

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

К. В. Ростислав, Д. С. Русаков, М. А. Сапрыкин

**Краткий обзор теоретических и эмпирических подходов к
решению транспортных задач и задач о развитии
транспортных сетей**

РОСТИСЛАВ Кирилл Владимирович, младший научный сотрудник, Лаборатория
инфраструктурных и пространственных исследований ИПЭИ РАНХиГС
РУСАКОВ Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Лаборатория
инфраструктурных и пространственных исследований ИПЭИ РАНХиГС
САПРЫКИН Матвей Алексеевич, младший научный сотрудник, Лаборатория
инфраструктурных и пространственных исследований ИПЭИ РАНХиГС

Москва 2023

АННОТАЦИЯ

В работе представлен краткий обзор отдельных аспектов существующих теоретических и эмпирических исследований к решению транспортных задач и задач о развитии транспортных сетей. Несмотря на то, что в целом это направление достаточно хорошо проработано в исследовательской литературе, при переходе к имплементации на практике отдельные вопросы требуют более детального рассмотрения, в частности, подходы к моделированию перевозок различных товаров по многослойной сети, представлению перевозочных и иных издержек, заданию критериев оптимальности развития сети. Кроме того, в настоящей работе рассмотрены функции издержек и переменные, их определяющие, вопросы влияния границ на транспортную систему, оптимальной маршрутизации и её парадоксы.

Ключевые слова: парадоксы оптимальной маршрутизации, моделирование перевозок, критерии оптимальности развития сети

The paper presents a brief review of some aspects of existing theoretical and empirical research on transportation and transport networks development problems. Despite the fact that in general this direction is well developed in the research literature, in practice some issues require more detailed consideration, in particular, approaches to modeling the transportation of various goods over a multilayer network, representation of transportation and other costs, setting the criteria of optimality of network development. In addition, this paper considers cost functions and variables determining them, the influence of borders on the transport system, optimal routing and its paradoxes.

Ключевые слова: пространственные модели, спрос и предложение на транспортные услуги, время в пути, безопасность на транспорте

Keywords: Spatial Models, Transportation: Demand, Supply, and Congestion, Travel Time, Safety and Accidents

JEL: C31, R41

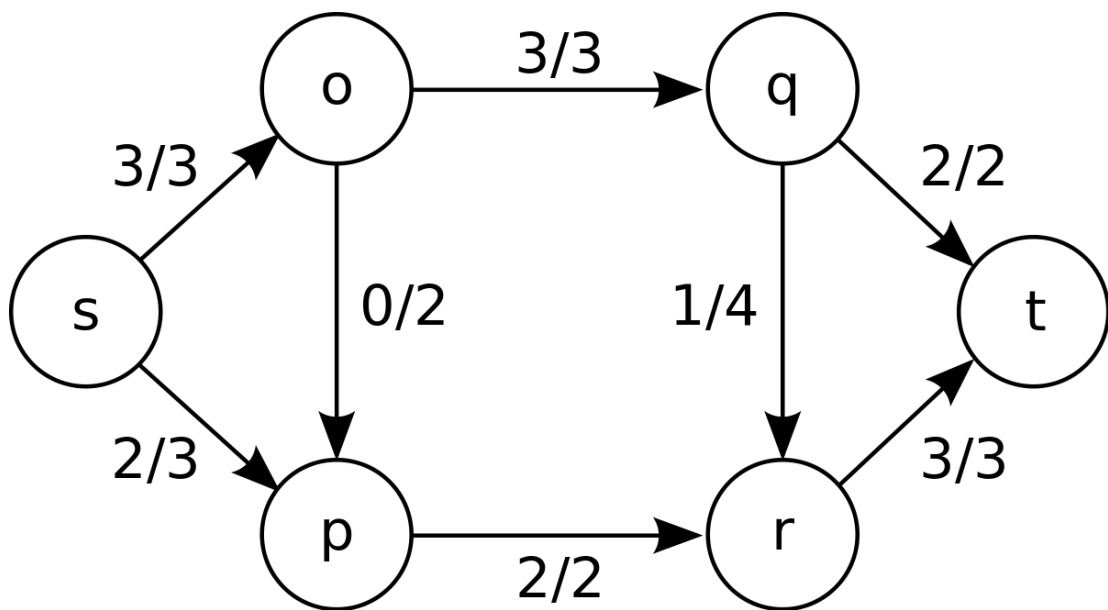
СОДЕРЖАНИЕ

1 Перевозки по сети с ограниченной провозной способностью связей	4
2 Транспортная задача для различных грузов	5
3 Функция издержек	6
5 Оптимальная маршрутизация и парадоксы пренебрежения ей в развитии сетей..	16

6 Влияние друг на друга разных видов перевозок	17
7 Влияние границ на транспортную систему.....	21
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	24
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	26

1 Перевозки по сети с ограниченной провозной способностью связей

Транспортную сеть возможно представить в виде направленного графа, чтобы найти кратчайший путь из одной точки до другой: от места производства, например, до места использования. Также возможно интерпретировать такой граф как «сеть потока» (англ. flow network) и использовать такую концепцию для ответа на вопросы о потоках грузов/материалов. Основная идея исходит из того, чтобы представлять систему в виде некоторой композиции труб, в которой, допустим, жидкость перемещается с некоторыми ограничениями (у этих «труб» есть ограниченная пропускная способность). Вершины такого графа — места соединения труб, где поток «жидкости» не задерживается (рисунок 1). В данном случае максимальный поток равен 5.



Примечания

1 Источник — [1].

2 Знаменатель — вместительность ребра. Числитель — фактическая нагрузка.

Рисунок 1 — Пример задачи о максимальном потоке

В рамках решения задачи о максимальном потоке решается задача вычисления наибольшей пропускной способности сети, при помощи которой можно перебросить жидкость из точки А (источника) в точку Б (сток), не нарушая существующих ограничений пропускной способности.

Задачу в рамках исследования можно интерпретировать как перемещение (транспортировка грузов) от отправителя к получателю по транспортной сети (автодорожной, железнодорожной, авиасообщению или морскими путями), которая имеет ограничения на вместительность этих самых путей — провозной способности сети. Когда сеть перегружается (превышена ее провозная способность, которую можно измерить по-

разному: в автомашинах или объемах перевозимого груза, что актуально для мультимодальных случаев), то образуются заторы и, соответственно, нежелательные издержки, поэтому решение такой задачи является важным для планирования оптимальной транспортной сети.

Направленный граф G с множеством вершин V и множеством ребер E в такой задаче имеет ограничение на пропускную способность c . Эта пропускная способность — максимальная величина потока, которая может пройти через ребро. Кроме того, предполагается, что, если существует направление из вершины v в вершину u , то обратного пути нет (проблема легко решается созданием эквивалентного графа с дополнительной вершиной). Если пути между вершинами не существует, то пропускная способность равна 0; недопустимы циклы внутри графа (англ. self-loops).

В представленном графе существуют особенные вершины: s — источник и t — сток. Предполагается, что у каждой из этих вершин (в которых объем входящего суммарного потока равен объему суммарного выходящего) имеется путь к любой из прочих вершин графа — предпосылка о связности графа.

