
ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЩЕСТВА

УДК 911.3

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ПАССАЖИРОПОТОКА СТАНЦИЙ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

© 2025 г. И. В. Киселев*

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: schwertberg98@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 18.03.2025 г.

Принята к публикации 31.03.2025 г.

В тексте обсуждается гипотеза о том, что расположение станций Московского метрополитена влияет на изменчивость пассажиропотока во времени. Данное предположение возникло, поскольку установлено, что в силу особенностей пространственной структуры города на пассажиропоток в центральной части Москвы влияет большее число факторов, чем на станции на периферии города, вследствие чего пассажиропоток станций в центре города должен быть более неравномерным во временной динамике. В исследовании используются топологические и статистические методы для подтверждения этой гипотезы. Положение каждой станции в пространстве рассчитывается с использованием показателя центральности по близости, а в качестве параметров для анализа выбраны два показателя: изменчивость пассажиропотока во времени (волатильность), рассчитанная с помощью коэффициента вариации, и относительное изменение объемов пассажиропотока между началом и концом исследуемого периода. Результаты показали, что станции с наибольшей волатильностью расположены хаотично, однако станции со средней и низкой волатильностью образуют более компактные пространственные группы в соответствии с центр-периферийным градиентом. Относительное изменение пассажиропотока за период исследования более детерминировано положением станций: большая часть станций в центральной части ядра агломерации демонстрирует снижение пассажиропотока, в то время как на окраине наблюдается замедление темпов спада или даже рост. Сделан вывод о том, что пространственное расположение станций является важным фактором, который следует учитывать при прогнозировании пассажиропотока, поскольку на станции, расположенные в центре города, влияет больше факторов, чем на станции на окраинах, что в конечном итоге влияет на волатильность.

Ключевые слова: география транспорта, пассажиропоток, метрополитен, Москва, пространственно-временной анализ

DOI: 10.7868/S2658697525030047

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ДАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах отечественных специалистов по географии транспорта традиционно больше внимания уделяется таким темам, как комплексное изучение территориальных транспортных систем, транспортно-географическое положение и транспортная доступность, анализ морфологии транспортных сетей и др. На их фоне изучение пространственных свойств пассажиропотока, тем более городских транспортных систем, выглядит заметно менее изученной проблемой.

Впервые в отечественной географии транспорта на пассажирский поток, рассматриваемый как один из ключевых объектов исследования в области географии транспорта, обратил внимание С.В. Бернштейн-Коган (1930). В своем основополагающем труде он преимущественно анализирует грузовые потоки в СССР и крупнейших капиталистических странах в конце 1920-х годов. Г.А. Гольц (1981) уделял значительное внимание изучению пассажиропотоков. Ключевым результатом является установление пространственно-временного изоморфизма городских систем: границы агломерации имеют временные

ограничения, а размер агломерации пропорционален скорости транспортного сообщения. Строительство скоростных путей может значительно увеличить радиус агломерации. Практические вопросы организации транспортных систем с учетом пространственных закономерностей распределения пассажиропотока в городах поднимались в работах М.Н. Беленького (1974). Проблемы картографирования пассажиропотока в системе метрополитена Санкт-Петербурга изучены Т. Балтыжаковой и А. Романчиковым (Baltyzhakova and Romanchikov, 2021). Установлено, что существующие способы представления данных о пассажиропотоке не позволяют в полной мере понять его пространственное распределение и связь с городской средой. Поэтому в данной статье предлагается использовать различные методы визуализации для пространственного анализа данных о пассажиропотоке.

За последние полтора десятилетия возможности изучения пространственной структуры пассажиропотоков заметно возросли благодаря появлению новых источников данных: транспортных смарт-карт, видеоаналитики, сотовой связи и т.д. Данные смарт-карт обладают значительным потенциалом для улучшения нашего понимания сложных пространственных явлений, таких как пассажиропоток на общественном транспорте (Bagchi and White, 2005) Они позволяют точно идентифицировать место начала поездки каждого пассажира метрополитена. В настоящей работе были использованы именно такие данные.

По мере накопления эмпирического материала стали появляться работы, в которых изучаются не только пространственные, но и временные закономерности распределения пассажиропотока. В одной из первых работ анализировалось пространственно-временное распределение пассажиропотока в нью-йоркском метрополитене, изучались сдвиги между будними и выходными днями (Barry et al., 2002). Связь недельных циклов и пространственного распределения пассажиропотока также была изучена на примере автобусной системы Сингапура (Sun et al., 2013).

Примером анализа данных транспортных смарт-карт служит работа (Sun et al., 2016). В ней пассажирские потоки, а также показатель устойчивости–изменчивости (известный в англоязычной литературе как *time travel reliability*) в метрополитене Шанхая оцениваются с помощью автоматически собираемых данных. Рассматриваются пространственное и временное распределение поездок, а также дисбалансы ввода/вывода на станциях.

Со временем наиболее подробно было изучено пространственное распределение пассажиропо-

тока под влиянием его внутрисуточной динамики. Во всех рассмотренных городах в будние дни выделяются утренний и вечерний пик, а также дневное и ночное межпиковое время. Каждый временной срез дает индивидуальную пространственную конфигурацию пассажиропотока. Были изучены системы общественного транспорта Оттавы (Канада) (Alfred Chu et al., 2009); Лондона (Великобритания) (Hasan et al., 2013); Пекина (Xu et al., 2016), Шенъчженя (Zhao J. et al., 2017) и Шанхая (Китай) (Sun et al., 2019). Суточные колебания пассажиропотока московского метрополитена также уже были изучены (Киселев, 2021; Некраплённая, Намиот, 2019).

Одной из наименее изученных с точки зрения пространственного анализа на данный момент остается проблема динамики пассажиропотока на более крупном масштабе (недели, месяцы, годы). Столь протяженные периоды выбирались исследователями крайне редко. Однако изучение долгосрочной динамики крайне важно для понимания адаптации транспортного поведения пассажиров к факторам, имеющим долгосрочное влияние (например, расширение транспортной сети).

