителей эффективности для разных видов транспорта, что затрудняет их корректное сравнение и интеграцию в рамках единой логистической цепочки из-за физической разнородности оцениваемых процессов и отсутствия унифицированной шкалы измерений.

Транспортировка строительных материалов может осуществляться тремя основными видами транспорта: железнодорожным, водным и автомобильным. Выбор оптимального вида транспорта не является изолированной задачей и должен решаться во взаимосвязи с другими логистическими функциями: управлением запасами, выбором упаковочных решений и др. Базой для принятия обоснованного решения служат данные о сравнительных характеристиках каждого вида транспорта, включающие как преимущества, так и ограничения, значимые в логистическом аспекте (Таблица 1) [12].

Таблица 1

Особенности различных видов транспорта

№ п/п	Вид транспорта	Достоинства	Недостатки
1	Железнодорожный	- Высокая пропускная способность; - Независимость от климатических условий, времени года и суток; - Высокая регулярность перевозок; - Относительно низкие тарифы.	- Ограниченное количество перевозчиков; - Большие капитальные вложения в материально-техническую базу; - Высокая материалоемкость и энергоемкость перевозок; - Низкая доступность к конечным точкам продаж.
2	Внутренний водный (речной)	- Огромные провозные возможности на глубоководных реках; - Низкая себестоимость перевозок; - Низкая капиталоемкость.	- Ограниченность перевозок; - Низкая скорость доставки грузов; - Зависимость от глубин рек; - Навигационных условий
3	Автомобильный	- Высокая доступность; - Непосредственная доставка получателю; - Высокая маневренность, гибкость, динамичность; - Возможность использования различных маршрутов и схем доставки. - Высокая сохранность груза.	- Низкая производительность; - Зависимость от погодных и дорожных условий; - Относительно высокая себестоимость перевозок.

Для поставки необходимого количества материала необходимо понять какой вид транспорта для этого является самым оптимальным. Воспользовавшись формулами из

ISSN 2949-2505
2026, 3 (15)

источника [11] рассчитаем какой вид транспорта является более экономичным на различных расстояниях. Все расчеты сведены к графику (Рисунок 1) зависимости цены от дальности доставки.