С такими ограничениями и предпосылками формируется задача о максимальном потоке, которую можно сформулировать так: найти максимально возможный поток в сети графа G из источника в сток, удовлетворяя ограничение на вместительность сети. Задача в такой постановке имеет отчетливо прикладной смысл: хранение грузов в промежуточных вершинах графа ввиду перегруженности ребер будет вести к нежелательным издержкам и являться сигналом того, что предложенная конфигурация транспортной сети является не оптимальной.

Задача о максимальном потоке может быть усложнена: может быть добавлено несколько источников и несколько стоков, что обосновано процессами в реальной жизни (несколько заводов, несколько складов). Решение этой проблемы заключается в том, что в структуру графа добавляется суперисточник и суперсток. Рёбра, связывающие эти новые вершины с обычными источниками и стоками, имеют бесконечную вместительность. Такое преобразование позволяет решать подобные задачи с помощью классических алгоритмов (например, алгоритма Форда — Фалкерсона, Эдмондса — Карпа или Диница).

2 Транспортная задача для различных грузов

В задаче транспортировки нескольких продуктов имеется множество продуктов или товаров, которые необходимо транспортировать из нескольких источников в несколько пунктов назначения. Каждый источник имеет ограниченные возможности по поставке каждого продукта, и у каждого пункта назначения есть определенный спрос на каждый

продукт. Цель состоит в том, чтобы свести к минимуму общие транспортные расходы, удовлетворяя при этом спрос на каждый продукт в каждом пункте назначения и соблюдая возможности поставок из каждого источника.

Задачу можно представить с помощью матрицы, где строки представляют источники, столбцы представляют пункты назначения, а записи представляют стоимость транспортировки единицы каждого продукта из каждого источника в каждый пункт назначения. Спрос и предложение на каждый продукт также представлены в матрице.

Задача может быть сформулирована в виде задачи линейного программирования, где переменные решения представляют количество каждого продукта, транспортируемого из каждого источника в каждый пункт назначения. Целевая функция состоит в том, чтобы минимизировать общие транспортные расходы, которые представляют собой сумму транспортных расходов для всех продуктов. Ограничения обеспечивают удовлетворение спроса и предложения на каждый продукт и соблюдение возможностей каждого источника поставок.

Задача может быть решена с использованием стандартных алгоритмов линейного программирования, таких как симплексный метод или метод внутренней точки. Оптимальное решение обеспечивает минимальные транспортные расходы на транспортировку всей продукции.

Однако масштаб проблемы может быстро увеличиться по мере увеличения количества продуктов, источников и мест назначения. В таких случаях для быстрого поиска почти оптимальных решений можно использовать эвристические алгоритмы, такие как генетические алгоритмы или имитация отжига. Эти алгоритмы начинаются с исходного решения и итеративно улучшают его, внося случайные изменения в решение и оценивая результирующую стоимость. Лучшее решение, найденное после определенного количества итераций или времени, возвращается в качестве решения.

Проблема транспортировки нескольких продуктов — это сложный вариант транспортной проблемы, когда имеется множество продуктов или товаров, подлежащих транспортировке из нескольких источников в несколько пунктов назначения. Для решения этой задачи могут быть использованы линейное программирование и эвристические алгоритмы, в зависимости от размера задачи и требуемой точности решения.

3 Функция издержек

Перевозочные издержки определяют размещение производителя и рыночную зону, которую он обслуживает. Когда выбрано расположение производителя, транспортные издержки определяют продажи товара, его цену [2].

Кроме того, функция издержек — основа целевой функции во многих транспортных задачах. Например, к задаче о потоке наименьшей стоимости возможно свести задачу поиска кратчайшего пути, задачу о назначениях, транспортную задачу Монжа — Канторовича и задачу о максимальном потоке в сети. Общее у этих частных случаев — это линейная функция перевозочных издержек [3].

Под линейностью понимается линейность по объему перевозимого груза или количества пассажиров: аргументы функции перевозочных издержек — это величина потока по дуге в ориентированном графе, которым в задаче представляется сеть. Так, при линейной функции перевозочных издержек целевую функцию задачи о потоке наименьшей стоимости задает формула (1).

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} a_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

где (i, j) — дуга (направленное ребро) из вершины i в вершину j в ориентированном графе, который представляет сеть для перевозок;

\mathcal{E} — множество дуг в таком графе;

a_{ij} — издержки для перевозки единицы груза из вершины i в вершину j ;

x_{ij} — поток дуги (i, j) , т. е. объем грузов, который перевозится из вершины i в вершину j .

Функция перевозочных издержек в приведенном примере — это $f_{ij}(x_{ij}) = a_{ij}x_{ij}$. Важно, что даже при линейной функции перевозочных издержек в экстремальной задаче сами функции могут отличаться у разных дуг из-за разных коэффициентов a_{ij} . Иными словами, та же функция определяет издержки перевозки грузов только для той же дуги. Коэффициенты же a_{ij} могут различаться и так отражать местные особенности. Более того, представляя коэффициент a_{ij} значением функции от расстояния (а равно и других важных для перевозки условий), мы не обязаны считать эту функцию линейной, даже если исходим из линейности функции перевозочных издержек, так как линейность функции перевозочных издержек подразумевает линейную зависимость только от потока дуги.

По состоянию на май 2023 г. продолжает действовать (по меньшей мере формально) утвержденный постановлением Госкомцен РСФСР от 8 февраля 1989 года № 67 Прейскурант № 13-01-01 «Тарифы на перевозку грузов и другие услуги, выполняемые автомобильным транспортом». Пусть Прейскурант № 13-01-01 и содержит плановые, не рыночные и не теневые цены, да еще и в ценах весьма далеких лет, но перечень самих

условий, которыми Прейскурант № 13-01-01 объясняет различия в тарифах — показателен и сейчас. Согласно Прейскуранту № 13-01-01 издержки для перевозки единицы груза автотранспортными перевозочными средствами зависят от таких условий:

- вида груза;
- его общего количества;
- массы отправок (количества груза для единовременной перевозки);
- расстояния между местом отправления и назначения;
- затрат времени (авто-тонно-часов) на перевозку;
- требуемой грузоподъемности подвижного состава;
- потребности в специализированном подвижном составе (рефрижераторы, цементовозы и т. п.);
- места перевозки;
- отчислений на строительство и ремонт автомобильных дорог.

Представление об издержках перевозки на современных российских железных дорогах, причем как о тарифах за саму перевозку грузов, так и о тарифах за услуги пользования железнодорожной инфраструктурой, дает Прейскурант № 10-01, утвержденный Постановлением ФЭК РФ от 17.06.2003 № 47-т/5. В отличие от грузовых автомобильных перевозок, грузовые железнодорожные перевозки остались предметом государственного регулирования из-за естественной монополии Российских железных дорог (далее — РЖД). По этой причине прейскурант регулярно обновляется, а потому подходящую его редакцию целесообразно применять для настройки модели.

Тарифы, установленные Прейскурантом № 10-01, включают расходы на амортизацию и ремонт путей и подвижного состава.

