

АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО.ГРАДОРЕГУЛИРОВАНИЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 656.072 : 519.237.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.1

Оценка востребованности метрополитенов жителями в пешеходной доступности от станций

Дмитрий Евгеньевич Ушаков^{1,2}, Дмитрий Викторович Карелин¹

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);

г. Новосибирск, Россия;

²МУП «УКС г. Екатеринбург»; г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время оценке метрополитенов в региональных городах России уделяется недостаточно внимания в научной литературе. Произведена оценка связи пассажиропотока метрополитенов в региональных городах России и количества жителей в радиусах шаговой доступности станций. Это позволит понять перспективы развития метрополитенов, а также направления использования сложившихся сетей для формирования устойчивой городской среды, удобной для каждого жителя.

Материалы и методы. Оценка взаимосвязи выполнена ретроспективно с помощью метода регрессионного анализа. В качестве зависимой переменной выбран годовой пассажиропоток метро, так как он менее подвержен влиянию случайных факторов, по сравнению со среднесуточным. В качестве независимой переменной принята жилая площадь зданий в радиусе шаговой доступности станций всей системы метро. Также учитывалось влияние крупных социальных факторов, которые могли воздействовать на пассажиропоток.

Результаты. Для периода с момента открытия метро по сегодняшний день выявлена взаимосвязь между жилой площадью в пешей доступности от станций метро и пассажиропотоком для городов Екатеринбург и Казань. С 2005 по 2019 гг. с учетом исключения влияния реформы по монетизации льгот и ограничительных мер, связанных с пандемией COVID-19, зависимость определяется для Новосибирска. Для Самары и Нижнего Новгорода эта зависимость не выявлена. Установлены радиусы шаговой доступности от станций по городам, имеющие наибольшее влияние на пассажиропоток.

Выводы. Жилая функция не является универсальным фактором, определяющим пассажиропоток для метрополитенов в региональных городах России. Значительное влияние имеют социальные факторы, затрагивающие широкие слои населения, — реформы по монетизации льгот. Дальнейшие исследования планируется посвятить оценке иных факторов, оказывающих влияние на формирование пассажиропотока метро в Самаре и Нижнем Новгороде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метрополитен, пассажиропоток, регрессионный анализ, жилая площадь, корреляция, пешеходная доступность, региональные города, социально-экономические факторы

Благодарности. Авторы выражают благодарность Международной ассоциации «Метро», ЕМУП «Екатеринбургский метрополитен» и МУП г. Новосибирска «Новосибирский метрополитен» за предоставление исходных данных, а также рецензентам за проделанную работу по улучшению качества материала.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ушаков Д.Е., Карелин Д.В. Оценка востребованности метрополитенов жителями в пешеходной доступности от станций // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 1. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.1

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Евгеньевич Ушаков, u_dmitrii@mail.ru.

The evaluation of the resident demand for underground railways within walking distance of stations

Dmitriy E. Ushakov^{1,2}, Dmitriy V. Karelin¹

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin);

Novosibirsk, Russian Federation;

²Capital Construction Department Ekaterinburg; Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Presently, the evaluation of underground railways in regional cities of Russia enjoys little attention in the research literature. We have assessed the relationship between passenger flows of underground railways in regional Russian cities and the number of residents within walking distance of the stations. This will allow understanding the potential development of underground railways and the future uses of existing networks towards a sustainable urban environment convenient for each resident.

Materials and methods. The evaluation of the relationship was conducted retrospectively using the regression analysis method. The annual passenger flow of underground railways was chosen as a dependent variable, as it is less affected by random factors, compared to average daily variables. The living space of buildings within walking distance of underground railway stations was taken as an independent variable. Major social factors that may influence passenger flows were also taken into account.

Results. For the period from the opening of the underground railway to the present day, the relationship between living spaces within walking distance of underground railway stations and passenger flows was identified for Ekaterinburg and Kazan. From 2005 to 2019, the relationship has been tracked for Novosibirsk with account taken of the effect of the benefit monetization reform and restrictive measures related to the COVID-19 pandemic. This dependence has not been identified for Samara and Nizhny Novgorod. The radii of walking distances from the stations, having the greatest impact on the passenger traffic, were identified for several cities.

Conclusions. The residential function is not a universal factor determining passenger flows of underground railways in regional Russian cities. Social factors, affecting large segments of the population, such as monetization reforms, have a substantial effect. Further research is planned to evaluate other factors that influence passenger flows of underground railways in Samara and Nizhny Novgorod.

KEYWORDS: underground railway, passenger flow, regression analysis, residential area, correlation, pedestrian accessibility, regional cities, socioeconomic factors

Acknowledgements. The authors would like to thank the International Metro Association, Ekaterinburg Metro and Novosibirsk Metro Municipal Unitary Enterprise for providing the source data, and the reviewers for their improving the quality of the material.

FOR CITATION: Ushakov D.E., Karelin D.V. The evaluation of the resident demand for underground railways within walking distance of stations. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(1):1. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.1

Corresponding author: Dmitriy E. Ushakov, u_dmitrii@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года является сокращение уровня межрегиональной дифференциации в социально-экономическом развитии субъектов РФ и снижение внутрирегиональных социально-экономических различий с помощью:

- развития транспорта общего пользования, в том числе линий скоростных внеуличных видов транспорта, пригородного сообщения, и оптимизации маршрутной сети;
- обеспечения сбалансированного развития городских территорий, в том числе путем освоения заброшенных и неэффективно используемых территорий, согласованного и комплексного развития застроенных и планируемых к застройке территорий.