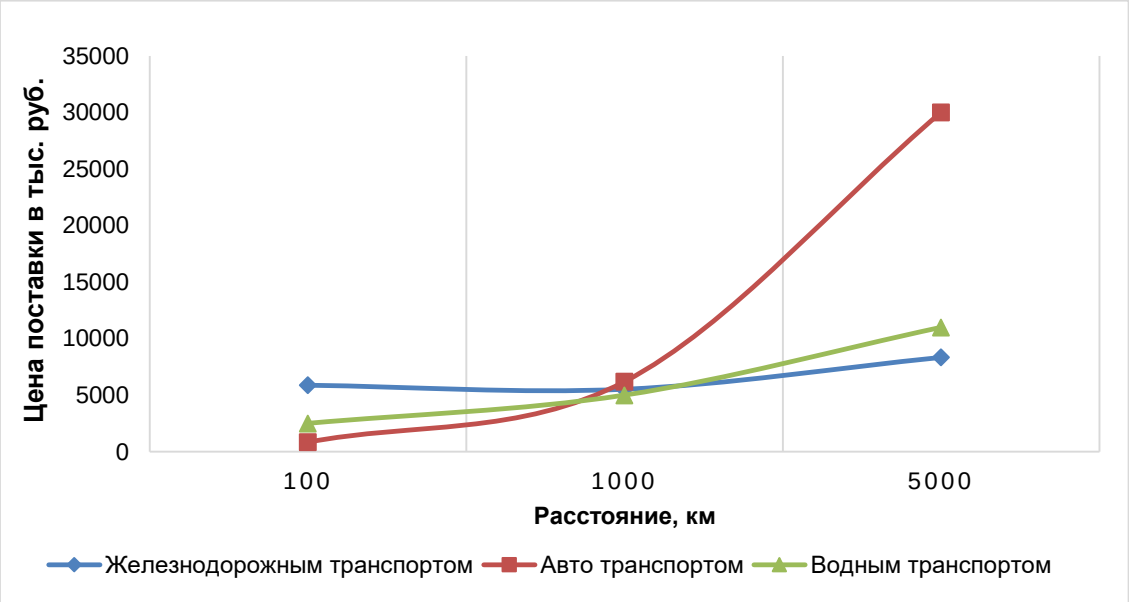


Рис. 1. График стоимости поставки материала различными видами транспорта
Fig. 1. Graph showing the cost of delivering materials using different modes of transport.

Если водный транспорт преимущественно дешевле остальных, но в строительстве преимущественно используются два вида транспорта: железнодорожный и автомобильный. Во внешних грузопотоках, как правило, доминирует железнодорожный транспорт, а во внутрифирменных – автомобильный. В целом же на долю автомобильного транспорта приходится более 80% всей транспортно-грузовой работы в строительстве. Поэтому сопряжение транспортных средств и технологий транспортной работы железнодорожного и автомобильного транспорта в строительстве является приоритетным направлением транспортно-складской логистики.

Для обеспечения непрерывного производства на всех участках Республики Татарстан в АО «Татавтодор» выстроены следующие логистические цепочки поставок инертных материалов с использованием различных видов транспорта в следующем соотношении: автомобильный транспорт 59 %, железнодорожный транспорт 35%, водный транспорт 6%.

В дорожном строительстве используют разные сыпучие материалы: песок, щебень, гравий и т. д. Их классификация зависит от происхождения, плотности, крупности зёрен и других характеристик. Для их постоянного использования и хранения необходимы складские пространства в виде развалов или штабелей на открытых площадках или в складских помещениях. Складское хозяйство производственных баз строительных организаций при хранении материалов включает: расчеты запасов хранения; определение площади складов; обоснование способов погрузочно-разгрузочных работ [12]. Избыточный запас сыпучих материалов увеличивает потребность в площади, технике и оборотных средствах; недостаточный запас повышает риск остановки производства. Следовательно, складская и транспортная подсистемы не могут оптимизироваться изолированно. Распределение поставок должно согласовывать потребность объекта, доступный остаток на базе, отгрузочную мощность узлов и допустимое время доставки. Поэтому обеспеченность материалами должна быть такой, чтобы при запланированных темпах строительства длительность пребывания материалов на складе была минимальной, обычно для месячной выработки [12].

В настоящее время АО «Татавтодор» является самой крупной дорожной компанией в Республике Татарстан и по производственным мощностям, и по объемам выполняемых работ, и по численности работающих, имеет самую разветвленную сеть районных

дорожных подразделений. Структура АО «Татавтодор» включает 9 филиалов, 27 участков, 7 тупиков, 7 причалов. Для устройства дорожных одежд и производства асфальтобетона ежегодно в производственном процессе задействовано 1938 тыс. тонн сыпучих материалов: песок, ОПГС, Щебень М-400, М-800, М-1200, М-1400. Результаты расчета демонстрируют, что необходимая общая площадь под хранения материалов почти в 3 раза превосходит фактическую площадь складов организации АО «Татавтодор», что требует организации правильных и своевременных цепочек поставок, подкрепленные точными методами расчета и оптимизации [13].

3. Результаты и обсуждение

Метод на основе теории графов − это мощный математический инструмент для моделирования и анализа сложных сетевых структур. В логистике он позволяет представить любую систему (склады, дороги, транспорт) в виде графа − набора вершин (узлов) и ребер (связей между ними), что дает возможность применять строгие алгоритмы для ее оптимизации [14, 15]. Теория графов − это не просто теория, а прикладной инструмент, который позволяет снизить затраты до 20-30% на отдельных этапах логистики) и повысить надежность поставок, выявляя уязвимые точки сети.