Согласно Прейскуранту № 10-01, издержки перевозки по железной дороге зависят от расстояния перевозки;

- вида отправки («повагонная, групповая, маршрутная, контейнерная, мелкая, сборная повагонная или отправка в составе поездного формирования, не принадлежащего перевозчику РЖД») и ее размера, т. е. партии грузов с одним перевозочным документом (от посылки до целого состава);
- вида вагонов;
- принадлежности локомотивов, вагонов и т. п.;
- наименования согласно Единой тарифно-статистической номенклатуре (ЕТСНГ)¹ или класса груза (различают три тарифных класса; класс груза определяет не только

¹ Опубликована в сборнике N 407 Правил перевозок и тарифов железнодорожного транспорта.

- то, насколько полно будет использоваться пространство в подвижном составе, но и то, сколько времени и какой техники требуют погрузочно-разгрузочные операции);
- вида сообщения (пересечения государственных границ);
 - района перевозки (особые тарифы для Калининградской и Сахалинской областей).

Себестоимость перевозок грузов по автомобильным дорогам обычно выше, чем себестоимость перевозок грузов по дорогам железным, особенно если речь идет о массовых грузах. Себестоимость перевозки грузов автомобильным транспортом выше, чем железнодорожным или речным в десятки раз. В то же время строительство железных дорог дешевле, особенно если речь о перевозках небольшого количества грузов на небольшие расстояния. В. Г. Галабурда приводит оценки сравнительной себестоимости и удельных капиталовложений для перевозки грузов разными видами транспорта в учебном пособии 2012 г. (таблица) [4, pp. 40–48].

Таблица 1 — Сравнение технико-экономических характеристик разных видов транспорта в России

Вид транспорта	Себестоимость работы по перевозке 10 приведенных тонно-километров, руб.	Удельные капиталовложения для работы по перевозке 10 приведенных тонно-километров, руб.
Автомобильный	10,7	8,0
Железнодорожный	0,5	9,2
Внутренний водный	0,5	3,8
Морской	0,3	6,0

Примечание — Показатели приводятся по [4, p. 44].

Обычно преимущество железных дорог перед автомобильными усматривают в перевозках на средние и дальние расстояния. Перевозка же на короткие расстояния до 50 км по железной дороге считается удачной, если получатель груза располагает подъездными железнодорожными путями. Чтобы учесть это, модель должна быть весьма и весьма подробная, должна отражать точную схему железных дорог без обобщения до связанности более-менее крупных территориальных единиц, даже районов. Сложность учета такой схемы при высокоуровневом моделировании достаточность провозной способности путей сообщения между более-менее крупными *территориями*, а не просто конкретными пунктами, вместе со сложностью учета различий в самих грузах и подвижном составе — главные трудности разработки модельного подхода, которую НИР ставит своей целью.

Расчетные таблицы тарифов грузовых перевозок из действующих прейскурантов указывают на нелинейность функций перевозочных издержек.

Простейшее отклонение от линейности и даже сведение ее к частному случаю — это представление издержек степенной функцией от объема перевозимого товара. Если показатель степени больше 1, то функция издержек выпуклая. Несмотря на простоту и математическое удобство такой спецификации, у нее есть очевидные изъяны. Так,

показатель степени в такой функции обычно постоянный, но, что еще важнее, такая функция издержек не различает постоянные и переменные издержки. При этом всё равно обычно предполагается, что целевая функция экстремальной задачи о потоке наименьшей стоимости сепарабельная, то есть что ее возможно представить как сумму перевозочных издержек всех дуг графа. Такой подход не позволяет точно передать заложенную в прейскуранты зависимость от общего расстояния отправки. Вполне удовлетворительного простого решения этой проблемы не видим, так как такое решение сводится к одному из двух:

1) если представить зависимость от расстояния для каждой дуги согласно таблицам в прейскурантах, мы завязим общие издержки перевозки на большие расстояния, так как, например, $\sum_{(ij) \in \mathcal{P}} l^{\alpha_l} m^{\alpha_m} \geq \sum_{(ij) \in \mathcal{P}} l^{\alpha_l} \sum_{(ij) \in \mathcal{P}} m^{\alpha_m}$ при $\alpha_l, \alpha_m \leq 1$, где (ij) — дуга графа, \mathcal{P} — маршрут перевозки, l — длина дуги графа по таблице тарифных расстояний, m — приведенная вес отправки, α_l, α_m — параметры, которые отражают вогнутость функции издержек;

2) если настроить зависимость перевозок от расстояния так, чтобы правильно оценивались издержки по преобладающему или среднему расстоянию перевозок (хотя эта величина изменчивая, ведь, к примеру, средняя дальность грузовых железнодорожных перевозок исторически растет: с 496 км в 1914 г. до 700 км в 1940 г., 923 км в 1980 г., 1615 км в 2008 г. [4]), то будут недооценены издержки перевозок на короткие расстояния, что приведет к неправдоподобному представлению в модели грузовых перевозок, к чрезмерному их сосредоточению на коротких расстояниях, что особенно плохо для представления железнодорожных перевозок.

Вогнутая функция издержек — отправная точка теории оптимальных перевозок, развитой Bernot, Caselles и Morel. Их книга всесторонне рассматривает влияние вогнутых издержек на устройство сети. Основа теории Bernot, Caselles и Morel — это простое наблюдение: если издержки перевозки количества груза φ на единицу расстояния задает функция φ^α , где $\alpha > 1$, то дорога, по которой перевозят $\varphi_1 + \varphi_2$ груза предпочтительнее, чем две дороги с объемом перевозок φ_1 и φ_2 , так как $(\varphi_1 + \varphi_2)^\alpha > \varphi_1^\alpha + \varphi_2^\alpha$ [5].

В пользу вогнутой функции X_{ia} приводит такой пример: дешевле две посылки из разных, но близких городов сперва собрать в одном месте, чтобы погрузить на грузовик, который доставит их в другой далекий город, чем доставлять две такие посылки в этот город порознь. В таком случае u-образный путь выгоднее, чем v-образный [6].

Хотя прейскуранты подразумевают, что плата за дополнительный и километр пути, и тонну груза уменьшается, в экономической литературе нередко используются выпуклые, а не вогнутые функции издержек. Объясняется это по меньшей мере двумя причинами:

- 1) так математически удобнее представить перегрузку дорог, из-за которой дополнительную единицу груза на той же дуге перевозить всё дороже и дороже (по аналогии с дорожным затором);
- 2) этого требуют достаточные условия Каруша — Куна — Такера для отыскания единственного решения в задаче вогнутого программирования.

Если целевая функция вогнутая, производство товара описывает неоклассическая производственная функция, перевозочные издержки айсберговые, а миграции запрещены, то, как показали Fajgelbaum и Schaal, при заданных свойствах сети, если издержки перевозки описываются выпуклой по объему грузов функцией, экстремальную задачу можно представить как задачу выпуклого программирования², для которой применима строгая двойственность, за счет которой возможно добиться существенного уменьшения вычислительной сложности задачи. Если же миграции разрешены, то при тех же условиях задача будет квазивыпуклой, если издержки перевозки описываются квазивыпуклой по объему грузов функцией [7,8,9].