Реализация данного направления требует совместного рассмотрения системы землепользования и внеуличного транспорта с установлением количественной зависимости между величинами. В зарубежных источниках рассматривается проблема пространственной организации городской застройки.

В исследовании, посвященном г. Бангкок (Таиланд), выявлено, что шесть переменных имеют существенную связь с перевозкой пассажиров метро: плотность населения (население/жилая площадь), станции пересадки метро, количество автобусных линий, количество автобусных остановок, количество железнодорожных станций и перехватываю-

щие парковки. Авторы делают вывод, что только плотность и планировочные переменные влияют на пассажиропоток станций Бангкокского метрополитена. Также результаты свидетельствуют о том, что население, проживающее в многоэтажных зданиях, как правило, пользуется станциями метро в большей степени, чем население, проживающее в отдельных домах или малоэтажных зданиях [1].

Что касается г. Сеул (Корея), отмечается, что на пассажиропоток в деловом центре (СВД) и прилегающих к нему районах в первую очередь воздействует плотность застройки, в то время как на субцентральный зону — разнообразие функций [2].

При дисперсной оценке зоны влияния станций на пассажиров в г. Мадрид (Испания) выяснено наличие тесной корреляции между пешеходным расстоянием и использованием метро. Функция аппроксимации для жилой площади является линейной, а экономической деятельности экспоненциальной. Коэффициенты детерминации R^2 составляют 0,972 и 0,952 соответственно. На жителей, использующих метро, добираясь из дома в диапазоне 0–100 м, приходится 0,50 поездок на человека в день, в диапазоне 500–600 м это значение падает до 0,30 [3].

В г. Циндао (Китай) данные по коммерческому и жилому землепользованию мультиколлинеарны. Поскольку корреляция жилой функции была выше коммерческой, последняя исключена из расчета [4].

Имеются примеры, когда не установлено существенного влияния жилой функции на пассажиро-

ток метро. Так, в г. Шанхай (Китай) коммерческое землепользование более значимо, чем жилая функция [5].

В ряде исследований показано, что общая протяженность системы городского рельсового транспорта служит главным фактором, воздействующим на пассажиропоток [6, 7]. Данный параметр можно считать эквивалентом включению новых территорий с жилой функцией, а также иных видов землепользования в буферную зону станций метро.

В большинстве рассмотренных работ выявлено наличие взаимосвязи между пассажиропотоком метро и развитием территории города и, в частности, жилой застройкой. При этом неоднозначно влияние жилой застройки по каждому отдельному городу. Этот вопрос требует дополнительного изучения.

Базовой стратегией городского развития, которая объединяет системы землепользования и транспорта, является концепция транспортно-ориентированного развития (Transit-oriented development — TOD). TOD подразумевает создание зон средней и высокой плотности смешанного землепользования в пределах удобного расстояния пешком (800 м) от станций общественного транспорта [8, 9].

На основе TOD-характеристик (г. Бангкок [1]) используют 3D-концепцию (плотность, разнообразие и планировка), предложенную R. Cerveo и K. Kockelman (1997). Исходя из собранных данных были созданы 22 переменные, которые разбиты на три категории (плотность, разнообразие и планировка) в соответствии с 3D-концепцией. Все они попали в 800-метровую зону. При этом расстояние до объектов определялось при помощи карты плотности по концепции ядерной оценки плотности (Kernel Density Estimation — KDE).

В TOD не определена точная величина буферной зоны, в пределах которой проводится обустройство территории. Работы по скоростному транспорту устанавливают эту зону различно. В ряде публикаций принята 800-метровая буферная зона — г. Бангкок [1], г. Анкара [10]. Для г. Шанхай [5] буферная зона составляет 600 м, что соответствует рекомендации 12-го пятилетнего плана.

Эксперты метро Сеула, опираясь на опыт коллег [11–13], рекомендуют расстояние (радиус) 500 м, что приблизительно равняется 10 минутам пешей доступности.

Предпринята попытка всестороннего анализа различных способов выявления пешей доступности до станций метро в г. Мадрид (Испания) [3]. Выполнено сравнение использования евклидовых расстояний и определенных с учетом уличной конфигурации.

Работа системы общественного транспорта, и метрополитена в частности, — актуальный вопрос для российских исследователей [14–16]. Рассматриваются различные подходы к прогнозированию пассажиропотока метро [17–19]. Оценивается

целесообразность дальнейшего развития данной системы транспорта с экономической, экологической и социальной точек зрения [20, 21].

Схема метрополитенов в региональных городах России совпадает с основными направлениями развития городов, за исключением г. Самара. Отечественный опыт проектирования метрополитенов показывает, что в основном строительство нацелено на соединение центральной перегруженной части города с производственными предприятиями или крупными жилыми микрорайонами на окраинах — в зависимости от градообразующей функции [22].

Развитие общественного транспорта и рациональное соотношение его видов позволяют перестроить городское пространство, освободив территории под общественные, рекреационные и иные необходимые городу функции [23].

Отмечается большое значение метрополитена как транспорта, связующего «городскую ткань», эффективно сокращающего затраты времени на передвижение. Указывается, что сети метрополитена проектируются в соответствии с планировочной структурой города, а не наоборот. В этой связи метро, как подземный транспорт, может разгрузить центр города от машин и излишнего наземного транспорта, создав нужную плотность деловой активности на малой площади. Поскольку метро связано с планировочной структурой города, оно является неотъемлемой частью транспортной инфраструктуры города в целом [24].

