

5/21

ПРЕПРИНТЫ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ПРОСТРАНСТВЕННОЕ
РАЗВИТИЕ. РЕГИОНАЛЬНАЯ РАЗВИТИЕ. РЕГИОНАЛЬНАЯ
И ГОРОДСКАЯ ЭКОНОМИКА И ГОРОДСКАЯ ЭКОНОМИКА
SPATIAL DEVELOPMENT SPATIAL DEVELOPMENT
REGIONAL AND URBAN ECONOMY REGIONAL AND URBAN ECONOMY

К. В. Ростислав
Ю. Ю. Пономарев

**РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К АНАЛИЗУ
ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ
НА МЕЖРЕГИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ГРУЗОПОТОКОВ В РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И ГОСУДАРСТВЕННОЙ
СЛУЖБЫ ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»
(РАНХиГС)

К. В. Ростислав, Ю. Ю. Пономарев

Разработка подхода к анализу влияния изменений транспортной сети
на межрегиональное распределение грузопотоков в России

Москва 2021

Транспортная система менее изменчива, чем расселение или размещение хозяйства. Это обуславливает потребность в проверке оптимальности расходов на развитие транспортных сетей. Прежние работы в этой области предлагали критерии оптимального развития транспортных сетей одного вида транспорта. Работа демонстрирует, как с помощью провозной способности можно «схлопнуть» многослойную сеть до представления, удобного для работы с привычными инструментами пространственных моделей общего равновесия. Возможности нового подхода проверены на примере Калининградской области. Установлено, что распределение провозной способности между городскими округами Калининградской области неоптимальное: мала провозная способность дорог в широтном направлении. Из модели следует, что новые инвестиции в дорожное строительство должны приближать провозную способность дорог между муниципальными образованиями к таким уровням, чтобы отношения провозной способности между парами смежных территорий соответствовали таковым в модели с нулевой нижней границей оптимальной величины провозной способности.

The transportation system is less variable than settlement patterns or the allocation of economic activity. This necessitates checking the optimality of spending on the development of transportation networks. Previous work in this area proposed criteria for the optimal development of transport networks for a single mode of transportation. The study demonstrates how, with the help of carrying capacity, a multilayer network can be “collapsed” to a representation convenient for working with the usual tools of spatial general equilibrium models. The possibilities of the new approach have been tested on the example of the Kaliningrad oblast. It was found that the distribution of the carrying capacity between the urban districts of the Kaliningrad region is not optimal: the carrying capacity of the roads in the latitudinal direction is insufficient. It follows from the model that new investments in road construction should bring the carrying capacity of roads between municipalities closer to such levels that the ratios of carrying capacity between pairs of adjacent territories correspond to those in the model with a zero lower limit of the optimal carrying capacity value.

Препринт подготовлен на основе материалов научно-исследовательской работы, выполненной в соответствии с государственным заданием РАНХиГС при Президенте Российской Федерации на 2021 год

Оглавление

Введение	4
1. Систематизация существующих теоретических и эмпирических исследований по моделированию конкуренции между видами транспорта с учетом конфигурации транспортной инфраструктуры	5
2. Подходы к моделированию развития транспортных сетей и конкуренции между видами транспорта с учетом конфигурации сети	45
3. Представление транспортных сетей в модели	47
4. Экономика и оптимизационная задача модели	58
5. Возможности модели	65
6. Результаты модели для сценариев в Калининградской области	70
Заключение	79
Список использованных источников	80

Введение

Развитие транспортных сетей дорожке, чем строительство других видов инфраструктуры. При этом решения о конфигурации сети, распределении провозной способности по ее участкам и о соотношении сетей разных видов транспорта определяют развитие экономики страны и ее расселение на долгие десятилетия. Из этого возникает потребность в научном обосновании оптимальности проектов по развитию транспортной системы.

Цели работы:

- оценить, как изменения конфигурации многослойной транспортной сети влияют на межрегиональное распределение грузопотоков;
- предложить способ установить оптимальность данной многослойной транспортной сети;
- выяснить, какой должна быть российская транспортная сеть, чтобы отвечать потребностям в грузовых перевозках.

Новизна работы в том, при поиске оптимального распределения грузовых потоков и инвестиций в развитие транспортной сети учитывается, что транспортная сеть страны состоит из сетей разных видов транспорта.

1. Систематизация существующих теоретических и эмпирических исследований по моделированию конкуренции между видами транспорта с учетом конфигурации транспортной инфраструктуры

При оценке и прогнозировании роли различных видов транспорта необходимо учитывать следующие сложности:

- 1) двойственный характер конкуренции, который заключается в том, что разные виды транспорта могут играть роль и комплиментов, и субститутов по отношению друг к другу. Необходимо учитывать возможные разнонаправленные эффекты;
- 2) существенный разрыв между потенциальными характеристиками транспортной системы и фактической реализацией, например, с точки зрения пропускной способности видов транспорта, заполняемости контейнеров;
- 3) явные трендовые и сезонные характеристики в транспортных данных, что требует особой работы с данными, например, в рамках экспоненциального сглаживания;
- 4) множественность методов прогнозирования. В исследованиях часто рекомендуются не ограничиваться одним подходом, но использовать комбинированные методы для повышения качества анализа.

Нередко количественные методы прогнозирования дополняются качественными, в частности, экспертными опросами, чтобы учесть локальные характеристики, которыми определяются важные тенденции. Экспертные данные часто корректируют смещения, возникающие в исключительно количественном анализе.

Основные модели использования различных видов транспорта (Floden, 2007):

— оптимизационные. Анализируется обеспечение снижения стоимости перевозок, в том числе за счет обеспечения своевременной доставки и перестановки порожних вагонов, увеличения доли интермодальных перевозок, например, модель Jensen (1990). Такие модели часто не направлены на нахождение наилучшего решения (это может быть сложным и с математической точки зрения, не все может быть учтено в рамках моделирования), но удовлетворительного решения с точки зрения целевой функции, достигаются минимальные целевые значения с учетом ограничений. Близкими считаются и эвристические модели, которые основаны на интуиции, в них не рассматриваются все возможные исходы, но зато относительно быстро возможно получение приемлемых результатов;

— симуляционные (имитационные). Решают тактические и оперативные проблемы. Пример — модель KombiSim. Используются графические методы, подражание

реальным процессам, при этом не ставится оптимизационных задач. Такие модели можно разделить на 2 типа — дискретные модели (анализ влияния внешнего шока) и модели, анализирующие ситуацию в динамике. Такие модели позволяют тестировать инновации, можно получить представление о том, какие переменные наиболее важны и как эти переменные взаимодействуют, выявить узкие места. Но результаты могут быть сложны для интерпретации, в имитационных моделях часто бывает затруднительно определить, вызван ли результат значительными свойствами системы или случайностями, заложенными в модель;

— сетевые. Примеры: модели Guélat, Florian and Crainic (1990) и Crainic, Florian and Leal (1990) для стратегического планирования грузовых потоков. Сетевые модели могут быть направлены на минимизацию общих транспортных расходов. Используются точки и связи, которые могут отражать транспортные издержки.

Выделяется три вида проверки моделей:

1) verification — проверяется, верно ли работает программа, при этом не происходит сравнения с реальным миром;

2) validation — сравниваются результаты моделирования и процессы реального мира с учетом набора выбранных предпосылок. Скорее, речь идет о попытках опровержения модели (классический критерий Поппера). Принимаются во внимание различные аспекты. Так, свойство непрерывности выявляет, что небольшие изменения входных параметров приводят к столь же небольшим и уместным изменениям. Свойство последовательности означает, что схожие тесты должны приводить к аналогичным результатам. Тест на абсурдные условия проверяет, что невозможных условий не должно возникать во время тестирования модели, например, не должно оказаться, что совершено отрицательное количество поездок;

3) evaluation — проверка на наличие данных, насколько сложившаяся модель соответствует предъявляемым требованиям.

Модели могут анализировать частный проект (case-based model) или всесторонне описывать всю транспортную систему. Пример комплексной модели — модель национальной грузовой модели в Норвегии (англ. national freight model, NGM). Эта модель покрывала всю транспортную систему, учитывала издержки для 11 видов транспорта, разные виды товаров. В основе модели лежала минимизация логистических издержек (de Jong, et al., 2016).

По уровню детализации модели делятся на агрегированные и дезагрегированные. Выбор между этими видами моделей зависит от доступности данных: очень часто дезагрегированных данных не хватает (Stinson, et al., 2017).

В дезагрегированных моделях вид транспорта выбирает конкретная фирма, но такие модели тяжело строить из-за недоступности данных: дезагрегированные данные бывают коммерческой тайной. В таких случаях можно использовать неохраемые более старые данные.

В агрегированной модели выделяются зоны обслуживания тем или иным видом транспорта. Выбор между агрегированными и дезагрегированными данными непростой. Агрегированные данные часто представляются с достаточной периодичностью (публикация органами государственной власти), но могут быть не детализированными. Дезагрегированные данные хороши для микромоделирования, например, на уровне города или отрасли, но часто такие данные недоступны для транспортной системы в целом. Эффективной может быть гибридная модель из агрегированных и дезагрегированных данных.

Данные для дезагрегированных моделей получаются либо с использованием выявленных предпочтений (англ. revealed preferences — получение информации о текущих процессах, о реальных транспортных потоках) или заявленных предпочтений (англ. stated preferences, на основе гипотетических ситуаций, опросов). Лучше использовать выявленные предпочтения (RP), чем заявленные (SP), или хотя бы сочетание данных [4]. Заявленные предпочтения порождают ошибки, а потому лучше использовать их не для прогнозирования, но для оценки соотношения коэффициентов.

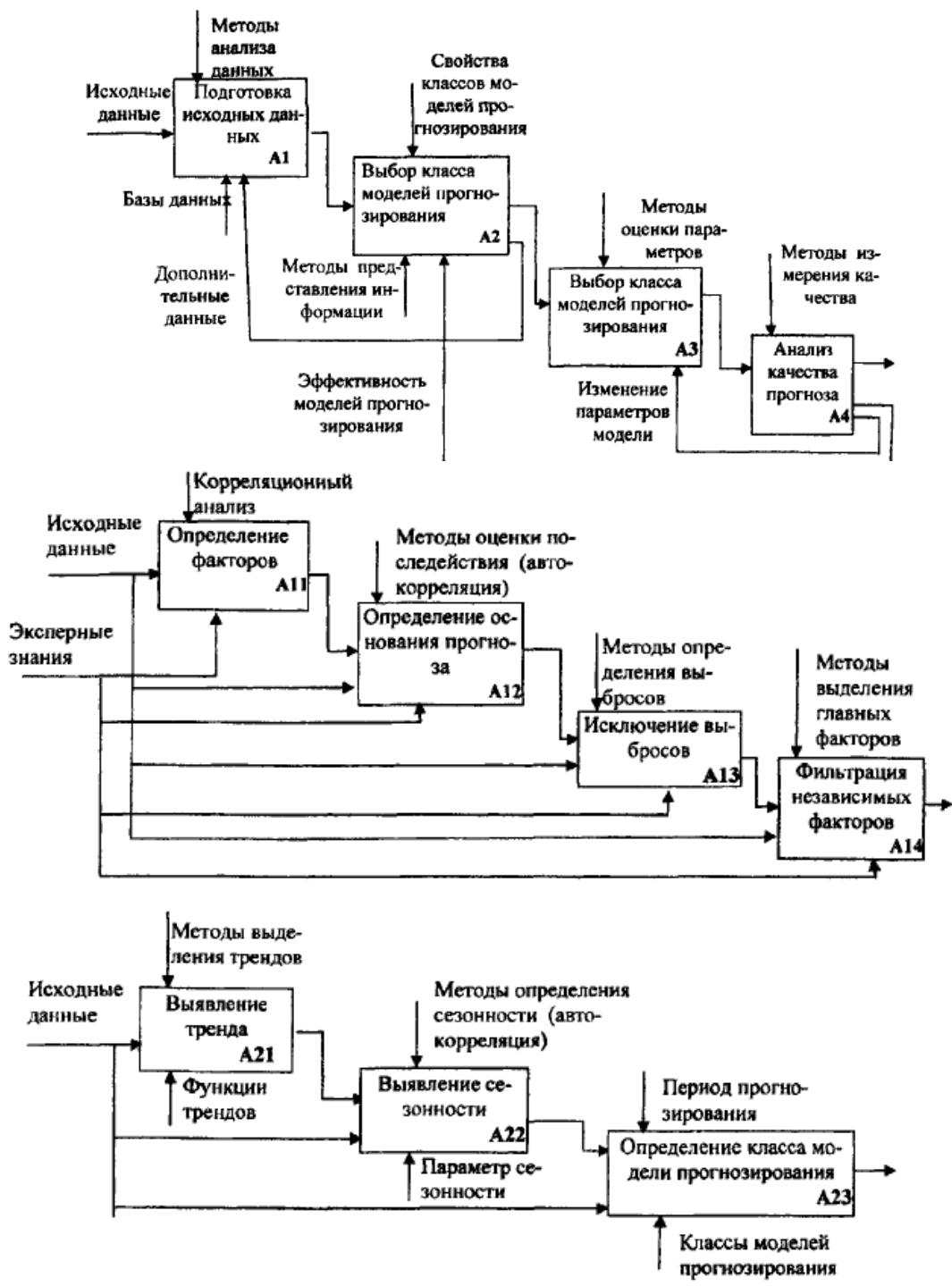
В моделях рекомендуется использовать как первичные данные (опросы транспортных компаний), так и вторичные данные. Для моделирования, особенно если речь идет о пассажироперевозках, должен быть собран большой массив данных, в том числе: социально-экономический статус путешественника (доход, состав домохозяйства и т. д.), характер поездки (мотивация) и характеристики альтернативных транспортных средств (время в пути, частота и т. д.) (Ivaldi & Vibes, 2005). Jensen (Jensen, 1990) выделяет следующие аспекты, которые должны быть учтены в рамках моделирования: учет экономических или социальных издержек, реальных потоков товаров или балансовых потоков, альтернативное использование высвободившихся грузовых автомобилей, их простой и т. д.

Модели грузоперевозок могут сильно отличаться по многим параметрам. Часто анализируются либо перевозки внутри города, либо межрегиональные перевозки. Традиционно модели рассматривают автомобильный и железнодорожный транспорт, но могут включать и водные перевозки, если они важны для выбранной местности. Доля авиаперевозок мала в физическом объеме грузовых перевозок, но велика в стоимости перевезенных грузов, что оправдывает включение и авиаперевозчиков в модели грузовых перевозок. Переменной может быть либо дискретный выбор конкретного транспортного средства, либо оценка рыночной доли того или иного вида транспорта.

Согласно de Jong (de Jong , Mode Choice Models, 2014), объясняющими переменными при моделировании грузоперевозок могут быть транспортные расходы (включая стоимость погрузки и разгрузки), время перевозки, количество перевалок, надежность (степень своевременной доставки), гибкость (способность обрабатывать краткосрочные запросы), вероятность повреждения во время транспортировки, возможности отслеживать груз, предполагаемые вредные выбросы и частота транспортировки. Чувствительность к характеристикам может различаться в зависимости от типа товара (насыпные грузы и т. п.). Могут учитываться размер груза, отрасль, размер фирмы, используемое транспортное оборудование (например, контейнеры) и географическое расстояние.

Обычно отдельно моделируют выбор транспортного средства и иных параметров грузоперевозки. Наиболее реалистично выглядело бы моделирование с учетом всей транспортной цепочки (со сменой видов транспорта), но часто доступные данные этого не позволяют и указывают только точки отправления и назначения. В этой связи иногда предлагают упрощенный вариант моделирования и отражают только главный вид транспорта, то есть если в транспортной цепочке есть водный маршрут, то перевозка считается водной, если есть железнодорожный участок, то железнодорожной, в противном случае перевозка считается автомобильной. Маленькие объемы грузов, как правило, перевозятся именно автомобильным транспортом. Также необходимо учитывать, что выбор транспортного средства — это сложный процесс со многими участниками, в том числе и получателями груза, и посредниками. Всё чаще транспортные модели учитывают транспортную логистику, иногда даже логистику запасов, что приближает их к отражению реальных коммерческих процессов в грузообороте.

Согласно Мамаеву (Мамаев, 2006) эффективный алгоритм для прогнозирования и моделирования экономических показателей работы и развития транспортной системы и перевозок является многоэтапным процессом — см. рис. 1.



Примечание — Источник — (Мамаев, 2006).

Рис. 1. Функциональная схема прогнозирования развития транспортной системы

В статье Гимади, Добродей, Матушкина (Гимади, Добродей, & Матушкина, 2005) рассматривается проблема моделирования транспортного комплекса региона. Авторы указывают, что, как правило, моделирование носит локальный характер, остальные параметры учитываются как экзогенные, идет учет различных сценариев развития во внешней среде. Большой задачей становится не просто моделирование транспортной

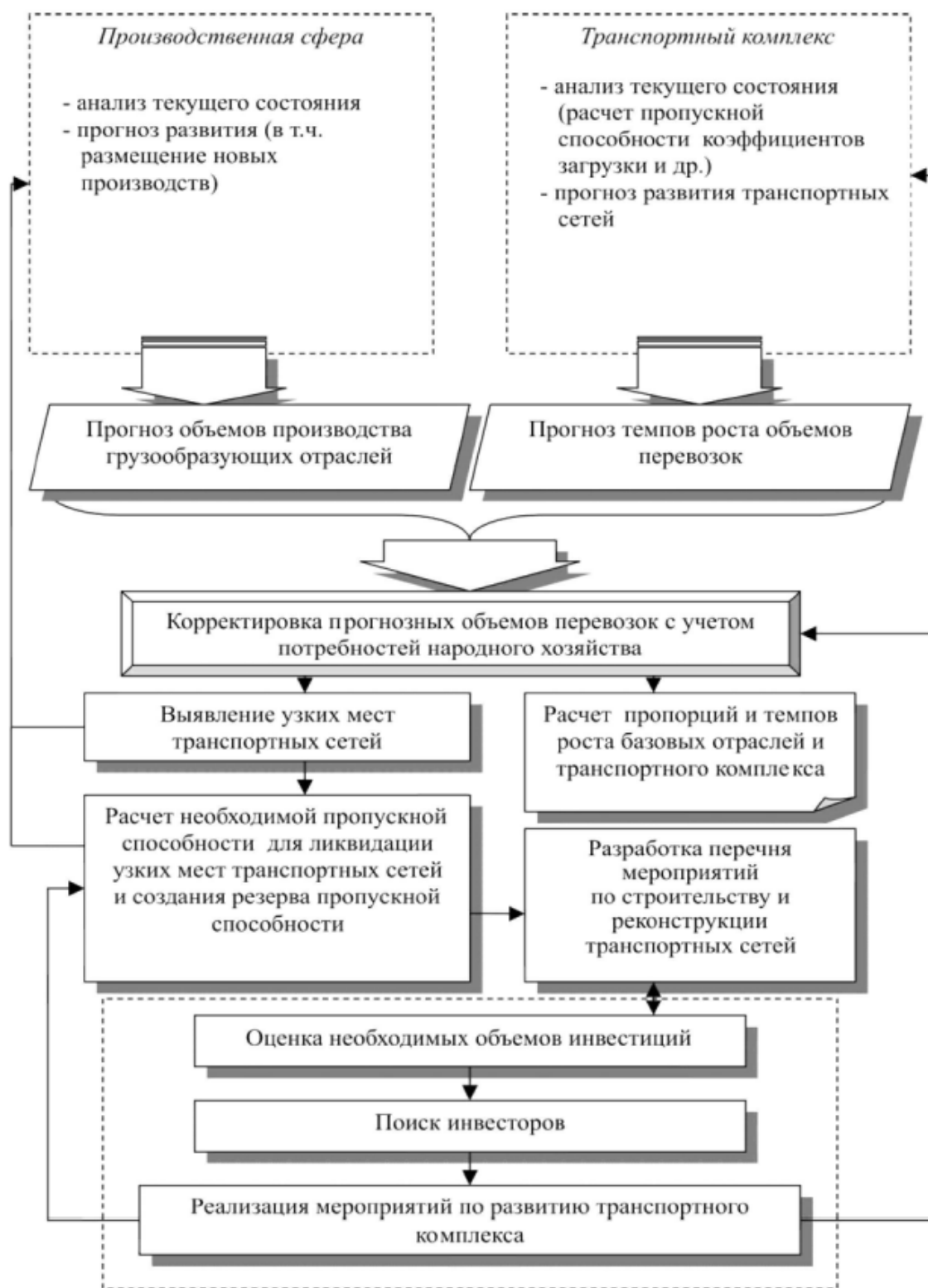
системы, но формирование комплексной модели хозяйства территории с транспортным блоком, предлагаются продуктовые модели размещения производства с учетом роли транспортной инфраструктуры, в том числе на основе МОБ (межотраслевого баланса). Общую логику моделирования авторы представляют с помощью следующего рисунка — см. рисунок 2.

При оценке транспортной инфраструктуры могут использоваться различные индикаторы, например:

- показатели транспортных издержек для различных видов транспорта (морским, автомобильным, железнодорожным транспортом);
- оценки физических характеристик инфраструктуры (пропускная способность портов, дорог на подходах к пунктам пропуска на границе, протяженность железных дорог, автомобильных дорог с учетом различных категорий – с твердым или усовершенствованным покрытием, автомагистрали, скоростные автомобильные дороги или шоссе);
- иные более сложные показатели, измеряющие качество автомобильных дорог, индексы качества дорог, например, по версии World Economic Forum Global Competitiveness Report (European Commission. Investments and Infrastructure: Quality of roads, 2019).

С точки зрения временных издержек могут быть выделены следующие компоненты при сравнении разных видов транспорта (Woxenius) (Woxenius, 2006):

- 1) время транспортировки (transport time) — время в пути, которое пропорционально расстоянию, учитываются географические ограничения или технические ограничения транспортной сети.
- 2) время заказа (order time) — время на подготовку перед отправлением.
- 3) тайминг (timing) — время в расписании, время отправления и прибытия для отгрузки.
- 4) пунктуальность — умение соблюдать график, транзитная надежность. Учитывается среднее отклонение от запланированного времени прибытия.
- 5) частота (frequency) — количество отправок за определенное время. Например, в этом отношении железнодорожный транспорт, как правило, ощутимо проигрывает автомобильному.



Примечание — Источник — (Гимади, Добродей, & Матушкина, 2005).

Рис. 2. Моделирование развития транспортного комплекса региона с учетом потребностей экономики

Иногда выделяют два подхода к оценке затрат времени для грузового транспорта (Feo-Valero, Garcí'a-Mene' dez, & Garrido-Hidalgo, 2011): по факторным издержкам (factor

cost approach) и через моделирование спроса. Первый оценивает сокращение издержек за счет снижения времени транспортировки.