В основе метода лежит моделирование системы с помощью различных видов графов: ориентированные графы и неориентированные графы, чаще используются взвешенные графы, когда каждому ребру присвоен вес, измеряемый в стоимости перевозки, расстоянии или времени в пути [15].

Для количественной и структурной оценки транспортной сети применяют ряд ключевых характеристик графа, среди которых выделяют следующие: [16]:

1. матрица смежностей − таблица, показывающая, какие вершины связаны друг с другом;
2. матрица весов − показывает не только наличие связи, но и характер отношений между элементами в определенных параметрах;
3. топологический анализ − позволяет выявлять «критические» звенья, тупиковые и изолированные элементы, что помогает оценить надежность сети и найти узкие места.

Сыпучие строительные материалы имеют свою специфику: объемность, часто низкая стоимость на единицу веса, риски смешивания и порчи. Когда есть несколько карьеров и несколько пунктов потребления, возникает задача распределения грузопотоков с минимальными общими затратами. Эта задача решается с помощью транспортных моделей, которые можно представить в виде графа [17, 18]. В одном из исследований применение такого подхода в сети доставки серы позволило снизить общие транспортные расходы на 3,5% [17].

Для решения задач с использованием теории графов используется следующий алгоритм:

- строится граф, где каждая вершина представляет отдельный заказ на перевозку;
- ребра между вершинами соединяются только при условии совместимости грузов (с учётом параметров: тип груза, габариты, температурный режим, требования к совместной перевозке и т.д.);
- с помощью оптимизационных алгоритмов определяются допустимые маршруты, проходящие исключительно по рёбрам, отражающим совместимые пары заказов; это позволяет исключить технологические риски, связанные с нарушением условий перевозки, а также минимизировать порожние пробеги и совокупный пробег транспортных средств.

В целом, методы теории графов дают возможность принимать обоснованные, математически выверенные решения в сложной и дорогостоящей среде перевозок сыпучих материалов. Подход, построенный на теории графов, позволяет представить логистическую цепочку дорожного строительства не как линейную последовательность операций, а как совокупность вершин и ребер, в которой возможны альтернативные маршруты, резервирование узлов, перераспределение потоков и оценка устойчивости сети. Для дорожного хозяйства это особенно важно, поскольку один и тот же материал может поступать на объект напрямую из карьера, через перевалочную базу, через асфальтобетонный завод (АБЗ) либо по межфилиальной схеме перераспределения.

В организации АО «Татавтодор» прибегают к филиальной сети производственных баз, каждая из которых отвечает за определенные автомобильные дороги, расположенные в границах территориальных образований. В состав филиальной сети АО «Татавтодор» входит 9 филиалов, их общие характеристики, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Укрупненная характеристика филиальной сети АО «Татавтодор»

№ п/п	Филиал	Зона обслуживания	Протяженность обслуживаемых дорог, км	Численность, чел.
1	Аксубаевский	Аксубаевский, Нурлатский, Черемшанский районы	606	176
2	Апастовский	Апастовский, Камско-Устьинский, Кайбицкий, Верхнеуслонский районы	955	326
3	Арский	Арский, Атнинский, Тюлячинский районы	795	236
4	Буинский	Буинский, Дрожжановский, Тетюшский районы	887	245
5	Мамадышский	Мамадышский район	376	192
6	Мензелинский	Мензелинский, Актанышский, Муслюмовский районы	950	272
7	Нижнекамский	Нижнекамский, Тукаевский, Сармановский районы	925	314
8	Пригородный	Лаишевский, Высокогорский, Пестречинский, Рыбно-Слободский районы	1264	527
9	Сабинский	Сабинский, Кукморский районы	709	189

Предлагается рассматривать логистическую сеть дорожной организации АО «Тататодор» как ориентированный взвешенный граф вида $G = (V, E)$, где множество вершин V состоит из следующих подмножеств:

S − поставщики и карьеры,

B − производственные базы и филиалы,

Z − асфальтобетонные заводы и пункты переработки,

O − строительные объекты и участки содержания,

R − резервные площадки и временные склады.