Условия Каруша — Куна — Такера (для выпуклого или вогнутого программирования) или Эрроу — Энтховена (для квазивыпуклого или квазивогнутого программирования) важны потому, что гарантируют, что любое локальное решение будет решением глобальным (хотя, если нет строгой выпуклости или вогнутости (в зависимости от задачи) оно может быть не единственным) [10].

Заметим, что квазивыпуклая и монотонно возрастающая функция издержек вполне совместима с тарифами из российских прейскурантов.

Fajgelbaum и Schaal используют айсберговое представление перевозочных издержек [7,8]. Такой прием наиболее распространен в пространственной экономике. Суть

² Здесь мы использовали тот же термин, который применяют Fajgelbaum и Schaal. Термины выпуклое и вогнутое программирование часто сбивают с толку, хотя бы потому, что само происхождение термина «вогнутое программирование» (англ. concave programming) объяснялось тем, что Кун и Такер в статье, представившей их достаточные условия для задачи нелинейного программирования с условиями в виде неравенств, ограничения записывались в виде $g^i(\vec{x}) \geq r_i$, а не $g^i(\vec{x}) \leq r_i$, как в формуле **Error! Reference source not found.**, так что и ограничения $g^i(\vec{x})$, и целевая функция $f(\vec{x})$ были вогнутыми (помноженная на -1 выпуклая функция вогнута). Задачу выпуклого программирования можно представить аналогично, т. е. просто в формуле **Error! Reference source not found.** рассмотреть задачу минимизации выпуклой функции $-f(\vec{x})$.

этого предложенного П. Сэмюэльсоном подхода в допущении, что лишь часть отправленного из $i \neq j$ груза a_{ij} достигает места назначения j , то есть чтобы из i в $j \neq i$ доехала единица товара, нужно отправить $d_{ij} = \frac{1}{a_{ij}} > 1$ единиц товара [11]. При таком подходе не требуется явно моделировать рынок грузовых перевозок, однако все издержки перевозки представляются только переменными. Исследователь же вправе выбирать, от чего эти издержки зависят. От этого выбора частично зависит и то, будут ли в модели айсберговые издержки симметричными. Очевидно, что если перевозочные издержки зависят только от расстояний, то издержки могут быть лишь симметричными. Источником асимметрии обычно служит уклон поверхности и объем перевозок [12].

Fajgelbaum и Schaal дополняют аргументы айсберговой функции издержек также условным уровнем инфраструктуры и удорожанием из-за естественных помех. Такими помехами могут быть водные препятствия, горы, пересеченная местность. На деле же настроенная Fajgelbaum и Schaal модель для Европы считает айсберговые издержки при том же объеме перевозки и уровне инфраструктуры просто пропорциональными расстоянию. Коэффициент пропорциональности был предметом калибровки по данным о межрегиональной торговле.

Модель айсберговых издержек в международной торговле и пространственной экономике применяют, чтобы избежать подробного рассмотрения рынка перевозочных услуг. Однако есть и модели, которые не уклоняются от этой задачи. Так, в модели морских международных перевозок сухогрузами, предложенной Brancaccio, Kalouptsidi и Parageorgiou, издержки перевозки — это итог торга по Нэшу между экспортерами-грузоотправителями и грузоперевозчиками. Цена перевозки в месте отправления зависит от того, насколько легко загрузить перевозочные средства в месте назначения. Грузоотправители-экспортеры и грузоперевозчик в каждом регионе возможного отправления ищут друг друга. Этот процесс — случайный. Суда грузоперевозчиков смотрят в будущее (англ. forward-looking), а потому перевозочные издержки зависят и от места отправления, и от места назначения, и от стоимости груза, и от вероятности, что поиск грузоперевозчиком и грузоотправителем друг друга увенчается успехом, что, особенно примечательно, от привлекательности близких к данному месту других районов. Успешность поиска представляет в модели специальная функция (англ. matching function), аргументы которой — это число участвующих в поиске грузоотправителей (экспортеров) и грузоперевозчиков (судов), а значение — число случаев, которое привело к сделке между грузоотправителем и грузоперевозчиком. Привлекательность какой-либо района для грузоперевозчиков тем выше, чем легче в этом месте грузоперевозчику найти подходящего

грузоотправителя. В стране — чистом экспортере поэтому грузоперевозчики могут требовать большую плату за перевозку, чем в стране — чистом импортере, где после доставки товара из стран — чистых импортеров скапливаются суда, так что и соперничество за грузоотправителя в таком месте возрастает. Более того, среди стран — чистых импортеров более привлекательна для доставки та страна, по соседству с которой есть страна — чистый экспортер, так как судно может уклониться от соперничества за грузоотправителя в стране — чистом импортере и предпочесть добраться негруженным в соседнюю страну, где сможет затребовать более высокую плату за отправку. Склонность к таким порожним пробегам будет тем выше, чем ниже цены на топливо. Более того, снижение цен на топливо усиливает переговорную силу грузоперевозчиков. Географические различия в торговом сальдо между территориями — это еще один источник асимметрии перевозочных издержек кроме объема грузов, провозной способности и особенностей местности. Тем не менее, чтобы явно смоделировать торг между грузоотправителями и грузоперевозчиками требуются подробные сведения о числе перевозчиков (еще сложнее, если они разные) и грузоотправителей. Для настройки модели Brancaccio, Kalouptsidi и Papageorgiou использовали также данные о ценах, о том, гружёное ли данное судно в определенный момент, о данных его геолокации. Столь подробные сведения отсутствуют в открытом доступе (возможно, в принципе) для сухопутных перевозок в ЕАЭС. Кроме того, Brancaccio, Kalouptsidi и Papageorgiou опирались на однородность перевозочных средств — сухогрузов, что невозможно при рассмотрении автомобильных и железнодорожных перевозок [13].

4 Выбор способа перевозки, величины партии

При решении задачи о транспортировке грузов решается не только проблема выбора оптимального маршрута, по которому товары будут поступать к своим получателям. Необходимо также ответить на вопросы «как поставлять?» и «сколько поставлять?». То есть необходимо выбрать наиболее эффективный способ перевозки товаров на определённом расстоянии, оптимизировав размер партии (отправки). Различные виды транспорта, такие как автомобили, поезда, самолеты и корабли, имеют свои преимущества и недостатки в зависимости от расстояния, веса, размера и характеристик перевозимых товаров.

Выбор наиболее подходящего способа перевозки и размера партии зависит от множества факторов, включая расстояние, время, стоимость, тип товаров, требования к скорости доставки и экологические факторы. Оптимальный выбор способа перевозки и размера партии может помочь улучшить эффективность логистических операций, сократить время доставки и снизить затраты на транспортировку товаров.

С экономической глобализацией и ростом электронной коммерции грузовые потоки меняются, причем небольшие партии становятся все более распространенными благодаря онлайн-покупкам. Эта тенденция, вероятно, приведет к увеличению использования грузовиков и посылок, что приведет к увеличению количества транспортных средств на улицах жилых районов и большегрузных транспортных средств на основных дорогах, что может ускорить износ дорожного покрытия, создать угрозу безопасности, вызвать заторы и увеличить выбросы. Для моделирования решений о способе перевозки и размера партии используются различные способы: как классические варианты (модель множественного выбора на основе логистической регрессии (англ. random utility multinomial logit³) — для выбора способа доставки; линейная регрессия — для выбора размера партии); так и более современные методы (например, модель упорядоченного выбора с использованием копул; копулы в такой модели используются для отражения, например, взаимосвязи между временем отправления и выбором транспорта).