При моделировании конкуренции между видами транспорта самая простая оцениваемая формула может выглядеть следующим образом:

$$\log \frac{S_i}{S_j} = \beta_0 + \beta_1(P_i - P_j) + \sum_w \beta_w(x_{iw} - x_{jw}) \quad (1)$$

где $\frac{S_i}{S_j}$ — соотношение рыночных долей двух видов транспорта i и j ;

P_i и P_j — транспортные расходы при использовании вида транспорта i и j ;

x_{iw} и x_{jw} — характеристика w видов транспорта i и j ;

β_0, β_1 и β_w — параметры.

Для оценки вероятности выбора того или иного вида перевозок используются различные типы моделей: мультиномиальный логит (англ. multinomial logit, MNL) [логистическая регрессия вероятности небинарного (с более чем двумя исходами) события оценивает вероятность выбора одного из более чем двух видов перевозок] или пробит-регрессия, вложенный логит (англ. nested logit) и его расширение для случая с пересекающимися группами (англ. cross-nested logit), смешанный логит. Во вложенной логистической модели сначала происходит выбор группы видов перевозок, а потом конкретного вида внутри группы. В расширении этой модели (англ. cross-nested logit) конкретный вид перевозки --- элемент одновременно нескольких групп видов перевозок.

Модели общего равновесия требуют обширных данных, могут быть слишком дорогими. Модели оптимизации требуют глубокой детализации данных (агрегирование порождает смещения). Из-за недостатков таких моделей широкое распространение получили гравитационные модели. Они используются для оценки торговых потоков между регионами, государствами.

Активно развиваются пространственные авторегрессионные модели, которые предлагают учесть влияние регионов на соседние территории через транспортные потоки.

В рамках прогнозирования транспортных потоков, грузоперевозок, в последнее время широкое распространение получают непараметрические методы, более гибкие с точки зрения прогнозирования распределения. Примеры непараметрических методов: нейронные сети, метод k ближайших соседей (Milenković, Švadlenka, Melichar, Bojović, & Avramović, 2018).

Пример анализа издержек транспортной системы — работа Floden (Floden, 2007). В ней предложена *heuristics intermodal transport model* (HIT-model) — эвристическая интермодальная транспортная модель. Floden сравнивает использование автомобильного и интермодального транспорта, оценивает сокращение автомобильных издержек при задействовании железнодорожного транспорта и сокращение общих издержек.

Издержки традиционно делятся на фиксированные (FC) и переменные (VC) (Floden, 2007), при этом фиксированные издержки FC зависят от времени анализа. Так, арендная плата за территорию терминала представляет собой фиксированные издержки в сутках, но переменные затраты в случае годовых интервалов. Переменные затраты можно далее подразделить на затраты, зависящие от времени (расходы на заработную плату, налоги на транспортные средства, страхование), и затраты, зависящие от расстояния (например, на шины, топливо, техническое обслуживание, налоги и сборы за железнодорожную инфраструктуру).

Для железнодорожных издержек при этом учитывались также скачки фиксированных издержек, которые возникают, например, при добавлении дополнительных поездов. Оценивались все возможности увеличить долю комбинирования транспортных средств, чтобы сократить дистанцию.

Обсуждается также проблема внешних эффектов. Внешние эффекты разделяются на технологические и денежные (англ. *technological externalities and pecuniary externalities*). Технологические внешние эффекты — это эффекты, которые влияют на производительность предприятий или объем потребления потребителей. Например, строительство дороги разрушает рекреационный потенциал территории. Денежные же эффекты влияют не на объем производства и потребления, но на его цену.

В предложенной модели доступны различные опции, в том числе учет только коммерческих или общественных издержек, оптимизация по отдельным маршрутам или в рамках всей системы (с точки зрения снижения издержек), минимизация издержек или максимизация доли комбинированного транспорта при условии отсутствия роста общих издержек системы, иные опции.

Для общественных издержек учитывается проблема налоговых эффектов. Если средства выделяются на другие цели, то может быть предусмотрен другой налог. При расчетах может отключаться доля налогов, учитывается средняя налоговая ставка. Учитывались экологические эффекты, издержки, связанные с выбросами, шумом, авариями.

Для всей системы социальные издержки оказались на 18 % выше, чем бизнес-издержки, при этом интересно отметить, что для комбинированного транспорта издержки

оказались выше на 8 %, а для автомобильного транспорта на 27 % выше, что дополнительно подчеркнуло важность развития железнодорожного транспорта. Но у комбинированного транспорта оказалась ниже конкурентоспособность с точки зрения оперативности сбора и доставки грузов. Исследование привело к выводу, что на дистанции 250–500 км комбинированный транспорт может быть эффективен и почти всегда конкурентоспособен на расстоянии более 500 км.

Конкурентоспособность видов транспорта во многом зависит и от приоритетов потребителей. Например, Saxin, Lammgård и Flodén (Saxin, Lammgård, & Flodén, 2005) получили оценки того, какие факторы важны респондентам при организации грузоперевозок. Так 58 % с точки зрения важности приходилось на ценовую конкурентоспособность, 21 % — на время транспортировки и 17 % — на своевременную доставку, 5 % на экологическую эффективность.

В статье Stinson и соавторов (2017) (Stinson, et al., 2017) для моделирования логистической системы с учетом выбора транспортного средства и размера груза использована модель вложенного логита.

Цепочки поставок анализируются с учетом 4 видов размера груза, 4 видов транспорта (автомобильного, железнодорожного, авиационного, почтового транспорта). Анализируется около 100 000 отправок, у которых или место отправления, или место назначения было в Аризоне.

В работе были объединены перевозки авиасообщением и посылками, так как оказалось, что эти два способа применялись для дорогих товаров небольшого объема. Кроме того, в ранних моделях, которые рассматривали авиaperевозки и почтовые отправления порознь, оценки параметров для этих двух видов перевозок были похожие.

Было выделено 4 вида грузов:

- 1) менее 150 фунтов (это предел веса посылки);
- 2) 150–1 499 фунтов, диапазон, в котором услуга перевозки грузов автомобилями является рентабельной;
- 3) 1 500–34 999 фунтов (грузовые автомобили являются конкурентоспособными, но начинают использоваться железнодорожные перевозки);
- 4) 35 000 и более фунтов (используется грузовой автомобильный и железнодорожный транспорт, который начинает играть равную роль).

Была рассчитана стоимостная плотность посылки (в долларах за фунт) для каждой партии путем деления заявленной денежной стоимости на вес груза. Товары были поделены на 4 категории:

- 1) сыпучие товары;

- 2) топливо и удобрения;
- 3) промежуточные продукты, продукты питания и прочие товары¹;
- 4) промышленные товары.

В результате большая часть грузов, доставляемых посылками или авиатранспортом, оказалась дорогóй. Около 91 % грузов стоило дороже 4 долларов за фунт. Для автомобильного транспорта на дорогие грузы приходилось только 30 %. Около 38 % оказались дешевыми (менее 1 доллара за фунт). Для железнодорожного транспорта дешевыми товарами оказались 83 %.

Результаты оценки показали, что перевозки наливных грузов, топлива и удобрений ориентированы на использование транспортных средств с более высокой пропускной способностью, включая крупнотоннажные вагоны и грузовики (для перевозки грузов весом более 35 000 фунтов). Промышленные товары, которые, как правило, имеют более высокую стоимость, отправлялись посылками (авиапочтой), малогабаритными грузовиками, но не железными дорогами.

Смоделированные результаты оказались очень близки к реальной статистике.

Интенсивность конкуренции для разных видов транспорта и их влияние на развитие альтернативных способов может сильно различаться, что видно и по метаисследованиям. Пример такой работы — статья Fearnley и соавторов (Fearnley, et al., 2018).

В этой статье собраны данные из более чем 170 эмпирических оценок перекрестной эластичности в использовании разных видов общественного транспорта из более чем 20 источников, собранных в Австралии, Европе и США. Исследовалось, как тарифы, время в пути и интервалы обслуживания на одном виде транспорта влияют на спрос на другой вид. Было получено, что время ожидания и иные характеристики важны в выборе вида транспорта, в меньшей мере — изменение тарифов. Железнодорожный спрос менее чувствителен к изменениям в автобусном движении, чем спрос на автобусы к изменениям в железнодорожном транспорте. В час пик спрос более заметно переключается между видами общественного транспорта.

Перекрестная эластичность для разных видов транспорта может очень сильно различаться в зависимости от цели поездки, времени дня. Вариация значительно превышает собственную эластичность.

Согласно Dodgson (Dodgson, 1986) перекрестная эластичность определяется по формуле:

¹ Англ. bulk goods; fuels and fertilizers; intermediate products, foodstuffs and miscellaneous goods.

$$E_{ij} = E_{jj} \times \frac{Q_j}{Q_i} \sigma_{ji} \quad (2)$$

где E_{ij} — перекрестная эластичность;

E_{jj} — собственная эластичность;

$\frac{Q_j}{Q_i}$ — рыночные доли двух видов транспорта;

σ_{ji} — относительной степени изменения спроса на транспорт i по сравнению с изменением спроса на транспорт j .

Результаты анализа показаны в таблице 1.

Таблица 1

Суммирование результатов для перекрестной эластичности видов транспорта из обзора литературы

Спрос	Зависимость	Изменения									
		Плата за проезд (Fare)		Время путешествия (VT/journey time)		Время ожидания (Wait time headway)		Время трансфера, доступа (Access/egress/transfer time)		Пересадки (No. of interchanges)	
		С	М	С	М	С	М	С	М	С	М
Легкий ж/д	Автобус	0,21	0,28	0,15	0,15	0,06	0,06	0,03	0,03	0,23	0,23
	Ж/д	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,06	0,01	0,01
Автобус	Легкий ж/д	0,16	0,25	0,15	0,15	0,05	0,05	0,38	0,38	0,17	0,17
	Ж/д	0,28	1,31	0,48	1,09	0,22	1	0,15	0,34	0,03	0,03
	Метро	0,16	0,16								
Ж/д	Легкий ж/д	0,2	0,2	0,6	0,6	0,1	0,1	0,11	0,11	0,06	0,06
	Автобус	0,15	0,49	0,26	0,91	0,08	0,18	0,13	0,25	0,24	0,24
Метро	Автобус	0,21	0,21								
	Ж/д	0,1	0,1								

Примечание — Источник — (Fearnley, et al., 2018).

Также был проведен эконометрический метаанализ:

$$CE = e^{c + \sum_{m=1}^M B_m D_m + \sum_{a=1}^A B_a D_a + \sum_{c=1}^C B_c D_c + \sum_{d=1}^D B_d D_d + \beta_{rms} \ln RMS + \varepsilon}, \quad (3)$$

где CE — перекрестная эластичность,

D_m — фиктивная переменная, отражающая влияние комбинации видов транспорта,

D_a — фиктивная переменная для исследуемого атрибута (стоимость, время ожидания и т. д.),

D_c — фиктивная переменная для страны,

D_d — фиктивная переменная для типа базы данных [revealed preference (RP) — выявленные предпочтения, stated preference (SP) — заявленные предпочтения, сочетание],

RMS — относительная доля рынка измененного вида транспорта (altered mode) по сравнению с затронутым видом (affected mode).

Результаты показаны на рисунке 3. После логарифмического преобразования модель представляет собой линейную регрессионную модель, которую можно оценить с помощью стандартного метода наименьших квадратов. Бета-параметры измеряют относительный эффект на перекрестную эластичность (изменение ее в процентах). Эталонные категории: $D_m = \text{Rail}$ (ж/д — измененный вид транспорта) \times Bus (Автобус — затронутый вид транспорта), $D_a = \text{tariff}$ (fare), $D_c = \text{Australia}$, $D_d = \text{RP}$ (revealed preferences — выявленные предпочтения).

Была получена статистическая поддержка теоретического аргумента о важной роли рыночных долей в величине перекрестной эластичности.

Ivaldi и Vibes (Ivaldi & Vibes, 2005) предложили симуляционную модель, в которой потребители могут сначала выбрать вид транспортного средства, а потом уже его характеристику (либо могут в принципе отказаться от поездки). Используется вложенная логит-модель (nested logit). Выделялись путешественники с разными целями: деловыми или рекреационными (leisure).

	Coefficient	SE
Affected mode × Altered mode		
Light rail × Bus	0.142	0.351
Light rail × Rail	-1.442 ^a	0.466
Bus × Light Rail	0.511	0.376
Bus × Rail	0.138	0.174
Rail × Light Rail	-1.117 ^{**}	0.454
Rail × Bus	Ref	
Attribute		
Fare	Ref	
In-vehicle/journey time	0.467 ^a	0.163
Waiting time/headway	-0.442 ^{**}	0.217
Access/egress/transfer time	0.245	0.283
No. of interchanges	0.191	0.417
Country		
Australia	Ref	
Europe	-0.671	0.42
Norway	-0.0629	0.368
US	0.48	0.382
United Kingdom	0.477 ^{**}	0.235
LN(Relative market share)	0.459 ^a	0.0776
RPSP RP		
SP	0.703 ^{**}	0.283
Combined	-0.00486	0.19
Constant	-2.433 ^a	0.296
Observations	171	
R-squared	0.482	
Adjusted R-squared	0.428	
Log Likelihood	-210.8	

Примечание — Источник — (Fearnley, et al., 2018).

Рис. 3. Оценки регрессии, перекрестная эластичность для разных видов транспорта

Модель была оценена на примере Германии, маршрут Кельн-Берлин. На нем были представлены все виды транспорта: национальный авиаперевозчик Lufthansa (LH), три дешевые авиакомпании (лоукостеры), действующий железнодорожный оператор Deutsche Bahn AG (DB), автомобильные дороги.

Модель исходила из того, что в краткосрочном периоде между фирмами реализуется ценовая конкуренция, а характеристики продукта остаются фиксированными. Функция полезности потребителя моделируется как:

$$U_{ij} = V_j + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

где V_j представляет собой средний уровень полезности, общий для каждого пассажира (детерминированная часть, зависящая от цены),

а ε_{ij} (случайная часть) соответствует специфике потребителя при оценке продукта j .

В результате функция спроса была задана как:

$$\ln s_j - \ln s_0 = \psi_j - hp_j + \sigma \ln(s_{j/g}), \quad (5)$$

где s_j — рыночная доля вида транспорта j ,

s_0 — доля отказавшихся от поездки в принципе,

p_j — цена вида транспорта,

$s_{j/g}$ — доля вида транспорта j в транспортной группе (например, конкретная авиакомпания среди всех, кто выбрал авиаперевозки).

Остальное — параметры.

Фирмы максимизировали прибыль, при этом цена определялась как предельные издержки плюс специальная наценка, определяемая с учетом коэффициентов модели.

Модель проходила калибровку. При этом возникали проблемы с некоторыми данными, в частности, меньше данных удалось собрать по деловым поездкам, в первую очередь были доступны данные по рекреационным поездкам. Использовались оценки эластичности видов транспорта, взятые из обзора литературы. Для оценки качества вида транспорта использовалась взвешенная сумма компонентов (скорость, частота, мощность, а также учитывались дополнительные параметры, например, возможность сделать остановку). С точки зрения отказа от совершения поездки, было рассчитано три гипотетических сценария с долей отказников в 15, 30 и 60 %.

Интересны следующие результаты моделирования. Для путешественников, совершающих рекреационные поездки, была получена более высокая чувствительность к стоимости поездки (0,026–0,038) по сравнению с путешественниками в деловых поездках (0,015–0,016). Так, для деловых поездок увеличение скорости на 1 км/мин оказалось эквивалентным снижению цены на 58,75 евро, а для прочих путешественников эквивалент составил всего 30,3 евро. Путешественники, совершающие деловые поездки, выбирали в первую очередь авиаперевозки, а прочие граждане предпочитали железную дорогу и автомобильный транспорт.

Также в модели было успешно протестировано влияние внешних шоков — см. рисунок 4. Например, моделирование появления нового железнодорожного перевозчика Connex, который на год входит на рынок, дало результаты, близкие к реальной статистике. Другой пример шока — введение налога на керосин. Получилось, что введение налога увеличило издержки авиаперевозок на 15 %, что повысило цены на 10 %, потери клиентов оказались в пределах 7–18 % для лоукостеров, 20–35 % для основного авиаперевозчика.

На рисунке 4 показаны три сценария: базовый, сценарий с появлением новой дешевой железнодорожной компании, сценарий с введением налога на керосин.

Показаны рыночные доли для следующих перевозчиков: DB — железнодорожного перевозчика, DBA, HLX, GW — трех авиакомпаний-лоукостеров, LH — основной авиакомпании, car — поездок на машине, outside alternative — отказа от поездки по данному маршруту.

Beuthe, Bouffieux (Beuthe & Bouffieux, 2008) с помощью эксперимента оценили, насколько важны различные факторы для грузоотправителей. Авторы разделили данные по типам товаров: продуктам питания, минералам, химическим и фармацевтическим товарам. Для разных видов товара были показаны различия в предпочтительности разных видов транспорта.

Дорожный транспорт оказался самым дешевым независимо от типа груза — см. таблицу 2.

Таблица 2

Издержки перевозок. Стоимость времени, евро на км на TEU для видов транспорта

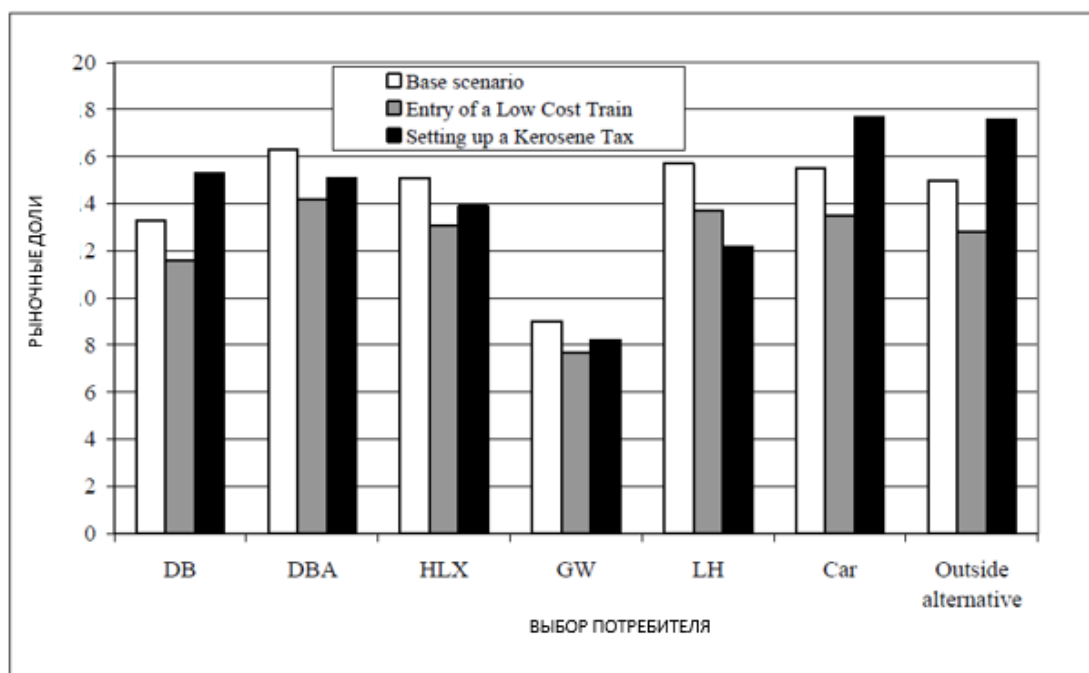
Стоимость товара	Автомобильная дорога	Железная дорога	Внутреннее судоходство
Высокая	0,576	1,382	3,142
Средняя	0,034	0,082	0,185
Низкая	0,002	0,004	0,010

Примечания:

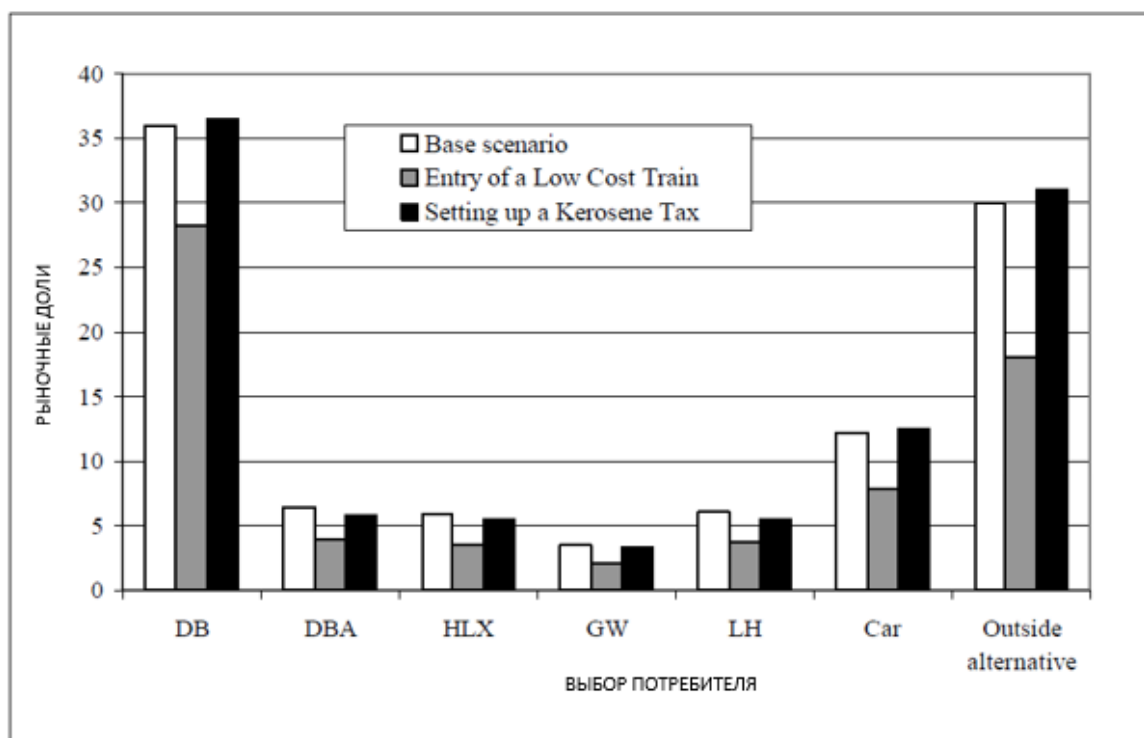
1 TEU — условная единица измерения вместимости грузовых транспортных средств (двадцатифутовый эквивалент).

2 Источник — (Beuthe & Bouffieux, 2008).