Для полноценной загрузки метро следует организовывать подвозящие маршруты наземного транспорта с разворотными площадками возле станций. Это даст возможность увеличить пассажиропоток. Пассажиропоток находится в прямой зависимости от длины линии метро [25].

Один из методов, применяемых в отечественных исследованиях метро, — метод гравитационного моделирования [26].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Важно иметь всеобъемлющее понимание ключевых факторов, влияющих на использование метрополитена для формирования устойчивой городской среды, удобной для каждого жителя. Проводимая в настоящее время политика реновации городских территорий в Москве далее может быть распространена на другие регионы [27]. Для оценки возможностей реновации существующих городских территорий в увязке с инфраструктурой внеуличного транспорта необходима количественная и пространственная оценка взаимосвязей.

Объект исследования — системы метрополитенов (без рассмотрения отдельных станций) в региональных городах России.

Гипотеза исследования заключается в том, что жилая площадь зданий в радиусе шаговой доступности

сти является значимым фактором, вносит наибольший вклад в формирование пассажиропотока метро и может быть применена для прогноза без учета иных факторов, влияющих на пассажиропоток.

Цель исследования — оценить количественную взаимосвязь изменения жилой площади зданий в радиусе шаговой доступности станций и пассажиропотока метрополитенов в региональных городах России.

Пассажиропоток метро — локальная информация, которая требует отдельных запросов по каждому городу у местной администрации или организации, эксплуатирующей метрополитен [1, 3, 5, 6, 28]. Это характерно как для зарубежных стран, так и для России. При этом имеются организации, объединяющие локальные метрополитены и предоставляющие открытый доступ к данным: Международная ассоциация «Метро» объединяет метрополитены на постсоветском пространстве; China Association of Metros (САМЕТ) объединяет метро Китая.

С целью оценки взаимосвязи между планировочной структурой города и пассажиропотоком метро используется корреляционный анализ [1, 3, 10]. Применяются линейные и нелинейные регрессионные модели [10].

Ранее была установлена зависимость пассажиропотока метро от жилой площади зданий для городов: Новосибирск [29], Екатеринбург [30] и Казань [31]. Предлагается выполнить анализ всех метрополитенов в региональных городах России и определить сходства и различия, связанные с влиянием жилой застройки в шаговой доступности от метро на пассажиропоток.

Для оценки влияния жилой застройки на пассажиропоток метро использовался метод регрессионного анализа [32]. Регрессия рассматривалась как парная: независимая переменная — жилая площадь зданий в радиусе шаговой доступности; зависимая переменная — годовой пассажиропоток метро. Исходные данные были следующие:

1. *Жилая площадь зданий* в радиусе шаговой доступности от существующих станций метрополитена. Информация получена из открытого источника «Реформа ЖКХ»¹. Он содержит сведения о жилом доме, в том числе общей, нежилой и жилой площади. Для расчетов принята жилая площадь здания. Учитывались год постройки здания и станции метро. В рамках изучаемого периода для каждого года в отдельности производилось суммирование жилой площади по всем зданиям, которые расположены в радиусе охвата всей системы метро.

2. *Пассажиропоток метрополитена*. Для расчетов принимался годовой пассажиропоток всей

системы метрополитена анализируемого города. Рассмотрены метрополитены городов: Новосибирск, Нижний Новгород, Самара, Екатеринбург, Казань. Исходные материалы получены от Международной ассоциации «Метро», по г. Новосибирск до 1990 г. — от МУП г. Новосибирска «Новосибирский метрополитен».

3. *Радиус шаговой доступности*. Жилая застройка рассматривалась в радиусах: 0–400, 0–800, 0–1200, 400–800, 800–1200 м.

4. *Временной период оценки*. Расчет будет проводиться для двух временных периодов: с момента открытия метрополитенов по 2020 г.; с 2005 по 2019 гг. Второй период учитывает влияние социально-экономических факторов (рис. 1).

Выраженное падение пассажиропотока в 2005 г. (для Екатеринбурга в 2009 г.) связано с проведением реформы по замене натуральных льгот денежными выплатами (Федеральный закон № 122-ФЗ от 22.08.2004), так называемой монетизацией льгот. Екатеринбург стал исключением в связи тем, что реализация закона была перенесена на 2009 г. Льготы на проезд предоставлялись в натуральном виде, что позволяло их обладателю делать неограниченное число поездок. Снижение пассажиропотока метрополитенов в 2020 г. по сравнению с 2019 г. составило в: Новосибирске — 31 %, Нижнем Новгороде — 33 %, Самаре — 33 %, Екатеринбурге — 41 %, Казани — 29 %. Основным фактором снижения в данном случае послужили ограничительные меры, связанные с нераспространением вируса COVID-19.

Поскольку независимой переменной является только жилая площадь зданий, прочие факторы, которые могут оказывать влияние на формирование пассажиропотока метро, в том числе пассажиропоток от деловой активности, подвозящие маршруты, пересадки между видами транспорта, будут составлять ошибки модели.

Краткая характеристика метрополитенов в региональных городах России приведена в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наличие взаимосвязи между жилой площадью в пешей доступности от станций метро и пассажиропотоком выявлено для г. Екатеринбург и г. Казань (табл. 2).

Диаграммы рассеяния, совмещенные с графиком линейной регрессии, подтверждают результаты корреляции (рис. 2).

С целью оценки спроса на метро без учета влияния льготного проезда, а также ограничительных мер в связи с пандемией COVID-19, выполнен расчет зависимости для периода с 2005 по 2019 гг. (табл. 3). Для г. Екатеринбург принят расчет с 1991 г., так как реформа в данном городе проведена в 2009 г., и количество данных для оценки будет недостаточным.

