

УДК 656.02

Развитие методов математического моделирования для формирования транспортно-градостроительной структуры городских агломераций

Л. А. Лосин^{1,2}, Н. А. Калюжный¹

¹Институт проблем региональной экономики РАН, Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Серпуховская ул., 38

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Лосин Л. А., Калюжный Н. А. Развитие методов математического моделирования для формирования транспортно-градостроительной структуры городских агломераций // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 455–466. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-455-466

Аннотация

Цель: Показать возможность организации комплексной методологии формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций. **Методы:** Математическое моделирование, методы обработки больших объемов данных, методы геоинформационного анализа. **Результаты:** Приведены основные алгоритмы рассматриваемых математических моделей, которые охватывают спектр решаемых задач по развитию территориально-транспортной структуры: от стратегического планирования до экономического обоснования. Предложена последовательность использования методов моделирования для построения территориально-транспортной структуры городских агломераций, а также для решения иных задач в сфере транспортно-градостроительного планирования. Представленная методология основана на комплексном анализе существующих направлений и моделей транспортно-градостроительного планирования и моделирования. **Практическая значимость:** Объединение математических моделей в комплексной методологии формирования территориально-транспортной структуры городов и агломераций является важным научно обоснованным решением, внедрение которого может внести значительный вклад в территориальное развитие.

Ключевые слова: Математическое моделирование, транспортное планирование, агломерация, городской пассажирский транспорт, транспортная сеть, транспортно-пересадочный узел, матрица корреспонденций.

Введение

Методы математического моделирования являются признанным инструментом решения задач транспортно-градостроительного планирования городов и регионов. Такие методы уже на протяжении многих десятилетий находят свое применение для обоснования проектных решений по развитию территории и транспортной инфраструктуры в составе разработки

документов стратегического, территориального и транспортного планирования. При этом сфера применения моделирования не ограничивается только рамками проектной документации: такие подходы используются при проведении научных исследований в сфере градостроительства и экономической географии, для массовой оценки городской территории и объектов недвижимости и т. д. [1].

В петербургской (ленинградской) практике транспортно-градостроительного планирования также используются методы математического моделирования, в том числе на основе собственных разработок в части постановок задач, создания алгоритмического и программного обеспечения. Эффективность деятельности по разработке и применению методов моделирования стала возможной благодаря научному сотрудничеству ученых-математиков — авторов алгоритмов и программного обеспечения, а также практиков — транспортников-градостроителей, выступавших как постановщики задач и пользователи моделей [2]. История этих исследований и результаты работ по формированию транспортно-градостроительных моделей нашли свое отражение в ряде монографий и научных публикаций [3, 4].

Последовательность расчетных процедур при моделировании интенсивности потокораспределения в рамках города (агломерации) строится на основе так называемой четырехэтапной схемы моделирования (FSM), являющейся своего рода стандартом моделирования на макроуровне [5, 6]. При этом в практике транспортно-градостроительного планирования применяется, как правило, сценарный (или вариантный) подход, при котором путем обработки на модели различных вариантов проектных решений осуществляется выбор оптимального решения на основе группы критериев. Такой методический подход при всех его преимуществах не полностью раскрывает поле возможностей методов моделирования.

Публикации ряда авторов демонстрируют критическое отношение к привычным методическим подходам, отмечая теоретические, эксплуатационные и функциональные группы проблем современных методик применения методов моделирования. В частности, отмечается избыточная полнота информационной базы и сложность алгоритмического обеспечения [7, 8]. Использование менее подробной информационной

базы моделирования может дать возможность при относительно небольших затратах ресурсов получить результаты, востребованные на уровне понимания общих закономерностей развития городов и их транспортных систем. Так, анализ направлений развития территории возможен на уровне матриц межрайонных корреспонденций, показывающих территориальное распределение спроса на передвижения на уровне расчетных районов или других территориальных единиц [9].

