

УДК 656.13

Д. В. КАПСКИЙ, доктор технических наук, Белорусский национальный технический университет, г. Минск;
С. В. СКИРКОВСКИЙ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель

ОБОБЩЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТИ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

Современный город представляет собой чрезвычайно сложный, саморазвивающийся организм, пытающийся сделать свою транспортную систему более устойчивой, в частности, за счет развитой системы маршрутного пассажирского транспорта, которая позволяет устойчиво развиваться городу. Однако учитывая, что транспортная система города и городская логистика несут ответственность за повышенный уровень выбросов вредных веществ в атмосферу, городской шум, заторы на дорогах и аварийность, именно они должны стать основным направлением для непрерывного устойчивого экономического роста городских систем за счет оптимизированной системы маршрутного пассажирского транспорта. Именно такая система способна не генерировать, исключить излишние поездки на индивидуальном транспорте, повысить привлекательность маршрутного пассажирского транспорта и в целом мобильность населения, для чего необходимо правильно формировать такую сеть с учетом развития средств индивидуальной мобильности и немоторизованного транспорта.

Введение. Современный мир становится всё более урбанизированным. В течение последних 100 лет мир пережил быструю урбанизацию [1]. Начиная с 2007 года более половины населения мира живет в городах [2]. Согласно докладу ООН, посвященному изучению перспектив урбанизации, к 2050 году около 70 % жителей нашей планеты будут проживать в городах, что создаст новые вызовы к планированию городского пространства и стратегий бизнес-сообщества в плане обслуживания конечных потребителей (распределения товаров в розничных точках и обеспечение интернет-продаж), с одной стороны, и обеспечения рабочей силой предприятий, планирование развития общественного транспорта как стороны муниципалитетов, так и как совокупности коммерческих услуг (такси, аренда транспортных средств, коммерческие маршруты) – с другой. При этом, согласно данным Всемирного Банка, именно города и мегаполисы генерируют 80 % глобального ВВП и являются центрами экономического и социального взаимодействия. Однако на них также приходится и около 70 % глобальных выбросов углерода и более 60 % использования ресурсов [3]. Продолжающийся рост городского населения повлияет на расширение городских территорий, что увеличит спрос на грузовую и пассажирский транспорт. Несмотря на то, что урбанизация создает новые возможности как для мигрантов, так и для владельцев городского бизнеса, она также сопряжена с множеством проблем. В Республике Беларусь за последние 20 лет количество автомобилей увеличилось в 4 раза и превысило 3 млн единиц [4]. Этот рост вызвал ряд проблем, связанных с увеличением нагрузки на дорожную сеть, особенно в городах [5]. Снизилась скорость сообщения, ухудшились режимы движения, появились перегрузки, возросло количество аварий. Согласно итогам переписи населения 2019 года в Республике Беларусь проживают 9413446 человек [6]. Население Беларуси за 20 лет сократилось почти на 631,8 тыс. человек, при этом городских жителей стало больше. Так, количество городского населения увеличилось с 6961516 человек в 1999 г. до 7299989 в 2019 г., что составляет более 77,5 % от общей численности населения. Сельских жителей, наоборот, стало меньше примерно на 970 тыс. человек: с 3 083 721 до 2 113 457.

Именно поэтому качество транспортных систем выходит на первый план, принося не только положительные, но и отрицательные эффекты в городскую жизнь (рисунок 1).



Рисунок 1 – Подходы к оценке влияния автомобилизации на человека

Таким образом, это динамичное развитие городских территорий из-за быстрой урбанизации создает серьезные проблемы для предоставления транспортных услуг растущему населению. В связи с этим необходима трансформация городской логистики, требующая комплексного понимания транспортных, экономических, экологических и социальных аспектов для выработки устойчивых решений в сфере планирования и координации потоков товаров (грузов) и пассажиров, личного, маршрутного пассажирского и коммерческого (грузового) транспорта. Безусловно, это влечет за собой необходимость создания соответствующей инфраструктуры в черте города с учетом интересов всех заинтересованных сторон (жителей города, бизнес-сообщества, государственных структур, туристов и пр.), а также разработки четких критериев оценки эффективности (операционные затраты на логистику, вложения в инфраструктуру, экологические потери, экономические потери, социальные издержки, уровень сервиса и качества предоставляемых услуг пассажирам, и др.) и устойчивого развития транспортных систем и симбиотических городов в це-

лом, что невозможно без целостно сформированной системы городского пассажирского транспорта.