¹ Государственная корпорация — Фонд содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства. URL: <https://www.reformagkh.ru/>

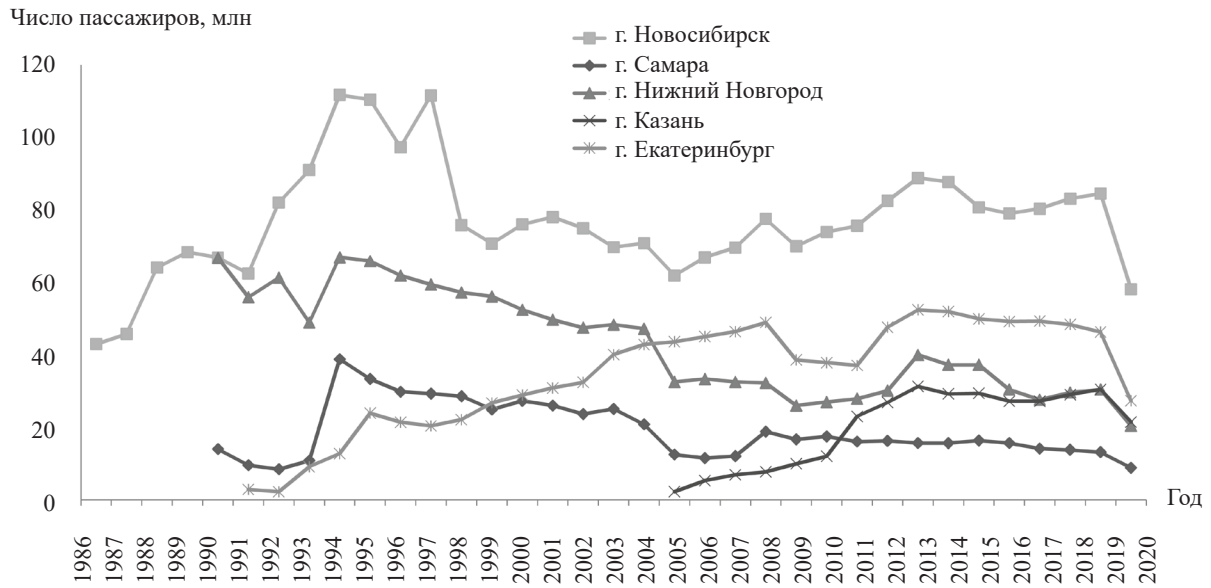


Рис. 1. Динамика пассажиропотока метрополитенов по региональным городам России

Табл. 1. Характеристики метрополитенов в региональных городах России на 2020 г.

Характеристика	Новосибирск	Екатеринбург	Казань	Нижний Новгород	Самара
Длина линий в двухпутном исчислении, км	15,9	12,7	16,8	21,82	11,6
Количество линий, шт.	2	1	1	2	1
Количество станций, шт.	13	9	11	15	10
Плотность метрополитена, км/км ² города	0,059	0,025	0,05	0,047	0,021
Максимальные размеры движения, пар поездов в час	20	15	10,9	11	6
Удельный вес перевозки пассажиров от общегородских, %	21,4	20,9	27,5	11	6,9

Табл. 2. Коэффициент корреляции

Город	Период оценки	Радиус пешей доступности от станций метро, м				
		400	800	1200	400–800	800–1200
Новосибирск	1986–2020	0,13	0,15	0,15	0,16	0,15
Екатеринбург	1991–2020	0,79	0,77	0,77	0,76	0,77
Казань	2005–2020	0,85	0,88	0,9	0,9	0,91
Нижний Новгород	1990–2020	–0,62	–0,66	–0,65	–0,67	–0,63
Самара	1990–2020	–0,21	–0,29	–0,32	–0,32	–0,34