Описание комплекса моделей

В последние годы в рамках расширения спектра решаемых задач был разработан ряд новых моделей и методик, направленных на решение задач транспортного и градостроительного планирования. Особенностью этих моделей стало то, что их направленность сконцентрировалась на укрупненном анализе транспортных систем, что позволило проводить анализ базовых параметров транспортно-градостроительной структуры городов (агломераций) без избыточной детализации информационной базы. Решаемые задачи при использовании таких моделей направлены на оптимизацию распределения городских передвижений по способам (видам), синтез сетей общественного транспорта, а также анализ приоритетности развития городских территорий. В частности, получили развитие досетевые модели расчета транспортного спроса, позволяющие осуществлять расчет параметров функционирования транспортной системы города (агломерации) на предварительных этапах разработки транспортно-градостроительной документации (табл. 1) [10].

Как указано выше, применение подобных моделей позволяет расширить спектр задач, решаемых на основе методов математического моделирования. Важно, что все указанные модели можно объединить в единый комплекс, позволяющий решать ряд взаимосвязанных транспор-

Таблица 1. Сравнение сетевого и досетевого подходов к расчету спроса на межрайонные передвижения

Метод расчета матриц межрайонных передвижений	Сетевой подход (модель сетевого уровня)	Досетевой подход (модель досетевого уровня)
Определение затрат времени между пунктами отправления и прибытия	С учетом скоростных параметров элементов транспортной сети	На основе среднего уровня транспортного обслуживания
Факторы, влияющие на распределение корреспонденций	– взаиморасположение потокообразующих и потокопоглощающих центров; – конфигурация и параметры транспортной сети; – поведенческие факторы (функция тяготения)	– взаиморасположение потокообразующих и потокопоглощающих центров; – поведенческие факторы (функция тяготения)

Таблица 2. Основные модели и их характеристики

Модель	Методы моделирования	Результаты моделирования	Публикации результатов
Модели оптимизации распределения передвижений по способам (видам)			
Модель влияния соотношения между индивидуальным и общественным транспортом на параметры транспортной системы	Досетевой расчет матриц корреспонденций, совмещенный с сетевым расчетом потоков в сети индивидуального общественного транспорта	Зависимости интенсивности потоков, объемов пассажирской работы, дальностей и скоростей передвижения от распределения долей между индивидуальным и общественным транспортом. Оценка наиболее эффективного соотношения между индивидуальным и общественным транспортом	[11]
Модель оптимизации распределения пассажирских корреспонденций по видам транспорта	Решение «энтропийной» задачи распределения долей по видам транспорта, совместно с досетевым расчетом матриц корреспонденций	Вероятности распределения корреспонденций по видам транспорта в масштабе всей транспортной системы агломерации	[10]
Модели синтеза сетей городского общественного транспорта			
Модель синтеза сети общественного транспорта (формирования каркаса сети общественного транспорта)	Досетевой расчет матриц корреспонденций и распределение пассажиропотоков на регулярной сетке при задании условия объединения потоков	Трассировки линий общественного транспорта с градацией по интенсивности пассажиропотоков	[12]
Модель транспортного спроса и потокораспределения на условной сети	Досетевой расчет матриц корреспонденций и распределение потоков на регулярной сетке при задании начальных скоростей	Структура (каркас) линий общественного транспорта	[13]
Модель формирования потокораспределения на условной сетке для построения сети скоростного транспорта	Досетевой расчет матриц корреспонденций и применение методов синтеза сети общественного транспорта на условной сетке	Определение объемов перевозок и направлений трассировок линий скоростного транспорта в соответствии с прогнозируемым спросом	[14]
Модель определения приоритетных локаций для размещения системы транспортно-пересадочных узлов (ТПУ)	Досетевой расчет матриц и пошаговая процедура расчетов пассажиропотоков на сети общественного транспорта при условии изменения затрат времени на пересадку в узлах	Классификация приоритетных локаций размещения ТПУ по уровню востребованности в рамках единой системы общественного транспорта агломерации	[15]