Методические подходы к построению сети городского маршрутного пассажирского транспорта (ГМПТ). В качестве примера расчетной схемы в данной статье рассматривается небольшой город (проектная численность населения по Генеральному плану – около 50 тыс. жителей), при этом представленные пояснения позволяют распространить методические подходы и на более крупные города. Структура предлагаемой расчетной схемы также рассматривается в упрощенном составе. В частности, приводится расчетная схема только для системы ГМПТ, хотя данный подход может с некоторыми изменениями использоваться и для расчета интенсивности движения автомобильного транспорта на улично-дорожной сети. Главное, предлагаемый подход учитывает, по возможности, все основные этапы транспортного планирования городов и агломераций. Иногда простые методики численной оценки оказываются востребованными для получения быстрых результатов, которые могут быть положены в основу предложений, разрабатываемых в составе документации территориального и транспортного планирования, а также при проведении научных исследований пространственного развития. Известен следующий порядок классической схемы расчета интенсивности потокораспределения, ставшей своеобразным стандартом для всех специалистов, занимающихся данной темой: генерация поездок; распределение поездок по транспортным районам (построение матрицы межрайонных корреспонденций); выбор способа передвижения; распределение поездок по сети (расчет потокораспределения в сети). Данная последовательность вычислительных процедур применима как для оценки современного состояния транспортных систем городов, так и для получения расчетных показателей функционирования транспортных систем на некоторую перспективу. В практической деятельности по градостроительству и транспортному планированию горизонт такой перспективы соответствует, как правило, расчетному сроку, на который разрабатывается документация. Именно такой подход и рассмотрен в настоящем издании: расчеты параметров функционирования системы ГМПТ осуществляются на базе оценки спроса на передвижения, который соответствует перспективной ситуации, определенной генеральным планом города.

Существует достаточно много аналогичных методик расчета транспортных систем городов, различающихся подробностью рассмотрения и набором учитываемых факторов. Многие из таких методик предлагаются для курсовых работ в различных высших учебных заведениях, направление обучения в которых связано с градостроительством и транспортным планированием. В основе описываемой в настоящей работе расчетной схемы лежат подходы, базовые положения которых разработаны М. С. Фишельсоном [7] – основателем советской научной школы транспортно-градостроительного планирования. Разработанные им методические подходы адаптированы к современным условиям на основе практического опыта авторов данной статьи. Основа методики – оценка (прогнозирование) транспортного спроса, определяющего проектные и организационные решения в части ГМПТ. При этом важно понимать, что парамет-

ры транспортного спроса сами могут являться объектом управления, но данный аспект находится вне зоны рассмотрения изучаемой методики.

Существенным допущением многих разработанных методик проектирования систем маршрутного пассажирского транспорта является то, что они ориентированы на создание систем ГМПТ в новых городах, планировочная структура которых задается в рамках разработки таких проектов. С точки зрения обучения навыкам транспортного планирования такой подход оправдан, но на практике появление новых городов – крайне редкое событие в современном градостроительстве. Поэтому в практической работе полученная в результате расчетов «идеализированная» транспортная система должна быть откорректирована с учетом особенностей сложившейся структуры ГМПТ и маршрутной сети, а также возможностей по реализации разработанных предложений.

Предлагаемая в издании расчетная схема состоит из следующих этапов. Анализ системы расселения, планировочной структуры и транспортной системы города; определение границы рассмотрения; построение системы транспортного районирования территории; прогноз уровня подвижности населения на маршрутном пассажирском транспорте; предварительное проектирование сети ГМПТ; прогноз численности населения по транспортным районам; прогноз количества мест приложения труда по транспортным районам; расчет параметров генерации поездок на маршрутном пассажирском транспорте; расчет матрицы межрайонных корреспонденций; построение картограммы (эпюры) пассажиропотоков; корректировка сети ГМПТ; расчет парка подвижного состава ГМПТ.

Результатом предлагаемой методики является определение базовых параметров функционирования системы городского маршрутного пассажирского транспорта: средней дальности поездок, объема парка подвижного состава, а также построение перспективной картограммы пассажиропотоков на транспортной сети, которая является основой для принятия проектных решений в части развития ГМПТ. Дополнительно представлены подходы по распределению перевозок по видам маршрутного пассажирского транспорта, расчету маршрутной сети, оценке эффективности транспортной системы.