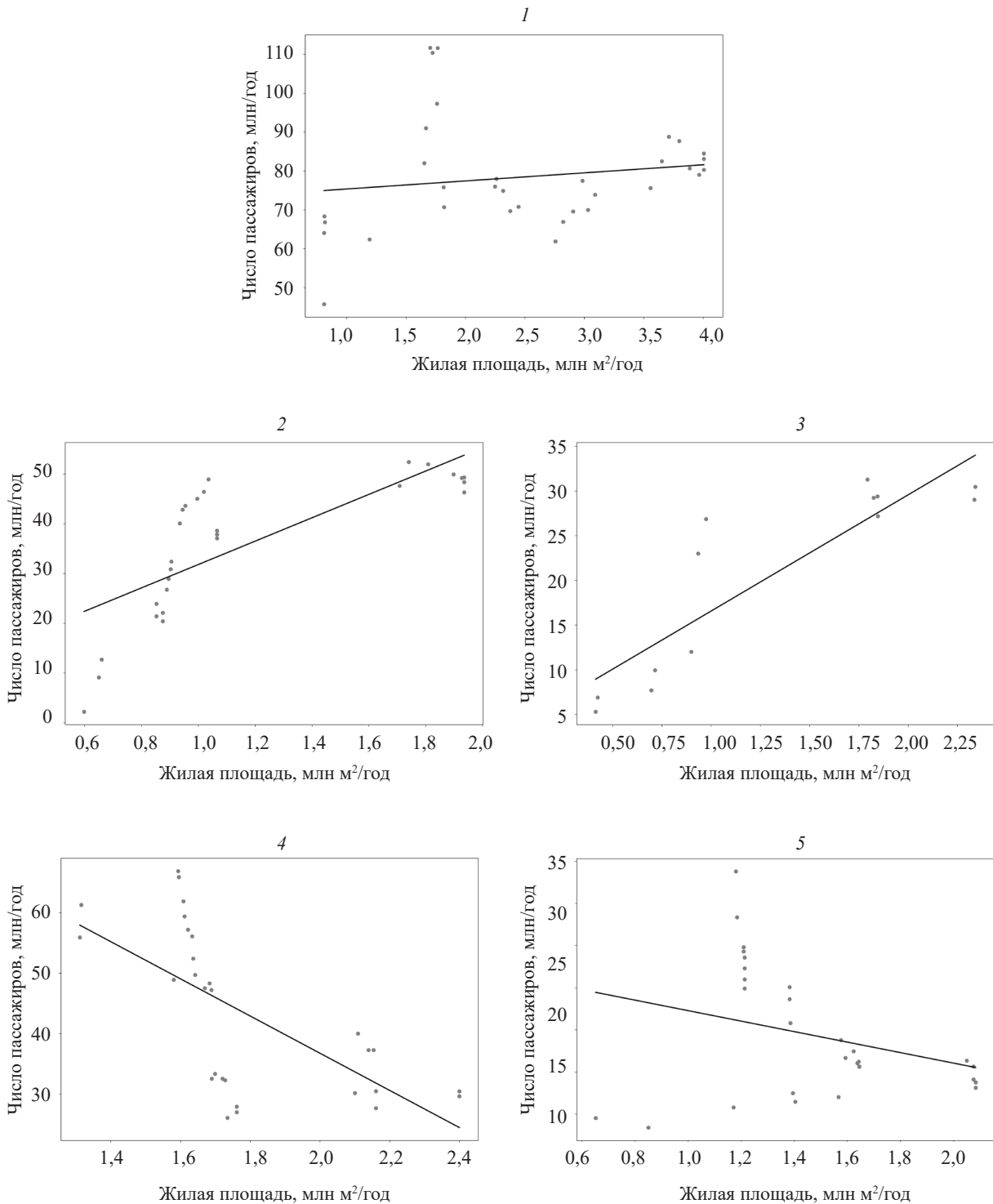


Рис. 2. График линейной регрессии с диаграммой рассеяния для радиуса 800 м за весь период работы метрополитена: Новосибирск (1); Екатеринбург (2); Казань (3); Нижний Новгород (4); Самара (5)

При анализе периода 2005–2019 гг. жилая площадь становится значимым фактором для Новосибирска. Для Самары и Нижнего Новгорода жилая площадь не является значимым фактором, который формирует пассажиропоток.

По полученным коэффициентам составляется уравнение линейной регрессии:

$$y(x) = b_0 + b_1x.$$

Коэффициент b_0 не имеет физического смысла. Коэффициент уравнения b_1 показывает изменение среднего значения пассажиропотока при изменении жилой площади зданий на 1 м^2 в соответствующем радиусе охвата метро. Коэффициент детерминации демонстрирует, насколько пассажиропоток метро определяется жилой площадью зданий в радиусах пешей доступности.

Табл. 3. Результаты регрессионного анализа (период с 2005 по 2019 гг.)

Город	Коэффициент	Радиус пешей доступности от станций метро, м				
		400	800	1200	400–800	800–1200
Новосибирск	Корреляции	0,81	0,79	0,78	0,77	0,78
	Детерминации	0,65	0,62	0,62	0,59	0,61
	b_0	$34,5 \cdot 10^6$	$37,3 \cdot 10^6$	$40,4 \cdot 10^6$	$39,2 \cdot 10^6$	$44,1 \cdot 10^6$
	b_1	40,8	11,7	6,3	16,1	13,6
Екатеринбург	Корреляции	0,79	0,77	0,77	0,76	0,77
	Детерминации	0,62	0,59	0,60	0,58	0,6
	b_0	$2,1 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^6$	$6,7 \cdot 10^6$	$9,1 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^6$
	b_1	97,6	24,6	11,2	32,8	20,3
Казань	Корреляции	0,85	0,88	0,90	0,89	0,91
	Детерминации	0,72	0,78	0,81	0,80	0,82
	b_0	$6,7 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$	$-1,0 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$-4,9 \cdot 10^6$
	b_1	44,9	13,7	7,2	19,7	14,7
Нижний Новгород	Корреляции	0,33	0,27	0,26	0,24	0,26
	Детерминации	0,11	0,07	0,07	0,06	0,07
Самара	Корреляции	0,09	0,02	0,07	0,05	0,14
	Детерминации	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02

Табл. 4. Плотность жилой и деловой функций в радиусе 1200 м от станций

Город	Величина показателя на одну станцию метро		
	Офисы, шт.	Жилье, м ²	Пассажиропоток, чел./год
Новосибирск	13	536 492	6 500 000
Екатеринбург	18	476 506	5 144 444
Казань	9	437 716	2 769 636
Нижний Новгород	6	280 353	1 900 625
Самара	4	370 251	1 312 400

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведена оценка востребованности метрополитена жителями в пешеходной доступности от станций метро в радиусах: 0–400, 0–800, 0–1200, 400–800, 800–1200 м. Для периода оценки с момента открытия метрополитенов по 2020 г. жилая площадь зданий служит важным фактором (корреляция выше 0,75), влияющим на пассажиропоток метро для городов Екатеринбург и Казань. С 2005 по 2019 гг. — периода оценки, который исключает влияние на данные пассажиропотока льготного проезда и ограничительных мер, связанных с пандемией COVID-19, жилая площадь зданий — значимый показатель для городов: Новосибирск, Екатеринбург, Казань. Жилая площадь зданий определяет пассажиропоток метро

на 58–82 %. Иные факторы (фактор) и ошибки модели составляют 18–42 %. Наилучшая детерминация соответствует радиусу 0–400 м для Новосибирска ($R^2 = 0,65$) и Екатеринбурга ($R^2 = 0,62$), радиусу 800–1200 м для Казани ($R^2 = 0,82$). Следовательно, расчет прогнозного пассажиропотока можно выполнять, основываясь только на жилой площади в указанных радиусах. При этом пассажиропоток в наибольшей степени выявляется жилой функцией в г. Казань.