Изучение логистических решений для перевозки грузов включает в себя анализ способа транспортировки и размера груза, который нужно отправить. В последние годы все большее признание получает взаимосвязь между выбором способа транспортировки и размером грузовой партии. Размер партии может быть фактором, влияющим на выбор способа транспортировки, и наоборот. Это связано с тем, что выбор способа транспортировки может зависеть от размера грузовой партии, а выбор размера грузовой партии может быть обусловлен сокращением транспортных или эксплуатационных расходов.

Большинство исследований по этой теме фокусируются на автомобильной и железнодорожной перевозке, но очень немногие рассматривают другие режимы, такие как воздушные, водные и курьерские. Для анализа выбора режима транспортировки обычно используются классические модели MNL (полиномиальная логистическая регрессия), основанные на случайной полезности (и их варианты), а для анализа размера грузовой партии — подход линейной регрессии.

Результаты предыдущих исследований подчеркивают взаимосвязь между выбором способа транспортировки и размером грузовой партии, а также то, что выбор способа

³ Случайная модель множественного логита (англ. random utility multinomial logit) — это статистическая модель, используемая для анализа выбора между несколькими альтернативами. Она основана на предположении, что полезность от каждой из альтернатив определяется как сумма двух компонент: определенной и случайной. Определенная компонента зависит от наблюдаемых характеристик как альтернативы, так и того, кто принимает решения. Именно параметры этой части оцениваются количественными методами.

транспортировки существенно зависит от размера грузовой партии. При этом грузоотправители и перевозчики сотрудничают в выборе способа транспортировки. Однако совместное моделирование выбора способа транспортировки и размера грузовой партии может быть неприменимо ко всем видам грузопотоков, особенно для зарубежных операций. В исследованиях рассматриваются также экзогенные переменные, такие как показатели уровня обслуживания, характеристики груза, транспортная сеть и атрибуты происхождения-назначения, а также другие характеристики. Более подробно можно изучить в таблице 2 [14].

Таблица 2 — Исследования по теме выбора размера груза и способа транспортировки

Исследование	Страна	Способ оценивания	Зависимая переменная	Типы доставки	Параметры доставки (независимые переменные)	Параметры груза (независимые переменные)
[15]	США	полиномиальная логистическая регрессия	Способ, размер доставки	Автомобильный, железнодорожный, посылкой (parcel), воздушный	Заграты	Категория товара, характеристики товара, размер, ценность
[16]	Дания	полиномиальная логистическая регрессия	Размер грузовика, размер отгрузки грузовика	Автомобильный	Стоимость доставки, стоимость топлива	Вес
[17]	Иран	полиномиальная логистическая регрессия, модифицированная связкой применения копул и логарифмически-линейной регрессии	Способ, размер отгрузки	Автомобильный	Стоимость аренды транспортного средства	Товарная категория
[18]	США	Вложенная логистическая регрессия (англ. nested logit)	Способ, размер отгрузки	Автомобильный, железнодорожный, посылкой (parcel), воздушный	Стоимость, время	Товарная категория, экспорт

Примечание — Составлено на основе [14].

5 Оптимальная маршрутизация и парадоксы пренебрежения ею в развитии сетей

Оптимальная маршрутизация — важный инструмент в развитии сетей, таких как телекоммуникационные сети, транспортные системы, сети электроснабжения и т. д. Она позволяет оптимизировать производительность сети и улучшить качество обслуживания пользователей.

Фактически оптимальная маршрутизация — это оптимизационный элемент сетевого анализа, который с помощью различных алгоритмов и множества факторов (скорость передачи данных, загруженность сети, расстояние между узлами, пропускная способность и пр.), позволяет улучшить сетевую систему по интересующей области.

Парадокс Джевонса — этот парадокс приобрел особую популярность в транспортной сфере: он возникает в ситуациях, когда строительство более широких дорог приводит лишь к ухудшению ситуации с дорожным движением. Обычно логика объяснения этого парадокса следующая: чем шире дорога, тем более крупные торговые центры хотят располагаться на ней, что, в свою очередь, привлекает больше автомобилей, скопление которых вызывает пробки.

Парадокс Найта — Даунса — идеи парадокса Джевонса получили широкое отражение в литературе, в том числе по транспортной тематике [19]. В этом направлении выделяется схожий по смыслу парадокс Найта — Даунса, которой говорит о том, что увеличение пропускной способности дороги не всегда оказывает позитивное влияние на сокращение времени в пути. Как правило, если властям удалось достигнуть успеха в вопросе снижения количества пробок, то это является сигналом для населения активнее использовать личный автотранспорт. Всё это приводит вновь к образованию пробок и увеличению времени в пути, создавая порочный круг.

Еще один пример — парадокс Бресса⁴ [20], в котором говорится о том, что строительство новой дороги может, наоборот, увеличить время в пути даже при сохранении одного и того же количества автомобилей. Тут же верна и обратная ситуация, когда закрытие одной дороги может способствовать сокращению времени в пути.

Другой интересный парадокс — постулат Льюиса — Могриджа [21], который говорит о том, что улучшение транспортной инфраструктуры приводит к повышению желания людей покупать автомобили, которые будут заполнять новые парковки или трассы, сколько бы их не строилось, тем самым снижая эффект от данной инфраструктуры с течением времени из-за перераспределения транспортных потоков.

⁴ Часто в отечественной литературе пишут о парадоксе Браесса, но такая транскрипция неверна.

Преодолеть вышеупомянутые парадоксы возможно за счет нескольких механизмов: развития общественного транспорта, в том числе выделения специальных для него полос, использования системы взимания дополнительной платы за перемещение по перегруженным участкам.

Всё это демонстрирует необходимость учета комплексного развития транспортной системы и стратегии планирования в целом, которая должна включать планы по расширению и строительству новых магистралей, использованию общественного транспорта и формированию механизма ценообразования для лучшего регулирования городского трафика.

6 Влияние друг на друга разных видов перевозок

Тип отправляемого товара может существенно повлиять на размер партии и способ транспортировки. Громоздкие, тяжелые или хрупкие изделия могут требовать специального обращения и транспортировки и лучше подходят для железнодорожного или морского транспорта, а не для воздушного или автомобильного.

Стоимость также является важным фактором при определении размера груза и способа транспортировки. Доставка морским или железнодорожным транспортом более рентабельная для крупных партий, в то время как воздушная доставка может быть дорогой альтернативой, но подходящей для небольших и дорогостоящих товаров на отправку.

Воздействие на окружающую среду: более экологичные виды транспорта могут быть более предпочтительными ввиду негативного внешнего воздействия.