Окончание табл. 2

Модель	Методы моделирования	Результаты моделирования	Публикации результатов
Модели анализа приоритетности развития городских территорий			
Модель выявления городских территорий с недостаточным уровнем транспортного обслуживания	Совместное использование сетевого и досетевого подходов к расчету матриц корреспонденций	Классификация расчетных районов по уровню транспортного обслуживания на основе приоритета выравнивания территориальной дифференциации	[16]
Модель распределения корреспонденций по уровню транспортного обслуживания с учетом их классификации по топологическим признакам	Сетевой расчет матриц корреспонденций при классификации внутриагломерационных связей по топологическим признакам	Значения объемов транспортного спроса и пассажирской работы по видам внутриагломерационных связей	
Модель оценки потенциала полицентричности урбанизированных территорий на основе анализа спроса на пассажироперевозки	Сетевой расчет матриц корреспонденций при пошаговом изменении среднего времени передвижения по сети	Классификация расчетных районов по потенциалу организации на их базе субцентров («автономных» районов)	[17]
Модель экономической оценки территорий объектов транспортной инфраструктуры	Сетевой расчет матриц корреспонденций для обоснования рентных коэффициентов для всей совокупности земельных участков объектов транспортной инфраструктуры	Экономический потенциал территории объектов транспортной инфраструктуры	[18]

тно-градостроительных задач агломерационного уровня. Целью такого объединения может стать комплексная методология формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций как системно связанная совокупность частных методов и методик. Все описываемые модели объединяет единый объект исследования — городские агломерации и их транспортные системы. Далее представлен перечень разработанных и апробированных моделей (табл. 2); расчетные эксперименты на этих моделях выполнены для Санкт-Петербургской городской агломерации.

На рис. 1 представлено соответствие разработанных моделей основным уровням транспортно-градостроительного планирования, определенным федеральными нормативно-правовыми документами. Под стратегическим транспортным

планированием понимается определение целей, задач и направлений перспективного долгосрочного развития территориальной единой транспортной системы, объединенной в данном случае территорией Санкт-Петербургской городской агломерации [19].

Модели оптимизации распределения передвижений по способам (видам)

Данная группа моделей дополняет известные методики распределения передвижений по видам транспорта. В группу объединены модели, направленные на поиск оптимального распределения передвижений как между индивидуальным и общественным транспортом, так и между отдельными видами общественного транспорта.

В модели влияния соотношения между индивидуальным и общественным транспортом на

Стратегическое транспортное планирование
• Модель влияния соотношения между индивидуальным и общественным транспортом на параметры транспортной системы • Модель оптимизации распределения пассажирских корреспонденций по видам транспорта
Территориальное планирование
• Модель выявления городских территорий с недостаточным уровнем транспортного обслуживания • Модель оценки потенциала полицентричности урбанизированных территорий на основе анализа спроса на пассажироперевозки
Транспортное планирование
• Модель синтеза сети общественного транспорта (формирования каркаса сети ГОТ) • Модель транспортного спроса и потокораспределения на условной сети • Модель формирования потокораспределения на условной сетке для построения сети скоростного транспорта • Модель определения приоритетных локаций для размещения системы ТПУ • Модель распределения корреспонденций по уровню транспортного обслуживания с учетом их классификации по топологическим признакам
Экономические обоснования
• Модель экономической оценки территорий транспортной инфраструктуры

Рис. 1. Основные модели и их соответствие уровням транспортно-градостроительного планирования

параметры транспортной системы ставится задача определить влияние соотношения индивидуального и общественного транспорта на параметры функционирования транспортной системы городской агломерации. Проведенный эксперимент базировался на сравнении вариантов распределения передвижений, заданных с определенным шагом. Реализуемый в модели подход показывает уровень эластичности транспортного спроса в зависимости от соотношения способов передвижений.

Модель оптимизации распределения пассажирских корреспонденций по видам транспорта основана на задании диапазонов эффективности каждого из видов общественного транспорта, представляемых в виде логонормальных распределений. Каждая корреспонденция в модели

представляется в виде последовательности элементарных передвижений в соответствии с заданной номенклатурой видов общественного транспорта. В модели реализуется разбиение каждой корреспонденции на элементы (участки) таким образом, чтобы средневзвешенная скорость всей корреспонденции была равна заданной. Решение задачи в модели реализовано на основе «энтропийного» подхода, дающего возможность выбрать разбиение, отвечающее заданной функцией распределения системе предпочтений.