А) деловые поездки



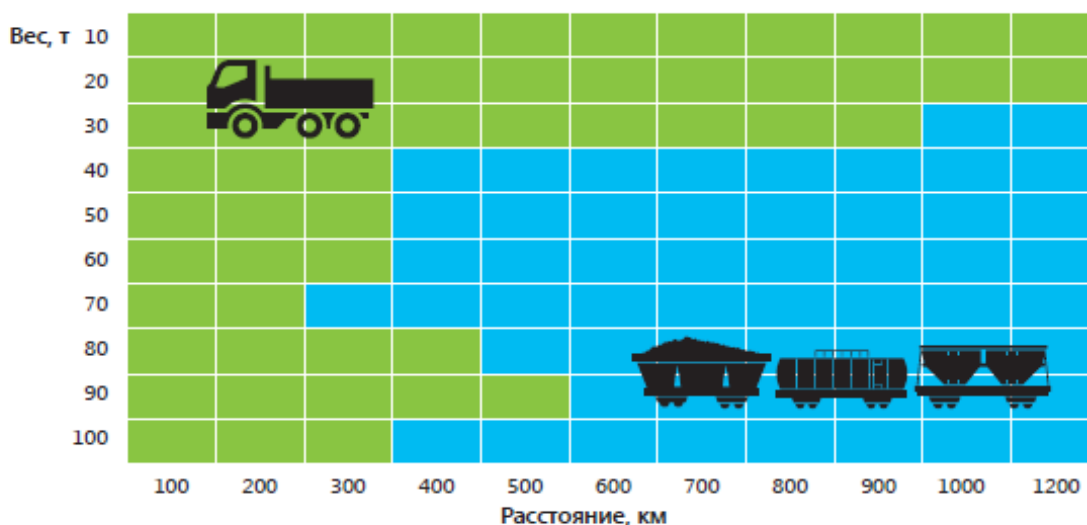
Б) рекреационные поездки



Примечание — Источник — (Ivaldi & Vibes, 2005).

Рис. 4. Влияние внешних шоков на выбор вида транспортного средства, рыночные доли

Примерно конкурентоспособность автомобильного и железнодорожного транспорта с учетом веса груза и расстояния можно представить в следующем виде — см. рис. 5 (Интегрированная транспортная система, 2018).



Примечание — Источник — (Интегрированная транспортная система, 2018).

Рис. 5. Конкурентоспособность железнодорожного и автомобильного видов транспорта

Можно говорить и о реально сложившейся ситуации с точки зрения контрактов. Так, в работе (Аксентьев, 2020) были проанализированы сделки на интернет-площадке «АвтоТрансИнфо». Статический анализ показал, что сделки на автомобильные грузоперевозки по стране заключались только на расстояние до 3 000 км.

Необходимо учитывать, что в грузоперевозках фактические перевозки очень сильно отличаются от теоретических из-за дисбалансов в трафике (Shintania, Konings, & Imai, 2010). В среднем в мире доля порожних контейнеров составляла 21 % (или 40 %, если рассматривать только наземный транспорт). В этой ситуации интермодальные транспортные терминалы могут играть важную роль с точки зрения хранения и использования пустых контейнеров, минимизации их неэффективного использования.

В статье Pekin и соавторов (Pekin, Macharis, Meers, & Rietveld, 2013) рассматривается LAMBIT-model (location analysis model for Belgian intermodal terminals), которая сравнивает интермодальные перевозки (баржи/ автомобильные и железнодорожные/автомобильные перевозки) с одномодальными автомобильными перевозками в пределах Бельгии.

Для коротких расстояний один вид транспорта оказывается более конкурентоспособным. После достижения определенного расстояния затраты автомобильных и интермодальных перевозок равноценны, после этого интермодальные перевозки становятся предпочтительными. Экономия в рамках интермодальных перевозок

достигается за счет низких переменных издержек, определяемых эффектом масштаба при использовании, например, железнодорожного или водного транспорта, но при этом выше издержки при обслуживании на перегрузочных терминалах.

Согласно Floden интермодальные перевозки могут быть эффективны на расстоянии более 500 км (Floden, 2007). Вместе с тем их можно оправдать тем, что они экологичнее, чем автомобильный транспорт.

Автомобильный транспорт оказался наиболее конкурентоспособным и с точки зрения скорости — 60 км/ч. При этом для внутреннего водного и железнодорожного транспорта средняя скорость достигала соответственно 11 и 25 км/ч соответственно.

Модель основана на ГИС и функциях издержек из разных слоев: дорожной сети, сети внутренних водных путей, железнодорожной сети. Переменные затраты зависят от пройденного расстояния, фиксированные затраты связаны с узлами в сети. Общая стоимость интермодальных перевозок складывается из стоимости перевалки в порту Антверпен на баржу или в вагон, учитывается стоимость интермодальных основных перевозок (баржей или по железной дороге), стоимость перевалки на внутреннем терминале в грузовик и стоимость почтовой перевозки грузовым автотранспортом. Информация об издержках была собрана от транспортных компаний. Алгоритм позволил рассчитать кратчайшие пути, которые следует учитывать для дальнейшего сравнения.

Новые терминалы могли быть добавлены в сеть, чтобы изучить их влияние на рыночную площадь функционирования существующих терминалов. Кроме того, могли быть смоделированы разные варианты политики и внешнего влияния, например, разные схемы субсидий, влияние цены на нефть.

В результате были выделены районы, для которых интермодальные перевозки выигрывают в конкурентоспособности по сравнению с обычными автомобильными — см. рисунок 6. Если контейнеры возвращаются пустыми, то это меняет долю стоимости времени в общих издержках, что увеличивает зону интермодальных перевозок.

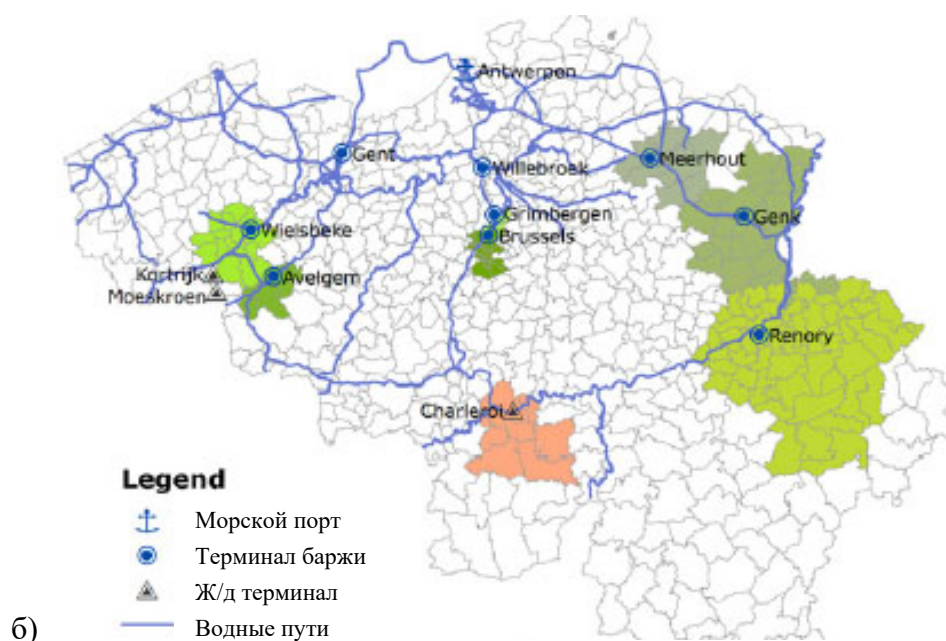
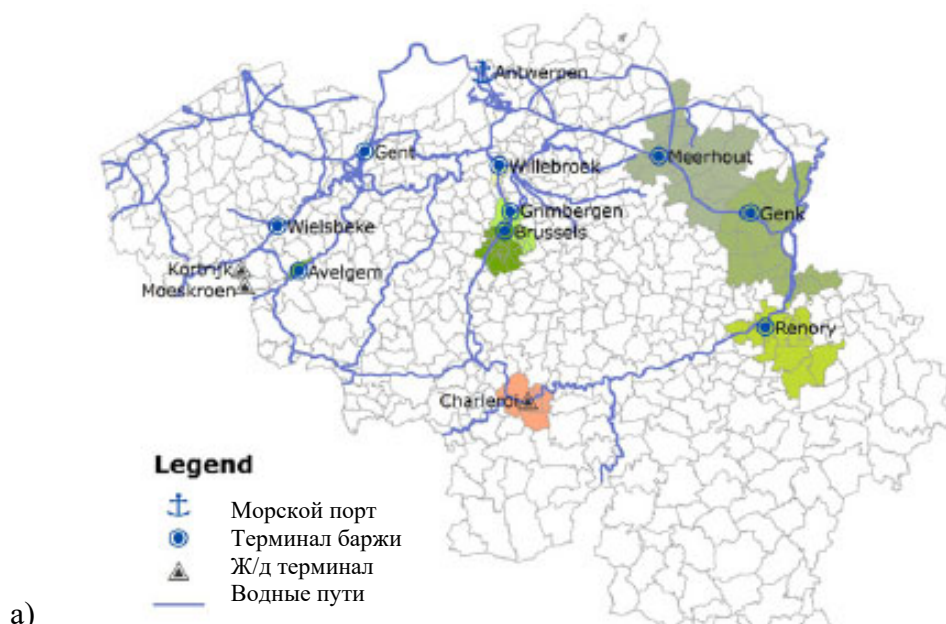
В работе (Burgholzer, Bauer, Posset, & Jammerneegg, 2013) анализируют разрывы в уязвимых местах в интермодальной транспортной системе. Каждый разрыв моделировался с точки зрения перенаправления на иные маршруты с использованием альтернативных транспортных средств. Оценивалось, какие объемы товара могут быть переправлены без существенной потери во времени. Происходила микросимуляция поведения каждого участника, который выбирал маршрут объезда исходя из цели минимизировать затраты времени. Для оценок использовались данные о транспортной системе Австрии. Результаты показали, что железнодорожные и дорожные перевозки более конкурентоспособные, чем водные.

Много статей анализировало конкуренцию железнодорожных и авиаперевозок. По мере развития ВСМ железная дорога становилась все более важным конкурентом для авиакомпаний. (Ortúzar & Simonetti, 2008) отмечают, что ВСМ очень сократили долю авиаперевозок во многих странах, например, Японии, Франции, Испании.

ВСМ могут конкурировать с авиаперевозками в пределах 1000 км. На более длинных расстояниях доминирование авиаперевозок, по крайней мере в ЕС, не оспаривается (Li, 2021). По другим оценкам, ВСМ могут конкурировать с воздушным транспортом, только если время в пути на поезде меньше 5 часов. При этом такие модели можно улучшить, если учесть дополнительные факторы (Bhadra, 2003): характеристики местности (плотность населения), статус аэропорта, рыночную власть, наличие малобюджетных перевозчиков. Также рекомендуется добавлять в модель важные события, повлиявшие на рынок или на экономическую ситуацию в стране.

Пример — статья (Gundelfinger-Casar & Coto-Millan, 2017). В ней Gundelfinger-Casar и Coto-Millan анализируют пассажирские перевозки с 2005 г. по 2014 г. Показано, что запуск высокоскоростной железной дороги в Испании повлиял на маршруты, на которых ранее использовались авиаперевозки. Функции спроса на воздушные перелеты анализируются с использованием эмпирической методологии. Функция спроса связывает его с доходом, обобщенной стоимостью авиатранспорта и стоимостью альтернативных транспортных средств.

В Испании первый маршрут ВСМ был запущен в 1992 году. Позднее были проложены дополнительные маршруты. Железные дороги оставались естественной монополией, в то время как в авиаперевозках реализовывались различные сценарии вплоть до конкурентного.



Примечания:

1 а — интермодальные перевозки с учетом стоимости времени (товары средней стоимости). б — интермодальные перевозки с учетом стоимости времени (товары средней стоимости) + пустое возвращение контейнеров.

2 Источник — (Pekin, Macharis, Meers, & Rietveld, 2013).

Рис. 6. Результаты анализа зоны конкурентоспособности интермодальных перевозок

В рамках модели спрос на авиаперевозки зависит положительно от дохода, негативно — от цены поездки. Также исследуется зависимость от цены на железнодорожное сообщение. При этом цена должна включать и стоимость билета, и потерянное время, затраченное на поездку. Учитывалось 120 месячных наблюдений с 2005

года по 2014 год. Модели строились для количества пассажиров между Мадридом и Барселоной (авиаперевозки) ($M - B_{it}$), аналогично строилась модель для Валенсии.

$$\ln(\text{Vol}M - B_{it}) = B_0 + B_1 \ln(\text{XIASSM} - B_{it}) + B_2 \ln(\text{PRAV.M} - B_{it}) + B_3 \ln(\text{TTR.M} - B_{it}) + \varepsilon_{it}, \quad (6)$$

где $\ln(\text{XIASSM} - B_{it})$ (ожидаемое влияние положительное) — прокси экономической активности, который отражает работу нефинансового сектора с точки зрения выручки и занятого персонала по результатам ежемесячного обследования 28 000 компаний;

$\ln(\text{PRAV.M} - B_{it})$ (ожидаемое влияние отрицательное) — цена нефти Brent, прокси цены на авиабилеты;

$\ln(\text{TTR.M} - B_{it})$ (ожидаемое влияние отрицательное) — время на перемещение по ВСМ.

Использовался метод взвешенных наименьших квадратов, учитывалась проблема гетероскедастичности. Результаты показаны на рисунке 7. Расчеты показали, что сокращение времени проезда железнодорожным транспортом на 1 % связано с падением спроса на воздушный транспорт на 0,23 %. Для Валенсии эластичность оказалась выше — 0,38. Авторы связывают более низкую эластичность для Барселоны с более длительным временем путешествия на ВСМ для этого маршрута. Они приходят к выводу, что ВСМ активно вытесняет авиаперевозки, особенно для путешествий в районе 500 км.

Weighted Least Squares				
Equation	Coef.	Std. error	Z-stat	P-Value
Const	5.36257	0.689666	7.776	3.37e-012 ***
$\ln(\text{XIASSM} - B_{it})$	1.51043	0.152990	9.873	4.70e-017 ***
$\ln(\text{PRAV.M} - B_{it})$	-0.255103	0.0616615	-4.137	6.69e-05 ***
$\ln(\text{TTR.M} - B_{it})$	0.230177	0.0603505	3.814	0.0002 ***
Coefficients of determination. Weighted Least Squares				
Mean dependent variable	12.50494	S.D. dependent variable	0.314154	
Sum squared residuals	2.883484	S.E. of regression	0.157663	
R-squared	0.754480	Adjusted R-squared	0.748131	
***The statistic is significant at a 99% confidence level.				
**The statistic is significant at a 95% confidence level.				
*The statistic is significant at a 90% confidence level.				

Примечание — Источник — (Gundelfinger-Casar & Coto-Millan, 2017).

Рис. 7. Результаты оценки регрессии, спрос пассажиров на авиаперевозки, Мадрид — Барселона

В работе (Martín & Nombela, 2007) анализируется конкуренция между различными видами пассажирского транспорта, влияние развития ВСМ в Испании. Рассматривались

путешествия на расстояние более 100 км на 187 маршрутах в Испании с использованием гравитационной модели и логит-модели выбора транспортного средства.

Результаты гравитационной модели показаны на рисунке 8. Видно, что на количество путешественников отрицательно влияло расстояние маршрута (*distance*, в логарифмах), положительно — численность населения территории отправления (*pop_origin*) и назначения (*pop_destination*), при этом оказались незначимы оба показателя запаса публичного капитала транспортной инфраструктуры в регионе отправления (*Kstock_origin*) и назначения (*Kstock_destination*).

Variable	Coef.	Err.	t-ratio	Sign.
Constant	2.14408	0.988133	2.16983	0.0313231
log_distance	-1.47307	0.120261	-12.249	0.00000
log_pop_destination	0.393624	0.153476	2.56472	0.0111371
log_pop_origin	0.807308	0.157858	5.11414	7.98E-07
log_Kstock_destination	0.241356	0.194177	1.24297	0.215487
log_Kstock_origin	0.0796245	0.191313	0.416201	0.677756
<i>R</i> -squared: 0.601 Model Test <i>F</i> (5,181): 54.88		Adjusted <i>R</i> -squared: 0.590 Log Likelihood: -176.49		

Примечание — Источник — (Martín & Nombela, 2007).

Рис. 8. Результаты гравитационной модели для количества путешественников на маршруте

Для предсказания выбора транспортного средства авторы рекомендуют полиномиальную логит-модель. Авторы предлагают выбор из двух этапов. На первом этапе пассажир выбирает использование личного транспорта или общественного. На втором этапе уже выбирается конкретный вид общественного транспорта. При этом полезность потребителя от пользования каждым видом транспорта на данном маршруте определяется по формуле:

$$U_i = \vec{\beta} \cdot \vec{x}_i + \vec{\gamma}_i \cdot \vec{z} + \varepsilon_i, \quad (7)$$

где U_i — полезность для потребителя вида транспорта i на маршруте, который описывают компоненты вектора \vec{z} ;

\vec{x}_i — вектор переменных для вида транспорта i (цена, время и т. д.);

\vec{z} — вектор переменных для маршрута, общих для всех видов транспорта (например, расстояние);

ε_i — случайная величина, такая что у разных i эти случайные величины независимые и одинаково распределенные.

Неизвестные параметры — это коэффициенты $\vec{\beta}$, общие для всех видов транспорта, и коэффициенты $\vec{\gamma}_i$, специфические для каждого вида. Вероятность выбора транспортного средства может быть определена по формуле:

$$p = \frac{\vec{\beta} \cdot \vec{x}_i + \vec{\gamma}_i \cdot \vec{z}}{\sum_j (\vec{\beta} \cdot \vec{x}_j + \vec{\gamma}_j \cdot \vec{z})} \quad (8)$$

где p — вероятность выбора вида транспорта i .

Далее показаны результаты логит-модели для выбора транспортного средства и полученные эластичности (на рисунке 10). Для автомобилей предполагались издержки в пределах 0,2 евро за км. Учитывается время путешествия (travel time), издержки (cost), интервал времени (time-interval), показатели дохода (income), дистанции (distance), доли рабочих поездок (work trips) для разных видов транспорта.

Variable	TOTAL sample	
	Coefficient	t-ratio
Travel time	-0.3645	-27.58
Cost	-0.0018	-4.28
Time-interval	-0.1302	-22.92
Income_plane	-0.196 E-03	-53.25
Income_train	-0.130 E-03	-34.59
Income_bus	0.597 E-05	1.58
Distance_plane	0.253 E-03	1.21
Distance_train	0.155 E-02	7.12
Distance_bus	-0.331 E-02	-15.32
Work trips_plane(%)	3.1734	26.91
Work trips_train(%)	2.0024	16.38
Work trips_bus(%)	1.2453	10.37
Number of observations: 143		
R^2 0.51038 Adj. R^2 0.49019		
Log likelihood -29791.37		

Примечание — Источник — (Martín & Nombela, 2007).

Рис. 9. Результаты логит-модели для выбора транспортного средства

Были получены эластичности для видов транспорта, как с точки зрения изменения времени поездки на виде транспорта [Time-Elasticities (changes in travel time of mode i)] или издержек использования вида транспорта [Cost-elasticities (changes in cost of mode i)].

	Time-Elasticities (changes in travel time of mode i)				Cost-Elasticities (changes in cost of mode i)			
	t_plane	t_train	t_bus	t_car	C_plane	C_train	C_bus	C_car
Plane	-0.498	0.474	0.320	1.477	-2.561	0.113	0.054	0.942
Train	0.090	-2.527	0.320	1.477	0.463	-0.604	0.054	0.942
Bus	0.090	0.474	-2.936	1.477	0.463	0.113	-0.491	0.942
Car	0.090	0.474	0.320	-1.024	0.463	0.113	0.054	-0.653

Примечание — Источник — (Martín & Nombela, 2007).

Рис. 10. Результаты и полученные эластичности

Доходы измерял ВРП на душу населения (оценивается на уровне провинций). Эта переменная имеет отрицательный знак для функций полезности при пользовании самолетом и поездом. Авторы интерпретируют это следующим образом: средний доход может быть индикатором для владения автомобилем. В более богатых провинциях живет больше людей, владеющих автомобилями, которые предпочитают этот вид транспорта, а не общественный транспорт. Процент деловых поездок имеет положительное значение для трех видов общественного транспорта: самолета, поезда и автобуса. Путешественники, совершающие деловые поездки, предпочитают пользоваться самолетами, когда эта альтернатива существует.

С точки зрения эластичностей было получено, что развитие ВСМ имеет большие перспективы. Получена высокая эластичность по сокращению времени в пути ($-2,527$). Интересно отметить, что для авиаперевозок получена высокая эластичность по цене ($-2,561$), но низкая с точки зрения времени передвижения ($-0,498$).

С помощью модели были рассчитаны также прогнозные значения.

Авторы подчеркивают также возможное смещение в гравитационной модели. Учитывалось только официальное население провинций. Вместе с тем транспортные потоки могут сильно отличаться по вкладу путешественников, которые не отображаются в официальной статистике.

В работе Li (Li, 2021) были выбраны несколько базовых факторов как контрольные переменные для анализа связи между развитием железных дорог и использованием авиаперевозок в Китае.

$$\begin{aligned}
\ln AP_{odt} = & \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{odt} + \beta_2 \ln POP_{odt} + \beta_3 \ln EMP_{odt} \\
& + \beta_4 \ln GST_{odt} + \beta_5 \ln EST_{odt} + \beta_6 \ln DIST_{od} + \beta_7 SARS_t \\
& + \beta_8 \ln RAILSLEN_{odt} + \beta_9 \ln RAILSPEED_{odt} \\
& + \beta_{10} \ln ROADCOST_{odt} + \beta_{11} \ln AIRFREQUENCY_{odt} + \alpha_{od} \\
& + v_{odt},
\end{aligned} \tag{9}$$

где o (origin) — место отправления,

d (destination) — место назначения,

t — период;

AP — объем авиаперевозок пассажиров;

GDP — ВВП;

POP — население;

EMP — занятость;

GST — доля сферы услуг в ВВП;

EST — доля сферы услуг в занятости;

$DIST$ — расстояние полета из места отправления в место назначения;

$SARS$ — фиктивная переменная со значением 1 в 2003 г. (год эпидемии тяжелого острого респираторного синдрома в Китае), 0 в другие годы;

$RAILSLEN$ — кратчайшее расстояние между парой городов по железной дороге;

$RAILSPEED$ — техническая скорость поездов между парой городов;

$AIRFREQUENCY$ — частота авиаотправлений (число рейсов между парой городов за год);

$ROADCOST$ — издержки перемещения: произведение цены на бензин и расстояния между парой городов по автомобильным дорогам;

α_{od}, v_{odt} — случайные величины — ошибки модели регрессии.