Перевозка грузов может быть двух типов: унимодальной, когда используется только один вид транспорта, или мультимодальной, когда используется два или более различных вида транспорта. Интермодальные перевозки грузов представляют собой перемещение грузов между пунктами отправления и назначения с использованием последовательности не менее чем двух различных видов транспорта, при этом переключение между видами транспорта происходит на интермодальных терминалах. Интермодальные транспортные сети состоят из предварительной и последующей транспортировки, интермодальных терминалов или хабов и компонентов для дальнемагистральных перевозок.

Унимодальные автомобильные перевозки предпочтительны благодаря высокой производительности, гибкости и конкурентоспособным тарифам, но они не всегда оптимальны с точки зрения устойчивого развития. Интермодальные перевозки, которые сочетают в себе различные виды транспорта, такие как поезда и суда, могут сократить количество грузовиков на дорогах, снизить затраты, выбросы и внешние эффекты. Они являются конкурентоспособной альтернативой перевозкам одним видом транспорта даже для транспортировки конкретных грузов на короткие расстояния, если учитывать критерии

устойчивого развития. Поэтому важно рассмотреть другие способы транспортировки грузов, чтобы уменьшить последствия неустойчивости в экономическом, экологическом и социальном аспектах.

В интермодальных транспортных сетях часто используется автомобильный транспорт для сбора и распределения грузов. Предварительная перевозка включает в себя предоставление пустого контейнера грузоотправителю, в то время как последующая перевозка включает в себя передачу полного контейнера получателю и возврат пустого контейнера на терминал. Интермодальные терминалы играют решающую роль в конкурентоспособности интермодальной системы, представляя собой пункты, где контейнеры могут быть отсортированы и переведены с одного вида транспорта на другой, а также где товары и поставщики логистических услуг могут физически встречаться и взаимодействовать. Дальнемагистральный компонент интермодальных транспортных цепочек обычно включает в себя сочетание автомобильного, железнодорожного, водного транспорта или их комбинаций. Целью интермодальных перевозок является создание интегрированной транспортной цепочки, улучшение экономических показателей и ускорение международной торговли.

В статье [22] цель исследования заключалась в изучении процесса принятия решений, связанных с интермодальными грузовыми перевозками, с акцентом на выборе видов транспорта и политике смены транспортных средств. Для создания моделей поддержки принятия решений были использованы методы многокритериального принятия решений (англ. MCDM — multi-criteria decision-making — широкий набор различных методов для принятия решений, основанных на линейном программировании/экспертном ранжировании и сравнении альтернатив/и др.) и эксперименты с заявленными предпочтениями (англ. SP — stated preferences). Под последними понимается сбор данных, который основывается на опросах (предпочтения, определенные на исторических данных, называются в английском языке revealed preferences).

Общий синтез методов многокритериального принятия решений в грузовой транспортировке. Процедура включает в себя следующие шаги:

- 1) определение системы транспортировки, контекста и целей;
- 2) определение критериев принятия решений и их связанных подкритериев на основе определенных целей;
- 3) определение альтернатив;
- 4) включение критериев в процесс принятия решений путем назначения весов.

Методы взвешивания критериев можно классифицировать на субъективные (экзогенные), объективные (эндогенные) и интегрированные подходы.

Примерами субъективных методов являются метод назначения баллов, прямой рейтинг, метод ранжирования, попарное сравнение, метод отношений, метод колебаний, метод Дельфи и т. д. Объективные методы включают метод энтропии, экстремальный метод взвешивания, метод случайных весов, метод стандартного отклонения, метод среднего веса и т. д. Интегрированный подход представляет собой смесь субъективных и объективных техник;

- 5) определение наиболее подходящих методов многокритериального принятия решений для оценки альтернативных решений на основе взвешенных критериев;
- 6) определение оптимального способа и маршрута грузоперевозки.

Исследование показало, что наиболее часто используемыми критериями принятия решений являются стоимость, выбросы CO₂, сроки доставки, безопасность, надежность, гибкость и периодичность. Стоимость была наиболее важным фактором (по весу, определяемого одним из указанных способов) в 22 статьях, что свидетельствует о ее значительном влиянии на принятие решений. Метод аналитического иерархического процесса (англ. АНР — analytical hierarchy process) широко использован в обозреваемых статьях, что указывает на его пригодность для принятия решений по выбору видов интермодальных перевозок.

АНР представляет собой метод принятия решений [23], который в общих чертах описывается так:

- 1) представить проблему в виде некоторой иерархии. В этой иерархии должна быть цель — принятое решение, альтернативы и их критерии;
- 2) попарно сравнить элементы, что позволит установить приоритеты в иерархии;
- 3) проверить согласованность суждений и приоритетов;
- 4) сделать конечный вывод.

Результаты экспериментов SP показали, что политики, направленные на снижение затрат, были более эффективны, чем политики, направленные на устранение других факторов, влияющих на спрос на интермодальные перевозки. В целом исследование подтвердило эффективность методов MCDM и их применимость в процессах принятия решений по интермодальным грузовым перевозкам.

Указанные методы являются способами для принятия решений в условиях, когда необходимо в некоторой мере удовлетворять многим критериям одновременно. Учет такой особенности в поведении агентов [многоцелевая оптимизация (здесь понимается принятие решений из альтернатив)], пользующихся сетью, может принести пользу и более реалистичной разработанной оптимальной конфигурации сети.

Современным веянием в планировании и реализации перевозок является использование синхромодальных перевозок (англ. *sychromodal transportation*) [24]. Синхромодальные перевозки — это вид мультимодальных перевозок, при котором груз может быть перевезен различными видами транспорта, но выбор каждого последующего транспортного средства основан на моментальных условиях и требованиях логистической цепи, учитывая сроки доставки, стоимость и другие факторы. Это означает, что груз может быть перенесен с одного вида транспорта на другой в режиме реального времени, если это необходимо для достижения оптимальных результатов в терминах качества, скорости и стоимости. Таким образом, синхромодальные перевозки позволяют оптимизировать логистические процессы и обеспечивают более эффективное использование ресурсов транспорта и инфраструктуры, что в итоге приводит к снижению затрат на перевозку грузов и повышению уровня обслуживания.

В работе [24] авторы предлагают математическую модель (которая применима для решения транспортной задачи на больших по удаленности территориях — были проведены проверки на реальных примерах), решение которой находят при помощи генетического алгоритма для эффективного по времени поиска решения.

У модели существует ряд предпосылок:

- все перевозчики различных видов транспорта объединились в сеть и работают вместе, поэтому любое переключение с одного режима на другой допускается;
- сеть ациклична, то есть это конечный направленный граф без направленных циклов;
- вместительность (пропускная способность, мощность) как для узлов, так и для связей ограничена;
- для каждой связи есть только один маршрут на каждый режим с типичными ограничениями инфраструктуры в США;
- груз может быть обработан только в межмодальных терминалах в рабочее время; перевозчик должен ждать, если терминал закрыт, и платить штраф за любую задержку или преждевременное прибытие;
- груз должен прибыть в место назначения в срок. В противном случае плательщик должен заплатить штраф за просрочку.

Задача состоит в минимизации суммарных затрат в доставке (в т. ч. транспортировка, обслуживание, штрафы за задержку) при заданных условиях.