Модели синтеза сетей городского общественного транспорта

Три из четырех моделей данной группы (табл. 2) основаны на формировании потоков на базе условной регулярной сетки, строящейся

с определенным шагом на всю территорию рассмотрения, т. е. на территорию городской агломерации. По сути, досетевой подход, применяемый для расчета транспортного спроса (построения матриц корреспонденций) в этих моделях, распространяется и на решение задачи формирования структуры потокораспределения, т. е. условно можно говорить о «дважды досетевом» подходе. Важно, что во всем цикле моделирования в этой группе моделей в составе исходного массива данных не используется фактическая или прогнозируемая транспортная сеть.

Результатом расчетов в этих моделях являются пассажиропотоки, «кристаллизующиеся» на условной регулярной сети (прямоугольной сетке с диагональными элементами). На основе предлагаемых методов моделирования систем городского общественного транспорта может быть сформирован базовый каркас транспортной сети, в первую очередь скоростной. Возможности предлагаемых методов заключаются в получении прогнозируемых параметров работы транспортных систем, демонстрирующих ситуацию наиболее полного раскрытия потенциала территории, т. е. формирование идеализированной структуры транспортного предложения. Сфера практического применения данной группы моделей — документы территориального планирования (генеральные планы), мастер-планы, программы развития транспортных систем городов и агломераций и т. д. Важно, что при использовании данного подхода не требуется задание трассировок линий различных видов транспорта.

Особое место в описываемой группе моделей занимает модель определения приоритетных локаций для размещения системы транспортно-пересадочных узлов. Модель основана на исследовании такой характеристики транспортных узлов, как «устойчивость узла», показывающей уровень их востребованности при заданной системе расселения и размещения мест приложе-

ния труда. Моделирование основано на пошаговом изменении задержек времени на вход в ТПУ, в результате чего определяются узлы со значительным, практически постоянным пассажиропотоком, что будет обеспечивать наибольшую эффективность функционирования транспортно-пересадочных узлов.

Модели анализа приоритетности развития городских территорий

Данная группа моделей направлена на исследования дифференциации территорий городских агломераций по различным признакам. Ключевым является использование факторов транспортной обеспеченности для классификации выделяемых в рамках исследований территориальных единиц — районов исследования.

В модели выявления городских территорий с недостаточным уровнем транспортного обслуживания исходя из приоритета выравнивания уровня транспортного обслуживания городской территории предлагаемый подход может использоваться при поиске и обосновании проектных решений по трассировке линий скоростного рельсового транспорта. Градация расчетных транспортных районов по уровню транспортного обслуживания базируется на сравнении объемов пассажирской работы, полученных с помощью различных подходов к расчетам матриц межрайонных передвижений: досетевым способом, сетевым способом или их комбинацией.

Модель распределения корреспонденций по уровню транспортного обслуживания с учетом их классификации по топологическим признакам основана на расчете матриц межрайонных передвижений, который может осуществляться как сетевым, так и досетевым способом. Полученные в ходе моделирования показатели дают представление о распределении корреспонденций в соответствии с типологией связей: радиальных, диаметральных, хордовых и т. д. На основе рас-