Жилая функция не служит универсальным параметром, определяющим пассажиропоток метро в региональных городах России, так как для Самары и Нижнего Новгорода жилая площадь не является значимым фактором. Следовательно, имеются иные факторы (фактор), которые оказывают значимое влияние на пассажиропоток метро.

Авторами предлагается следующее объяснение причины, что жилая площадь зданий значима для одних городов и незначима для других. По аналогии с исследованием [4] г. Циндао (Китай), можно предположить, что для городов Новосибирск, Екатеринбург и Казань жилая площадь зданий и коммерческая функция изменяются синхронно и коррелируют с пассажиропотоком метро. Значит, для регрессионного анализа, во избежание мультиколлинеарности, можно использовать только один из факторов в качестве независимой переменной. Самара и Нижний Новгород отличаются от рассмотренных тем, что линии метрополитена в их структуре не обслуживают центр. Метро строилось от окраины к центру преимущественно для обслуживания пассажиропотока заводов [22]. Количественная оценка офисов, как мест приложения труда, показывает, что для Са-

мары и Нижнего Новгорода этот показатель в зоне охвата метро минимален по сравнению с другими городами (табл. 4).

Таким образом, для оценки формирования пассажиропотока метро в городах Самара и Нижний Новгород необходимо учитывать два фактора: жилую площадь зданий в радиусе шаговой доступности метро, и коммерческую функцию, так как данные параметры изменяются неодинаково и поэтому должны по-разному коррелировать с пассажиропотоком метрополитена.

Направлением дальнейшего исследования станет определение количественной взаимосвязи пассажиропотока метро и иных значимых факторов, которые его формируют, в том числе деловая активность, подвозящие маршруты, пересадки между видами транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nyunt T.K., Wongchavalidkul N. Evaluation of relationships between ridership demand and Transit-Oriented Development (TOD) indicators focused on land use density, diversity, and accessibility: a case study of existing metro stations in Bangkok // *Urban Rail Transit*. 2020. Vol. 6. Issue 1. Pp. 56–70. DOI: 10.1007/s40864-019-00122-2
2. Lee S., Yi C., Hong S. Urban structural hierarchy and the relationship between the ridership of the Seoul Metropolitan Subway and the land-use pattern of the station areas // *Cities*. 2013. Vol. 35. Pp. 69–77. DOI: 10.1016/j.cities.2013.06.010
3. Gutiérrez J., Cardozo O.D., García-Palomares J.C. Transit ridership forecasting at station level: an approach based on distance-decay weighted regression // *Journal of Transport Geography*. 2011. Vol. 19. Pp. 1081–1092. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.05.004
4. Lin C., Wang K., Wu D., Gong B. Passenger flow prediction based on land use around metro stations: a case study // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 17. P. 6844. DOI: 10.3390/su12176844
5. An D., Tong X., Liu K., Chan E. Understanding the impact of built environment on metro ridership using open source in Shanghai // *Cities*. 2019. Vol. 93. Pp. 177–187. DOI: 10.1016/j.cities.2019.05.013
6. Liu S., Yao E., Li B. Exploring urban rail transit station-level ridership growth with network expansion // *Transportation Research Part D Transport and Environment*. 2018. Vol. 73. Pp. 391–402. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.006
7. Nawrocki J., Nakagawa D., Matsunaka R., Oba T. Measuring walkability and its effect on light rail usage: A comparative study of the USA and Japan // *Urban transport XX*. 2014. Vol. 138. Pp. 305–316. DOI: 10.2495/UT140261
8. Berawi M.A., Saroji G., Iskandar F.A., Ibrahim B.E., Miraj P., Sari M. Optimizing land use allocation of Transit-Oriented Development (TOD) to generate maximum ridership // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 9. Pp. 3798. DOI: 10.3390/su12093798
9. Вучик В.П. Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина ; под науч. ред. М. Блинкина. М. : Территория будущего, 2011. 574 с.
10. Ozgur-Cevher O., Altintasi O., Tuydes-Yaman H. Evaluating the Relation Between Station Area Design Parameters and Transit Usage for Urban Rail Systems in Ankara, Turkey // *International Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 18. Issue 4. Pp. 951–966. DOI: 10.1007/s40999-020-00506-7
11. Kim N.J. Estimating the subway station influence area by the distribution of walking distance and the change of housing sale prices // *Journal of the Korea Planners Association*. 2012. Vol. 47. Issue 6. Pp. 29–38.
12. Kim D.O., Ryu Y.G., Choi H.G. A study on the setting up method of subway access/egress area by walking and its application // *Journal of Korea Planning Association*. 2002. Vol. 37. Issue 5. Pp. 177–186.
13. Yun D.S., Ko J.J. Analysis of Daegu citizens' subway use characteristics and access area of subway station // *Journal of the Korean Regional Science Association*. 2006. Vol. 22. Issue 2. Pp. 251–274.
14. Бунеев В.М., Новоселов В.И. Пассажирский транспорт Новосибирска: Проблемы повышения эффективности и развития. Новосибирск : НГАСУ, 1999. 268 с.
15. Ваксман С.А. Социально-экономические проблемы прогнозирования развития систем массового пассажирского транспорта в городах. Екатеринбург, 1996. 289 с.
16. Козлов П.И., Власов Д.Н. Оценка параметров качества обслуживания пассажиров в транспортно-пересадочных узлах // *Вестник МГСУ*. Т. 12. № 5 (104). С. 529–536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536