М. Чэн (Chen, 2011) рассматривал временные колебания в системе метрополитена Тайбэя (Тайвань). Был проанализирован интервал продолжительностью один месяц с помощью метода Гильберта-Хуанга, выявлены наиболее устойчивые временные циклы: пиковье, полу-суточные и суточные. К. Тан с соавторами (Tan et al., 2019) изучили статистические свойства и динамику пассажиропотока городского автобусного транспорта на примере г. Шэнъчжэнь в Китае. Были изучены как внутрисуточные, так и недельные колебания пассажиропотока. Результаты показали, что пассажиропотоки имеют неравномерное распределение в пространстве и времени, при этом наиболее точно могут быть предсказаны пассажиропотоки в районах с высокими объемами перевозок. Методология изучения динамики пассажиропотока рассмотрена в работе Fan et al. (2020). В ней авторы описывают методику анализа динамической устойчивости метрополитенов, основанную на моделировании пассажиропотока с учетом пространственно-временных характеристик. Эта методика позволяет определить наиболее критические участки в сети линий метрополитена, которые могут стать причиной возникновения нештатных ситуаций, и разработать соответствующие меры по их предотвращению.

О применимости коэффициента вариации для анализа динамики пассажиропотока рассуждали в своей работе О. Кэтс и Э. Дженелиус (Cats and Jenelius, 2014) В ней рассматривается использо-

вание коэффициента вариации и других методов для анализа динамики пассажиропотока в сетях общественного транспорта. Авторы подчеркивают важность учета размера выборки и единиц измерения при интерпретации результатов. Этот показатель используется для измерения относительной вариабельности, или изменчивости данных. Он позволяет сравнивать изменчивость различных выборок, даже если они имеют разные единицы измерения. Чем выше значение коэффициента вариации, тем более изменчивы данные и тем менее точны они могут быть для прогнозирования будущих значений.

Переходя к предмету исследования – пассажиропотоку станций Московского метрополитена – обратим внимание на его временную динамику. На графике (рис. 1) четко видны недельные и сезонные циклы, а также общий спад пассажиропотока в период пандемии COVID-19. Помимо этого, имеются и отдельные статистические выбросы, связанные со сбоями при сборе данных (они были исключены из исследования).

В течение недели пассажиропотоки могут колебаться в зависимости от того, рабочий это день, или выходной. На рабочие дни пассажиропотоки принимают большие по величине значение, поскольку население перемещается к местам приложения труда, учебным заведениям и в другие места. В выходные дни мобильность населения традиционно ниже, пассажиропотоки меньше. Однако на некоторых станциях

могут быть большие потоки благодаря наличию достопримечательностей и иных досуговых мест притяжения горожан.

Сезонные циклы возникают благодаря традиционному снижению людности в городах в летнее время. Подробно причины этого явления описаны в (Махрова и др., 2021). Авторы отмечают, что плотность городского населения Москвы в летний период может упасть до трех раз по сравнению с зимним. Разумеется, это не может не повлиять на величину пассажиропотока в летний период.

Также на отдельные всплески пассажиропотока может влиять специфика расположенных в зоне влияния станций точек притяжения, например, наличие стадиона возле станции метро. Во время матчей или концертов на стадионе количество пассажиров, использующих данную станцию, может значительно увеличиться.

Заметив временную неравномерность динамики пассажиропотока (далее в работе для краткости будем использовать термин волатильность), сформулируем исследовательскую гипотезу, касающуюся пространственной неравномерности пассажиропотока. Предположим, что в зависимости от пространственного положения той или иной станции волатильность пассажиропотока за исследуемый период различается: на станциях, расположенных в центральной части ядра Московской агломерации, она должна быть выше, чем на станциях, расположенных в окраинной части.

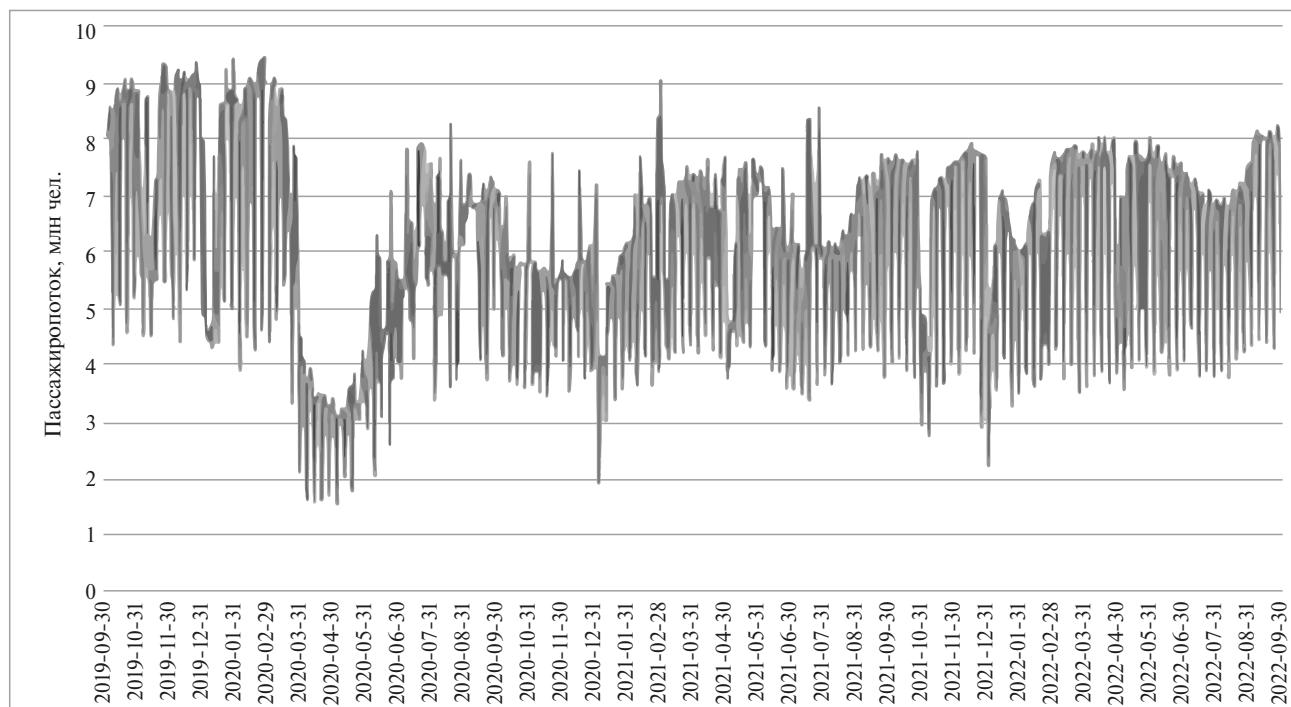


Рис. 1. Динамика общего объема пассажиропотока Московского метрополитена за октябрь 2019 г. – октябрь 2022 г.
Составлено автором.