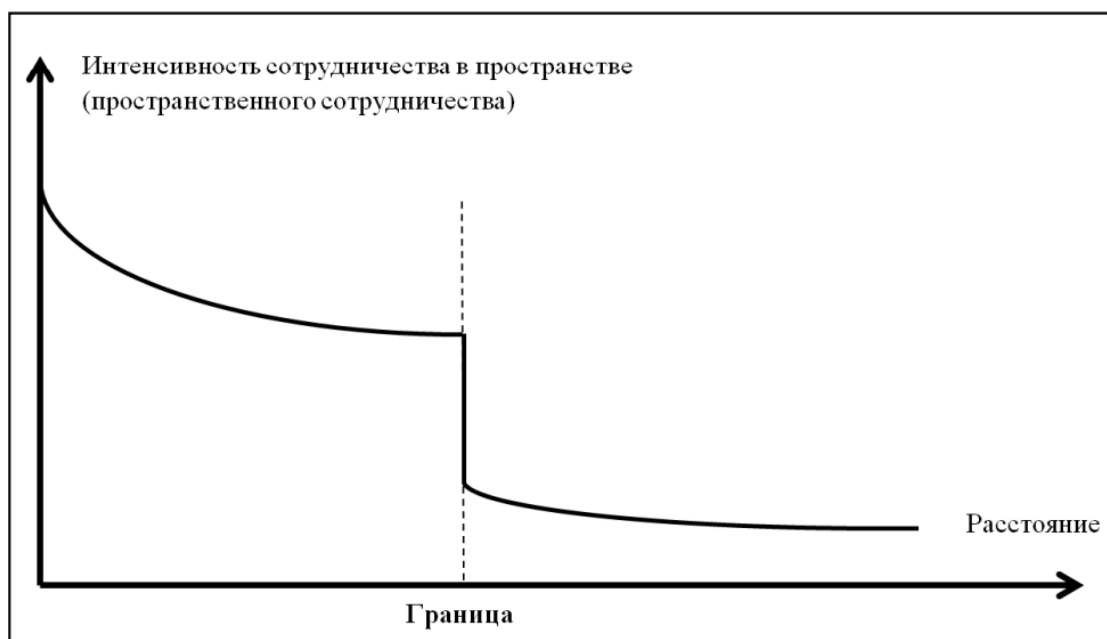
Решение модели при помощи генетического алгоритма было изначально проверено на небольшом графе (4 узла, 18 связей, 3 способа транспортировки и 4 контейнера). А затем были рассмотрены примеры для США, применение которых позволило сократить расходы

как по времени, так и по стоимости. Предложена усовершенствованная модель (частично-целочисленное программирование) сети интермодальной транспортировки (англ. AI-SNM — advanced intermodal service network model), которая учитывает основные допущения синхромодальных перевозок, такие как свободный выбор режима и горизонтальная интеграция, и сводит к минимуму общую стоимость транспортировки, перевалки и задержек. Модель может быть решена с использованием точного метода или генетического алгоритма и стимулирует переход к более экономичным видам транспорта. Модель может быть расширена, чтобы включить динамические сети, факторы окружающей среды и социальные издержки транспортировки.

7 Влияние границ на транспортную систему

Границы в первую очередь ассоциируются с чем-то, что разделяет два непохожих друг на друга объекта по какому-то признаку. Как правило, чаще всего упоминается о государственных границах, однако также бывают и другие: институциональные, экономические, геополитические, этические и пр. В лимнологии — профильной научной дисциплине выделяются еще больше типов границ, например, по признаку морфологии (уровню извилистости, формы рисунка). Тем не менее, наиболее просто о границах высказался академик П. Я. Бакланов и др., который разделил их на два типа: природные и установленные человеком [25].

Очевидно, что границы также оказывают значительное влияние и на развитие транспортной системы в целом. Например, еще в прошлом веке было признано существование барьерного эффекта границ в транспортной географии [26]. В целом этот пограничный эффект был определен как внезапное снижение пространственного взаимодействия в местах пересечения границ [27] (см. рисунок 2).



Примечание — Источник — [27].

Рисунок 2 — Влияние барьерной функции границы на интенсивность пространственного сотрудничества

В целом, как уже было сказано, эффект границ может быть как положительный (например, проверка транспортных средств на границах могут улучшить безопасность и защиту от незаконной деятельности), так и отрицательный. Однако большинство исследований концентрируются именно на отрицательном эффекте как основном. П. Ритвельд группировал и обобщил пять существующих барьерных функций границ:

- 1) предпочтения потребителей в отношении отечественных, а не зарубежных товаров и направлений;
- 2) налоги или другие ограничения на трансграничную торговлю и транспорт, налагаемые государствами;
- 3) институциональные различия (например, вождение в ЕС — правостороннее, тогда как в Великобритании — левостороннее);
- 4) недостаток информации о зарубежных странах;
- 5) слабые или дорогостоящие инфраструктурные услуги в области транспорта и связи для международных связей [27].

Эмпирические результаты эффекта границ также можно проследить и в трансграничной торговле [28], автомобильных и железнодорожных потоках [29], движении капитала [30] или диффузии знаний [31].

В большинстве перечисленных областей особую роль играли гравитационные модели [32], в которых оценивался объем взаимных потоков между двумя странами, регионами или городами. В качестве таких потоков чаще всего использовалась величина

торгового оборота в стоимостном выражении, но также могли рассматриваться и тоннаж или объем перевезенных пассажиров.

Второй блок эмпирических работ посвящен моделированию потребительского выбора отдельных видов транспорта и того, как на этот выбор влияют границы. В этом направлении наибольшую популярность приобрели мультиномиальные логит-модели (англ. multinomial logit, MNL), которые позволяют предсказать выбор индивида из нескольких вариантов, учитывая его индивидуальные характеристики (уровень дохода, пол, возраст, профессия и др.). Основная предпосылка модели — однородность предпочтений потребителей и равные вероятности для выбора каждого варианта.

Третья группа моделей — сетевые, в которых используется теория графов для изучения влияния границ на транспорт и мобильность в целом. Как правило в данной группе моделей используется взвешенный граф $G = (V, E, W)$, где V — множество вершин в графе (городов или пересечения дорог), E — множество ребер (фактов взаимодействия) и W — веса ребер, отвечающие за объем этого взаимодействия (товарооборот, пассажиропоток и пр.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен краткий обзор отдельных аспектов существующих теоретических и эмпирических исследований к решению транспортных задач и задач о развитии транспортных сетей. Несмотря на то, что в целом это направление достаточно хорошо проработано в исследовательской литературе, при переходе к имплементации на практике отдельные вопросы требуют более детального рассмотрения, в частности подходы к моделированию перевозок различных товаров по многослойной сети, представлению перевозочных и иных издержек, заданию критериев оптимальности развития сети.