17. *Намиот Д.Е., Покусаев О.Н., Лазуткина В.С.* О моделях пассажирского потока для городских железных дорог // *International Journal of Open Information Technologies*. 2018. Т. 6. № 3. С. 9–14.
18. *Некрапленная М.Н., Намиот Д.Е.* Анализ матриц корреспонденции метро // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Т. 7. № 7. С. 68–80.
19. *Александр К.Э., Руднева Н.А.* Скоростной рельсовый транспорт в градостроительстве. М. : Стройиздат, 1985. 139 с.
20. *Федорова М.В.* Влияние скоростного городского транспорта на системы расселения // *Мир транспорта*. 2015. Т. 13. № 6 (61). С. 22–35.
21. *Атаев П.Г.* Зарубежный опыт исследования внеуличного пассажирского транспорта // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле*. 2020. Т. 20. № 2. С. 94–97. DOI: 10.18500/1819-7663-2020-20-2-94-97
22. *Смирнова Е.А.* Метрополитен в структуре российских городов // *Архитектура и строительство России*. 2010. № 6. С. 16–25.
23. *Кинит А.В., Малова Е.Д.* Развитие системы общественного транспорта как один из факторов экологизации городской среды // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23. № 3. С. 46–57. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-46-57
24. *Смолова М.В.* Типологическое многообразие сетей метрополитена как отражение пространственно-планировочной структуры города // *Известия КГАСУ*. 2017. № 3 (41). С. 75–86.
25. *Сафронов Э.А., Сафронов К.Э., Семенова Е.С.* Инновационный путь развития метрополитенов в современных условиях // *Известия Транссиба*. 2010. № 3 (3). С. 103–110.
26. *Валиев Р.Р.* Прогнозирование развития инфраструктуры метрополитена в мегаполисе // *Девятая Всероссийская науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности : тр. конф.* 2019. С. 381–385.
27. *Теличенко В.И.* Реновация — создание современной городской среды // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 1. С. 11.
28. *Lu K., Han B., Lu F., Wang Z.* Urban rail transit in China: Progress report and analysis (2008–2015) // *Urban Rail Transit*. 2016. Vol. 2. Issue 3–4. Pp. 93–105. DOI: 10.1007/s40864-016-0048-7
29. *Ушаков Д.Е., Карелин Д.В.* Оценка возможности прогнозирования пассажиропотока Новосибирского метрополитена на основе плотности жилого фонда // *Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : мат. XXIV Междунар. (XXVII Екатеринбургской, II Минской) науч.-практ. конф.* 2018. С. 126–136.
30. *Ushakov D., Karelin D.* Estimate of interrelation between development of metro and city area of Ekaterinburg // *Transport problems: XII International conference*. 2020. Pp. 849–852.
31. *Ушаков Д.Е., Карелин Д.В.* Оценка взаимосвязи развития метро и городской застройки города Казань // *Актуальные вопросы архитектуры и строительства : XIV Междунар. науч.-техн. конф.* 2021.
32. *Воскобойников Ю.Е.* Построение регрессионных моделей в пакете MathCAD : учебное пособие. Новосибирск : НГАСУ, 2009. 220 с.

Поступила в редакцию 26 сентября 2021 г.

Принята в доработанном виде 24 января 2022 г.

Одобрена для публикации 24 января 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Евгеньевич Ушаков** — аспирант кафедры градостроительства и городского хозяйства; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; специалист по надзору за проектно-изыскательскими работами; **МУП «УКС г. Екатеринбург»**; 620144, г. Екатеринбург, ул. Шейнкмана, д. 110 а; РИНЦ ID: 877619, Scopus: 57195469078; u_dmitrii@mail.ru;

Дмитрий Викторович Карелин — кандидат архитектуры, доцент, заведующий кафедрой градостроительства и городского хозяйства; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; РИНЦ ID: 212418, Scopus: 57195479145; ggh@sibstrin.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

One of the main focus areas of the Strategy for the Spatial Development of the Russian Federation for the period up to 2025 is to reduce the inter-regional dif-

ferentiation in the socio-economic development of subjects of the Russian Federation and to reduce intra-regional socio-economic disparities by means of:

- development of public transport, including lines of high-speed off-street means of transport, subur-

ban commuter lines, and optimization of the network of public transport routes;

- the well-balanced development of urban areas, also through the development of abandoned and inefficiently used spaces, coordinated and integrated development of built-up and potentially built-up areas.

The implementation of these actions requires the consolidated analysis of land use and off-street transport systems and the identification of the quantitative dependence between the values. Foreign sources consider the problem of the spatial organization of urban development.