Ребро $e(i, j) \in E$ существует в том случае, если между двумя вершинами возможна технологически допустимая перевозка материала с учетом состояния дорог, грузоподъемности транспорта и организационных ограничений [18].

Каждому ребру можно присваивать не один, а несколько параметров: протяженность маршрута $d_{i,j}$, время следования $t_{i,j}$, стоимость перевозки $c_{i,j}$, пропускная способность $u_{i,j}$, риск нарушения поставки $r_{i,j}$ и при необходимости, экологическая нагрузка или ожидаемая величина потерь $p_{i,j}$. Для практического расчета эти параметры сворачиваются в обобщенный вес ребра. Такой подход позволяет учитывать не только кратчайшее расстояние, но и качество решения в более широком смысле с позиции общей эффективности цепочки поставок.

Все филиалы АО «Татавтодор» имею возможность свободного сообщения, что дает возможность создать матрицу расстоянии между ними. Матрица расстояний межфилиального графа представлена в таблице 3, она отражает укрупненную схему возможного межфилиального взаимодействия и резервирования маршрутов.

Таблица 3

Матрица расстояний укрупненного межфилиального графа

Узел	Акс	Апа	Буй	При	Арс	Саб	Мам	Мен	Ниж
Акс	0	233	261	162	233	206	196	252	165
Апа	233	0	35	99	175	212	246	370	283
Буй	261	35	0	126	202	239	273	400	300
При	162	99	126	0	79	112	168	292	205
Арс	233	175	202	79	0	58	160	284	196
Саб	206	212	239	112	58	0	105	250	163
Мам	196	246	273	168	160	105	0	145	60
Мен	252	370	400	292	284	250	145	0	103
Ниж	165	283	300	205	196	163	60	103	0

Условные обозначения: Акс — Аксубаевский; Апа — Апастовский; Буй — Буинский; При — Пригородный; Арс — Арский; Саб — Сабинский; Мам — Мамадышский; Мен — Мензелинский; Ниж — Нижнекамский.

На рисунке 2 представлен граф межфилиальных связей фелиалов АО «Татавтодор».

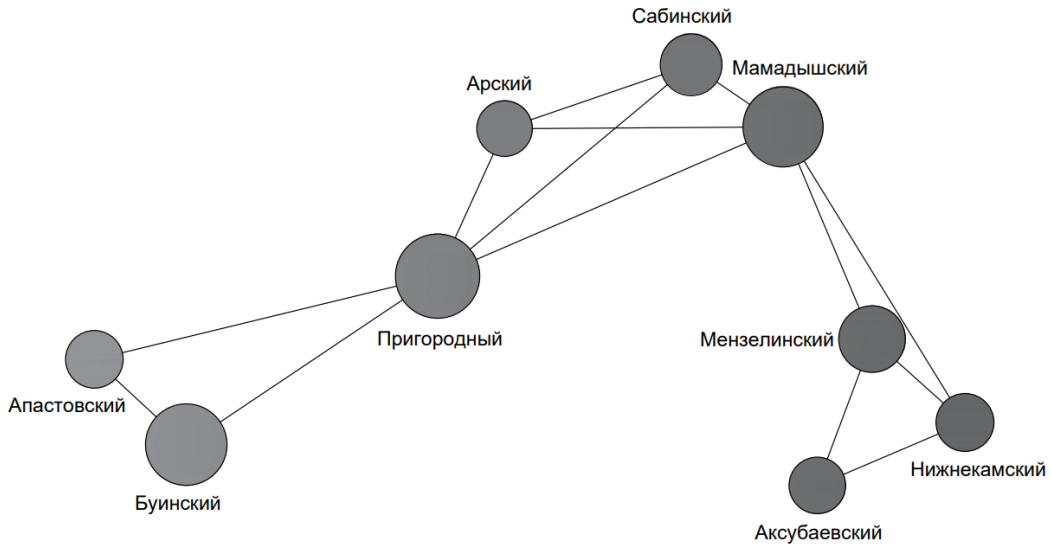


Рис. 2. Схематический граф межфилиальных связей АО «Татавтодор» с наикратчайшими связями
Fig. 2. A schematic graph of the inter-branch connections of JSC “Tatavtodor”, showing the shortest paths