Предположение следует из следующих соображений. Сеть линий Московского метрополитена своим морфологическим строением повторяет моноцентрическую пространственную структуру города, обладающую градиентом центр—периферия. Это означает, что циклический остов сети (под ним понимается совокупность циклов транспортной сети, в которой у каждого цикла есть хотя бы одно общее ребро с другим циклом) (Тархов, 1989) совпадает с центральной частью ядра Московской агломерации (в настоящей статье под ядром Московской агломерации понимается Москва в границах Московской кольцевой автодороги, а под центральной частью ядра агломерации — пространство в пределах Третьего транспортного кольца). Следовательно станции, расположенные в циклическом остове графа сети линий Московского метрополитена, имеют менее детерминированный пассажиропоток в своей структуре. Иными словами, разнообразие пунктов отправления и пунктов назначения среди пассажиров, пользующихся станциями в центральной части городского ядра агломерации, выше.

Таким образом, нами выдвигается предположение о том, что пассажиропоток станций, расположенных в центральной части ядра Московской агломерации, будет наиболее волатильным во времени. Менее волатильным он будет на пересадочных узлах, а на беспересадочных станциях, расположенных в окраинной части города, волатильность примет наименьшие значения.

Для поиска взаимосвязи между пространственным положением станций и показателями динамики пассажиропотока необходимо определить и рассчитать показатели динамики пассажиропотока, определить метод поиска взаимосвязи и установить ее.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Измерение динамики пассажиропотока по станциям метрополитена. В исследовании был проанализирован входящий поток пассажиров на каждой станции Московского метрополитена с октября 2019 по октябрь 2022 г. Этот период не учитывает время пандемии (март–август 2020), так как пассажиропоток на станциях за этот временной интервал настолько серьезно снизился, что наличие этих данных в анализируемой выборке способно серьезно исказить результаты (допускаем, что на разных станциях спад пассажиропотока произошел с разными относительными значениями; проверка наличия пространственных закономерностей в этом спаде требует проведения отдельного исследования), а продолжительность этого временного интервала пренебрежимо мала в сравнении

с продолжительностью изученного периода. Для измерения волатильности потока был использован коэффициент вариации, который отражает степень изменчивости данных. В данном случае коэффициент вариации показывает, насколько разнообразным был поток пассажиров на конкретной станции за исследуемый период. Чем выше значение коэффициента вариации, тем более изменчив поток пассажиров. Таким образом, исследование позволяет оценить волатильность потока пассажиров на каждой станции метро и выявить наиболее изменчивые станции.

Коэффициент вариации (*CV*) является отношением стандартного отклонения (*SD*) к среднему значению (*M*) выборки, умноженном на 100%:

$$CV = (SD / M) \times 100\%. \quad (1)$$

Коэффициент вариации позволяет сравнивать изменчивость различных выборок, даже если они имеют разные единицы измерения. Чем выше значение коэффициента вариации, тем более изменчивы данные и тем менее точны они могут быть для прогнозирования будущих значений (Sørensen, 2002).

Чтобы проверить, насколько разнонаправленны тренды изменения пассажиропотока за исследуемый период, мы также измерили, насколько изменился входящий пассажиропоток между первым и последним днем исследуемого периода (%).

2. Расчет центральности по близости каждой из станций метрополитена. Центральность по близости — показатель, демонстрирующий, насколько близко к центру транспортной системы расположена тот или иной объект. Центральность по близости можно рассчитать, если представить систему линий метрополитена в виде графа, где вершинами являются станции, а ребрами — перегоны между ними. Это обратная величина суммы кратчайших расстояний от конкретной вершины до всех других вершин сети. Вершины графа (узлы) с высокой степенью близости считаются более центральными, поскольку они ближе к другим узлам и из них быстрее можно добраться до них (Brandes, 2001).

При построении графа сети линий Московского метрополитена учитывались реальные возможности пассажиров совершить пересадку между линиями. Например, между Арбатско-Покровской и Таганско-Краснопресненской линиями метро пассажир не имеет возможности сделать пересадку, не совершив поездку по одной из линий, соединяющей две данные линии (например, по Кольцевой линии). Таким образом, хотя на схеме линии пересекаются, на графике в этом месте узел не возникает. Величина показателя центральности по близости представлена на рис. 2.