Увязка транспортной задачи с моделями общего равновесия ставит вопрос о единственности решения, так что итоговая модель принимает вид задачи выпуклого программирования с неотрицательными переменными выбора и ограничениями в виде неравенств. Основные алгоритмы в литературе об оптимальных перевозках сосредоточиваются на сети одного вида транспорта, но учесть многослойность сети и при этом сохранить применимость известных алгоритмов возможно через представление параллельных ребер разных видов сообщения простыми цепями с промежуточной вспомогательной вершиной — маркером вида сообщения. Как преискурранты цен перевозки, так и академическая литература едина в том, что и в перевозках, и в строительстве дорог действует эффект масштаба, так что это следует учитывать в функциях издержек экстремальной задачи в модели оптимальной конфигурации многослойной сети. Кроме типа дорог и особенностей местности при поиске действительно лучшего пути развития транспортной сети желательно учитывать особенности маршрутизации, тонкости выбора величины отправки, типа груза, а также риски нарушения работы сети. Такие условия при планировании сети на уровне более-менее крупных территориальных единиц крайне сложно учесть, так что вызванные этими условиями отклонения представляют практически неустранимую погрешность в решении, которое будет искать наш подход к моделированию.

БЛАГОДАРНОСТИ

Препринт подготовлен на основе материалов научно-исследовательской работы, выполненной в соответствии с Государственным заданием РАНХиГС при Президенте Российской Федерации на 2023 год

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Maksim, Cyhawk. File:Max flow.svg // Wikimedia Commons. 2010. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Max_flow.svg (дата обращения: 29.05.2023).
2. Button K. Transport economics. Cheltenham, UK ; Northampton, MA: Edward Elgar Publishing, 2022. 574 pp.
3. Bertsekas D.P. Network optimization: continuous and discrete methods. Belmont, Mass: Athena Scientific, 1998. 593 pp.
4. Терешина НП, Левицкая ЛП, Шкурина ЛВ, редакторы. Экономика железнодорожного транспорта. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 536 с.
5. Bernot M., Caselles V., and Morel J.M. Optimal transportation networks: models and theory. Berlin: Springer, 2009. 200 pp.
6. Xia Q. Optimal paths related to transport problems // Communications in Contemporary Mathematics. Apr 2003. Vol. 05. No. 02. pp. 251-279.
7. Fajgelbaum P.D., Schaal E. Optimal Transport Networks in Spatial Equilibrium // National Bureau of Economic Research Working Papers. Feb 2017. No. 23200.
8. Fajgelbaum P.D., Schaal E. Optimal Transport Networks in Spatial Equilibrium // Econometrica. 2020. Vol. 88. No. 4. pp. 1411-1452.
9. Supplement to «Optimal transport networks in spatial equilibrium» // Econometrica. 2020. URL: <https://www.econometricsociety.org/publications/econometrica/2020/07/01/optimal-transport-networks-spatial-equilibrium/supp/ecta200160-sup-0001-onlineappendix.pdf> (дата обращения: 12.05.2023).
10. Chiang A.C., Wainwright K. Fundamental methods of mathematical economics. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 005. 688 pp.
11. Samuelson P.A. The Transfer Problem and Transport Costs, II: Analysis of Effects of Trade Impediments // The Economic Journal. Jun 1954. Vol. 64. No. 254. pp. 264-289.
12. Redding S.J., Rossi-Hansberg E. Quantitative Spatial Economics // Annual Review of Economics. Aug 2017. Vol. 9. No. 1. pp. 21-58.
13. Brancaccio G., Kalouptsi M., and Papageorgiou T. Geography, Transportation, and Endogenous Trade Costs // Econometrica. 2020. Vol. 88. No. 2. pp. 657-691.

14. Keya N., Anowar S., and Eluru N. Joint model of freight mode choice and shipment size: a copula-based random regret minimization framework // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019. Vol. 125. pp. 97-115.
15. Pourabdollahi Z., Javanmardi M., Karimi B., Mohammadian A., and Kawamura K. Mode and shipment size choice models in the FAME simulation framework // *TRB 92nd Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington DC. 2013. P. 17.
16. Abate M., De Jong G. The optimal shipment size and truck size choice—The allocation of trucks across hauls // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2014. Vol. 59. pp. 262-277.
17. Irannezhad E., Prato C.G., Hickman M., and Mohaymany A.S. Copula-based joint discrete–continuous model of road vehicle type and shipment size // *Transportation Research Record*. 2017. Vol. 2610. No. 1. pp. 87-96.
18. Stinson M., Pourabdollahi Z., Livshits V., Jeon K., Nippani S., and Zhu H. A joint model of mode and shipment size choice using the first generation of Commodity Flow Survey Public Use Microdata // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2017. Vol. 6. No. 4. pp. 330-343.
19. Ding C., Song S., Zhang Y. Paradoxes of Traffic Flow and Economics of Congestion Pricing // *Semantic Scholar*. 2008. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Paradoxes-of-Traffic-Flow-and-Economics-of-Pricing-Ding-Song/a2b38f5e29ed4d99c796960665ae57813dd148c3> (дата обращения: 19.05.2023).
20. Braess D. Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung // *Unternehmensforschung*. 1968. Vol. 12. pp. 258–268.
21. Mogridge M.J.H. *Travel in towns: jam yesterday, jam today and jam tomorrow?* London: Palgrave Macmillan UK, 1990. 326 pp.
22. Gohari A., Ahmad A.B., Balasbaneh A.T., Gohari A., Hasan R., and Sholagberu A.T. Significance of intermodal freight modal choice criteria: MCDM-based decision support models and SP-based modal shift policies // *Transport Policy*. Jun 2022. Vol. 121. pp. 46-60.
23. Saaty T. L. *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications, 2001.
24. Farahani N.Z., Noble J.S., McGarvey R.G., and Enayati M. An advanced intermodal service network model for a practical transition to synchromodal transport in the US Freight System: A case study // *Multimodal Transportation*. Mar 2023. Vol. 2. No. 1. P. 100051.

25. Бакланов П.Я., Ганзей С.С. Трансграничные территории: проблемы устойчивого природопользования. Владивосток: Дальнаука, 2008. 215 pp.
26. Hansen N. Border regions: a critique of spatial theory and a European case study // *The Annals of Regional Science*. Mar 1977. Vol. 11. No. 1. pp. 1-14.
27. Rietveld P. Barrier Effects of Borders: Implications for Border-Crossing Infrastructures // *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. Apr 2012. Vol. 12. No. 2. pp. 150–166.
28. Nitsch V. National Borders and International Trade: Evidence from the European Union // *The Canadian Journal of Economics / Revue canadienne d'Economie*. 2000. Vol. 33. No. 4. pp. 1091-1105.
29. Olvera L.D., Le Nir M., Plat D., and Raux C. Les effets de frontière, une barrière à la compréhension des échanges internationaux? // *L'Espace géographique*. 1996. Vol. 25. No. 3. pp. 193-202.
30. Helliwell J.F., McKittrick R. Comparing Capital Mobility across Provincial and National Borders // *The Canadian Journal of Economics / Revue canadienne d'Economie*. 1999. Vol. 32. No. 5. pp. 1164-1173.
31. Tang C., Qiu P., and Dou J. The impact of borders and distance on knowledge spillovers — Evidence from cross-regional scientific and technological collaboration // *Technology in Society*. Aug 2022. Vol. 70. P. 102014.
32. Шумилов А.В. Оценивание гравитационных моделей международной торговли: обзор основных подходов // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. 2017. Т. 21. № 2. С. 224–250.