Общий анализ матрицы расстояний показывает, что филиальная сеть явно разделена на две зоны: плотно связанную центрально-восточную группу куда входят: Апастовский, Буинский, Пригородный, Арский, Сабинский, Мамадышский и Нижнекамский филиалы, где расстояния между соседними узлами редко превышают 100 – 120 км, что позволяет организовать оперативную взаимопомощь при поставках материалов в течение нескольких часов, и две изолированные периферийные точки — Аксубаевский и особенно Мензелинский филиалы. Аксубаевский филиал удалён от ближайшего соседа Пригородного филиала на 162 км, а Мензелинский, будучи самым дальним для всех остальных, имеет единственную относительно близкую связь с Нижнекамском 103 км, что делает его критически уязвимым при сбоях в логистике. При этом самыми надёжными с точки зрения быстрого перераспределения ресурсов являются Апастовский, Пригородный и Арский филиалы, имеющие по два соседа в радиусе до 100 км. Особенно для Аксубаевского филиала при отсутствии альтернативных коротких маршрутов требует обязательного создания резервных запасов и проработки альтернативных каналов снабжения через более дальние узлы, чтобы компенсировать естественные географические разрывы в межфилиальном графе [19, 20].

Оценка производиться с применением целевой функции. Для построения обобщенного коэффициента эффективности перевозки по ребру *(i, j)* все разнородные

параметры необходимо привести к единой стоимостной или временной размерности, введя весовые коэффициенты λ, отражающие приоритеты эксперта.

Ниже представлена целевая функция для нахождения обобщенный веса ребра W_{ij}, которую необходимо минимизировать при поиске маршрута:

$$W_{ij}=(\lambda_1 \cdot d_{ij}+\lambda_2 \cdot t_{ij}+\lambda_3 \cdot c_{ij}) \cdot (1+\lambda_4 \cdot r_{ij}) \cdot (1+\lambda_5 u_{ij})+\lambda_6 \cdot p_{ij}\,, \quad (1)$$

где $\lambda_1 - \lambda_6$ − весовые коэффициенты значимости суммарно $\sum=1$, задаются экспертно.

Для глобальной задачи всей цепи поставок суммарная целевая функция по маршруту R должна определять по формулой:

$$F(R)=(i,j)\in R,\sum Wij \rightarrow \min\,. \quad (2)$$

Для формулы (2) устанавливаются следующие ограничения:

– $\sum t_{ij} \le T_{max}$ время доставки не должна превышать максимально допустимого;

– $\sum c_{ij} \le C_{max}$ стоимость доставки не должна превышать максимально допустимого;

– $\prod (1-r_{ij}) \ge R_{min}$ надежность доставки не меньше пороговых значений рентабельности;

– $Min(u_{ij}) \ge U_{min}$ пропускная сопособность доставки не меньше пороговых значений рентабельности.

Графовая модель по Харари полезна не только для описания сети, но и для ее анализа [17]. Путь в графе интерпретируется как допустимая логистическая цепочка доставки. Используется понятие цикл – как наличие альтернативных обходных маршрутов, дерево – как минимально необходимый граф снабжения без избыточных связей, вершина сочленения – как критический узел, потеря которого нарушает связность сети, а мост – как единственный маршрут, не имеющий дублирования [14]. Для дорожной подрядной организации выявление критических узлов имеет высокую практическую ценность: именно в них целесообразно размещать резерв техники, страховой запас материалов и инструменты оперативного диспетчерского управления.