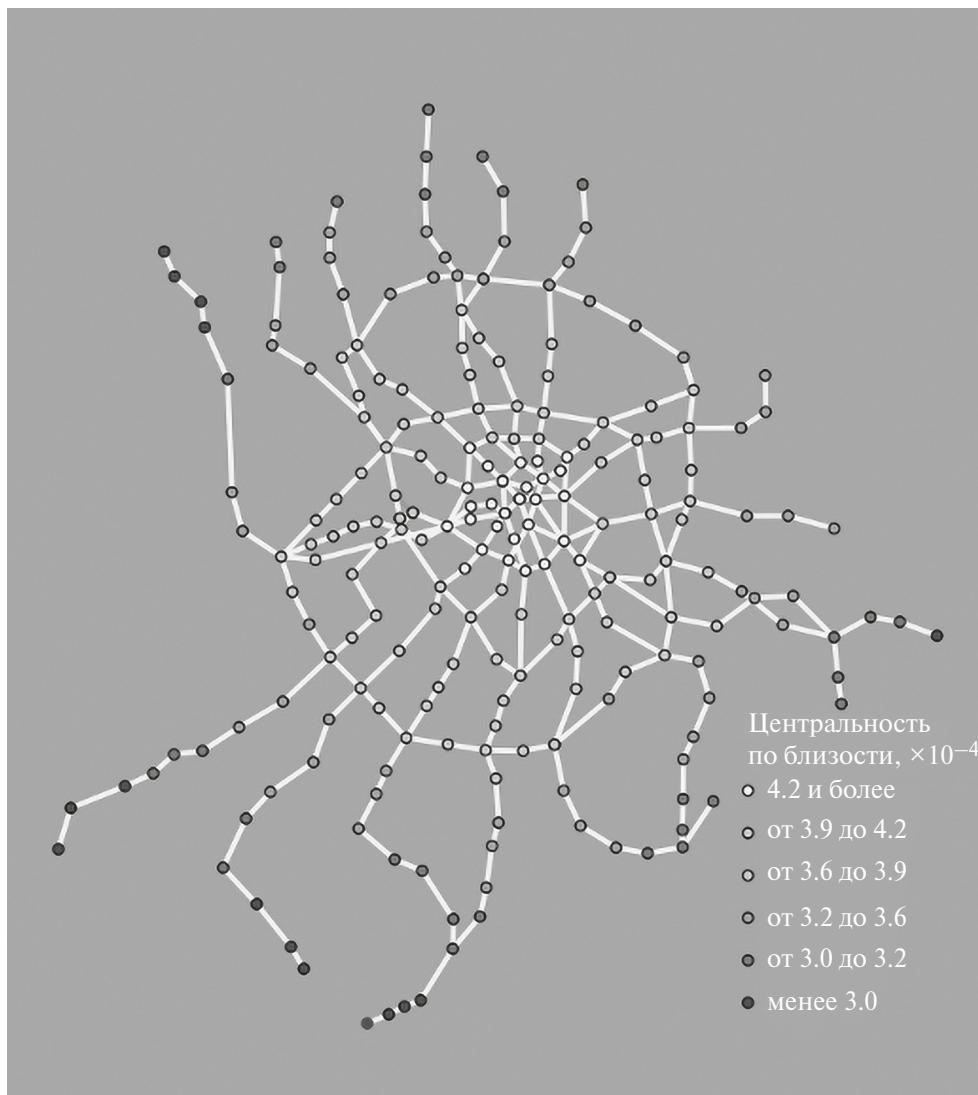


Рис. 2. Значения показателя центральности по близости для станций Московского метрополитена.

3. Поиск статистической взаимосвязи между изменчивостью пассажиропотока во времени (волатильностью) и центральностью по близости. Взаимосвязь между расположением узлов, соответствующему станции в графе транспортной сети, и показателем волатильности, рассчитанным для данной станции, определяется с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена между этими двумя показателями [этот коэффициент измеряет степень линейной зависимости между рангами двух переменных и может принимать значения от -1 до $+1$, где -1 означает полную обратную корреляцию, а $+1$ — полную прямую корреляцию (Sedgwick, 2014)]. Он подходит для изучения характера статистической взаимосвязи этих двух показателей, поскольку для нас первоочередным является именно соответствие рангов двух массивов данных.

4. Поиск статистической взаимосвязи между относительным изменением пассажиропотока

и центральностью по близости выполняется аналогично методу, описанному в п. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В начале сравним коэффициент вариации со значением центральности по близости. На диаграмме рассеяния (рис. 3) заметно наличие сравнительно слабой отрицательной статистической взаимосвязи (коэффициент корреляции Спирмена -0.38). Это означает, что с удалением от центральной части агломерации волатильность пассажиропотока увеличивается. В верхней части графика заметно большое количество отклонений от линии тренда, что говорит о неоднозначности выявленного тренда. Таким образом, наиболее вероятно, что распределение станций Московского метрополитена не соответствует идеальному центр–периферийному градиенту.

Чтобы рассмотреть наличие иных паттернов в пространственном распределении исследуемого

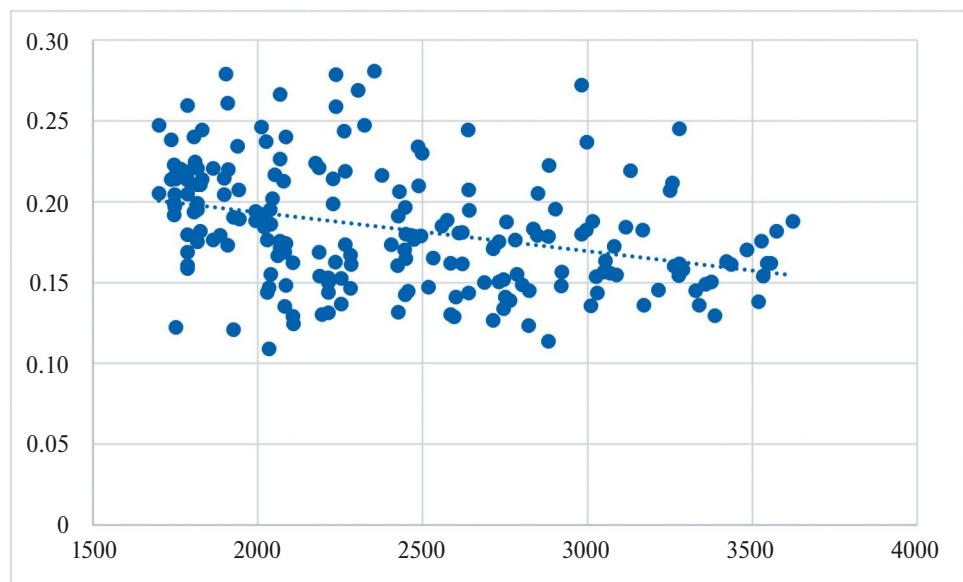


Рис. 3. Значения коэффициента вариации (ось x) и центральности по близости (ось y).

показателя, обратимся к рис. 4. Нами использована визуализация согласно кратности стандартного отклонения (σ), чтобы понимать близость каждого значения к среднему, поскольку значения коэффициента вариации – безразмерная бесконечно большая величина, не говорящая прямо о самом характере волатильности. В рамках исследования нас интересуют относительные значения. Четко видно, что станции с наибольшим значением коэффициента вариации расположены хаотично: они встречаются как в центральной части города, так и в окраинной его части. Для ряда окраинных станций (“Спартак”, “Воробьевы горы”, “Лесопарковая”) характерен низкий объем пассажиропотока. Однако пассажиропоток этих станций может ситуативно возрастать (например, при проведении мероприятий, которые проводятся на спортивных объектах). Также среди станций с высокими значениями коэффициента вариации можно выделить многие из тех, которые были открыты в течение исследуемого периода (например, “Лефортово”, “Терехово”, “Народное Ополчение”). Это говорит о том, что использование этих станций в повседневных поездках только начинает входить в транспортные привычки пассажиров Московского метрополитена. Пассажиропоток этих станций растет темпами, гораздо более высокими (о чем будет еще раз упомянуто ниже), что не может не сказаться на значениях коэффициента вариации.