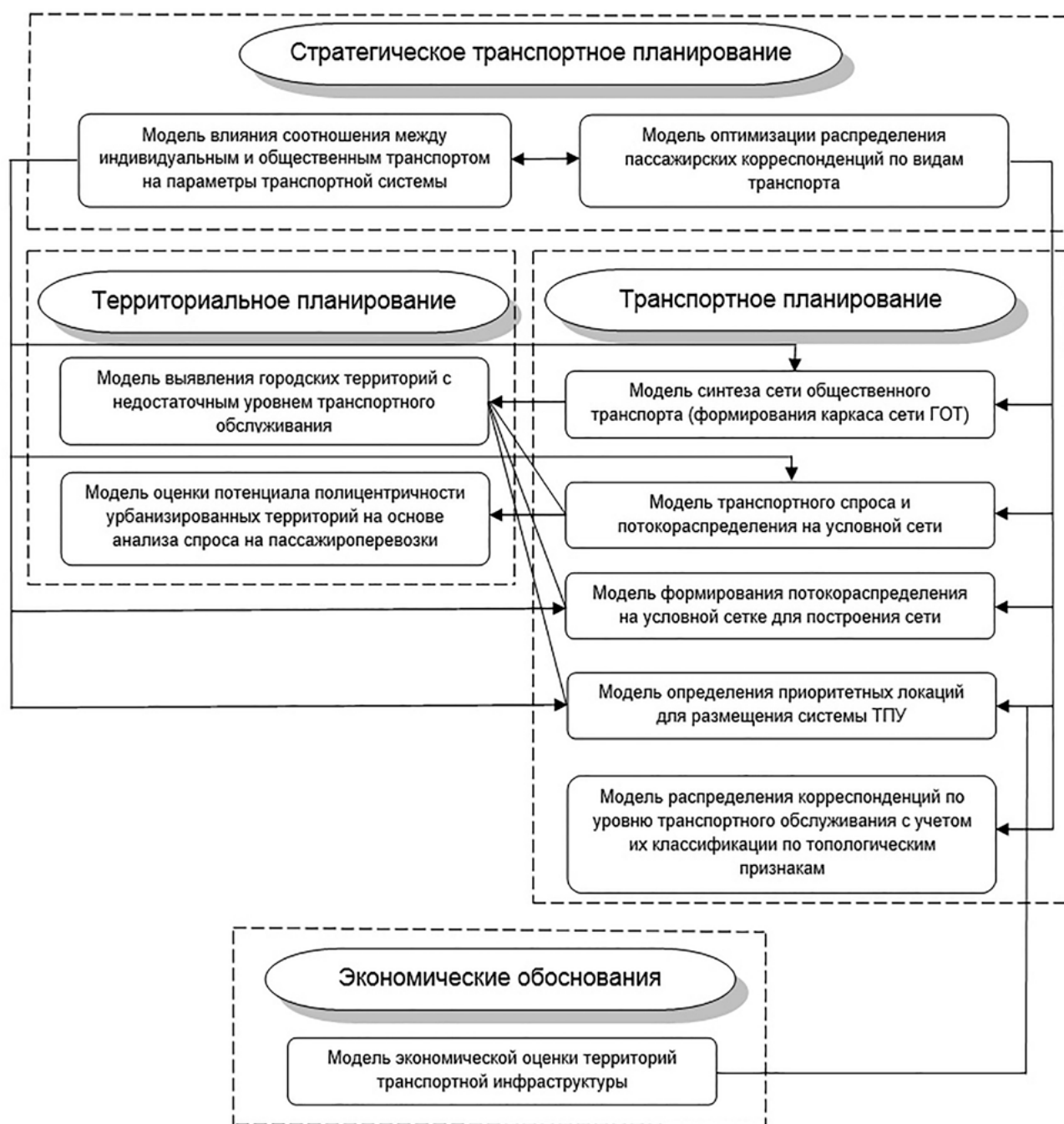


Рис. 2. Комплексная методология формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций

пределений объемов передвижений и объемов пассажирской работы могут быть сформулированы выводы о востребованности и приоритетности тех или иных типов внутригородских (внутриагломерационных) связей.

В основе модели оценки потенциала полицентричности урбанизированных территорий на основе анализа спроса на пассажироперевозки лежит понятие «коэффициента полицентричности», показывающего потенциал той или иной

территории с точки зрения эффективности организации на ее базе субцентра в рамках формирования полицентрической структуры города. Модель на основе анализа динамики показателей матриц межрайонных передвижений дает основание для классификации районов исследования по уровням потенциала полицентричности.

Модель экономической оценки территорий объектов транспортной инфраструктуры базируется на сравнении вводимых функций для кадастровой оценки территорий (например, функция территории «транспортно-пересадочный узел»). Поскольку в общем случае такая оценка базируется на величине доходности территории, в модели экономическая оценка территории объектов транспортной инфраструктуры основывается на определении «транспортных» факторов, имеющих «платежеобразующую природу», для обеспечения конкретного функционального назначения объекта. В модели нормируются значения этих факторов и дифференцируется базовый рентный коэффициент функции в соответствии со значением рентных коэффициентов факторов экономической оценки.