В качестве исходной информации выступают документация территориального планирования (генеральный план), определяющая направления развития городской территории, а также документация социально-экономического развития, содержащая, в частности, экономические прогнозные показатели и прогнозную структуру занятости населения. Также в качестве исходной информации следует упомянуть параметры существующей системы ГМПТ и показатели транспортной подвижности. Указанные параметры образуют комплекс факторов, определяющих количество совершаемых передвижений и их распределение по транспортной сети города: потокообразующие, транспортные и поведенческие факторы.

Методы оценки транспортного спроса как основы проектирования системы ГМПТ базируются на исследовании замкнутой системы передвижений в городах. Выделение территорий городских агломераций можно

производить на основе следующих критериев [8]: высокая территориальная концентрация населения, производственной деятельности и объектов сферы услуг при значительной неоднородности территории по функциям и их плотности; достаточно высокая плотность городского населения и отсутствие значительных разрывов застройки; благоприятная временная транспортная доступность от окраин до центра агломерации (не более 1,5 часов), наличие транспортных коридоров, обеспечивающих успешное взаимодействие разных видов транспорта; значительная доля населения городских населенных пунктов пригородной зоны от общей численности городского населения агломерации (не менее 10 %); наличие массовых маятниковых трудовых, учебных, культурно-бытовых, деловых и рекреационных миграций; значительная доля трудоспособного населения, проживающего в пригородной зоне, но работающего в центре (ядре) агломерации (не менее 15 %); достаточно тесные связи по социально-бытовой и инженерно-технической инфраструктуре; преобладающая взаимодополняемость видов деятельности и территориальных единиц в городской агломерации (что предопределяет развитие тесных связей внутри агломерации); относительная целостность рынков труда, недвижимости, земли в пределах агломерации. Существуют также методики численных расчетов границ зон влияния на основе средневзвешенных показателей интенсивности связей. На рисунке 2 приведено схематичное представление границ зоны влияния (агломерации) города-центра [9].

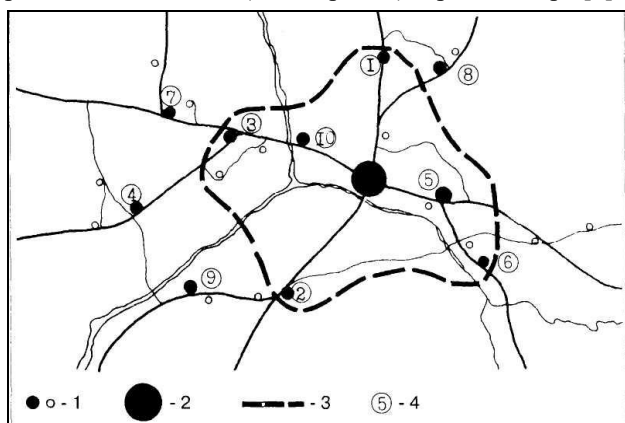


Рисунок 2 – Определение границ зоны влияния города-центра [9]:

1 – населенные пункты; 2 – город-центр; 3 – границы зоны влияния города-центра; 4 – номер населенного пункта

На практике сбор информации о территории и транспортной системе в границах агломерации (зоны влияния) может вызывать определенные затруднения, так как статистические данные и данные иных информационных источников группируются по административно-территориальным единицам, границы которых, как правило, не совпадают с границами агломераций. Кроме того, при расчете системы маршрутного пассажирского транспорта на перспективу используемые в качестве источника исходной информации документы территориального планирования также разрабатываются в пределах административных или муниципальных границ. Таким образом, процедура сбора исходной информации может потребовать изучения документации на смежные административно-территориальные единицы,

находящиеся в границах агломерации. Отдельно следует обратить внимание на ситуации, при которых рассматриваемый город входит в состав агломерации более крупного города-центра. В этих случаях расчет спроса на передвижения должен учитывать внешние по отношению рассматриваемого города передвижения.

Построение системы транспортного районирования территории. Для оценки (прогнозирования) спроса на передвижения рассматриваемая территория разбивается на расчетные транспортные районы. Суммарное количество транспортных районов в первом приближении можно определить исходя из расчета: один транспортный район на 10 тысяч жителей (хотя при транспортном районировании не нужно стремиться к равенству районов по численности населения). Важно отметить, что указанный норматив относится, в первую очередь, к методике районирования для решения расчетных задач в сфере индивидуального транспорта. Поскольку мы рассматриваем расчетную схему, сразу ориентированную на перспективную ситуацию, в качестве основы для построения системы транспортного районирования должна выступать схема функционального зонирования генерального плана (рисунок 3).