Следующая выделенная группа станций (со слабым отклонением от среднего) расположена гораздо более компактно, преимущественно в пределах третьего топологического яруса циклического остова сети линий метрополитена. Таким образом, если сделать допущение, что

группа станций, рассмотренная выше, является пространственным статистическим выбросом, то исследовательская гипотеза подтверждается, поскольку, если посмотреть далее на периферию системы, станции, расположенные там, обладают существенно меньшей волатильностью входящего пассажиропотока. Однако, разумеется, факт наличия станций с высокой степенью волатильности, не вписывающейся в центр–периферийный градиент, игнорировать ни в коем случае нельзя. Кроме того, если рассмотреть станции с крайне низкой волатильностью, мы обнаружим, что отнюдь не все из них расположены строго на самой окраине ядра городской агломерации. Хотя большая часть из них расположена на самой окраине циклического остова, что тоже никак не является центральной частью города. Таким образом, станции этой группы занимают преимущественно срединное положение.

Далее сравним относительный показатель изменения пассажиропотока со значением центральности по близости (рис. 5). Значение коэффициента корреляции Спирмена составляет -0.51 . Это говорит о наличии средней статистической взаимосвязи между показателями. Таким образом, можно вполне однозначно утверждать, что большая часть станций, расположенных в центральной части ядра городской агломерации, претерпевает снижение пассажиропотока за исследуемый период. С приближением к окраине ядра Московской агломерации (т.е. снижением значения центральности по близости) заметно замедление темпов спада пассажиропотока, а для ряда станций зафиксирован рост пассажиропотока.

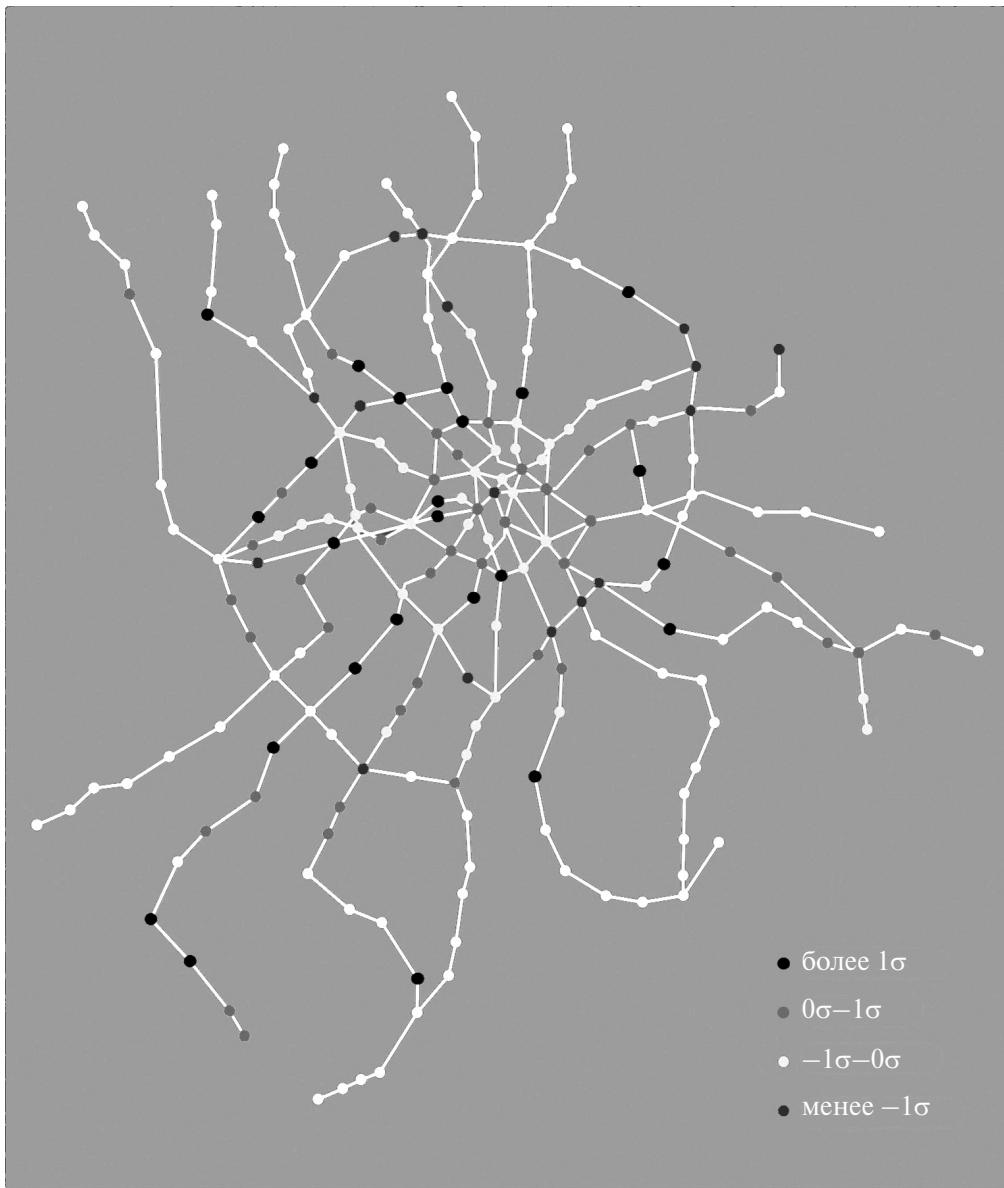


Рис. 4. Значения показателя волатильности (коэффициента вариации) входного пассажиропотока для станций Московского метрополитена.