При учете ВВП и других такого рода характеристик имеется в виду произведение значений (ВВП) города отправления и города назначения. В 2003 году было учтено с помощью фиктивной переменной распространение тяжелого острого респираторного синдрома (ТОРС), так как это событие очень сократило авиаперелеты. Собирались данные по показателям развития железных дорог, в том числе технической железнодорожной скорости ($RAILSPEED$) и кратчайшей железнодорожной длине ($RAILSLEN$).

Результаты эконометрического анализа показаны на рис. 11. Тестирование показало предпочтительность моделей FE и RE, при этом также были отмечены автокорреляция и гетероскедастичность. Из-за этого были использованы робастная оценка ковариационной

матрицы для моделей FE, доступный ОМНК (FGLS, feasible GLS) для RE. Более достоверные оценки дала модель FE. Результаты показали, что, если кратчайшая длина железной дороги снижается на 100 %, авиаперевозки снижаются на 4 %. Однако, когда техническая скорость железной дороги увеличивается на 100 %, возможно более сильное снижение авиаперевозок, на 16,5 %. Для разных расстояний результаты приведены на рис. 12 (расстояние до 1 100, 1 100–2 000, свыше 2 000).

Видно, что интенсивная конкуренция происходит в действительности на расстоянии до 1 100 км.

Independent variables	FE model (robust VCE)	RE model (FGLS)
$\ln GDP_{odt}$	0.108*** (0.022)	0.042*** (0.006)
$\ln POP_{odt}$	0.037 (0.032)	-0.002 (0.008)
$\ln EMP_{odt}$	0.005 (0.018)	0.046*** (0.007)
$\ln GST_{odt}$	0.097* (0.037)	0.134*** (0.018)
$\ln EST_{odt}$	-0.183*** (0.049)	-0.018 (0.019)
$\ln DIST_{od}$	106.495*** (19.466)	-0.113*** (0.022)
$SARS_t$	-0.048*** (0.011)	-0.038*** (0.007)
$\ln RAILSLEN_{odt}$	0.040*** (0.010)	0.021** (0.007)
$\ln RAILSPEED_{odt}$	-0.165** (0.051)	-0.087*** (0.023)
$\ln ROADCOST_{odt}$	0.168*** (0.036)	0.159*** (0.019)
$\ln AIRFREQUENCY_{odt}$	0.870*** (0.028)	0.949*** (0.010)
Constant	-736.654*** (134.857)	3.744*** (0.185)
Number of observations	2000	2000
R ²	Within: 0.9620 Between: 0.0014 Overall: 0.0002	-
Wald Chi2	-	32602.17***

Примечание — Источник — (Li, 2021).

Рис. 11. Результаты эконометрического анализа, FE и RE для всей совокупности

Independent variables	RAILDIST: < 1100 km (FE model)	RAILDIST: 1100–2000 km (FE model)	RAILDIST: > 2000 km (FE model)
lnGDP _{odt}	0.111** (0.033)	0.117** (0.031)	0.120** (0.032)
lnPOP _{odt}	0.010 (0.044)	0.046 (0.041)	0.382** (0.092)
lnEMP _{odt}	0.006 (0.025)	–0.016 (0.024)	0.059 (0.055)
lnGST _{odt}	0.089 (0.055)	0.034 (0.055)	0.178 (0.093)
lnEST _{odt}	–0.175* (0.071)	–0.252*** (0.059)	0.082 (0.226)
lnDIST _{od}	0 (omitted)	97.389** (30.377)	0 (omitted)
SARS _t	–0.062*** (0.015)	–0.053*** (0.014)	–0.031 (0.047)
lnRAILSPEED _{odt}	–0.168* (0.067)	–0.083 (0.071)	–0.549 (0.373)
lnRAILSLEN _{odt}	0.041** (0.014)	0.044** (0.014)	0.072 (0.050)
lnROADCOST _{odt}	0.140* (0.057)	0.218*** (0.052)	–0.072 (0.137)
lnAIRFREQUENCY _{odt}	0.870*** (0.044)	0.867*** (0.036)	0.764*** (0.100)
Constant	1.214* (0.567)	–709.793** (221.111)	1.231 (2.722)
Number of observations	1080	760	160
R ²	Within: 0.9534 Between: 0.9124 Overall: 0.9352	Within: 0.9765 Between: 0.0107 Overall: 0.0014	Within: 0.9555 Between: 0.6107 Overall: 0.8331

Примечание — Источник — (Li, 2021).

Рис. 12. Результаты эконометрического анализа, FE для различных расстояний

В статье Behrens, Pels (Behrens & Pels, 2012) рассматривалась интермодальная конкуренция в пассажироперевозках на маршруте Лондон — Париж в 2003–2009 годах высокоскоростного железнодорожного транспорта и авиаперевозок. Использованы панельные данные для построения логит-моделей для изучения фактического поведения пассажиров. Данные международного опроса пассажиров (англ. international passenger survey) позволили оценить их выявленные предпочтения (аэропорт вылета и прибытия или вокзал (порт), перевозчик, класс путешествия, оплаченные тарифы и цель поездки, индивидуальные социально-экономические характеристики, в том числе возраст, пол и страна проживания).

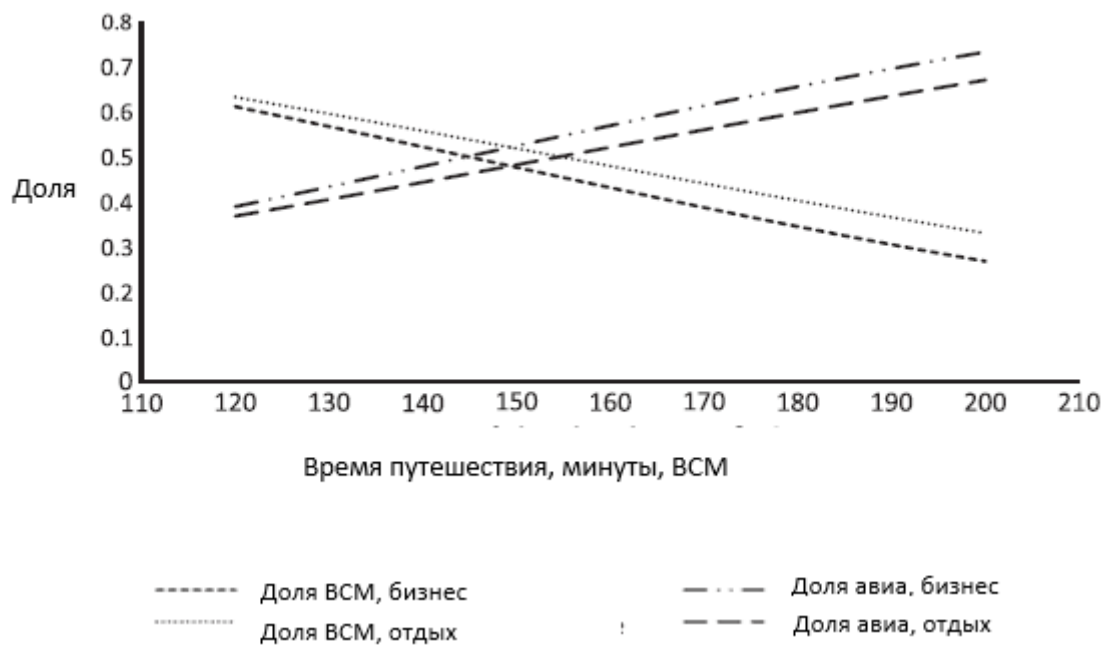
Общее время в пути в минутах определялось суммированием трех элементов. Первый элемент — это средний плановый показатель в транспортном средстве, причем для железнодорожного транспорта среднее запланированное время в пути зависит от сезона (лето и зима). Второй элемент — это время в минутах, которое рекомендуется пассажирам, чтобы прибыть в терминал до отправления рейса (зависит от авиакомпании, в противном случае — от аэропорта). Последний компонент в пути — это ожидаемая задержка в минутах, средняя годовая задержка, умноженная на процент задержек прибытия или отправления.

Предполагается, что каждый респондент максимизирует полезность, определяется косвенная полезность в рамках модели.

$$\begin{aligned}
V_i^n = & \beta_{0,i} + \beta_{1,i} (\text{November 2004 December 2006}) \\
& + \beta_{2,i} (\text{January 2007 October 2007}) \\
& + \beta_{3,i} (\text{December 2007 December 2009}) + \beta_{4,i} (\text{First class}) \\
& + \beta_5 \text{Fare}_i + \beta_6 \text{RoadDist}_i + \beta_7 \text{PPM}_i + \beta_8 \text{Ttime}_i \\
& + \beta_9 \ln(\text{Freq}_i) + \varepsilon_i^n
\end{aligned}
\tag{10}$$

Таким образом, учитывается как фактор времени поездки, так и класс поездки (First class), плата за проезд (Fare), расстояние (RoadDist), вероятность прибытия вовремя (PPM), время поездки (Ttime), частота рейсов (Freq). Модель оценивалась для бизнес-пассажиров, и для отдыхающих, и для 2 групп совместно. Оговаривается, что тариф, плата за проезд, часто рассматривается как эндогенный параметр, когда тариф устанавливается авиакомпанией, имеющей рыночную власть. Учитывая эту потенциальную проблему эндогенности, следует быть осторожным при интерпретации полученных результатов. При этом интересно отметить, что плата за проезд оказалась значима только для путешественников с туристическими целями, но незначима для бизнес-пассажиров.

В работе был построен график зависимости рыночной доли транспортного средства (бизнес-поездки, отдых) от времени передвижения — см. рис. 13.



Примечание — Источник — (Behrens & Pels, 2012).

Рис. 13. Прогнозируемая доля рынка VCM на пассажирском рынке Сан-Франциско — Лос-Анджелес

Также рассчитаны эластичности доли рынка (P) по отношению к определенному атрибуту (X). Прямая эластичность доли рынка измеряет эффект изменения атрибута на 1 % с точки зрения вероятности выбора конкретной альтернативы.

$$\frac{\partial P_i^n X_i^n}{\partial X_i^n P_i^n} = \frac{X_i^n}{P_i^n} \int \beta (1 - L_i^n(\beta)) L_i^n(\beta) f(\beta) d\beta, \quad (11)$$

где $L_i^n(\beta)$ — логит-вероятность, оценивается при параметрах β , $f(\beta)$ — функция плотности.

На пассажиров, совершающих деловые поездки, больше влияют общее время в пути и высокая еженедельной частота, но меньше — тарифы. Напротив, для рекреационных поездок тарифы для пассажиров кажутся важными, тогда как частота и общее время в пути — нет.

Clewlow и соавторы (Clewlow, Sussman, & Balakrishnan, 2014) исследуют влияние ВСМ на спрос на авиаперевозки. Создана панельная база данных европейских авиаперевозок, перевозок по ВСМ, региональных демографических характеристик для 90 аэропортов в 5 ключевых странах (Франции, Германии, Испании, Италии, Великобритании) с 1995 до 2009 года. Эти страны были в фокусе исследований по этой тематике. Многие исследования подтверждали, что на расстоянии менее 500 км авиаперевозки оказывались неконкурентоспособными, впрочем, основным фактором для роста рыночной доли ВСМ было не расстояние, но время в пути.

Основная эконометрическую модель для авиаперевозок выглядит следующим образом.

$$\ln(Demand) = \beta_0 + \beta_1 \ln GDP + \beta_2 \ln Yield + \sum_m \beta_{3,m} X_m + \varepsilon, \quad (12)$$

где оценивается изменение спроса ($Demand$) (пассажиры или рейсы) в зависимости от комбинации ВВП места отправления и назначения (GDP), средней платы за перелет ($Yield$), иных факторов (X_m).

Расчеты были осуществлены для спроса на авиаперевозки с точки зрения: 1) пар городов 2) пар аэропортов 3) отдельного аэропорта.

Авторы заключили, что в рамках модели можно использовать как цену билета авиаперевозок, так и цену топлива, так как последняя практически полностью отражается в цене билета. С точки зрения характеристик территорий (ВВП, плотности населения и т. д.),

наиболее эффективным способом авторы полагают использование среднего геометрического показателей территории отправления и назначения.

$$\ln(Demand_{it}^{OD}) = \beta_0 + \beta_1 \ln Rail_{it} + \sum_m \beta_{2m} \ln X_{mit} + u_i + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

В результате спрос на авиаперевозки из территории отправления O в территорию назначения D ($Demand_{it}^{OD}$) зависел от времени перемещения по альтернативной железной дороге ($Rail$), от иных факторов X_m (ВВП — GDP, население — Population, плотность населения — Density, цены на топливо (Fuel price)). Анализ показал, что не наблюдалось корреляции между численностью и плотностью населения. Территории оказались достаточно дифференцированными. Была выбрана после тестирования модель RE. Результаты различались в зависимости от того, исследовались ли авиаперевозки между городами (у одного города могло быть до 5 обслуживающих аэропортов) или непосредственно аэропортами — см. рис. 14 и 15.

Parameter	(1)	(2)	(3)	(4)
In(GDP)	0.297 (0.714)	2.280** (0.872)	3.548** (1.273)	5.192** (1.696)
In(Fuel price)		-1.863*** (0.476)	-2.360** (0.714)	-2.304* (0.906)
In(Population)			1.961* (0.997)	1.818 (1.126)
In(Density)			-0.427 (0.549)	-0.376 (0.603)
In(Rail time)				4.734*** (0.834)
Constant	8.066 (7.389)	-5.472 (8.111)	-41.774* (19.187)	-82.329*** (24.589)
N	$n = 53, T = 2-15,$ $N = 579$	$n = 53, T = 2-15,$ $N = 579$	$n = 52, T = 1-15,$ $N = 539$	$n = 31, T = 1-15,$ $N = 326$
Adjusted R^2	0.163	0.185	0.181	0.296

Примечание — Источник — (Clewlow, Sussman, & Balakrishnan, 2014).

Рис. 14. Результаты эконометрических расчетов на уровне городов, эффекты развития ВСМ на авиатрафик

Parameter	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
ln(GDP)	0.280 (1.420)	3.394*** (0.831)	6.039*** (1.061)	5.857*** (1.060)	5.468*** (1.181)
ln(Fuel price)		-2.287*** (0.445)	-3.412*** (0.558)	-3.312*** (0.558)	-2.913*** (0.624)
ln(Population)			1.182 (0.748)	0.424 (0.800)	0.810 (0.711)
ln(Density)			-2.484*** (0.509)	-2.511*** (0.536)	-2.479*** (0.554)
Hub (origin)				2.491* (1.013)	2.713** (0.951)
Hub (destination)				2.115 (2.168)	3.132* (1.830)
ln(Rail time)					5.261*** (0.857)
Constant	6.516 (5.966)	-17.229* (7.506)	-38.367** (13.654)	-26.818 (14.483)	-57.746*** (14.473)
<i>N</i>	<i>n</i> = 94, <i>T</i> = 1–15, <i>N</i> = 1124	<i>n</i> = 94, <i>T</i> = 1–15, <i>N</i> = 1124	<i>n</i> = 92, <i>T</i> = 1–15, <i>N</i> = 1083	<i>n</i> = 92, <i>T</i> = 1–15, <i>N</i> = 1083	<i>n</i> = 69, <i>T</i> = 1–15, <i>N</i> = 835
Adjusted <i>R</i> ²	0.073	0.094	0.113	0.119	0.172

Примечание — Источник — (Clewlow, Sussman, & Balakrishnan, 2014).

Рис. 15. Результаты эконометрических расчетов на уровне аэропортов, эффекты развития ВСМ на авиатрафик

На уровне аэропортов была получена бóльшая значимость ВВП и плотности населения. Авторы полагают, что это более точные результаты: использовались более локальные данные по ВВП и плотности населения именно для региона конкретного аэропорта, а не всего макрорегиона.

В статье Ortúzar, Simonetti (Ortúzar & Simonetti, 2008) рассматривается конкуренция авиаперевозок и возможного высокоскоростного железнодорожного транспорта между Сантьяго и Консепсьоном в Чили. Были использованы данные как о заявленных, так и о выявленных предпочтениях.

Оговаривалось несколько методологических проблем. Так, выявленные предпочтения могут породить смещение в независимых переменных, а заявленные предпочтения, напротив, могут породить смещение в зависимых переменных. В этой ситуации более эффективные оценки получаются, если сочетать источники данных.

Также авторы отмечают, что некорректно использовать в моделировании данные о часовой заработной плате, так как часто нельзя выбрать количество часов работы. В этой связи рекомендуется использовать показатель g :

$$g = \frac{IFAM}{T - t_w}, \quad (14)$$

где $IFAM$ представляет собой чистый семейный доход человека,

t_w — количество часов, отработанных за отчетный период T (т. е. за 24 часа).

В статье Albalate и соавторов (Albalate, Bel, & Fageda, 2015) рассматривается влияние развития ВСМ на авиаперевозки, причем с двух точек зрения: конкуренции видов транспорта и эффектов дополнения при обслуживании пассажиров. Например, во Франции распространены единые билеты на ВСМ и пользование услугами авиаперевозчика, действует единая система хранения багажа.

В исследовании были использованы данные о распространении ВСМ в четырех крупнейших европейских странах (Франции, Германии, Испании, Италии). Всего 180 маршрутов.

Отмечается, что для конкурентоспособности ВСМ время из-за больших различий в скорости движения значит намного больше, чем длина пути. При этом конкуренция с железнодорожным транспортом может сильно влиять на тарифы авиаперевозчиков, вплоть до того, что они становятся ниже, чем железнодорожные. Важность ВСМ показывает такой пример: в Китае в 2009 году после запуска ВСМ 50 % полётов на расстоянии менее 310 миль и 20% полётов на расстояние 500–620 миль оказались нерентабельными.

Использовались следующие модели:

$$\begin{aligned}
 & Seats_{kt} \\
 & = a + \beta_1 Population_{kt} + \beta_2 GDP_{kt} \\
 & + \beta_3 Distance_k + \beta_4 D_k^{hub} + \beta_5 D_{kt}^{high_speed_train} + \beta_6 HHI_{kt} + \beta_7 D_{kt}^{LCC} + \vec{\lambda} \\
 & \cdot \vec{D}_k^{country} + \vec{\mu} \cdot \vec{D}_t^{year} + \varepsilon,
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 & Frequencies_{kt} \\
 & = a + \beta_1 Population_{kt} + \beta_2 GDP_{kt} \\
 & + \beta_3 Distance_k + \beta_4 D_k^{hub} + \beta_5 D_{kt}^{high_speed_train} + \beta_6 HHI_{kt} + \beta_7 D_{kt}^{LCC} + \vec{\lambda} \\
 & \cdot \vec{D}_k^{country} + \vec{\mu} \cdot \vec{D}_t^{year} + \varepsilon,
 \end{aligned} \tag{16}$$

где зависимые переменные:

- *Seats*: общее количество мест;
- *Frequencies*: общая годовая частота полетов;

Авторы оговаривают, что наиболее сложно было выдвинуть гипотезу о роли лоукостеров. На маршруте могут снизить цену и подстегнуть спрос, но это также может снизить рентабельность этого маршрута и негативно сказаться на соперниках и конкуренции. Таким образом, ожидаемый знак этой переменной не был сформулирован.

Была использована RE-модель — см. рис. 16.

	Dependent variable: seats	Dependent variable: frequencies
Population	36.81*** (12.05)	0.20*** (0.07)
GDP	-519.95 (625.08)	-1.32 (3.67)
Distance	158686.1*** (50548.3)	771.90** (308.70)
D^{hub}	198539.4*** (60336.39)	1079.13*** (332.03)
$D^{high_speed_train}$	-66255.2* (38042.04)	-358.32 (239.33)
HHI	-212069.7*** (63269.58)	-1670.37*** (376.69)
D^{ICC}	4253.19 (18311.05)	-25.51 (115.77)
Intercept	-574542.3* (301030.6)	-1835.33** (1872.14)
D^{Spain}	-136850.3 (100,229)	-585.04 (608.18)
D^{France}	-319595.6*** (84181.97)	-1679.27** (529.43)
D^{Italy}	-218,041*** (92175.35)	-1356.2*** (577.04)
D^{2003}	13718.68 (10687.84)	78.01 (68.39)
D^{2004}	19339.38 (11837.37)	125.10 (77.02)
D^{2005}	4712.52 (9692.41)	59.95 (61.73)
D^{2006}	26619.95 (30,604)	198.57 (204.61)
D^{2007}	14674.1 (15430.89)	142.71 (101.69)
D^{2008}	11909.89 (15893.8)	72.53 (97.52)
D^{2009}	9444.322 (13058.71)	5.19 (83.22)
D^{2010}	-	132.97* (80.70)
N	1396	1572
R^2	0.21	0.24
χ^2 (test joint significance)	97.70***	133.84***

Примечание — Источник — (Albalade, Bel, & Fageda, 2015).

Рис. 16. Результаты регрессий для зависимых переменных — количество мест (seats) и частота полетов (frequencies)

Было получено различное влияние ВСМ, видно, что для количества мест получено значимое отрицательное влияние, но на частоту полетов влияния не было получено. Получены были и разные результаты для стран. Например, ВСМ для ряда стран сильнее повлияли на аэропорты-хабы, но в Германии результаты оказались обратными.

Также были получены интересные результаты, которые доказывают взаимодополняемость развития ВСМ и авиаперевозок. Так, для аэропортов Париж — Шарль-де-Голль и Франкфурт получилась неотрицательная оценка влияния ВСМ на авиаперевозки. Эти аэропорты отличаются максимальной интеграцией ВСМ и авиаперевозок. Таким образом, сокращение пассажиров за счет развития железных дорог

компенсировалось дополнительным притоком пассажиров, которые использовали ВСМ, чтобы добраться до аэропорта.

Отдельное направление исследований связано с активным развитием морского транспорта.

Согласно статье (Lu, Chen, Morphet, Lu, & Li, 2019), можно выделить три этапа конкурентоспособности различных видов транспорта:

1) древний период наземного транспорта, который можно назвать эпохой глобализации 1.0;

2) второй этап — период современного морского транспорта, так называемая эпоха глобализации 2.0. В этот период морской транспорт почти полностью заменил наземный транспорт в мировом масштабе. По оценкам авторов, 85 % мировой торговли обеспечивают морские перевозки;

3) вступление в третью эпоху глобализации, эпоху 3.0, на основе совместного наземно-морского транспорта.

В исследовании (Lu, Chen, Morphet et al., 2019) анализируется конкуренция между наземным и морским транспортом в контейнерных перевозках. Исследование показало, что в Евразии сформирована структура транспортной конкуренции с отношением площади суши к площади моря около 1 к 2; это соотношение, однако, меняется на 1 к 1, если учесть временные затраты.