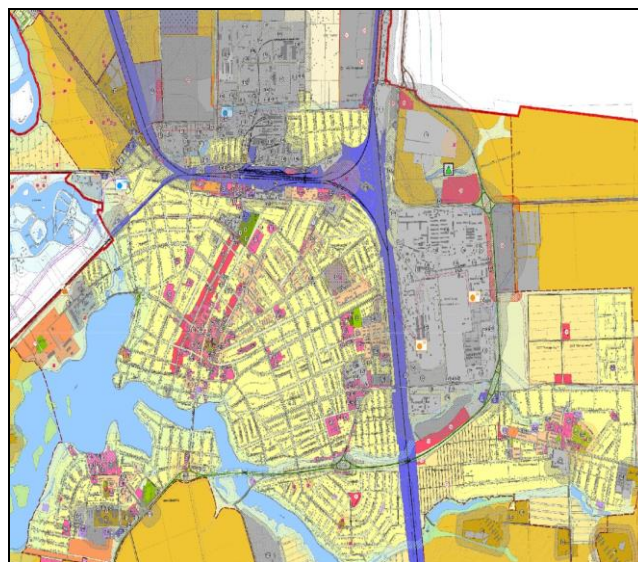


Рисунок 3 – Схема функционального зонирования Генерального плана города

Рекомендуется следующий порядок в определении границ транспортных районов. Выделить внешнюю границу системы транспортного районирования. Выделить основные линейные гидрографические объекты (крупные реки, цепочки озер и т. д.). Выделить элементы рельефа, разделяющие территорию на изолированные участки (горы, цепочки холмов и т. д.). Выделить магистральные железные дороги. Выделить крупные разрывы между застроенными и предполагаемыми к застройке территориями. Данный подход позволит получить укрупненную систему районирования. Исходя из общего количества транспортных районов оставшуюся территорию следует разделить на районы согласно принципам функциональной однородности и размещения «центра тяжести» районов на основных транспортных магистралях (рисунок 4).

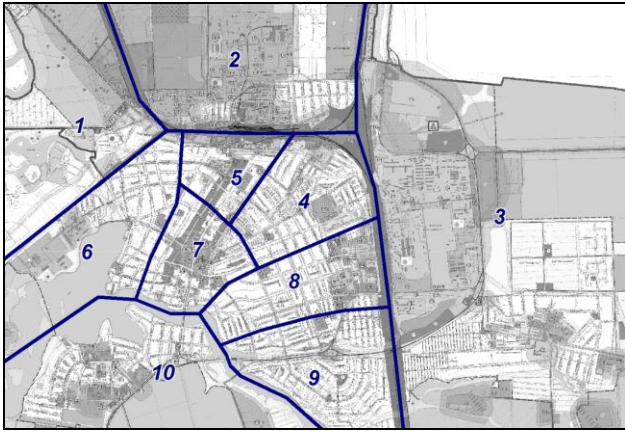


Рисунок 4 – Система транспортного районирования

Все транспортные районы должны иметь идентификационные номера, последовательность нумерации районов обычно осуществляется по правилу меандра или спирали. После разбивки территории на районы в каждом из них должен быть определен центроид (характеристический центр). В качестве такого центра тяжести может быть принят геометрический центр площади района или, в случае значительной неравномерности функционального зонирования, центр ареала жилой или производственной застройки. Внешние районы (кордоны) в рассматриваемой расчетной схеме не учитываются.

Прогноз уровня подвижности населения на городском маршрутном пассажирском транспорте. Переход от численности населения и количества мест приложения труда к показателям «отправлений» и «прибытий» в единицу времени может осуществляться через величину подвижности на маршрутном пассажирском транспорте. В целом объем отправок и прибытий для трудовых передвижений в утренний максимальный час определяется по формулам

$$P = Nk_{\text{сам}}V_{\text{ГМПТ}}k_{\text{ч}} / 365; \quad (1)$$

$$Q = MV_{\text{ГМПТ}}k_{\text{ч}} / 365, \quad (2)$$

где N , M – объем отправок и прибытий соответственно в утренний максимальный час, пас./ч; $k_{\text{сам}}$ – доля самостоятельного населения; $V_{\text{ГМПТ}}$ – уровень подвижности населения на ГМПТ, поездок на жителя в год; $k_{\text{ч}}$ – доля утреннего максимального часа в сутках.