Представленный ниже пошаговый алгоритм рекомендуется использовать как ядро корпоративного регламента анализа и оптимизации поставок сыпучих материалов дорожной организации.

На основе представления в виде графа строится потоковая оптимизационная модель. Искомой величиной является объем перевозки x_{ij} материала или группы материалов из узла i в узел j в момент времени t. Целевая функция W_{ij} минимизирует суммарные приведенные логистические затраты, включающие расходы на транспортировку, промежуточное хранение, перегрузку, простои и штрафы за несвоевременную поставку. В модель дополнительно вводятся ограничения по объему потребления на объектах, по доступной мощности баз, по вместимости складов, по числу транспортных средств и по временным окнам разгрузки.

С практической точки зрения особенно важно различать два класса задач:

– Первая, стратегическая задача закрепления объектов O за базами B и выбора конфигурации сети на период сезона либо крупного проекта. Она решается в терминах минимальной транспортной работы, надежности и устойчивости маршрутов.

– Вторая, оперативная задача суточного и сменного планирования, при которой определяется фактический график рейсов, очередность погрузки, временные окна прибытия на объект и распределение транспорта между направлениями.

В настоящей работе обе задачи объединяются в единую двухуровневую схему: сначала определяется оптимальное распределение потоков между узлами, затем для выбранных направлений рассчитывается расписание рейсов и потребность в подвижном составе.

Для учета пространственного фактора модель, построенная на теории графов, дополняется геопространственным анализом. На первом этапе база и объект рассматриваются как точки на схеме территории, после чего определяется их взаимное положение, транспортная удаленность и принадлежность к зоне обслуживания. На втором этапе строятся области тяготения объектов к ближайшим базам и выявляются пограничные зоны, в которых административно закрепленная схема снабжения может

быть экономически неэффективной. На третьем этапе учитываются реальные или приведенные транспортные плечи, состояние сети и возможность межфилиального перераспределения.

4. Заключение

1. В работе обоснована целесообразность применения аппарата теории графов для решения задач транспортной логистики при доставке сыпучих строительных материалов на производственные объекты. В отличие от классических методов, ориентированных на минимизацию только расстояния или стоимости, предложенный подход позволяет интегрировать разнородные критерии (время, надежность, пропускную способность, риски) в единую целевую функцию. Это обеспечивает более гибкое и адекватное реальным условиям моделирование логистических цепочек, особенно в условиях разветвленной филиальной сети и сезонных колебаний спроса.

2. На примере АО «Татавтодор» показано, что существующая система снабжения производственных баз сталкивается с диспропорцией между потребностями в складских площадях и фактическими возможностями хранения, а также с неравномерной транспортной доступностью филиалов. Разработанная модель межфилиальных связей на основе теории графов с матрицей расстояний и весовыми коэффициентами позволяет выявить критически уязвимые узлы и зоны, где административное закрепление объектов за базами экономически неоптимально. Предложенный двухуровневый алгоритм дает инструмент для снижения логистических затрат и повышения надежности поставок без капитальных вложений в расширение складской инфраструктуры.

3. Полученные результаты создают основу для внедрения цифрового двойника логистической сети дорожной организации. Однако в текущей версии модели не учтены динамические факторы (погодные условия, сезонные ограничения по весу транспорта, текущий ремонт дорог), а также стохастический характер спроса со стороны производителей работ. Перспективным направлением является интеграция предложенной модели теории графов с системами GPS-мониторинга и данными о загруженности дорог в реальном времени, что позволит перейти от статической оптимизации к адаптивному управлению поставками.

Список литературы / References

1. Багинова В.В., Федоров Л.С., Сысоева Е.А. [и др.] Логистика: монография. Москва: Прометей, 2020. 292 с. [Baginova V.V., Fedorov L.S., Sysoeva E.A. [et al.]. Logistics: a monograph. Moscow: Prometheus, 2020. 292 p.]