Чтобы убедиться, насколько однозначен обозначенный тренд, обратимся к рис. 6. Очевидно, что среди станций, на которых изменение пассажиропотока происходило наиболее высокими темпами, в основном видны именно те, что были открыты в 2019–2022 гг. Как уже упоминалось выше, это означает, что транспортные поведение горожан еще не до конца переориентировалось на использование данных станций, поэтому этот тренд будет продолжаться еще, по меньшей мере, несколько лет. Можно обратить внимание, что среди станций, открытых в течение последних десяти лет, пассажиропоток некоторых, например, станции “Спартак”, все еще возрастает с каждым годом; пассажиропоток других, например, станций Московского центрального кольца, уже, напротив, снижается,

находясь в общем тренде пассажиропотока по станциям Московского метрополитена.

В целом число станций, пассажиропоток которых за исследуемый период поменялся значительно, немного. Зафиксирована лишь одна станция с крайне сильным снижением пассажиропотока (“Динамо”). Наиболее вероятно, что причина столь серьезного спада связана с открытием собственного вестибюля станции “Петровский парк”. Очевидно, что количество пассажиров, предпочитающих поездки по Большой кольцевой линии, а следовательно, новый вестибюль, существенно велико.

Для большей части станций характерен слабо отрицательный тренд объемов пассажиропотока вне зависимости от местоположения станций в пространственной структуре сети линий

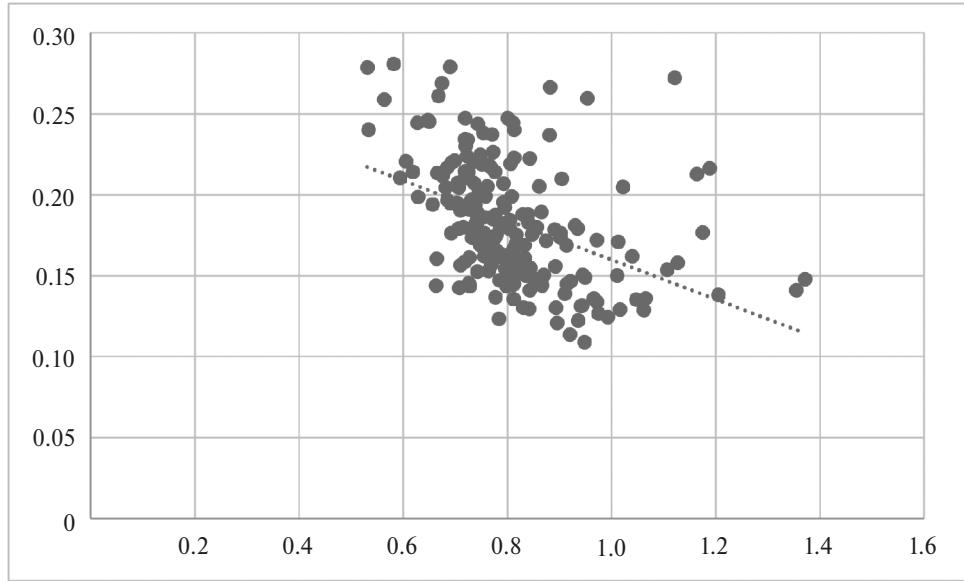


Рис. 5. Значения изменения объемов пассажиропотока (ось x) и центральности по близости (ось y).

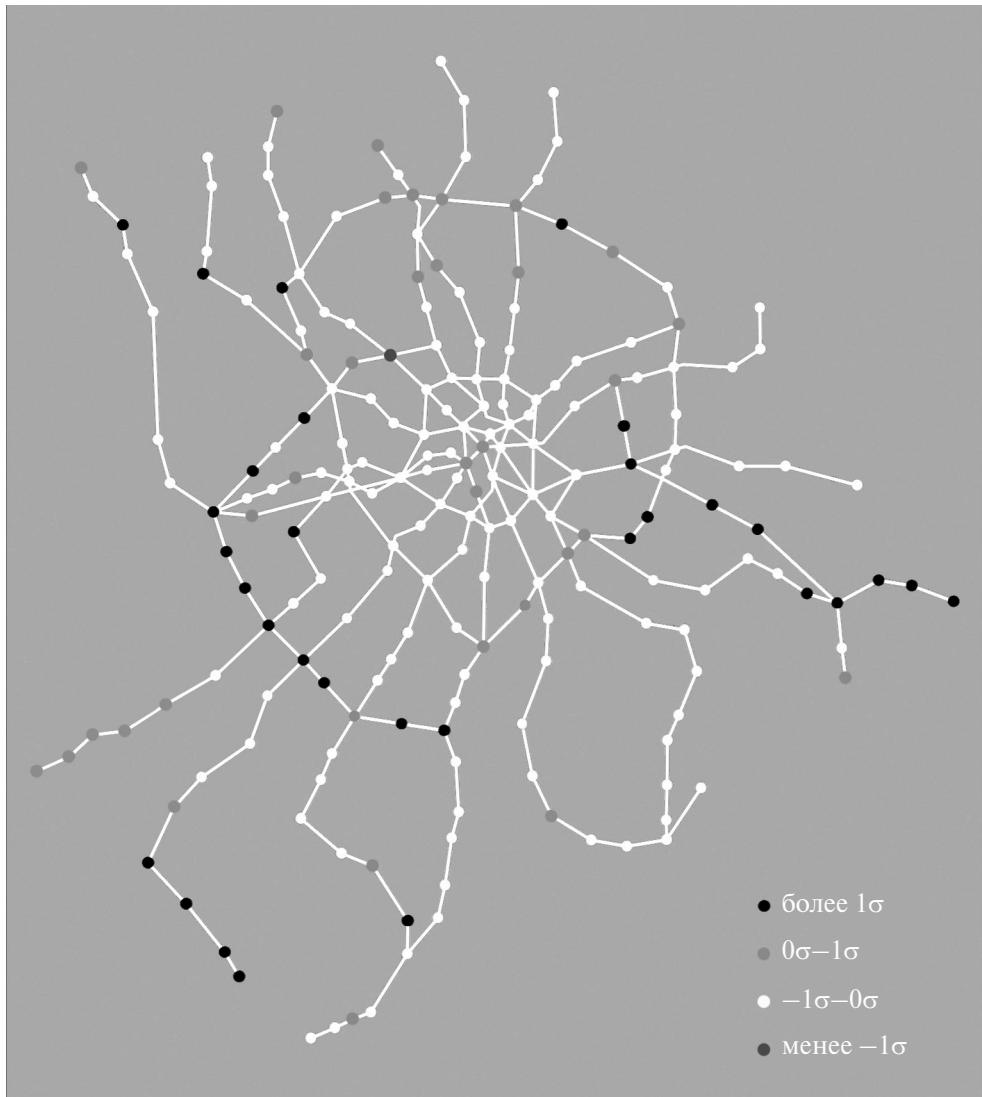


Рис. 6. Пространственное распределение относительного изменения входного пассажиропотока для станций Московского метрополитена.