Сама величина подвижности на маршрутном пассажирском транспорте зависит от ряда факторов, таких как уровень автомобилизации, плотность населения, средний годовой доход на душу населения. На практике для оценки величины подвижности можно использовать эмпирические зависимости, например:

$$V_{\text{ГМПТ}} = 391 + 231 \cdot \ln \delta_n - 34,9(0,705 \cdot e^{0,0057A}) + 0,982(0,705 \cdot e^{0,0057A})^2, \quad (3)$$

где δ_n – плотность населения, тыс. жит./км²; A – уровень автомобилизации населения, авт. на 1000 жит.

Показатели подвижности в городах меняются со временем; ниже приведены некоторые методы прогнозирования этих показателей [10, 11].

1 Моделирование рядов динамики транспортной подвижности. Данный метод предполагает экстраполяцию с учетом основных факторов, таких как динамика коэффициента пересадочности, влияние временного населения, изменение транспортного поведения и т. д.

2 Моделирование на основе теории минимизации транзакционных издержек в перемещениях. Транзакционные потери, связанные с осуществлением внутригородской подвижности, имеют временную и стоимостную составляющие, причем стоимость перемещения является платой за экономию его времени, что позволяет говорить о единой сущности данных составляющих. Данный метод основан на положениях институциональной экономической теории, которая трактует транзакционные издержки как эквивалент стоимости дополнительной услуги, позволяющей сократить время транзакции.

3 Метод сравнительных аналогий.

Предварительное формирование топологической структуры сети ГМПТ. Одной из процедур расчетной схемы является построение предварительной сети ГМПТ (в предлагаемом примере рассматриваются только автобусы). На данной предварительной сети будет производиться построение картограммы пассажиропотоков.

Принципы построения предварительной сети.

1 Все основные пункты тяготения пассажиров (вокзалы, аэропорты, крупные торговые комплексы, административные здания, зоны отдыха и т. д.), жилые микрорайоны и производственные зоны связываются транспортными линиями, по возможности, по кратчайшим расстояниям.

2 Линии транспорта по возможности трассируются вблизи центра застройки района.

3 Основные линии транспорта проектируются по магистральным улицам и улицам, допускающим пропуск ГМПТ.

4 Необходимо обеспечить минимизацию длины сети ГМПТ при условии максимального обслуживания территории города.

Кроме того, расстояние между линиями ГМПТ нужно принимать таким, чтобы величина пешеходного подхода к ним не превышала 500 метров. Необходимо также избегать сложных транспортных узлов, ограничивающих пропускную способность в узлах пересечения.

На рисунке 5 представлена предварительная сеть ГМПТ, а также территория, удовлетворяющая требованиям по обеспечению 500-метровой пешеходной доступности линий ГМПТ.

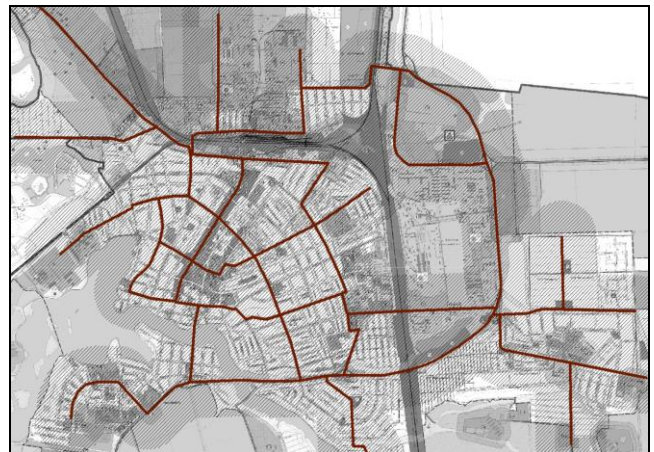


Рисунок 5 – Схема предварительной сети городского маршрутного пассажирского транспорта (штриховкой показаны зоны 500-метровой пешеходной доступности)

Для проверки целесообразно вычислить плотность сети ГМПП, которая должна находиться в пределах норматива:

$$\delta_d = L_{\text{застр}}/S_{\text{застр}} = 1,5 - 2,5 \text{ км}^2, \quad (4)$$

где $L_{\text{застр}}$ – суммарная длина сети в пределах застроенных или предполагаемых к застройке территорий, км; $S_{\text{застр}}$ – площадь застроенных или предполагаемых к застройке территорий, км².