На основе анализа функционала представленных моделей предлагается последовательность их применения для формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций. Данная методология базируется на иерархии уровней планирования: стратегическое транспортное планирование, территориальное планирование, транспортное планирование и экономические обоснования развития территории (рис. 2).

Выводы

На основе сформированных моделей, ориентированных на решение транспортно-градостроительных задач на уровне общих показателей развития территории и транспортной системы,

может быть предложена комплексная методология формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций. В основе методологии лежит последовательность использования описываемых методов моделирования для построения транспортно-градостроительной структуры городских агломераций.

Список источников

1. Капский Д. В. Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 частях / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. — Минск: БНТУ, 2019. — Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. — 94 с.
2. Мягков В. Н. 55 лет лаборатории математического моделирования функционально-пространственного развития городов Ленинградского отделения ЦЭМИ — ЭМИ РАН — ИПРЭ РАН / В. Н. Мягков, Л. А. Лосин, Н. В. Булычева // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2024. — № 1(76). — С. 116–125.
3. Мягков В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования. / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров; отв. ред. Б. Л. Овсевич. — Л.: Наука, Ленингр. отделение, 1989. — 144 с.
4. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии / Ред. засл. деятель науки, д-р ф.-м. н. И. В. Романовский // Сборник трудов СПб ЭМИ РАН. № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. — СПб.: Нестор-История, 2015. — 84 с.
5. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов. — М.: Логос, 2013. — 188 с.
6. Ortuzar J. D. Modeling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen // John Wiley & Sons Ltd. — 2001. — 594 p.
7. Davidson P. A new approach to transport modelling — the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications / P. Davidson // Australasian Transport Research Forum, Proceedings 28–30 September 2011. — Adelaide. — 2011

8. McNally M. G. The Four Step Model / M. G. McNally // Department of Civil and Environmental Engineering and Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, U.S.A. — 2007.
9. Свердлин Л. И. Транспортные обоснования композиции генерального плана города / Л. И. Свердлин // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XI Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: АМБ, 2005. — С. 40–43.
10. Федоров В.П. Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне / В. П. Федоров, Л. А. Лосин // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 2(39). — С. 42–45.
11. Булычева Н. В. Исследование влияния параметров транспортной модели на результаты расчетов пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) / Н. В. Булычева, Д. В. Капский, Л. А. Лосин // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2023. — Т. 59. — № 3. — С. 253–264.
12. Федоров В. П. Формирование вариантов развития городских транспортных сетей: разработка метода / В. П. Федоров // Транспорт Российской Федерации. — СПб.: ООО «Т-Пресса», 2012. — № 3-4 (40-41). — С. 17–21.
13. Булычева Н. В. Моделирование системы общественного транспорта на основе пассажиропотоков, сформированных на условной сети / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2021. — № 2(65). — С. 86–92.
14. Булычева Н. В. Оценка роли метрополитена в структуре системы пассажирского транспорта в крупном городе / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2022. — № 3(70). — С. 93–102.
15. Калюжный Н. А. Информационно-программный комплекс Citraf и его применение для решения задачи по определению мест формирования транспортно-пересадочных узлов / Н. А. Калюжный, А. И. Лисенков, Л. А. Лосин // Вестник гражданских инженеров. — СПбГАСУ, 2018. — Вып. 5(70). — С. 174–181.
16. Булычева Н. В. Определение пассажирских корреспонденций с недостаточным уровнем транспортного обслуживания (на примере сети общественного транспорта Санкт-Петербурга) / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. — Минск: БНТУ, 2018. — С. 79–88.
17. Лосин Л. А. Определение потенциала полицентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта / Л. А. Лосин, Н. А. Калюжный // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 47–59.
18. Калюжный Н. А. Экономическая оценка территорий объектов транспортной инфраструктуры (на примере транспортно-пересадочного узла «Девяткино») / Н. А. Калюжный // Транспорт Российской Федерации. — 2020. — № 3-4(88–89). — С. 24–27.
19. Лосин Л. А. Стратегическое транспортное планирование развития Санкт-Петербургской городской агломерации / Л. А. Лосин, В. В. Солодилов // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2020. — № 1(60). — С. 84–93.