Была разработана land and sea transport spatial balance model (LSTSB), которая основывается на трех ключевых элементах:

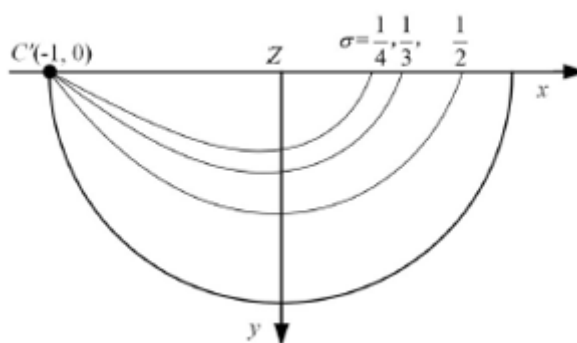
1) месте отправления и назначения, анализе влияния местоположения на сравнительную конкурентоспособность наземного и водного транспорта;

2) сухопутных и морских фрахтовых ставках: стоимости фрахта за километр. В статье китайско-европейская фрахтовая ставка составляла 0,15 долл. США, цена железнодорожного транспорта 0,6 долл. США, то есть разрыв был четырехкратный;

3) нормах затрат времени на наземный и морской транспорт: временных затратах на километр. Были выражены временные затраты как процентный доход, который мог бы генерироваться, если бы денежные средства, равные стоимости контейнера, были сданы на хранение в банк. Можно охарактеризовать временные затраты на транспортировку как функцию от трех переменных: стоимости груза в контейнере, времени транспортировки и базовой процентной ставки банка. Исследование стоимости времени при транспортировке товаров, увязке стоимости товаров и времени является важным направлением исследований. Например, по оценкам Blauwens, Van De Voorde (Blauwens & Van De Voorde ,

1988), в результате 0,008 48 % стоимости товара приравнивается к 1 часу выигрыша во времени транспортировки, согласно данным из Бельгии.

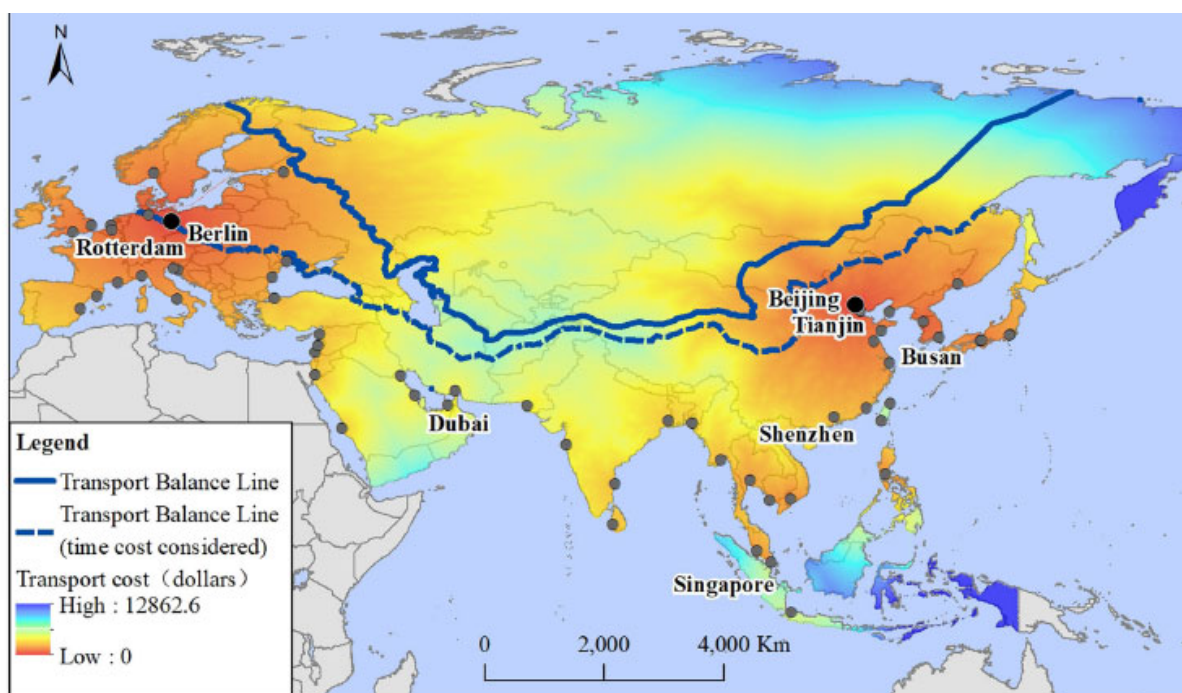
Далее с помощью пространственного моделирования рассматриваются альтернативы транспортировки грузов: использование наземного или морского транспорта. На основе системы уравнений были смоделированы четыре сценария для изучения влияния основных факторов на модель. Сценарий 1 показывает линии баланса разных направлений в ситуации, когда процентные затраты не учитываются. Сценарий 2 представляет, как линии баланса изменились бы в пространстве, если бы ставка фрахта морским транспортом была меньше ставки фрахта сухопутным транспортом в 4, 3 и 2 раза или если бы ставки вовсе стали равны. Сценарий 3 затем учитывает в модели затраты на транспортировку контейнеров разной ценности. Наконец, в сценарии 4 рассматривается изменение скорости наземного транспорта. Конкуренция наземного и морского транспорта изображается с помощью полукругов, на которых выбирается оптимальный маршрут доставки. На рис. 17 показаны возможные изменения для сценария 2.



Примечание — Источник — (Lu, Chen, Morphet, Lu, & Li, 2019).

Рис. 17. Транспортные линии баланса при изменении соотношения ставок фрахта (сценарий 2)

В результате проведенного анализа и моделирования в Евразии были выделены две территории. Если учесть только издержки перевозки, то 33,6 % от общей площади составят страны, входящие в регион доминирования наземных видов транспорта. Это касается таких стран, как Россия, Казахстан, Туркменистан и Таджикистан. Регион доминирования морского транспорта в Евразии состоит из 75 стран. Они занимают 66,4 % общей площади континента (см. Transport Balance Line на рис. 18). Если добавить издержки, связанные со временем, регион доминирования наземных видов транспорта составит уже 52,4 % — см. рисунок 18 [см. пунктирную линию Transport Balance Line (time cost considered)].



Примечание — Источник — (Lu, Chen, Morphet, Lu, & Li, 2019).

Рис. 18. Линии конкурентоспособности морского и наземного грузового транспорта

Также на рисунке цветом показаны территории с различными транспортными издержками в долларах [Transport cost (dollars)]. Они могут достигать до 12,8 тыс. долл. США.

Авторы признают, что используемые модели основаны на простых посылах, которые можно усложнить в дальнейшем анализе:

- издержки времени оцениваются по экономической выгоде, эквивалентной процентному доходу, но издержки могут быть выше;
- возможно включить в модель разные виды товаров, которые разнятся по чувствительности ко времени перевозки;
- возможно включить в модель дополнительные важные на практике факторы, как то: разные возможности и ширина рельсов, время нахождения в портах, тарифы, расходы на страхование, ограничения мощности портов и т. д.

Отдельный исследовательский вопрос — это экономические эффекты транспортной инфраструктуры разных видов. Также рассматриваются эффекты интеграции разных видов транспорта. Степень развития инфраструктуры разных видов транспорта часто оценивается индексами территориальной доступности.

Пример оценки экономической роли различных видов транспорта — статья Yi, Kim (2018) (Yi, Y.; Kim, E., 2018), где авторами проведен эмпирический количественный анализ развития транспортного комплекса с точки зрения влияния этого процесса на СФП

южнокорейских фирм на муниципальном уровне (всего рассмотрены более 200 муниципалитетов, для которых рассчитываются индексы транспортной доступности территорий).

На основе эконометрических оценок эластичность добавленной стоимости по доступности автомобильным (η_{Road}^r) и железным дорогам (η_{Rail}^r), а также предельная абсолютная прибавка в добавленной стоимости от роста доступности оцениваются по формулам (17)–(20).

$$\eta_{Road}^r = \beta_1 + \beta_3 \ln Rail^r + 2\beta_4 \ln Road^r + \gamma_2 \ln Pop^r \quad (17)$$

$$\eta_{Rail}^r = \beta_2 + \beta_3 \ln Road^r + 2\beta_5 \ln Rail^r + \gamma_3 \ln Pop^r \quad (18)$$

$$MVA_{Road^r} = \eta_{Road}^r \frac{VA^r}{Road^r} \quad (19)$$

$$MVA_{Rail^r} = \eta_{Rail}^r \frac{VA^r}{Rail^r} \quad (20)$$

Оценка эластичности добавленной стоимости по показателю, отражающему доступность автодорог, была оценена на уровне 0,116, ж\д — 0,046 (более детально результаты оценок представлены на рис. 19).

Equation form	Model 1	
Variable	Estimate	S.E.
lnL	0.813***	0.008
lnK	0.187***	0.008
(lnL)2	0.109***	0.002
(lnK) 2	0.109***	0.002
lnL*lnK	- 0.109***	0.002
lnRoad	0.366***	0.128
lnRail	- 0.101***	0.060
lnRoad*lnRail	0.066**	0.034
(lnRoad) 2	- 0.068**	0.034
(lnRail)2	0.016*	0.018
lnPop	0.029***	0.023
lnPop*lnRoad	- 0.004	0.013
lnPop*lnRail	- 0.029***	0.009
Region	- 0.061***	0.019
$\alpha_{11} + \alpha_{12} = \alpha_{22} + \alpha_{21} = 0, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1$		
Intercept	2.215***	0.116
Restriction 1	1210.904***	224.4
Restriction 2	3836.238**	1902.9
Restriction 3	9627.061***	2424.3
Adj. r-square	0.919	
Sample size	2108	

Примечание — Источник — составлено авторами на основе (Yi, Y.; Kim, E., 2018).

Рис. 19. Результаты эмпирического анализа эффектов от развития транспортного комплекса

Пример моделирования конкуренции между государственным и частным транспортом — теоретическая статья (Бусыгин, Левин, Попова, 2010) (Бусыгин В.П., Левин М.И., & Попова, 2010).

В статье рассматривается моделирование пассажирских перевозок, когда существует конкуренция между государственным перевозчиком (автобусами) и частным (такси, работающими по лицензии). Авторы подчеркивают, что в таких моделях возникает существенная проблема: государство, с одной стороны, является регулятором, а с другой — участником рынка. В рамках простой модели можно предположить, что государство максимизирует общественное благосостояние, но при усложнении модели можно предположить иные мотивы по перераспределению прибыли. Так, муниципалитет за взятку (выигрыш муниципального перевозчика) может ограничивать количество лицензий для частных перевозчиков.

В модели государственный сектор выполняет план по объему перевозок пассажиров, а частный — максимизирует прибыль. При этом предполагается, что у государственных перевозок качество низкое, но оно должно превышать минимальное значение, чтобы удовлетворить общественный запрос. Качество перевозок на муниципальном транспорте предполагается более стабильным по сравнению с качеством частных перевозчиков.

Считается, что частный перевозчик самостоятельно определяет цену и качество на свои перевозки, а муниципальный перевозчик руководствуется ценой, предложенной муниципалитетом.

В модели объем перевозки муниципальным транспортом положительно зависит от качества перевозки и цены на частный транспорт, отрицательно — от цены и от качества перевозки частным транспортом. В модели считается, что спрос на перевозки частным транспортом в большей мере зависит от качества частных перевозок, чем спрос на перевозки муниципальным транспортом и зависит от качества муниципальных перевозок.

Функция издержек перевозчика c^t в период t учитывает объем перевозок y^t и уровень качества Q^t и моделируется следующим образом:

$$c^t(y^t, Q^t) = (y^t)^2 \times (Q^t)^2 / 2 \quad (21)$$

Объем перевозок частными перевозчиками задаётся как функция от числа выданных лицензий. Для муниципального перевозчика вводится повышающий коэффициент издержек. Общественное благосостояние моделируется с учетом как объема перевозок, так и качества и суммируется для муниципального (а) и коммерческого транспорта (t).

$$G = y^a \times Q^a + y^t \times Q^t \quad (22)$$

В результате решения модели было получено, что цены на частные перевозки отрицательно зависят и от числа лицензий, и от качества муниципальных перевозок, но положительно — от цены муниципальных перевозок. Качество перевозок частным транспортом отрицательно зависит от числа лицензий. В решении с ростом минимального уровня качества перевозок муниципальным транспортом прибыль частного транспорта снижается, но прибыль остается неизменной, если при увеличении минимального уровня качества муниципальных перевозок увеличивается коэффициент чувствительности спроса на муниципальные перевозки к цене перевозки частным транспортом.

Предпосылки модели склоняются к варианту, когда цена на частные перевозки выше, чем на муниципальные, что можно рассматривать как премию за качество. Оптимизация приводит к тому, что муниципальный перевозчик предоставляет услуги минимально возможного качества. Но через низкие цены на муниципальные перевозки муниципалитет регулирует цену и на перевозки частным транспортом, так как частные перевозки зависят от муниципальных.

2. Подходы к моделированию развития транспортных сетей и конкуренции между видами транспорта с учетом конфигурации сети

Способы представления моделью развития в географическом пространстве транспортных сетей разнятся по таким признакам:

- стремиться ли модель найти оптимальную конфигурацию транспортной сети или только сравнивает несколько конфигураций между собою, оценивает, что было бы, если бы транспортная сеть была иной, чем она есть на самом деле. Если модель всё же ищет оптимальную сеть, то еще один признак для классификации — это какой критерий оптимальности сети использует модель. По П. Стивенсу, эффективная сеть короткая, а пути между ее узлами прямые: с одной стороны, длинную сеть дорого содержать; с другой стороны, чтобы пути в сети были прямые и издержки на поездку были как можно меньше, сеть должна быть длинная. Выходит, что лучшая сеть — это та, которая находит компромисс между издержками содержания сети и затратами на перевозку (Stevens, 1974). Иной критерий оптимальной транспортной сети предложили М. Гастнер и М. Ньюман: узлы, такие как станции и аэропорты, должны быть в среднем как можно ближе к жителям территории (Gastner & Newman, 2006). Еще один критерий, который используют П. Фаххельбаум и Э. Шааль и которому в дальнейшем следуем и мы, это максимизация той общей пользы, которую работа транспорта приносит жителям территории (Fajgelbaum & Schaal, 2020). Критерием оптимальности в транспортной модели может быть и сама точность модели: передает ли модель важные свойства настоящих транспортных сетей. Важнейшее свойство, из которого вытекают другие, это распределение степеней вершин графа (Barabási & Rósfai, 2017). От него среди прочего зависит и уязвимость сети к шокам;
- сколько слоев есть в модельной сети: один или несколько (Du, Zhou, Jusup, & Wang, 2016);
- предусматривает ли подход оценку влияния границ. Проще всего представить границу между двумя территориями мерой удорожания — атрибутом ребра между вершинами в графе, представляющем смежность территорий;
- из какого принципа или алгоритма выбора пути (маршрута) исходит модель. Важность такого алгоритма исходит из наблюдений, что даже кажущиеся улучшения в сети, например, прирост максимально возможного потока между данной парой узлов, могут приводить к фактическому ухудшению пропускной

способности (средней скорости, средних издержек и т. п.) из-за неоптимальной маршрутизации. Известнейший пример — парадокс Бресса (Roughgarden, 2005); — учитывает ли модель различия между транспортными средствами. Такие различия отражаются среди прочего в официальных методиках учета

По перечисленным выше признакам подход, который мы используем, характеризуется следующим:

- критерий оптимальности — это максимум суммы полезности потребления всех жителей всех ячеек модели (ячейка представляет территорию, такую как территория российского городского округа или муниципального района) при заданных ограничениях, среди которых предельная восстановительная стоимость провозной способности всех дорог между парами смежных ячеек;
- модель учитывает два слоя транспортной сети: автомобильные дороги и железнодорожные пути;
- влияние границ модель может учитывать через различия в удорожании перевозок и обеспечении провозной способности между разными парами смежных ячеек. Чем меньше такие ячейки, тем точнее можно приблизить оценку влияния границ. Суть подхода в том, что стоимость строительства зависит от конкретного места, в котором у ячеек общая граница, а не от свойств всего маршрута между, скажем, центрами этих ячеек. Фактически в приложениях влияние границ явно не учитывалось;
- модель исходит из идеи максимально эффективной маршрутизации в сети, как если бы был единственный оператор грузовых перевозок, централизованно оптимизирующий их логистику.

3. Представление транспортных сетей в модели

Мы предлагаем использовать экономику моделей П. Фаххельбаума и Э. Шааля, чтобы найти оптимальное распределение общей для нескольких видов транспорта провозной способности дорожных связей. Зная такую оптимальную общую оценку, а также действительные показатели провозной способности связей сетей разных видов транспорта, постоянные и переменные издержки строительства инфраструктуры разных видов транспорта, можно сравнить планы строительства дорог разных видов транспорта с современной конфигурацией дорог, чтобы оценить изменения в распределении грузопотоков и в общем благосостоянии работников страны.

Хотя мы используем математическое описание экономики из моделей П. Фаххельбаума и Э. Шааля, их способ представления транспортной сети в графе мы не принимаем.

Во-первых, все их модели разработаны так, чтобы рассматривать лишь автомобильные дороги, причем веса, которые используют П. Фаххельбаум и Э. Шааль весьма произвольные и зависят от скорости поездки по шоссе и числа ее полос. Такой подход нельзя легко перенести, например, на железные дороги.

Во-вторых, П. Фаххельбаум и Э. Шааль сжимают площади квадратных ячеек к одной точке, которую затем размещают на ближайшей к ним автомобильной дороге. Все работники, всё производство и всё потребление сжимаются в точку. Но важнее два других обстоятельства:

- 1) определить точку можно к сети только одного вида транспорта: линии шоссе и железных дорог не совпадают;
- 2) между парой точек, которые представляют смежные по правилу ферзя квадраты, учитывается лишь свойство i , стало быть, объем инфраструктуры только кратчайшего маршрута. Это исключает всю сложность дорожной сети между районами i , по нашему мнению, угрожает большими искажениями в начальном представлении конфигурации реальной транспортной сети. Так, от того, как сожмется в точку квадратный район, зависит то, какая дорога окажется ближайшей. Легко представить, как ближайшей к точке района оказывается незначительная дорога с малым числом полос, хотя крупная магистраль лишь немного дальше. В этом случае крупную дорогу модель может упустить вовсе. Итоговое распределение окажется неоптимальным, а полученные из калибровки и оптимизации цены и веса грубо ошибочными.

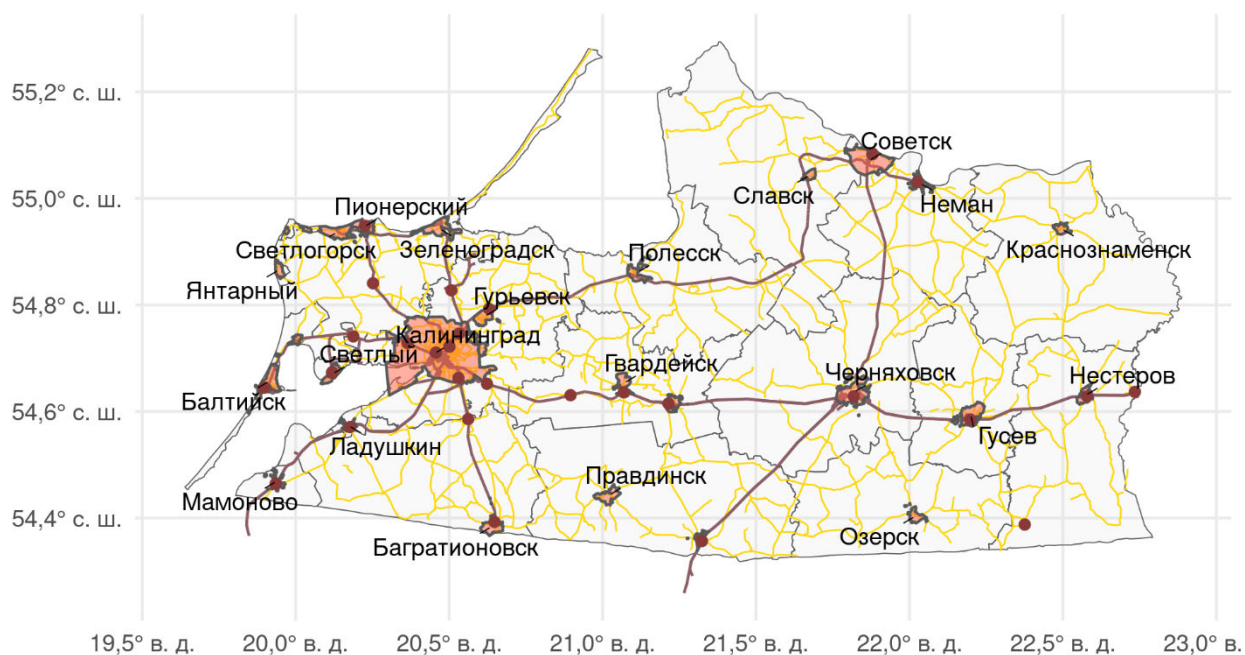
Вместо того, чтобы произвольно взвешивать участки лишь кратчайшего пути между условными точками — представителями квадратного района, мы предлагаем рассматривать меру объема инфраструктуры как нормированную провозную способность всех дорог, которые пересекают общую реальную границу реальных административных единиц. Для проверки нашего подхода мы ограничились эксклавом Российской Федерации — Калининградской областью. Единицами модели стали ее городские округа (в области все муниципальные образования этого уровня — это городские округа). Распределение доходов на одного их получателя по округам Калининградской области по данным Федеральной налоговой службы показывает рисунок 20. Эти оценки мы использовали вместо валового продукта на душу населения у П. Фаххельбаума и Э. Шаалья.



Примечание — Составлено авторами по данным отчетов, составленным Федеральной налоговой службой по формам 5-НДФЛ.

Рис. 20. Распределение средних доходов плательщиков НДФЛ по городским округам Калининградской области в 2019 г.

Преимущество нашего подхода — это возможность суммировать объем инфраструктуры нескольких видов транспорта. Мы рассмотрели два важнейших по объему перевозок и грузообороту: автомобильный и железнодорожный. Общую конфигурацию важнейших железных дорог и автомобильных линий показывает рис. 21.



Примечания

- 1 Подписаны крупнейшие на 2018 г. населенные пункты городских округов.
- 2 Площади, занятые крупными населенными пунктами, выделены оранжевым цветом.
- 3 Линии коричневого цвета — железные дороги. Точки коричневого цвета — отмеченные в OpenStreetMap железнодорожные станции.
- 4 Линии желтого цвета — важнейшие автомобильные дороги.
- 5 Составлено по данным OpenStreetMap (Kaliningrad, 2021; Planet OSM, 2021).