Заключение. Приведен обобщенный подход к решению задач формирования сети городского пассажирского транспорта. Приведен перечень исходных данных для формирования сети пассажирского транспорта в крупном городе с учетом различных особенностей ее формирования и развития города, а также мобильности населения. В рассматриваемом примере плотность сети ГМПП – $58,5/17,1 = 3,4 \text{ км/км}^2$, что превышает рекомендуемые значения. Но поскольку в городе преобладает усадебная застройка, то такое превышение может быть оправдано с учетом необходимости соблюдения нормативной пешеходной доступности (см. рисунок 5). Практически все территории жилой и производственной застройки находятся в зоне нормативной пешеходной доступности. Поскольку городская логистика является междисциплинарным и симбиотическим предметом – сложнейшим социально-экономическим процессом, затрагивающим различные вопросы планирования и управления как системами городского грузового, так и пассажирского транспорта, то ее можно определить как процесс оптимизации транспортно-логистической деятельности государственных предприятий и частных компаний с учетом транспортной среды, загрузки дорог, потребления (сокращения затрат) энергии для синергетического эффекта по снижению негативного воздействия транспорта на жителей города [11, 12].

Список литературы

1 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: The 2014 revision, (ST/ESA/SER.A/366). – New York : Author, 2015.

Получено 11.10.2021

D. V. Kapski, S. U. Skirkouski. Generalized approaches to solving the problems to forming a network of urban passenger transport.

A modern city is an extremely complex, self-developing organism trying to make its transport system more stable, in particular, due to the developed system of route passenger transport, which allows the city to develop sustainably. However, considering that it is the transport system of the city and urban logistics that is responsible for the increased level of emissions of harmful substances into the atmosphere, urban noise, traffic congestion and accidents, it should become the main direction for continuous sustainable economic growth of urban systems due to an optimized system of route passenger transport. It is such a system that is able to generate unnecessary trips, eliminate unnecessary trips on individual transport, increase the attractiveness of route passenger transport and, in general, the mobility of the population, for which it is necessary to correctly form such a network taking into account the development of means of individual mobility and non-motorized transport.

2 **Chester, M. V.** Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains / M. V. Chester, A. Horvath. – Environ. Res. Lett. 2009, 4.

3 Цель 11: Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.un.org/sustainable development/ru/cities/>. – Дата доступа : 10.02.2021.

4 Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2020 году : аналитический сб. / сост. : Д. М. Корзюк ; под общ. ред. Ю. Г. Назаренко. – Минск : МВД Респ. Беларусь, 2021. – 94 с.

5 **Капский, Д. В.** Методология повышения качества дорожного движения : [монография] / Д. В. Капский. – Минск : БНТУ, 2018. – 372 с.

6 Подведены итоги переписи населения Республики Беларусь 2019 года [Электронный ресурс] / Новости PRAVO.BY. – Режим доступа : <https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2020/september/54414/>. – Дата доступа : 10.02.2021.

7 **Овечников, Е. В.** Городской транспорт : учеб. пособие для вузов / Е. В. Овечников, М. С. Фишельсон. – М. : Высш. шк., 1976. – 352 с.

8 **Лосин, Л. А.** Административно-территориальные преобразования и формирование локальных центров расселения на территории Санкт-Петербургской городской агломерации / Л. А. Лосин, В. В. Солодилов, Г. П. Ляпунова // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. – № 2 (61). – 2020.

9 **Сосновский, В. А.** Прикладные методы градостроительных исследований / В. А. Сосновский, Н. С. Русакова. – М. : Архитектура-С, 2006. – 112 с.

10 Расчет транспортной подвижности населения Санкт-Петербурга с использованием городского маршрутного пассажирского и индивидуального пассажирского транспорта : материалы по обоснованию проектных решений Генерального плана Санкт-Петербурга / отв. испол. В. В. Солодилов. – СПб.: ЗАО «Петербургский НИПИГрад», 2004.

11 **Капский, Д. В.** Транспорт в планировке городов : пособие : в 10 ч. / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. – Минск : БНТУ, 2019. – Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. – 94 с.

12 Транспортное моделирование и оценка условий дорожного движения с использованием навигационной информации : [монография] / Д. В. Капский [и др.]. – Минск : Капитал Принт, 2018. – 144 с.