Дата поступления: 11.04.2025

Решение о публикации: 18.05.2025

Контактная информация:

ЛОСИН Леонид Андреевич — канд. техн. наук,
зав. лабораторией; nipigrad@yandex.ru
КАЛЮЖНЫЙ Николай Анатольевич — канд. техн.
наук, старший научный сотрудник;
nicholaskalyuzhny@gmail.com

Development of Mathematical Modelling Methods for Creating the Transport and Urban Planning Structure of Agglomerations

L. A. Losin^{1, 2}, N. A. Kalyuzhny¹

¹Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, 38, Serpuhovskaya str., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Losin L. A., Kalyuzhny N. A. Development of Mathematical Modelling Methods for Creating the Transport and Urban Planning Structure of Agglomerations. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 455–466. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-455-466

Summary

Purpose: To demonstrate the potential of a comprehensive methodology for the formation of the transport and urban planning structure of cities and agglomerations. **Methods:** Mathematical modelling, the processing of large data sets, and geoinformation analysis. **Results:** The primary algorithms of the mathematical models under consideration have been outlined. They combine a range of tasks for the development of the area transport structure from strategic planning to economic justification. The sequence of using modelling methods for constructing the territorial and transport structure of urban agglomerations, as well as for solving other tasks related to transport and urban planning, has been proposed. The methodology presented is based on a thorough analysis of existing trends and models in transport and urban planning and modelling. **Practical significance:** Incorporating mathematical models into a systematic approach for shaping the area and transport infrastructure of cities and agglomerations represents a significant scientific advancement. Implementing this approach can be instrumental in catalyzing the area development.

Keywords: Mathematical modelling, transport planning, agglomeration, urban transport, transport network, transport hub, matrix of correspondences.

References

1. Kapski D. V., Losin L. A. *Transport v planirovke gorodov: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsial'nosti 1-44 01 02 "Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya": v 10 chastyakh. Ch. 1: Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie* [Transport in urban planning: a teaching aid for students majoring in 1-44 01 02 "Traffic Organization": in 10 parts. Part 1: Transport planning: mathematical modeling]. Minsk: BNTU Publ., 2019, 94 p. (In Russian)
2. Myagkov V. N., Losin L. A., Bulycheva N. V. *55 let laboratorii matematicheskogo modelirovaniya funktsionalno-prostranstvennogo razvitiya gorodov Leningradskogo otdeleniya CEMI — EMI RAN — IPRE RAN* [55 years of the Laboratory of Mathematical Modeling of Functional and Spatial Development of Cities, CEMI — EMI RAN — IPRE RAN, Russian Academy of Sciences]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2024, Iss. 1(76), pp. 116–125. (In Russian)
3. Myagkov V. N., Palchikov N. S., Fyodorov V. P. *Matematicheskoe obespechenie gradostroitel'nogo proektirovaniya; otv. red. B. L. Ovsievich* [Mathematical support of urban planning; under general editorship of B. L. Ovsievich]. Leningrad: Nauka Publ., 1989, 144 p. (In Russian)
4. *Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii*. Red. zasl. deyatel' nauki, d-r f.-m. n. I. V. Romanovskiy [Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii. Ed.

Honored Scientist, Doctor of Physics and Mathematics I. V. Romanovsky]. *Sbornik trudov SPb EMI RAN. № 9. Matematicheskie modeli v issledovanii protsessov razvitiya gorodskoy sredy* [Collection of works of St. Petersburg Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences. № 9. Mathematical models in the study of urban development processes]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2015, 84 p. (In Russian)

5. Yakimov M. R. *Transportnoe planirovanie: sozдание transportnykh modeley gorodov* [Transport planning: creation of transport models of cities]. Moscow: Logos Publ., 2013, 188 p. (In Russian)

6. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. *Modeling Transport*. John Wiley & Sons Ltd, 2001, 594 p.

7. Davidson P. A new approach to transport modelling — the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications. Australasian Transport Research Forum, Proceedings 28–30 September 2011, Adelaide, 2011.

8. McNally M. G. The Four Step Model. Department of Civil and Environmental Engineering and Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, U.S.A., 2007.