2. Неруш Ю.М., Неруш А.Ю. Логистика: учебник для вузов, 6-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2025. 419 с. [Nerush Yu.M., Nerush A.Yu. Logistics: a textbook for universities, 6th ed., rev. and add. Moscow: Yurayt Publishing House, 2025. 419 p.]

3. Козловская Л.В., Савуха А.В. Производственные предприятия дорожного хозяйства: учебное пособие. Минск: БНТУ, 2025. 60 с. [Kozlovskaya L.V., Savukha A.V. Industrial Enterprises in the Road Sector: a textbook. Minsk: BNTU, 2025. 60 p.]

4. Гиссин В.И., Тимонин А.А., Погребная А.А Управление транспортно-логистическими процессами: совершенствование качества и безопасности Москва: Инфра-Инженерия, 2021. 124 с. [Gissin V.I., Timonin A.A., Pogrebnaya A.A. Management of transport and logistics processes: improving quality and safety. Moscow: Infra-Engineering, 2021. 124 p.]

5. Коган Д.И. Исследование и разработка методов решения многокритериальных задач распределения, обмена, упорядочения в моделях транспортного типа. Диссертация доктора технических наук: 2.9.9. Санкт-Петербург, 1999. 365 с. [Research and development of methods for solving multi-criteria problems of distribution, exchange, and ordering in transport-type models. Doctoral dissertation in technical sciences: 2.9.9. Saint Petersburg, 1999. 365 p.]

6. Иванова Л.Н., Иванов С.Е. Методы оптимизации и алгоритм маршрутизации в транспортной логистике // ЭПИ. 2024. №4. С. 21-29. [Ivanova L.N., Ivanov S.E.

Optimization Methods and Routing Algorithms in Transport Logistics // EPI. 2024. No. 4. URL: P. 21-29.]

7. Павлов Д.А. Моделирование Крупномасштабной транспортной сети предфрактальными графами // Научный журнал КубГАУ. 2017. №131 (07). С. 24-33 [Pavlov D.A. Modeling Large-Scale Transport Networks Using Prefractal Graphs // Scientific Journal of KubSAU, 2017. №131 (07). P. 24–33.]

8. Кректунова М.А Пространственный анализ сети общественного транспорта на примере города Тюмени // ТГУ Институт наук о земле, 2017. С. 123-130. [Krektonova M.A. Spatial Analysis of the Public Transport Network: A Case Study of Tyumen // TSU Institute of Earth Sciences, 2017. P. 123-130.]

9. Солнцева М.О., Кухаренко Б.Г. Применение методов кластеризации узлов на графах с разреженными матрицами смежности в задачах логистики // Труды МФТИ, том 2013. №3(5). С. 167-175. [Solntseva M.O., Kukharenko B.G. Application of node clustering methods on graphs with sparse adjacency matrices in logistics problems // Proceedings of MIPT. 2013. Vol. 5, No. 3. P. 167-175.]

10. Bhagwat S.B. Cost of Transportation of Construction Aggregates in Illinois in 2014 // Proceedings of the 47th Forum on the Geology of Industrial Minerals. Champaign, IL: Illinois State Geological Survey, 2015. P. 105-109.

11. Соловьев Н.В. Метод обеспечения единства измерителей эффективности различных видов транспорта в логистических транспортных системах. Диссертация кандидата технических наук: 2.9.9. Москва, 2025. 135 с. [Solovyov N.V. Method for ensuring the uniformity of performance indicators for various types of transport in logistics transport systems. Candidate's dissertation in technical sciences: 2.9.9. Moscow, 2025. 135 p.]