Московского метрополитена. Иными словами, изменение относительных значений пассажиропотока не столь существенно меняется при удалении от центра городского ядра. При этом, как мы убедились ранее, пространственный градиент выражен весьма ярко.

ВЫВОДЫ

Нами было выдвинуто предположение о том, что пространственное положение станций Московского метрополитена определяет волатильность пассажиропотока во времени. Для подтверждения гипотезы были использованы топологический, статистический и картографический методы.

Пространственное положение было рассчитано для каждой станции с помощью показателя центральности по близости. В качестве исследуемых параметров динамики были выбраны волатильность и тренд. Волатильность пассажиропотока во времени определена как значение коэффициента вариации массива данных по входному пассажиропотоку за каждый будний день в исследуемый период (октябрь 2019 г. – октябрь 2022 г.). В качестве количественного выражения тренда был выбран показатель относительного изменения входящих пассажиропотоков станций между первым и последним днями исследования.

Установлена слабая статистическая взаимосвязь между показателями волатильности и степенью центральности станций по близости. Однако, если станции с высокой степенью волатильности расположены хаотично в рамках системы, то станции с волатильностью относительно выше среднего, как и станции с волатильностью относительно выше среднего, расположены достаточно компактно в пределах центр–периферийного градиента (т.е. станции с относительно высокой волатильностью расположены преимущественно в центральной части ядра Московской агломерации, границе которой соответствует второй (местами первый) топологический ярус графа Московского метрополитена; а станции с относительно низкой волатильностью – в окраинной части города). Станции с крайне низкой волатильностью относительно немного и многие из них расположены в срединной зоне города (на границе циклического остова). Таким образом, несмотря на несоответствие прямому центр–периферийному градиенту, группы станций с различными значениями расположены сравнительно компактно в пределах структурно-планировочных элементов города.

Относительное изменение пассажиропотока за период исследования по станциям метропо-

литена более статистически и пространственно детерминировано, чем коэффициент вариации по станциям метрополитена. Установлена заметная отрицательная статистическая взаимосвязь между близостью станций к центру ядра городской агломерации и относительным изменением объемов пассажиропотока станций. Тем не менее значения этих изменений не столь сильно отличаются друг от друга (так, если для станций в центральной части ядра Московской агломерации характерно изменение пассажиропотока на 30–40% в сторону уменьшения, то для станций в окраинной части снижение пассажиропотока изменение составляет 10–20%). Станций с заметным ростом пассажиропотока относительно немного. Подавляющее большинство из них было запущено в эксплуатацию лишь в течение исследуемого периода (т.е. нами зафиксирован эффект низкой базы). А расположение таких станций не детерминировано в пространственном отношении: они встречаются как proximity с центральной частью ядра агломерации, так и в его окраинной части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бернштейн-Коган С.В.* Очерки географии транспорта: учеб. пособие для вузов. М.: Гос. изд-во, 1930. 348 с.
- Беленький М.Н.* Экономика пассажирских перевозок. М.: Транспорт, 1974. 271 с.
- Гольц Г.А.* Транспорт и расселение. М.: Наука, 1981. 247 с.
- Киселев И.В.* Влияние особенностей пространственной структуры города на неравномерность пассажиропотоков на московском метрополитене // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: матер. XXVII Международ. (тридцатой Екатеринбургской) науч.-практич. конф. (19–20 июня 2021 г.) / науч. ред. С.А. Ваксман. Екатеринбург: АМБ, 2021. С. 259–269.
- Махрова А., Нефедова Т., Трейвиши А.* Москва: мегаполис? агломерация? мегалополис? // Демоскоп Weekly. 2012. № 517–518.
- Некроплённая М.Н., Намиот Д.Е.* Анализ матриц корреспонденции метро // Int. J. Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 7. С. 68–80.
- Тархов С.А.* Эволюционная морфология транспортных сетей. М.: ИГ АН СССР, 1989. 382 с.
- Alfred Chu K.K., Chapleau R., Trepanier M.* Driver-assisted bus interview: Passive transit travel survey with smart card automatic fare collection system and applications // Transportation Res. Record. 2009. Vol. 2105. № 1. P. 1–10.
- Bagchi M., White P.R.* The potential of public transport smart card data // Transport Policy. 2005. Vol. 12. № 5. P. 464–474.

- Barry J.J., et al.* Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data // *Transportation Res. Record.* 2002. Vol. 1817. № 1. P. 183–187.
- Brandes U.* A faster algorithm for betweenness centrality // *J. Mathematical Sociology.* 2001. Vol. 25. № 2. P. 163–177.
- Cats O., Jenelius E.* Dynamic vulnerability analysis of public transport networks: mitigation effects of real-time information // *Networks and Spatial Economics.* 2014. Vol. 14. P. 435–463.
- Chen M.C., Wei Y.* Exploring time variants for short-term passenger flow // *J. Transport Geography.* 2011. Vol. 19. № 4. P. 488–498.
- Fan Y., et al.* Dynamic robustness analysis for subway network with spatiotemporal characteristic of passenger flow // *Ieee Access.* 2020. № 8. P. 544–555.
- Hasan S., et al.* Spatiotemporal patterns of urban human mobility // *J. Statistical Physics.* 2013. Vol. 151. P. 304–318.
- Sørensen J.B.* The use and misuse of the coefficient of variation in organizational demography research // *Sociological Methods & Research.* 2002. Vol. 30. № 4. P. 475–491.
- Sedgwick P.* Spearman's rank correlation coefficient // *Bmj.* 2014. Vol. 349.
- Sun L., et al.* Understanding metropolitan patterns of daily encounters // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2013. Vol. 110. № 34. P. 13774–13779.
- Sun Y., Shi J., Schonfeld P.M.* Identifying passenger flow characteristics and evaluating travel time reliability by visualizing AFC data: a case study of Shanghai Metro // *Public Transport.* 2016. Vol. 8. P. 341–363.
- Tan Q., et al.* Statistical analysis and prediction of regional bus passenger flows // *Int. J. of Modern Physics B.* 2019. Vol. 33. № 11. P. 1950094.
- Zhao J., et al.* Spatio-temporal analysis of passenger travel patterns in massive smart card data // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* 2017. Vol. 18. № 11. P. 3135–3146.