Рис. 21. Общая конфигурация автомобильных и железных дорог и границ населенных пунктов в Калининградской области

Чтобы оценить провозную способность железных дорог между округами Калининградской области, мы использовали:

- подробные сведения о перевозках грузов в 2019 и 2020 гг. между российскими железнодорожными станциями из информационно-аналитической системы управления на транспорте;
- таблицы расстояний между железнодорожными станциями из 1-й книги Тарифного руководства № 4 Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества (версия от 27 февраля 2019 г.) (Тарифное руководство № 4, 2021);
- пространственные данные о линиях железных дорог и железнодорожных станциях из OpenStreetMaps (Kaliningrad, 2021; Planet OSM, 2021);

— переводные таблицы из разных открытых источников для согласования коротких названий и кодов станций.

С помощью таблиц расстояний мы восстановили топологию графа железнодорожных линий Калининградской области. У Калининградской области отдельная железная дорога — Калининградская (с кодом 10 в Совете по железнодорожному транспорту). Таблицы перечисляют станции и остановочные пункты различных участков дороги в той последовательности, в которой по ним следуют поезда. Более того, в таблицах есть расстояния до крайних станций участков. Последовательно вычитая разницу в расстоянии до крайних станций двух смежных станций или остановочных пунктов, мы получили расстояние между каждой парой смежных станций всей Калининградской железной дороги. Смежности станций / остановочных пунктов уже достаточно, чтобы восстановить топологию графа железных дорог. Сведения о расстоянии между станциями позволили нам методом Дейкстры искать кратчайшие маршруты между заданными нами парами станций.

В информационно-аналитической системе управления на транспорте нет сведений о точном маршруте следования состава: известны только станция отправления и станциям назначения. Из сведений о грузообороте и объеме перевозки грузов или из числа вагонов в составе и данных о вагоно-километрах. В доступных нам сведениях о железнодорожных перевозках иногда было нулевое количество вагонов и вагоно-километров при ненулевом грузообороте или объеме перевозок. Более того, были и перевозки на нулевое расстояние из станции в ту же станцию (ненулевой объем при нулевом грузообороте). Случалось и наоборот: нулевой объем при ненулевом грузообороте. Странных перевозок, у которых показатель вагоно-километров нулевой, но грузооборот или объем перевозок положительный в таблицах перевозок по всей стране очень много: почти 772 тыс. из 3 230 тыс. (за 2019 и 2020 гг. вместе). Мы не удаляли такие строки, так как вагоны всё равно занимают дорогу, а значит для оценки провозной способности следует учесть и порожние составы. При этом вагоны таких перевозок в исходных таблицах были помечены как гружёные. Из общей по стране таблицы перевозок мы отобрали те, у которых субъект Федерации, отправления и назначения был Калининградская область.

В Калининградской области 51 % объема перевезенных железной дорогой в 2019 г. грузов приходился на импорт. Доля экспорта была 23 %, а внутренних перевозок — 20 %. Остаточные 6 % — транзитные перевозки (ни точка отправления, ни точка назначения не были в Калининградской области; в этом и отличие от импортных и экспортных перевозок). В 2020 г. доля внутренних перевозок выросла, но сути это не меняет. Так как доля

внешнеторговых перевозок высокая, а составы всё равно занимают линии железных дорог, исключать экспорт и импорт из оценки провозной способности нельзя.

В Калининградской области доля порожних перевозок была 73 % в 2019 г. и 72 % в 2020 г. Если считать по числу вагонов, то порожними в перевозках было 63 % в 2019 г. и 66 % в 2020 г. Это больше, чем в стране в целом, где доля порожних вагонов была 53 % и в 2019, и в 2020 г. Меньшую долю гружёных вагонов в перевозках по Калининградской области объясняет близость государственной границы и оторванность Калининградской области от основной территории Российской Федерации.

Чтобы оценить, какова действительная провозная способность по железным дорогам Калининградской области, мы использовали данные о различных видах железнодорожных перевозок по всей России. Вид перевозки определяли такие признаки:

- род (полувагоны, цистерны, крытые вагоны, платформы, рефрижераторы и пр.) и подрод (например, цистерны газовые и битумные, платформы длинномерные и для лесоматериалов, из прочего зерновозы, окатышевозы, думпкары, ИВ-термосы и т. п.) вагонов;
- тоннажность вагона (10-, 20-, 30-, 40- и 45-футовые, пяти- и трехтонные, малотоннажные);
- вид спецконтейнера (универсальный, танко-, реф- или термоконтейнер).

Для каждого вида перевозки мы рассчитывали максимальный известный объем перевозок в тоннах одним вагоном. Далее мы полагали, что в перевозке одного вида каждый вагон, который прошел по железным дорогам Калининградской области, мог нести этот максимальный известный в России объем груза. Здесь учитывались и порожние составы, ведь они могли перевезти груз.

Слабость нашего подхода в том, что, согласно официальной методике оценки пропускной и провозной способности инфраструктуры железнодорожного транспорта, провозная способность зависит не только от линий и составах на них, но и от мощностей железнодорожных станций (Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 18.07.2018 № 266 «Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования», б.д.), достаточных сведений о которых у нас не было. Всего в доступных нам данных о железнодорожных перевозках в Калининградской области упоминается 32 станции. Это значит, что эти станции были либо станциями отправления, либо станциями назначения, либо пограничными станциями транзитных перевозок.

Так как в таблицах грузовых железнодорожных перевозок указаны лишь станции отправления и назначения, но не все станции маршрута, мы считали, что все перевозки

проходят по кратчайшему маршруту. Чтобы восстановить эти маршруты, мы использовали таблицы расстояний из 1-й книги Тарифного руководства № 4 Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. Из таблиц грузовых перевозок можно вычислить расстояние перевозки. Это способ удостовериться, что найденный нами кратчайший маршрут верен. Провозная способность линий между двумя станциями — это сумма максимально возможного груза, который могли за год перевезти составы, маршрут которых проходил по линии между этими двумя станциями. При этом число станций и остановочных пунктов возросло до 112: большая часть пунктов на железнодорожных линиях просто не были местом отправления или назначения перевозок.

Пространственные единицы в нашей модели — это смежные округа, а потому мало найти провозную способность линий. По координатам железнодорожных станций и сведениям о геометрии полигонов городских округов из OpenStreetMap и других открытых источников, мы определили, в каком округе находится каждая станция. Из сведений о геометрии полигонов городских округов мы получили матрицу из смежности, которую затем представили как набор пар смежных городских округов. Затем мы сложили провозные способности всех линий между станциями в смежными городскими округами. Итоговое число для каждой границы двух смежных округов и стало оценкой провозной способности железных дорог в модели (рис. 22).



Примечания

1 Расчеты авторов по данным информационно-аналитической системы управления на транспорте

2 Не отмечена нулевая провозная способность между смежными округами, если через их границу не проходит железная дорога.

Рис. 22. Оценка провозной способности железных дорог между городскими округами

Провозную способность автомобильных дорог мы оценивали по методике, близкой к методическим рекомендациям Росавтодора.

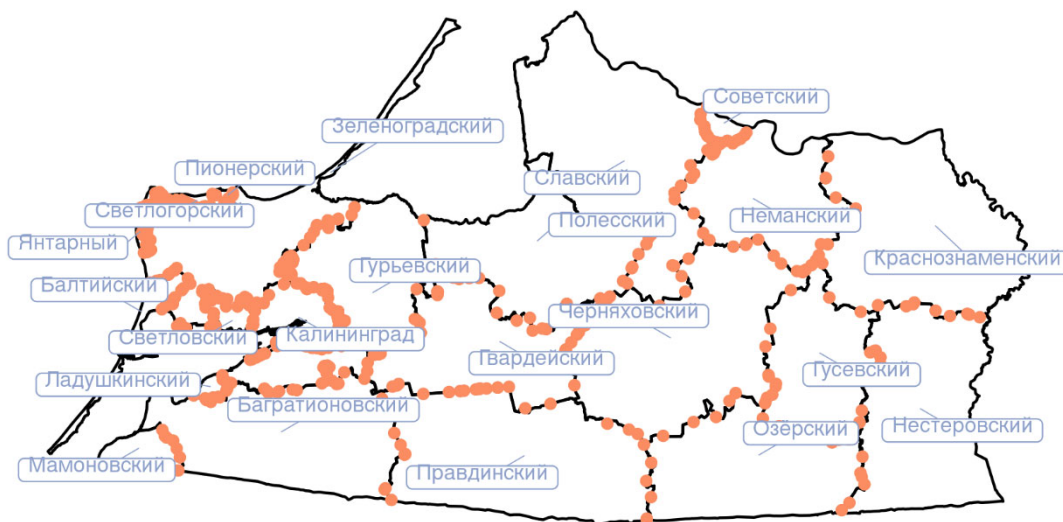
Сведения о геометрии автомобильных дорог в Калининградской области мы взяли из выгрузки обработанных Geofabrik данных OSM (Kaliningrad, 2021). Из линий дорог мы исключили по значениям тега highway (Key:highway, 2021):

пешеходные и велосипедные дорожки (path, cycleway, footway),

дороги в жилой зоне, где сквозное движение запрещено, нежелательно или затруднено (living street, residential),

подъездные дороги, не предназначенные для сквозного движения (service).

Далее с помощью геометрии границ городских округов мы оставили лишь те точки дорог, в которых они пересекали границу округов. Так мы уменьшили объем данных, которые требуется обработать, и резко упростили задачу, но сохранилась опасность в возможной переоценке провозной способности автомобильных дорог, так как из-за пересечения дорог их общая провозная способность меньше суммы отдельных участков (здесь можно было бы решать задачу о максимальном потоке, если бы мы работали не с площадями районов, а с точками, например городов).



Примечание — Составлено автором по данным OpenStreetMap

Рис. 23. Точки, в которых шоссе пересекают границу городских округов Калининградской области

Подробные сведения о свойствах отобранных нами дорог (значения всех доступных в OpenStreetMap ключей) мы затем получили по API OpenStreetMap через запросы по идентификатору линии дороги в GET-запросе после <https://www.openstreetmap.org/api/0.6/way/>. Из полученных тегов мы использовали значения следующих:

- о числе полос (lanes, lanes:backward, lanes:forward) и том, односторонне ли движение (oneway);
- ширине (width);
- доступе (access — только ли для пешеходов? motor_vehicle — доступны л);
- строящихся дорогах (их мы исключали) (construction);
- ограничениях скорости (maxspeed);
- состоянии дороги, проходимости (smoothness) (мы исключали непроходимые дороги со значение тега impassable);
- типе покрытия (surface, tracktype);
- тупиках (их мы исключали) (noexit).

Далее мы оценивали провозную способность точек с помощью коэффициентов из методических рекомендаций Роставтодора (Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог, 2012). Если у дороги было не больше двух полос, мы максимальной пропускной способностью считали 3,6 тыс. условных легковых автомобилей в час, если полос было три — 4 тыс., если четыре — 8,4 тыс., если 6 — 13,2 тыс., если 8 — 18,4 тыс. Так как у Росавтодора эти значения даны для пропускной способности в оба направления, указанные числа мы делил на два. Действительную пропускную способность мы оценивали по уменьшающим коэффициентам (множителям) из других тегов для свойств дорог. Если сведений о каком-то свойстве не было, понижающий коэффициент не использовался. Сводку коэффициентов дает таблица 3.

Таблица 3

Понижающие множители для оценки действительной пропускной способности автомобильных дорог в модели на границе городских округов Калининградской области по оценкам максимальной пропускной способности, полученной из числа полос

Ключ из OpenStreetMap	Значение ключа	Понижающий коэффициент для пропускной способности дороги
width (ширина в метрах)	6,0	0,85
	7,0	0,90
	7,5	1,00
	3,0	0,70
	3,5	0,96
maxspeed (максимальная скорость в км/ч)	10	0,44
	20	0,76
	30	0,88
	40	0,96
	50	0,98
	60	1
surface или tracktype (поправки на тип покрытия)	cobblestone (surface) (булыжники и брусчатка)	0,42
	compacted, unpaved, gravel (ключ surface); grade2 (ключ tracktype) (сухая дорога без покрытия)	0,90
	dirt, grass, mud (ключ surface); grade5 (ключ tracktype) (грязь)	0,10
	ground (surface), grade3 (tracktype) (земля, но без постоянной грязи)	0,30
	asphalt, paved (surface)	1,00

Примечание — Составлено авторами по ключам из OpenStreetMap (Planet OSM, 2021; Kaliningrad, 2021) и методическим рекомендациям Роставтодора (Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог, 2012).

Пропускная способность дорог между двумя городскими округами — это сумма пропускной способности всех точек отобранных дорог, которые пересекают границу этих двух округов (рис. 24).



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 24. Оценки пропускной способности автомобильных дорог между городскими округами Калининградской области

Провозную способность мы оценили с помощью сведений о потоке транспортных средств на пунктах учета интенсивности дорожного движения (ПУИД) (Министерство транспорта Российской Федерации, 2019). Для этого мы нашли, на какой линии стоит пункт, и сравнили действительный грузопоток через пункт с нашей оценкой пропускной способности. Найденное отношение и было множителем для перевода пропускной способности в провозную. Из разных значений для дорог с одинаковыми свойствами мы брали максимум отношения наблюдаемого грузопотока к оценочной пропускной способности. Итоговая оценка — 410 т на 1 тыс. условных легковых авто пропускной способности. Оценочное распределение провозной способности дает рис. 25.



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 25. Оценки провозной способности автомобильных дорог между городскими округами Калининградской области

26 показывает наши оценки совокупной провозной способности и железных, и автомобильных дорог между городскими округами Калининградской области.

26 почти повторяет предшествующий. Причина в том, что оценка провозной способности железных дорог очень мала, если сравнить ее с провозной способностью автомобильных дорог. Наглядно это показывает рис. 27.



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 26. Оценки совокупной провозной способности и железных, и автомобильных дорог между городскими округами Калининградской области



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 27. Доля провозной способности железных дорог в общей провозной способности железных и автомобильных дорог между городскими округами Калининградской области

4. Экономика и оптимизационная задача модели

Модель, которую мы используем, повторяет оптимизационную задачу одной из моделей П. Фаххельбаума и Э. Шааля (Fajgelbaum & Schaal, 2020). Эта задача состоит в том, чтобы найти максимум полезности от потребления всеми жителями при условии, что в каждом районе объем потребления и чистого экспорта не больше выпуска, а стоимость инфраструктуры не больше запаса условного ресурса, из которого и только из которого создается инфраструктура. Также общее число жителей полагается постоянным.

Цена перевозки в модели товара в модели измеряется в единицах его объема. Товар исчезает при перевозке, как тает айсберг. Эту метафору модель заимствует из известного приема П. Сэмюэльсона. Благодаря такому приему можно не вводить в модель рынок перевозок явно.

Оптимальный объем грузоперевозок и инфраструктуры модель выводит только из настроечных параметров модели и различий между районами в равновесных ценах товаров.

Модели П. Фаххельбаума и Э. Шааля также допускают, что веса у полезности от потребления жителями разных географических ячеек модели могут различаться.

Всего П. Фаххельбаум и Э. Шааль выводят несколько типов моделей, которые зависят от следующих условий:

- 1) сколько в модели товаров. Товар может быть один. В таком случае он полагается однородным. Если товаров несколько, цена перевозки товара может зависеть от объема перевозки как лишь этого товара, так и всех товаров. При этом разделение товаров всегда совершенно условное и не проходит проверку, не подтверждается или задается действительными наблюдениями;
- 2) есть ли миграции. Если миграций нет, то естественное ограничение в том, чтобы в каждой ячейке число работников в оптимальном решении не было больше числа ее жителей. Если миграции есть, единственное ограничение в том, чтобы общее число работников во всех ячейках модели не было больше их суммарной численности населения;
- 3) есть ли нижняя граница объема инфраструктуры. Если нижней границы нет, это вовсе не значит, что провозная способность (в нашей модели провозная способность, а у П. Фаххельбаума и Э. Шааля отвлеченный объем инфраструктуры) в оптимальном решении может быть каким угодно числом. На практике это значит, что такая величина должна быть неотрицательной. Если же есть нижняя граница, то это обычно значит, что она задается наблюдаемыми

различиями в дорожных связях между территориями, которым соответствуют географические ячейки в модели;

- 4) должна ли матрица с оптимальными свойствами (у нас провозной способностью, у П. Фаххельбаума и Э. Шаала отвлеченным объемом инфраструктуры) дорожных связей между географическими ячейками модели быть симметричной. Симметрия означает здесь, что, например, провозная способность дорог между двумя смежными территориями одна и та же вне зависимости от направления перевозки.

Из этого множества выборов модель, принятую нами для изучения связи между транспортной сетью и грузовыми потоками в России, отличают следующие особенности:

- 1) товар однородный;
- 2) миграций нет;
- 3) нет требования симметрии оптимальной провозной способности.

Выбор жесткости ограничения наименьшего возможного оптимального объема провозной способности в наших приложениях модели зависел от целей анализа.

Если не ограничивать оптимальное решение объемом существующей провозной способности, можно получить распределение, в котором в некоторых местах объем инфраструктуры будет меньше, чем существующий. Это значило бы, что в некоторых местах дороги следовало бы разобрать ради большей полезности от оптимально распределенного между территориями потребления. Такой исход неизбежен, если рассматривается задача поиска оптимального распределения провозной способности по транспортной сети при той же общей стоимости (условно — восстановительной стоимости) обеспечения (условно — строительства) провозной способности на дорожных участках, что и в действительности. Такой анализ показывает только, оптимально ли размещение по участкам сети провозной способности. Так как такой исход маловероятен в силу хотя бы эффекта колеи от построенных в другие эпохи и при других обстоятельствах дорог — своего рода гистерезиса опорного каркаса территории.

Более интересно для сценарного анализа ограничение оптимальной сети требованием давать провозную способность между каждой парой смежных территорий не меньшую, чем уже есть. Такая задача, однако, имеет смысл лишь при условии, что общая восстановительная стоимость провозной способности во всей сети вырастет. Иными словами, такая задача возможна исключительно в сценарном анализе с некоторой стоимостной оценкой, во-первых, восстановительной стоимости уже построенных дорог, а во-вторых, приведенного к сравнимым ценам потока расходов на строительство новых дорог согласно тем или иным проектам и программам. Для случая без нижней границы у

оптимальной провозной способности подобный сценарный анализ также возможен, но он имеет смысл лишь в сравнении со сценарным анализом с заданной по наблюдаемой нижней границей оптимальной провозной способности. Сравнение двух оптимальных решений, однако, лишь покажет, уводит ли эффект колеи уже построенной инфраструктуры от оптимального распределения провозной способности по сети, если бы ее можно было бы создавать с нуля.

Функция Лагранжа, отыскание экстремума которой описывает искомое оптимальное, равновесное распределение цен, уровней потребления товаров (однородного товара), величины и направлений их перевозки, а также соответствующей этим распределениям провозной способности участков сети, представлена в формуле (23).

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & \sum_j L_j u(c_j, h_j) - \sum_j P_j (c_j L_j - D_j) - \sum_j P_j^H \cdot (h_j L_j - H_j) \\
& - \sum_j P_j \\
& \cdot \left(D_j + \sum_{k \in \mathcal{N}(j)} (Q_{jk} + \tau_{jk}(Q_{jk}, I_{jk}) Q_{jk}) - F(L_j) - \sum_{i \in \mathcal{N}(j)} Q_{jk} \right) \\
& - P^K \left(\sum_j \sum_{k \in \mathcal{N}(j)} \delta_{jk}^i I_{jk} - K \right) + \sum_j \sum_k \zeta_{jk}^I \cdot (I_{jk} - \bar{I}_{jk}) \\
& + \sum_j \sum_k \zeta_{jk}^{\bar{I}} \cdot (\bar{I}_{jk} - I_{jk}) + \sum_j \sum_k \zeta_{jk}^Q Q_{jk} + \sum_j \zeta_j^L L_j + \sum_j \zeta_j^D D_j \\
& + \sum_j \zeta_j^c c_j + \sum_j \zeta_j^h h_j, \\
u(c_j, h_j) = & \frac{\left(\left(\frac{c_j}{\alpha} \right)^\alpha \left(\frac{h_j}{1-\alpha} \right)^{1-\alpha} \right)^{1-\rho}}{1-\rho}, \\
\tau_{jk}(Q_{jk}, I_{jk}) = & \delta_{jk}^\tau \frac{Q_{jk}^\beta}{I_{jk}^\gamma}, \\
F_j(L_j) = & z_j L_j^a,
\end{aligned} \tag{23}$$

где \mathcal{L} — значение функции Лагранжа;

j — номер географической ячейки (в наших приложениях — муниципального образования) в модели;

L_j — число получателей дохода в ячейке j ;
 u — функция полезности от потребления одного получателя дохода;
 c_j — среднее потребление товаров одним человеком в ячейке j ;
 h_j — среднее потребление неторгуемых благ в ячейке j ;
 P_j — равновесная цена товара в ячейке j , множитель Лагранжа для условия, согласно которому объем потребления товаров в ячейке не может быть больше, чем общее количество товаров, доступных для покупки в этой ячейке;
 D_j — общее количество (не стоимость) товара, доступного для потребления (покупки) в ячейке j ;
 P_j^H — равновесная цена неторгуемых благ в ячейке j , множитель Лагранжа для условия, согласно которому потребление неторгуемых благ получателями дохода в ячейке не может превышать общее количество неторгуемых благ в ячейке;
 k — номер ячеек, соседних с ячейкой указанного номера;
 $\mathcal{N}(j)$ — множество ячеек, соседних с ячейкой j ;
 Q_{jk} — объем грузовых перевозок из j в k (товары в этих перевозках не должны быть произведены в j — достаточно, чтобы через j проходил маршрут перевозки товара из ячейки его производства);
 τ — функция цены перевозки в единицах объема перевозимого груза;
 I_{jk} — оптимальная провозная способность автомобильных и железных дорог на границе ячеек j и k при движении из j в k (в общем случае $I_{jk} \neq I_{kj}$);
 F — производственная функция (фактически функция наблюдаемого, а не только максимально возможного, объема выпуска однородного товара);
 P^K — равновесная цена особенного ресурса, из расхода которого только и обеспечивается расширение провозной способности дорог; множитель Лагранжа для условия, согласно которому стоимость обеспечения провозной способности (строительных работ, необходимых для этого) не больше общего объема особенного ресурса, из расхода которого и только возможно расширение провозной способности дорог;
 δ_{jk}^i — цена строительных работ по расширению провозной способности на условную ее единицу на границе ячеек j и k при движении из j в k (в общем случае $\delta_{jk}^i \neq \delta_{kj}^i$);
 K — общее количество особенного ресурса, из расхода которого и только возможно увеличение провозной способности дорог;
 ζ_{jk}^1 — множитель Лагранжа для условия, что оптимальная провозная способность из j в k не может быть меньше установленной нижней границы провозной способности;

\underline{I}_{jk} — нижняя граница допустимой оптимальной провозной способности дорог из ячейки j в смежную с ней ячейку k ;

$\zeta_{jk}^{\bar{I}}$ — множитель Лагранжа для условия, что оптимальная провозная способность из j в k не может быть больше установленной верхней границы провозной способности;

\bar{I}_{jk} — верхняя граница допустимой оптимальной провозной способности дорог из ячейки j в смежную с ней ячейку k ;

ζ_{jk}^Q — множитель Лагранжа для условия, что объем перевозки из ячейки j в смежную с ней ячейку k не отрицательный;

ζ_j^L — множитель Лагранжа для условия, что число получателей дохода в ячейке j не меньше нуля;

ζ_j^D — множитель Лагранжа для условия, что объем потребления товаров всеми получателями дохода в ячейке j не меньше нуля;

ζ_j^c — множитель Лагранжа для условия, что среднее потребление товаров в ячейке j на одного получателя дохода не меньше нуля;

ζ_j^h — множитель Лагранжа для условия, что среднее потребление неторгуемых благ на одного человека в ячейке j не меньше нуля;

α — доля расходов на товары в функции полезности;

ρ — мера относительного неприятия риска в функции полезности;

δ_{jk}^{τ} — мера удорожания перевозки, если поток идет из географической ячейки j в смежную с ней географическую ячейку k

β — положительный параметр из функции транспортных издержек, отражающий скорость перегрузки дорог;

γ — положительный параметр из функции транспортных издержек, отражающий эффект масштаба для провозной способности ($\gamma \leq \beta$);

z_j — средний в ячейке j доход одного получателя дохода; z_j приближает производительность в производственной функции, хотя и использует для этого стоимостную величину;

a — эластичность выпуска по затратам труда и одновременно (так как труд — единственный вид затрат) мера эффекта масштаба производственной функции; если $a = 1$, то $F_j(L_j)$ просто возвращает доход, из которого z_j получается делением дохода на число его получателей L_j .