9. Sverdlin L. I. *Transportnye obosnovaniya kompozicii general'nogo plana goroda* [Transport substantiation of the composition of the city master plan]. *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Yekaterinburg: AMB Publ., 2005, pp.40–43. (In Russian)

10. Fyodorov V. P., Losin L. A. *Metody matematicheskogo modelirovaniya dlya proektirovaniya gorodskoy transportnoy sistemy na dosetevom urovne* [Methods of mathematical modeling of the urban transport system designing at the pre-network level]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2012, Iss. 2(39), pp. 42–45. (In Russian)

11. Bulycheva N. V., Kapski D. V., Losin L. A. *Issledovanie vliyaniya parametrov transportnoi modeli na rezultaty raschetov passazhiropotokov (na primere Sankt-*

Peterburga) [Studying the influence of transport model parameters on the results of passenger traffic calculations (on the example of St. Petersburg)]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* [Proceedings of National Academy of sciences of Belarus. Physics and Mathematics series]. 2023, vol. 59, Iss. 3, pp. 253–264. (In Russian)

12. Fyodorov V. P. *Formirovanie variantov razvitiya gorodskikh transportnykh setey: razrabotka metoda* [Formation of options for the development of urban transport networks: development of a method]. *Transport of the Russian Federation* [Transport of the Russian Federation], 2012, № 3-4(40-41), pp. 17–21. (In Russian)

13. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Modelirovanie sistemy odschestvennogo transporta na osnove passazhiropotokov, sformirovannykh na uslovnoy seti* [Modeling of a municipal transport system on the basis of passenger flows formed on a conditional network]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2021, Iss. 2(65), pp. 86–92. (In Russian)

14. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Otsenka roli metropolitena v strukture sistemy passazhirskogo transporta v krupnom gorode* [Assessment of the role of the metro in the structure of the passenger transport system in a large city]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and development prospects]. 2022, Iss. 3(70), pp. 93–102. (In Russian)

15. Kalyuzhny N. A., Lisenenkov A. I., Losin L. A. *Informatsionno-programmnyy kompleks Citraf i ego primeneniye dlya resheniya zadachi po opredeleniyu mest formirovaniya transportno-peresadochnykh uzlov* [Information and software complex Citraf and its application to solve the problem of determining the locations of transport hubs]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. SPbGASU, 2018, Iss. 5(70), pp. 174–181. (In Russian)

16. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Opredeleniye passazhirskikh korrespondentsiy s nedostatochnym urovnem transportnogo obsluzhivaniya (na primere seti obschestvennogo transporta Sankt-Peterburga)* [Application

of methods of mathematical modeling to determine the location of transportation facility of cities (the case of the placement of transfer hubs in St. Petersburg)]. *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning], Minsk: BSTU Publ., 2018, pp.79–88. (In Russian)

17. Losin L. A., Kalyuzhny N. A. Opredelenie potentsiala policentrichnosti gorodskih rayonov na osnove matematicheskogo modelirovaniya system gorodskogo passazhirskogo transporta [Determination of the polycentricity potential of urban areas based on mathematical modeling of urban transport systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University], 2025, vol. 22, Iss. 1, pp. 47–59. (In Russian)

18. Kalyuzhny N. A. Ekonomicheskaya ocenka territoriy ob'ektov transportnoy infrastruktury (na primere transportno-pereadochnogo uzla “Devyatkino”) [Economic assessment

of the territories of transport infrastructure facilities (using the example of the Devyatkinno transport hub)]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2020, Iss. 3–4 (88–89), pp. 24–27. (In Russian)

19. Losin L. A., Solodilov V. V. Strategicheskoe transportnoe planirovanie razvitiya Sankt-Peterburgskoy gorodskoy aglomeratsii [The strategical transport planning of development of St. Petersburg city agglomeration]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2020, № 1(60), pp. 84–93. (In Russian)

Received: April 11, 2025

Accepted: May 18, 2025

Author's information:

Leonid A. LOSIN — PhD in Engineering, Laboratory Head; nipigrad@yandex.ru

Nikolai A. KALYUZHNY — PhD in Engineering, Senior Researcher; nicholaskalyuzhny@gmail.com