Spatial Regularities of Long-Term Dynamics of Passenger Flow at Moscow Metro Stations

I. V. Kiselev*

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: schwertberg98@yandex.ru

The paper discusses the hypothesis that the spatial arrangement of Moscow metro stations influences the variability of passenger flow over time. This hypothesis is based on the fact that, due to the peculiarities of the spatial structure of the city, the passenger flow in the central part of Moscow is influenced by a larger number of factors than in the stations located in the periphery of the city, and as a result, the passenger flow in the stations located in the center of the city should be more uneven in time dynamics. The study uses topological and statistical methods to confirm this hypothesis. The spatial position of each station is calculated using the closeness centrality indicator, and two indicators are selected as parameters for the analysis: the variability of passenger flow over time (volatility), calculated using the variation coefficient, and the relative change in passenger flow volume between the beginning and the end of the study period. The results showed that stations with the highest volatility are located chaotically, but stations with medium and low volatility form more compact spatial groups according to the center-periphery gradient. The relative change in passenger traffic over the study period is determined more by the spatial location of the stations: most stations in the central part of the agglomeration core show a decrease in passenger traffic, while on the periphery there is a slowing of the rate of decrease or even growth. It is concluded that the spatial location is an important factor to consider when forecasting passenger traffic, since stations located in the city center are affected by more factors than stations located in the outskirts, which ultimately affects the volatility.

Keywords: transport geography, passenger flow, metro, Moscow, spatiotemporal analysis

REFERENCES

- Alfred Chu K.K., Chapleau R., Trepanier M. Driver-assisted bus interview: Passive transit travel survey with smart card automatic fare collection system and applications. *Transp. Res. Rec.*, 2009, vol. 2105, iss. 1, pp. 1–10.
<https://doi.org/10.3141/2105-01>
- Bagchi M., White P.R. The potential of public transport smart card data. *Transp. Policy*, 2005, vol. 12, iss. 5, pp. 464–474.
- Barry J.J. et al. Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data. *Transp. Res. Rec.*, 2002, vol. 1817, iss. 1, pp. 183–187.
- Belen'kii M.N. *Ekonomika passazhirskikh perevozok* [Economics of Passenger Transportation]. Moscow: Transport Publ., 1974. 271 p.
- Bernshtein-Kogan S.V. *Ocherki geografii transporta: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Essays on the Transport Geography: A Textbook for Universities]. Moscow: Gos. izd-vo, 1930. 348 p.
- Brandes U. A faster algorithm for betweenness centrality. *J. Math. Sociol.*, 2001, vol. 25, iss. 2, pp. 163–177.
- Cats O., Jenelius E. Dynamic vulnerability analysis of public transport networks: Mitigation effects of real-time information. *Netw. Spat. Econ.*, 2014, vol. 14, pp. 435–463.
- Chen M.C., Wei Y. Exploring time variants for short-term passenger flow. *J. Transp. Geogr.*, 2011, vol. 19, iss. 4, pp. 488–498.
- Fan Y. et al. Dynamic robustness analysis for subway network with spatiotemporal characteristic of passenger flow. *IEEE Access*, 2020, iss. 8, pp. 544–555.
- Gol'ts G.A. *Transport i rasselenie* [Transport and Settlement Pattern]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 247 p.
- Hasan S. et al. Spatiotemporal patterns of urban human mobility. *J. Stat. Phys.*, 2013, vol. 151, pp. 304–318.
- Kiselev I.V. Influence of the features of the spatial structure of the city on the uneven passenger traffic on the Moscow metro. In *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: materialy XXVII Mezhdunarodnoi (tridtsatoi Ekaterinburgskoi) nauch.-prakt. konferentsii (19–20 iyunya 2021 g.)* [Socioeconomic Problems of the Development and Functioning of Urban Transport Systems and Their Zones of Influence: Proceedings of the XXVII International (Thirtieth Yekaterinburg) Scientific and Practical Conference (June 19–20, 2021)]. Vaksman S.A., Ed. Yekaterinburg: AMB Publ., 2021, pp. 259–269. (In Russ.).
- Makhrova A., Nefedova T., Treivish A. *Moskva: Megapolis? Aglomeratsia? Megalopolis?* [Moscow: Megapolis? Urban Agglomeration? Megalopolis?] Demoskop Weekly, 2012, no. 517–518. (In Russ.).
- Nekraplennaya M.N., Namiot D.E. Analysis of metro correspondence matrices. *Int. J. Open Inf. Technol.*, 2019, vol. 7, no. 7, pp. 68–80.
- Sedgwick P. Spearman's rank correlation coefficient. *BMJ*, 2014, vol. 349.
- Sørensen J.B. The use and misuse of the coefficient of variation in organizational demography research. *Sociol. Methods Res.*, 2002, vol. 30, iss. 4, pp. 475–491.
- Sun L. et al. Understanding metropolitan patterns of daily encounters. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2013, vol. 110, iss. 34, pp. 13774–13779.
- Sun Y., Shi J., Schonfeld P.M. Identifying passenger flow characteristics and evaluating travel time reliability by visualizing AFC data: a case study of Shanghai Metro. *Public Transp.*, 2016, vol. 8, pp. 341–363.
- Tan Q. et al. Statistical analysis and prediction of regional bus passenger flows. *Int. J. Mod. Phys. B*, 2019, vol. 33, iss. 11, p. 1950094.
- Tarkhov S.A. *Evolyutsionnaya morfologiya transportnykh setei* [Evolutionary Morphology of Transport Networks]. Moscow: IG AN SSSR Publ., 1989. 382 p.
- Zhao J. et al. Spatio-temporal analysis of passenger travel patterns in massive smart card data. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2017, vol. 18, iss. 11, pp. 3135–3146.