Благодаря требованию $\gamma \leq \beta$ указанная в формуле (23) задача выпуклая, что резко упрощает поиск оптимального решения: локальный оптимум одновременно и оптимум глобальный.

Вычисления для поиска оптимального решения из указанной задачи обеспечила специально созданная для целей программа, написанная авторами на языке *R* (*R: A Language and Environment for Statistical Computing*, 2021). Программа адаптирует код MATLAB моделей П. Фаххельбаума и Э. Шаала (https://optimaltransportnetworktoolbox_v.1.0.4b.zip/, 2019) для работы с описанным нами представлением пространства и несколько точнее следует описанию экономики модели в статье самих П. Фаххельбаума и Э. Шаала (Fajgelbaum & Schaal, 2020). Вычисления модели не зависят от выбора нижней границы провозной способности.

В коде используется двойственное представление задачи, которую представляет функция Лагранжа в формуле (23). Более того, двойственная задача упрощается так, как если бы оптимальное распределение провозной способности по связям сети было известно. Для заданного $I = \{I_{jk}\}$ находится оптимальное распределение по ячейкам потребления, а по группам смежных ячеек — грузовых перевозок. Затем используется отношение оптимальных потоков и оптимальной провозной способности из условия (оптимума) первого порядка функции Лагранжа в формуле (23), чтобы оценить, сходятся ли две оценки оптимальной провозной способности. Если они расходятся, берутся вычисленные из указанного условия первого порядка величины провозной способности и вновь уже при этих новых значениях находится оптимальное распределение потребления и грузовых потоков. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто приемлемое приближение двух оценок оптимальной провозной способности. Чтобы избежать нарушения требования нижней и верхней границы, после пересчета новых значений провозной способности по условиям первого порядка из функции Лагранжа в (23), величины, нарушающие допустимые границы, приравниваются к соответствующему допустимому значению (если больше верхней границы — к верхней границе, если меньше нижней границы — к нижней), а все оценки провозной способности пересчитываются, чтобы их суммарная стоимость не превышала максимальную допустимую стоимость K . Из таких итеративных процедур и находится оптимальное решение задачи.

Критерием схождения мы полагали сумму абсолютных значений попарных разностей (то есть для тех же пар смежных ячеек с тем же направлением движения) двух наборов оценок провозной способности. Критерием во всех приложениях была величина 10^{-10} . Для сравнения: стоимость провозной способности (максимальная в задаче без нижней

границы допустимой провозной способности, минимальная в задаче с нижней границей провозной способности, заданной по наблюдениям) во всей сети полагалась 1.

Чтобы найти оптимальное решение внутренней задачи размещения потребления и распределения по транспортной сети грузовых потоков, использовался интерфейс для языка R библиотеки IPOPT (Wächter & Biegler, 2006).

5. Возможности модели

Базовые возможности связаны с одним параметром модели — превышением стоимости строительства провозной способности дорог над стоимостью текущей конфигурации провозной способности. Вместе с заданием наблюдаемого распределения провозной способности (I) по весам ребер графа модели (взвешенной матрицы смежностей географических ячеек) это дает оценку приращения оптимальной провозной способности по участкам смежных ячеек моделей. Сравнивая объем инфраструктуры наблюдаемый (оптимальный при наблюдаемых доходах и наблюдаемом расселении) с оптимальным при большей (в указанное число раз) максимальной суммарной стоимости провозной способности построенных дорог, можно выяснить, в расширение каких именно участков дорог следует инвестировать средства.

У такой задачи прямая связь с исполнением расходов в рамках бюджетных ассигнований, выделяемых, например, национальным проектом «Безопасные и качественные автомобильные дороги» или Комплексным планом модернизации и расширения магистральной инфраструктуры. Если единственные изменения в модели для сценарного анализа — это (1) приравнение наименьшего допустимого объема провозной способности наблюдаемому (вместо взятия маленького положительного числа, представляющего, по сути, нулевую нижнюю границу провозной способности на границе любых географических ячеек модели), и (2) установка превышения (в указанное число раз) максимальной суммарной стоимости провозной способности на всех ребрах графа дорожных связей, то сценарный анализ фактически лишь проверит, оптимален ли выбор инфраструктурных проектов, заявленных в результатах, например, федеральных проектах, исполняющих национальный проект или Комплексный план.

Так как фактически результаты в росписи задач и результатов проектов во исполнение Комплексного плана утверждены, требуется модификация подхода к сценарному анализу, которая бы позволила учесть ограничение круга дорожных связей, провозная способность которых может быть увеличена. В модели такое ограничение для сценарного анализа представляет избирательное приравнение наибольшей допустимой провозной способности на участках, через которые наверняка не пройдут трассу дорог, утвержденных как результаты проектов, к наименьшему допустимому объему провозной способности, а фактически к наблюдаемому его уровню.

При интерпретации результатов сценарного анализа с ограничением наблюдаемым объемом провозной способности как только нижней границы провозной способности, так и одновременно и нижней, и верхней, нужно учитывать способ записи лагранжиана

оптимизационной задачи в коде модели. После нахождения оптимального распределения цен товаров, их потребления и потоков при данном объеме инфраструктуры во внутренней задаче оптимизации, во внешней задаче оптимизации объем провозной способности, согласно условиям 1-го порядка по объему инфраструктуры из функции Лагранжа главной оптимизационной задачи, определяется из уравнения в формуле (24).

$$I_{jk} = \frac{\delta_{jk}^{\tau}}{\delta_{jk}^i} P_j (Q_{jk})^{(1+\beta)\frac{1}{1+\gamma}}, \quad (24)$$

где I_{jk} — оптимальная провозная способность между географическими ячейками j и k , не нормированная на максимальную стоимость всех дорог, т. е. не переведенная в количество условного ресурса, из затрат которого и состоит строительство и стоимость всех дорог;

δ_{jk}^{τ} — мера удорожания перевозки, если поток идет из географической ячейки j в смежную с ней географическую ячейку k ;

δ_{jk}^i — мера удорожания (цена) строительных работ по расширению провозной способности дорог между смежными ячейками j и k ;

P_j — равновесная цена в ячейке j из решения внутренней оптимизационной задачи;

Q_{jk} — объем потока товаров из j в k из решения внутренней оптимизационной задачи;

β — положительный параметр из функции транспортных издержек, отражающий скорость перегрузки дорог;

γ — положительный параметр из функции транспортных издержек, отражающий эффект масштаба для провозной способности ($\gamma \leq \beta$).

В формуле (24), однако, нет множителя Лагранжа для условия, что максимальная стоимость провозной способности во всей сети не меньше оптимальной стоимости всей провозной способности в сети: из формулы (24) вынесен множитель, равный $\left(\frac{\gamma}{P_k}\right)^{\left(\frac{1}{\gamma+1}\right)}$. Поэтому, чтобы ограничить оценку оптимального объема провозной способности, она пересчитывается по формуле (25).

$$I_{jk}^* = \frac{I \times K}{\sum_j \sum_k \delta_{jk}^i I_{jk}}, \quad (25)$$

где I_{jk}^* — оптимальная провозная способность между географическими ячейками j и k , нормированная по максимальной стоимости провозной способности в сети;

I_{jk} — оптимальная провозная способность между географическими ячейками j и k , не нормированная на максимальную стоимость всех дорог, т. е. не переведенная в количество условного ресурса, из затрат которого и состоит строительство и стоимость всех дорог;

K — максимальную стоимость провозной способности всех дорог в сети; ресурсы для строительства дорог (скорее, их максимальная стоимость);

δ_{jk}^i — мера удорожания (цена) строительных работ по расширению провозной способности дорог между смежными ячейками j и k .

Такое же нормирование прodelывается и на старте модели для нижней границы провозной способности между парами смежных ячеек I , если такая граница приравнивается к наблюдаемой. Из-за таких нормирований показателей провозной способности в модели их значения теряют связь с единицами измерения в исходных данных — тоннами грузов в год. Чтобы перевести оптимальный объем провозной способности I_{jk}^* из формулы (25), нужно сперва сравнить его с нормированным значением I_{jk}^* и выяснить, во сколько раз I_{jk}^* больше I_{jk}^* , а затем на этот множитель помножить наблюдаемое значение I_{jk} в естественных единицах наблюдения.

Точность прогноза модели можно повышать, увеличивая пространственное разрешение. Вместо территорий субъектов Федерации муниципальных образований можно использовать растр со всё меньшим размером ячейки. На границе двух ячеек при таком подходе будет оцениваться провозная способность дорог. По мере увеличения пространственного разрешения растра будет расти и точность описания моделью реальной сети дорог. Это устранил недостаток представленных выше модельных оценок, связанный с упущением различий в провозной способности дорог внутри муниципальных образований и сосредоточением исключительно на провозной способности дорог на границе муниципальных образований. Хотя такой подход точнее отразит трассировку новых дорог, он потребует и предположений о распределении по ячейкам растра доходов. Поиск баланса между точностью отражения дорожной сети и точностью представления географии доходов требует условно пространственной калибровки модели. Такая калибровка будет еще одним внешним циклом подбора настроечных параметров модели. Потребуется рассмотреть несколько разных уровней пространственного разрешения, определяющего растр модели и, стало быть, матрицу смежности ее ячеек и выводимый из нее граф связей, с тем чтобы для каждого такого уровня вывести предсказания, которые возможно сверить с

наблюдениями. Так, Фаххельбаум и Шааль для калибровки некоторых параметров моделей использовали отношение торговли внутри районов к торговле между районами.

Повышение пространственного разрешения географических ячеек в модели решает и проблему выбора параметров удорожания перевозок δ^1 и удорожания (цен) строительных работ по расширению провозной способности δ^T . В модели Фаххельбаума и Шааля, взятой нами за образец, такие параметры выводились из расстояния между вершинами в графе дорог, но так как в нашей модели такие вершины не точки, но ячейки, такой подход лучше не применять: резко предпочтительными делаются связи между смежными маленькими ячейками (например смежными городами, когда в модели есть также и бóльшие по площади муниципальные районы), хотя стоимость строительства в таком случае едва ли самая низкая.

Вместо альтернативной сети в сценарном анализе можно рассмотреть и иное распределение доходов или иное расселение. В таком случае модель может показать, какой должна была бы быть оптимальная транспортная сеть: как построенная с нуля, так и достроенная на действующей сети. При этом в первом случае открываются возможности для сравнения значений известных функций общественного благосостояния: при наблюдаемом расселении и распределении доходов, при сценарном распределении доходов с той же провозной способностью в сети дорог или с новой провозной способностью. Следует помнить, что сравнения значений функции общественного благосостояния могут быть лишь порядковые, то есть возможно показать, в каком случае функция общественного благосостояния возвратит большее значение, но не следует оценивать, во сколько раз это значение больше. Поэтому в сценарном анализе нельзя ставить вопрос о том, на сколько, например, процентов выросло бы общественное благосостояние, если бы распределение провозной способности в дорожной сети между ячейками модели было оптимальное. Между тем такой запрет нарушается в сценарном анализе Фаххельбаума и Шааля для европейских стран.

Новую провозную способность можно задавать не только для связей, уже присутствующих в сети, но и для новых. Воплощение этой идеи в сценарном анализе сводится к выбору между тем, отражать ли в матрице смежности географических ячеек модели все ячейки с общей географической границей или только те, через границу которых проходит автомобильная или железная дорога. В первом случае у некоторых рёбер, строго говоря, должна быть вначале нулевая провозная способность, тогда как во втором случае рёбер с нулевой провозной способностью в графе дорожной сети между географическими ячейкам модели не будет вовсе.

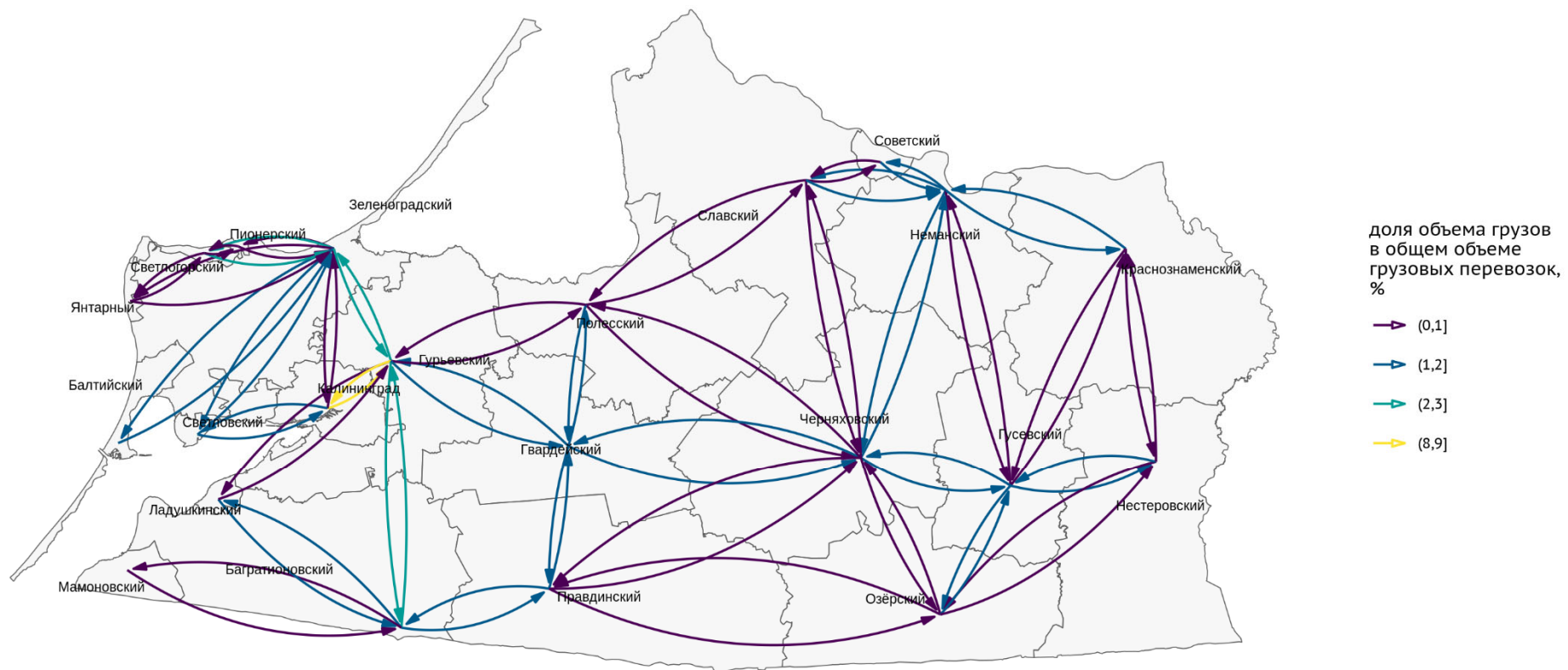
Тем не менее, чтобы случай с полным набором связей, даже связей без дорог, имел смысл в сценарном анализе, вместо нулевой провозной способности следует всё же указывать пусть и малую, на положительную величину. Такое требование обуславливают особенности алгоритма поиска оптимальной провозной способности по заданным (расчетным) объемам перевозок. Модель состоит из по меньшей мере двух циклов оптимизации, из которых один вложен в другой. Внутренний цикл подбирает объем перевозок, *полагая провозную способность данной*. Это значит, что объем перевозок при нулевой провозной способности никогда не будет положительным, а потому и оптимизация на внешнем цикле, где провозная способность подбирается исходя из равновесных перевозок, не изменит нулевую провозную способность и никогда не предложит строительство в подлинном смысле новой для модели дороги.

Скорость нахождения оптимального распределения провозной способности для случая возникновения дорожной связи между географическими ячейками модели впервые, а равно и чувствительности оценок оптимального распределения провозной способности в модели требует дополнительного изучения. Полный такой анализ потребовал бы и учета граничных величин, определяющих, какое схождение в оптимизационном алгоритме приемлемо. Принципиальное ограничение полного анализа чувствительности — его вычислительная сложность.

Еще одна возможность сценарного анализа связана с симметричностью матрицы смежности ячеек модели. Если такая матрица не симметричная, она представляет орграф, а значит, в оптимальном решении провозная способность между той же парой ячеек в разные направления может не совпадать. На практике сложно представить, чтобы транспортные средства, в которых перевозятся грузы, двигались лишь в одну сторону. Дороги не трубы, по которым течет жидкость. Если состав доставил по железной дороге груз, он далее не может и не должен простаивать в месте назначения этой перевозки вечно, но должен вернуться либо порожним, либо груженным. Проход даже порожних вагонов ограничивает провозную способность — обстоятельства, которое мы учитывали при оценке провозной способности железных дорог. Тем не менее выявление асимметрии в оптимальной провозной способности может учитываться при проектировании технических свойств, например, автомобильных дорог на полосах в разные направления.

6. Результаты модели для сценариев в Калининградской области

Прежде всего выясним, каково оптимальное распределение грузовых перевозок между городскими округами Калининградской области при наблюдаемых величинах провозной способности автомобильных и железных дорог на границе этих округов. Такое распределение показывает рис. 28, где объем перевозок приведен в процентах от общего объема внутренних перевозок в области. При оптимальном распределении грузовых перевозок при существующей провозной способности дорог на границе округов Калининградской области главные грузовые перевозки были бы между Калининградом и Гурьевским округом, с которым у областного центра самая широкая граница. Больше через Гурьевский округ (у него целых 6 соседей), а не напрямую идут перевозки из Калининграда в Зеленоградский и Светловский городские округа. Поток в несмежный с центром Багратионовский городской округ объясняют самые высокие в области доходы городского округа.



Примечание — источник: расчеты авторов.

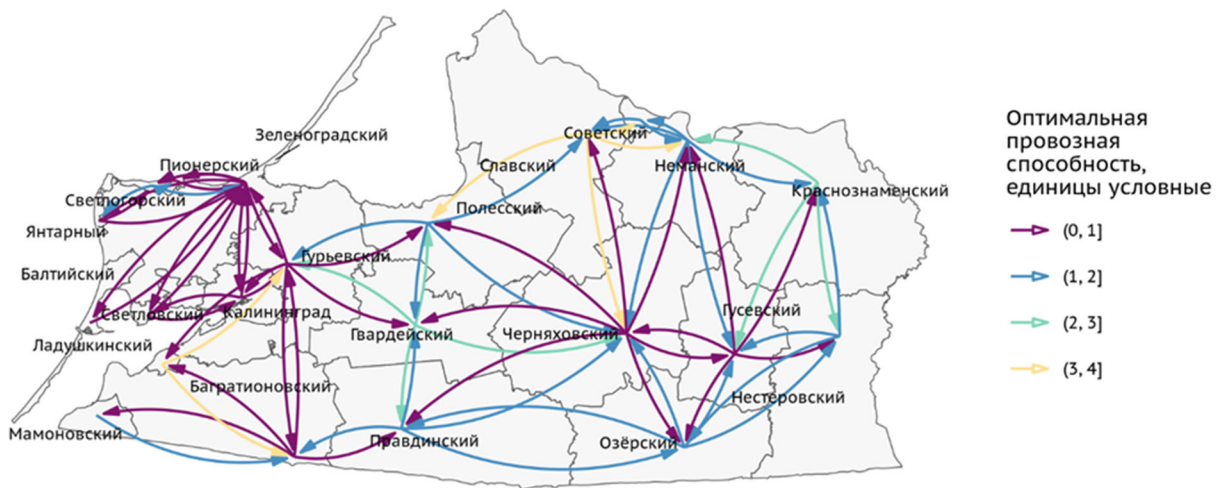
Рис. 28. Равновесные перевозки грузов (Q_{jk}) при действительной провозной способности в условных единицах грузов

Действительное распределение грузовых потоков между городскими округами неизвестно. Знание такого распределения позволило бы сравнить равновесные перевозки с действительными и составить рекомендации по улучшению логистики грузовых перевозок. Приблизительно действительное распределение грузовых перевозок отражается на рисунке с оценками провозной способности дорог. Тем не менее эта оценка не может использоваться для сравнения с оптимальным распределением. Во-первых, эта оценка принималась за данность для поиска оптимального решения, представленного на рисунке 28. Во-вторых, хотя в оценках провозной способности дорог учитывались действительные железнодорожные перевозки, а точнее наибольшие возможные такие перевозки, оценки провозной способности автомобильных дорог опирались на наблюдения лишь из единственного пункта учета интенсивности дорожного движения на федеральной трассе.

Если наблюдений за объемом перевозок для дорог на каждой границе смежных городских округов нет, а потому и сравнения оптимального распределения невозможны, оценки провозной способности есть, а потому первым сценарием, допускающим прямое сравнение с наблюдениями, может быть сценарий, при котором средства, равные суммарной восстановительной стоимости построенных в Калининградской области железных и автомобильных дорог, использовались бы, чтобы построить с нуля новую транспортную сеть с оптимальным распределением провозной способности между городскими округами. Оптимальное решение из такого статистического анализа — на рисунке 29. Чтобы сравнение оптимального распределения провозной способности в указанном сценарном анализе было удобнее, рисунок 30 показывает, как оптимальная провозная способность отличается от наблюдаемой для каждого направления перевозок на границе между каждой парой смежных городских округов.