12. Бахтин В.А., Богданов И.П. Оптимизация перевозок однородной продукции между оптовыми складами // ИПМ РАН. URL: http://keldysh.ru/papers/2018/ prep2018_65.pdf (дата обращения 21.04.2026) [Bakhtin V.A., Bogdanov I.P. Optimization of transportation of homogeneous products between wholesale warehouses // IPM RAS. URL: http://keldysh.ru/papers/2018/prep2018_65.pdf (reference date: 21.04.2026).]

13. Нурмухаметов К.А., Зиннуров Т.А., Садыков Д.М. Алгоритм принятий решений в системе управления региональными мостами // Известия КГАСУ. 2019. № 3(49). С. 212-220. EDN XZLTSS [Nurmukhametov, K. A., Zinnurov T. A., Sadykov D. M. Decision-making algorithm in the regional bridge management system // News KSUAE. 2019. No. 3(49). P. 212-220. EDN XZLTSS.]

14. Chen C. Analyzing Supply Chain Network Optimization in Digital Trade Using Graph Algorithms // Asia-Europe Conference on Cybersecurity, Internet of Things and Soft Computing (CITSC). 2025. P. 680-685, DOI: 10.1109/CITSC64390.2025.00127.

15. Sinha A.K., Maity M. Avoiding cross-contamination in bulk logistics while minimizing costs and empty miles with novel decomposition-based approach // Decision Sciences, 2026. P. 1-19. DOI: 10.1111/deci.70030

16. Алексеева Я.А. Моделирование транспортной задачи на графах: сб. ст. XIX (66) Регион. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. сотрудников и аспирантов - Наука — образованию, производству, экономике. Витебск, 2014 г. Т. 1. С. 227–228. [Alekseeva Ya.A. Modeling the transportation problem on graphs: collection of articles. XIX (66) Regional scientific and practical conference of teachers, scientific staff and graduate students — Science to Education, Production, Economy. Vitebsk, 2014. Vol. 1. P. 227–228.]

17. Tunts T., Salum, A., Waybill E. Using Experience & Development In Estonian State Road Building // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1202. DOI: 012041. 10.1088/1757-899X/1202/1/012041.

18. Yelesheva Z., Kenzhebayeva, G., Spanova Y., Ustemirova R., Shortanbayeva, A.. Management of logistics processes in road freight transport under conditions of sectoral digitalisation // Systemy Logistyczne Wojsk. 64. 2026. P.125-140. DOI: 10.37055/slw/224977.

19. Шаймарданова К.А., Прокопьев Е.И. Транспортно-пересадочный узел как градообразующий фактор развития периферийных территорий // Известия КГАСУ. 2019. № 4 (50). С. 175-184. [Shaimardanova K.A., Prokopiev E.I. Transport and transfer hub as a city-forming factor in the development of peripheral territories // News KSUAE. 2019. No. 4 (50). P. 175-184.]

20. Комарова Т.К., Поспелов П.И., Мартяхин Д.С. Исследование параметров движения транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети в городских условиях // Известия КГАСУ. 2024. № 4(70). С. 285-293. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.25. EDN: TOUNOL. [Komarova T.K., Pospelov P.I., Martyakhin D.S. Investigation of traffic flow parameters on the street and road network elements in urban conditions // News of KSUAE. 2024. № 4(70). P. 285-293. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.25. EDN: TOUNOL.]

Информация об авторах

Рахматуллина Эвелина Владимировна, специалист ОПТК АО «Татавтодор», г. Казань, Российская Федерация;
E-mail: Evelina.rakh@yandex.ru.
Зиннуров Тагир Альмирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Автомобильные дороги, мосты и тоннели», Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация;
E-mail: leongar@mail.ru.

Information about the authors

Evelina V Rakhmatullina, OPTC specialist JSC “Tatavtodor”, Kazan, Russian Federation;
E-mail: Evelina.rakh@yandex.ru.
Tagir A. Zinnurov - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of Automobile Roads, Bridges and Tunnels, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation;
E-mail: leongar@mail.ru.

Дата опубликования статьи: 30.09.2026.