При той же общей провозной способности дорог, что сейчас в Калининградской области, оптимальное решение — это немного уменьшить провозную способность на границе некоторых округов, чтобы усилить провозную способность для вывоза товаров прежде всего:

- из Ладушкинского городского округа в Гурьевский городской округ в обход городского округа «Город Калининград»;
- в Черняховский городской округ (узел восточной части области) из окрестных городских округов;
- из Пионерского городского округа в Светлогорский городской округ и далее в Янтарный.



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 29. Оптимальный объем провозной способности в сценарии, в котором транспортная сеть перестраивалась заново с той же общей стоимостью обеспечения провозной способности



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 30. Превышение над наблюдаемым оптимального объема провозной способности в сценарии, в котором транспортная сеть перестраивалась заново с той же общей стоимостью обеспечения провозной способности

Так как в сценарии общая стоимость дорог та же, что и наблюдаемых, для расширения провозной способности на указанных направлениях, нужны ее сокращения в других местах. Прежде всего чрезмерна, согласно оптимальному решению модели, провозная способность между прибрежными городами на западе Калининградской области и Зеленоградским городским округом, который выступает посредником между этими прибрежными городами и городским округом «Город Калининград».

Оптимальной транспортной сети отвечает и другая равновесная география грузовых перевозок. Текущая конфигурация дорог приводит к тому, что 30 % всех перевозок регионе сосредоточены в западной части области всего между пятью округами: Калининградом, Багратионовским, Гурьевским, Зеленоградским и Пионерским, причем на сообщение между Калининградом и Гурьевским округом должно приходиться 17 % грузовых перевозок в области (рисунок 28). С другой стороны, оптимальное распределение потоков грузов между округами Калининградской области (31) заметно более равномерное, чем при текущей конфигурации транспортной сети. Потоки грузов между Калининградским и Гурьевским округом в идеале составляют всего 1 % от перевозок по области. При этом возрастает поток грузов на участках широтных маршрутов международных коридоров: доля грузов на отдельных их участках возрастает с менее чем 1 до 3 % от перевозок в области.

Из-за особенностей настроечных параметров моделей в сценарном анализе изменение провозной способности прямо пропорционально изменению оптимального (равновесного) объема грузовых перевозок. Абсолютное превышение провозной способности дорог из Калининграда в посреднический Гурьевский округ над провозной способности на других границах настолько велико, что на рисунке 30 различия между другими участками в провозной способности не заметны.

Хотя Калининградская область и удобнее других субъектов Российской Федерации для представления возможностей сценарного анализа, так как сама по себе единственный анклав России, в грузовых перевозках по территории Калининградской области велика доля транзитных потоков, но спрос на транзитные перевозки не отражается в модели. Из-за этого на рисунках (29 и 30) не видна потребность в высокой провозной способности широтных маршрутов.

Кроме того, так как в модели представленного сценарного анализа нижняя граница провозной способности была нулевая, на границе между Багратионовским и Гвардейским городскими округами, которую сейчас не пересекают пригодные для грузовых перевозок автомобильные или железные дороги, в оптимальном решении не возникла полноценная дорожная связь. Насыщенность и меньшая светлота цвета для этих связей на рисунке 30 указывают, что любое приращение с нулевого уровня будет бесконечно большим, если судить по процентной прибавке.

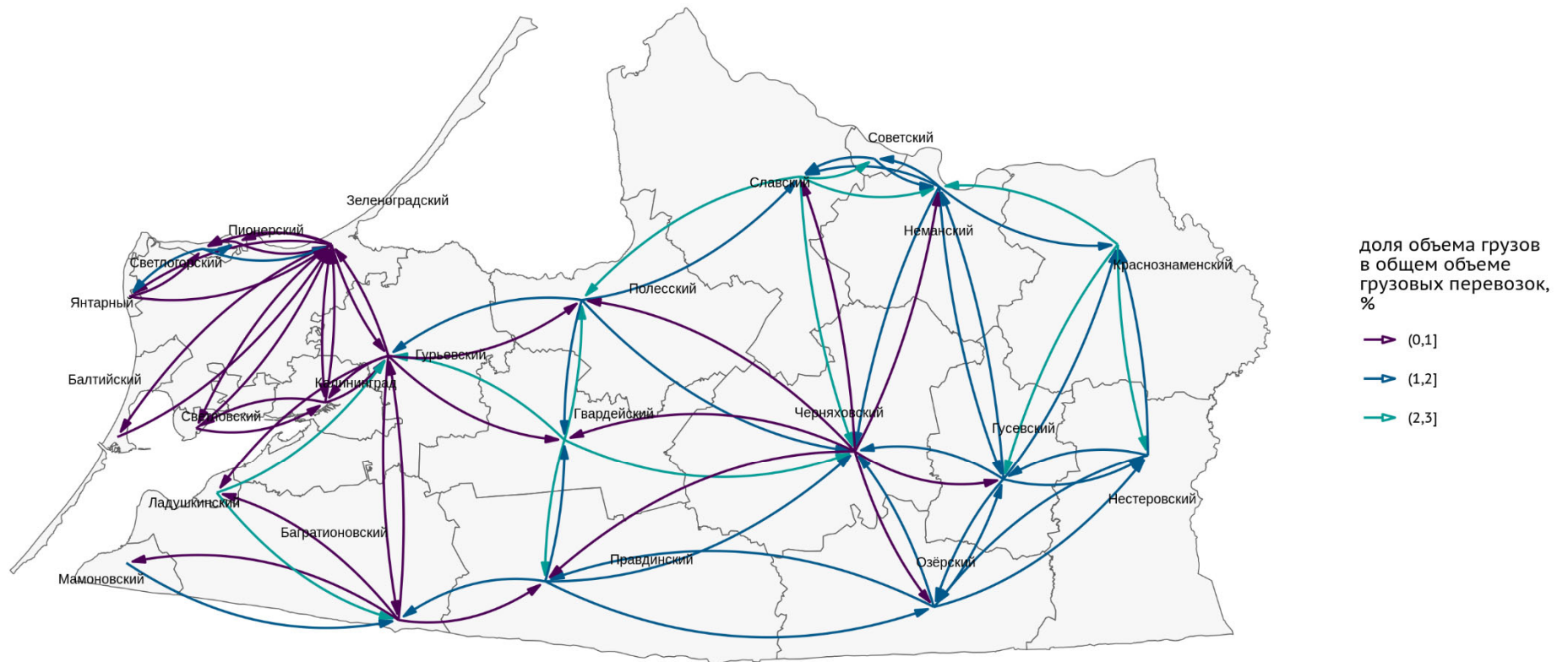
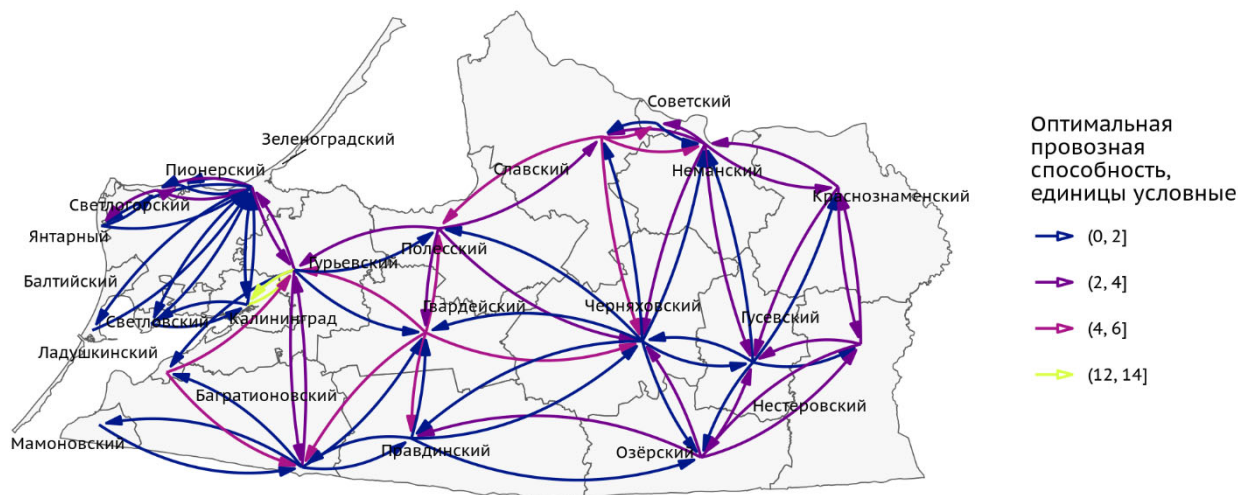


Рис. 31. Оценки равновесного распределения грузовых потоков между округами Калининградской области при оптимальной конфигурации дорог между ними в сценарии без нижней границы оптимальной провозной способности дорог

В рассмотренном примере сценарного анализа провозная оптимальная способность не ограничивалась снизу наблюдаемой ее величиной. Благодаря этому можно было оценить, оптимально ли распределение накопленных инвестиций в провозную способность между городскими округами Калининградской области. Итог оценок модели — распределение не оптимально. Это, однако, не сообщает, какими должны быть направления новых инвестиций в дорожное строительство. Чтобы ответить на такой вопрос, рассмотрим сценарный анализ, в котором инвестиции в дорожное строительство могут увеличить общую стоимость обеспечения провозной способности между городскими округами Калининградской области в полтора раза. При этом нижнюю границу для оптимального распределения грузовых потоков мы принимаем за наблюдаемую величину, нормированную, только чтобы суммарная стоимость провозной способности на всех направлениях перевозки между всеми парами городских округов Калининградской области с общей границей была равна 1, в то время как такая общая стоимость в оптимальном решении может быть 1,5.

Результаты такого сценарного анализа оптимального расширения существующей провозной способности сети дорог отражены на рис. (32 и 33).

Главные результаты анализа сценария с расширением действующей сети состоят в том, что направления инвестиций, то есть направления перевозок и пары смежных городских округов, провозную способность на границе которых следует расширять, в оптимальном решении те же, что и для задачи без нижней границы провозной способности в оптимальном решении. Фактически оптимальное распределение новых инвестиций сводится к тому, чтобы за счет дополнительных средств достроить провозную способность до такого состояния, в котором *отношения* провозной способности дорог на границах между городскими округами будут близки к отношениям, оптимальным согласно решению задачи без нижнего ограничения оптимального объема провозной способности.



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 32. Оптимальный объем провозной способности в сценарии, в котором транспортную сеть можно только расширять, но так, что суммарная величина новых инвестиций не превышает более чем в 1,5 раза восстановительную стоимость действующей сети дорог



Примечание — источник: расчеты авторов.

Рис. 33. Превышение над наблюдаемым оптимального объема провозной способности в сценарии, в котором транспортную сеть можно только расширять, но так, что суммарная величина новых инвестиций не превышает более чем в 1,5 раза восстановительную стоимость действующей сети дорог

Параметры в представленных результатах:

- выпуск пропорционален числу работников ($a = 1$ в формуле (23));
- функция полезности — CRRA (2) [то есть мера относительного неприятия риска в функции полезности (ρ в формуле (23)) приравнивалась к 2] по функции-агрегатору Кобба — Дугласа от потребления товаров и неторгуемых благ с долей стоимости товаров (α из формулы (23)) 0,4;

- коэффициенты удорожания перевозок грузов и строительства дорог везде одинаковы и равны 10^5 (выбор величины обусловили проблемы с операциями над числами, меньшими машинного эпсилона, возникавшие при меньших величинах коэффициентов) [в MATLAB-кодах, реализующих модели Фаххельбаума, эти параметры приравниваются к расстоянию в км, но если следовать такому подходу, резко предпочтительными делаются связи между смежными маленькими полигонами (смежными городами), хотя стоимость строительства в таком случае едва ли самая низкая];
- эластичность цены перевозки по объему перевозки принималась равной 0,13 (β из формулы (23)), а по величине провозной способности и обратно — провозной способности — 0,1 (γ в формуле (23)). Величины этих параметров были взяты из статьи Couture, Duranton и Turner, содержащей оценки чувствительности скорости движения в городах США к тем или иным условиям (Couture, Duranton, & Turner, 2018);
- нижняя граница провозной способности — 0.

Заключение

В рамках работы были решены следующие задачи:

- подготовлен обзор подходов к моделированию развития пространственной конфигурации транспортных сетей;
- разработан способ оценки (алгоритм и программное обеспечение) совокупной провозной способности железных автомобильных дорог между регионами, районами и округами;
- создан и испытан на городских округах Калининградской области прототип модели оптимального распределения инвестиций для развития межрайонной провозной способности железных и автомобильных дорог;
- разработан набор инструментов, позволяющий проводить сценарный анализ изменений в дорожной сети, в территориальной организации экономики и в расселении;
- на примере грузового сообщения по железным и автомобильным дорогам между городскими округами Калининградской области показаны возможности сценарного анализа для оценки оптимальности действующей конфигурации дорог и их провозной способности, а также для составления рекомендаций по оптимальному распределению инвестиций в расширение действующей сети дорог.

Работа демонстрирует, как с помощью провозной способности можно «схлопнуть» многослойную сеть до представления, удобного для работы с привычными инструментами пространственных моделей общего равновесия.

Показано, что оптимальной географии грузовых потоков распределение провозной способности между городскими округами Калининградской области не соответствует. При развитой провозной способностью в западной части области инфраструктура в восточных округах развита недостаточно. Кроме того, мала и не соответствует объему грузовых перевозок провозная способность дорог в широтном направлении открытого через Калининградскую область коридора Европа — Россия — Китай. Компьютерная модель не только вскрывала диспропорцию в развитии транспортной сети Калининградской области, но и дала ей количественную оценку. Новые инвестиции в дорожное строительство должны приближать провозную способность дорог между муниципальными образованиями к таким уровням, чтобы отношения между провозной способностью между парами смежных территорий соответствовали таковым в модели с нулевой нижней границей оптимальной величины провозной способности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Abdelwahab , W. (1998). Elasticities of mode choice probabilities and market elasticities of demand: Evidence from a simultaneous mode choice/shipment-size freight transport model . *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 34(4), 257–266.
- Albalade, D., Bel, G., & Fageda, X. (2015). Competition and cooperation between high-speed rail and air transportation services in Europe. *Journal of Transport Geography*, 42, 166-174.
- Barabási, A.-L., & Pósfai, M. (2017). *Network science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Behrens, C., & Pels, A. (2012). Intermodal Competition in the London-Paris Passenger Market: High-speed Rail and Air Transport. *Journal of Urban Economics* , 71, 278–288.
- Beuthe, M., & Bouffieux, C. (2008). Analysing qualitative attributes of freight transport from stated orders of preference experiment. *Journal of Transport Economics and Policy*, 42 (1), 105-128.
- Bhadra, D. (2003). Demand for air travel in the United States :bottom-up econometric estimation and implications for forecasts by origin and destination pairs. *J. Air Transp*, 8(2), 19–56.
- Blauwens, G., & Van De Voorde , E. (1988). The valuation of time savings in commodity transport. *Int J Trans Econ/Riv Int Econ Trasp* (15), 77-87.
- Burgholzer, W., Bauer, G., Posset, M., & Jammerneegg, W. (2013). Analysing the impact of disruptions in intermodal transport networks: A micro simulation-based model. *Decision Support Systems*, 54 (4), 1580-1586.
- Clewlow, R., Sussman, J., & Balakrishnan, H. (2014). The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic. *Transport Policy*, 33, 136-143.
- Couture, V., Duranton, G., & Turner, M. (10 2018 г.). Speed. *The Review of Economics and Statistics*, 100(4), 725-739.
- de Jong , G. (2014). Mode Choice Models. В *Modelling Freight Transport* (стр. 117–141). Elsevier.
- de Jong, G., Tavasszy, L., Bates, J., Grønlandd, S., Huber, S., Kleven, O., . . . Schmorakh, N. (2016). The issues in modelling freight transport at the national level. *Case Studies on Transport Policy*, 4(1), 13-21.
- Dodgson, J. (1986). Benefits of changes in urban public transport subsidies in the major australian cities. *The Economic Record*, 62(2), 224–235.
- Du, W.-B., Zhou, X.-L., Jusup, M., & Wang, Z. (21 01 2016 г.). Physics of transportation: Towards optimal capacity using the multilayer network framework. 6(1), стр. 19059.

- European Commission. *Investments and Infrastructure: Quality of roads*. (2019). Получено из European Commission: https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/investments-infrastructure/quality-roads_en
- Fajgelbaum, P., & Schaal, E. (2020). Optimal Transport Networks in Spatial Equilibrium. *Econometrica*, 88(4), 1411-1452.
- Fearnley, N., Currie, G., Flügel, S., Gregersen, F., Killi, M., Toner, J., & Wardman, M. (2018). Competition and substitution between public transport modes. *Research in Transportation Economics*(69), 51-58.
- Feo-Valero, M., Garcí'a-Mene' dez, L., & Garrido-Hidalgo, R. (2011). Valuing freight transport time using transport demand modelling: a bibliographical review. *Transport Reviews* , 31(5) , 625–651.
- Floden, J. (2007). *Modelling Intermodal Freight Transport*. Получено из https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/17141/3/gupea_2077_17141_3.pdf
- Gastner, M., & Newman, M. (07 2006 г.). Optimal design of spatial distribution networks. *Physical Review E*, 74(1), 016117.
- Gundelfinger-Casar, J., & Coto-Millan, P. (2017). Intermodal competition between high-speed rail and air transport in Spain. *Utilities Policy*, 47, 12-17.
- https://optimaltransportnetworktoolbox_v.1.0.4b.zip/. (2019). Получено 08 11 2021 г., из drive.google.com:
https://drive.google.com/file/d/1q28zNkP_i6559jblIF0kitfKtv2Ufx4o/view
- Ivaldi, M., & Vibes, C. (2005). *Intermodal and Intramodal Competition in the Long-haul Passenger Transport Markets. Idei report 4. March*.
- Jensen, A. (1990). *Combined transport: systems, economics and strategies*.Stockholm, Swedish Transport Research Board (Transportforskningsberedningen).
- Kaliningrad. (2021). Получено 13 06 2021 г., из Geofabrik downloads:
<https://download.geofabrik.de/russia/kaliningrad.html>
- Key:highway. (2021). Получено 13 06 2021 г., из OpenStreetMap Wiki:
<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway>
- Li, L. (2021). Competition Between Railways and Other Transport Modes. B *Railways and Sustainable Low-Carbon Mobility in China*. Singapore: Springer.
- Lu, M., Chen, Y., Morphet, R., Lu, Y., & Li, E. (2019). The spatial competition between containerised rail and sea transport in Eurasia. *Palgrave Commun*(5).
- Martín, J., & Nombela, G. (2007). Microeconomic impacts of investments in high speed trains in Spain. *The Annals of Regional Science*, 41 (3), 715 -733.

- Milenković, M., Švadlenka, L., Melichar, V., Bojović, N., & Avramović, Z. (2018). SARIMA modelling approach for railway passenger flow forecasting. . *Transport*(33(5)), 1113-1120.
- Ortúzar, J., & Simonetti, C. (2008). Modelling the demand for medium distance air travel with the mixed data estimation method. *Journal of Air Transport Management*, 14(6), 297-303.
- Pekin, E., Macharis, C., Meers, D., & Rietveld, P. (2013). Location Analysis Model for Belgian Intermodal Terminals: Importance of the value of time in the intermodal transport chain. *Computers in Industry*, 64(2), 113-120.
- Planet OSM. (2021). Получено 13 06 2021 г., из OpenStreetMap: <https://planet.openstreetmap.org/>
- R: *A Language and Environment for Statistical Computing*. (2021). Получено 08 11 2021 г., из R-project.org: <https://www.R-project.org/>
- Roughgarden, T. (2005). *Selfish routing and the price of anarchy*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Saxin, B., Lamngård, C., & Flodén, J. (2005). *Meeting the Demand for Goods Transports - Identification of Flows and Needs Among Swedish Companies, Paper presented at NOFOMA 2005, Copenhagen, Denmark*.
- Shintania, K., Konings, R., & Imai, A. (2010). The impact of foldable containers on container fleet management costs in hinterland transport, Transportation Research Part E. *Logistics and Transportation Review*, 46 (5), 750–763.
- Stevens, P. (1974). *Patterns in nature*.
- Stinson, M., Pourabdollahi, Z., Livshits, V., Jeon, K., Nippani, S., & Zhu, H. (2017). 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*. . Vol. 6, № 4. P., 6 (4), 330–343.
- Wächter, A., & Biegler, L. (03 2006 г.). On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical Programming*, 106(1), 25-57.
- Woxenius, J. (2006). Temporal elements in the spatial extension of production networks. *GROWTH and Change*, 37(4), 526–549.
- Yi, Y.; Kim, E. (2018). Spatial economic impact of road and railroad accessibility on manufacturing output: inter-modal relationship between road and railroad. *Journal of Transport Geography*(66), 144-153.
- Аксентьев, А. А. (2020). Исследование рынка автомобильных грузоперевозок в России: ценовой аспект. *Вестник НГИЭИ*(10 (113)).

- Бусыгин В.П., Левин М.И., & Попова, Е. В. (2010). Моделирование конкуренции между муниципальными и частными предприятиями в отрасли автобусных перевозок. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление*(2), 62-71.
- Гимади, И. Э., Добродей, В., & Матушкина, Н. (2005). Моделирование развития транспортного комплекса региона. *Экономика региона*(3). *Интегрированная транспортная система*. (2018). Получено из Центр экономики и инфраструктуры. ЦСР: <https://infraeconomy.com/data/files/integrirovannaya-transportnaya-sistema-2018.pdf>
- Мамаев, Э. А. (2006). *Моделирование региональных транспортных систем в условиях конкуренции: дис. доктор технических наук*. Москва.
- Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог*. (2012). Получено 29 03 2021 г., из Федеральное дорожное агентство (Росавтодор): <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/22-odm-2182020-2012.pdf>
- Министерство транспорта Российской Федерации. (2019). *ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ*. (Министерство транспорта Российской Федерации) Получено 25 02 2021 г., из <https://asutk.ru/SitePages/home.aspx>
- Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 18.07.2018 № 266 «Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования»*. (б.д.). Получено 11 06 2021 г., из Официальный интернет-портал правовой информации: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201808090017>
- Тарифное руководство № 4*. (2021). Получено 13 06 2021 г., из Совет по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества: <https://www.sovetgt.org/index.php?link=65>

**В СЕРИИ ПРЕПРИНТОВ
РАНХиГС РАССМАТРИВАЮТСЯ
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ
К СОЗДАНИЮ, АКТИВНОМУ
ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ИННОВАЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ
СФЕРАХ ЭКОНОМИКИ
КАК КЛЮЧЕВОГО УСЛОВИЯ
ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**



РАНХиГС
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