A study on the city of Bangkok (Thailand) has identified that six variables have a significant relationship with the transportation of underground railway passengers: population density (population/residential area), interchange stations, the number of bus lines, the number of bus stops, the number of train stations and intercepting parking lots. The authors conclude that only density and layout variables affect the passenger flow of Bangkok underground railway stations. Also, the results suggest that the population living in high-rise buildings tend to use underground railway stations more than the population living in single-family houses or low-rise buildings [1].

As for the city of Seoul, Korea, it is noteworthy that the passenger flow in the business centre (CBD) and its surroundings is primarily affected by the building density, while the subcentral area is affected by the diversity of functions [2].

In case of a dispersion estimation of the zone of influence of stations on passengers in Madrid (Spain), it is found out that there is a strong relationship between walking distance and underground railway use. The approximation function for the residential area is linear, and the economic activity is exponential. R^2 determination coefficients equal 0.972 and 0.952, respectively. If residents reside at a distance of 0–100 m from the station, they make 0.50 underground railway trips per person per day, and if the station is located at a distance of 500–600 m, this value falls to 0.30 [3].

In Qingdao, China, the data on commercial and residential land use are multicollinear. Since the correlation between the residential function was higher than the commercial function, the latter was excluded from the calculation [4].

In some cases the residential function did not have a significant impact on the underground railway passenger traffic. For example, in Shanghai, China, commercial land use is more significant than the residential function [5].

A number of studies have shown that the total length of the urban underground railway system is the main factor influencing the passenger flow [6, 7]. This parameter can be considered equivalent to the inclusion of new areas with a residential function, as well as other types of land use in the buffer zone of underground railway stations.

Most of the analyzed works identified a relationship between the passenger flow of underground railways and the development of urban areas, in particular, their residential development. At the same time, the impact of residential development on each city is ambiguous. This issue requires further study.

The basic urban development strategy, which integrates land use and transport systems, is the concept of transport-oriented development (TOD). TOD implies the establishment of zones of medium and high density mixed land use within a convenient walking distance (800 m) from public transport stations [8, 9].

A 3D-concept (density, diversity and layout), proposed by R. Cervero and K. Kockelman (1997), based on the TOD characteristics (Bangkok [1]) is used. Based on the data collected, 22 variables were developed and classified into three categories (density, diversity and layout) according to the 3D concept. All of them were within the 800-meter zone. The distance to the objects was determined using a density map according to the Kernel Density Estimation (KDE) concept.

TOD does not identify the exact size of the buffer zone within which development takes place. Works on high-speed transport identify this zone in different ways. A number of publications use an 800 m buffer zone for the city of Bangkok [1] and the city of Ankara [10]. For Shanghai [5], the buffer zone is 600 m, which corresponds to the recommendation of the 12th five-year plan.

The experts of the Seoul Metro take advantage of the experience of their colleagues [11–13] and recommend a distance (radius) of 500 m, which is approximately equal to the 10-minute walking distance.

An attempt was made to comprehensively analyze different ways to identify the walking accessibility of underground railway stations in Madrid (Spain) [3]. A comparison was made between the use of Euclidean distances and distances identified taking into account the street configuration.

The operation of the public transport system, and the underground railway in particular, is a relevant issue for Russian researchers [14–16]. Various approaches to the forecasting of underground railway passenger traffic are considered [17–19]. The feasibility of further development of this transport system from the economic, environmental and social points of view is assessed [20, 21].

The layout of underground railways in regional Russian cities, except for Samara, coincides with the main directions of urban development. Domestic experience in designing underground railways shows that their construction is mainly focused on connecting the central congested part of the city with industrial enterprises or large residential neighborhoods in the outskirts, depending on the city-forming function [22].

The development of public transport and the rational correlation between its means allow for the urban

space reconstruction that will empty the areas for public, recreational and other functions the city needs [23].

The underground railway is an important means of transport that makes up the “urban fabric” and effectively reduces the time spent on urban travel. It is pointed out that the underground railway network is designed in accordance with the planning structure of the city, and not vice versa. In this regard, the underground railway, being a means of transport, can unclog the city centre by getting rid of cars and excessive ground transport to ensure the appropriate density of business activity in a small area. Since the underground railway is associated with the planning structure of the city, it is an integral part of the urban transport infrastructure as a whole [24].

To make the underground railway operate at full capacity, it is necessary to organize feeder routes of the ground transport and turning circles near the stations. This measure will increase the passenger traffic. The passenger flow is in direct correlation with the length of the underground railway line [25].

One of the methods used in the domestic studies of underground railways is the method of gravity modeling [26].

MATERIALS AND METHODS

It is important to have a comprehensive understanding of the key factors influencing the use of the underground railway to have a sustainable urban environment that is convenient for every resident. The current urban renovation policy, implemented in Moscow, can be further applied to other regions [27]. A quantitative and spatial evaluation of relationships is needed to assess the feasibility of the renovation of existing urban areas in conjunction with the infrastructure of non-street transport.

The object of the study encompasses underground railway systems (without considering individual stations) in regional cities of Russia.

The hypothesis of the study is that the living space of buildings within walking distance is a significant factor; it makes a major contribution to the underground railway passenger traffic and can be used to make a forecast without considering other factors affecting passenger traffic.

The aim of the study is to assess the quantitative relationship between changes in the residential area of buildings within walking distance of the stations and the passenger flow in the underground railway systems in regional cities of Russia.

Passenger flows in underground railway systems represent the local information, which requires individual inquiries for each city to be filed to the local administration or the organization operating the underground railway [1, 3, 5, 6, 28]. This is typical for foreign countries as well as Russia. At the same time, there are organizations that unite local underground railways and provide open access to their data. They include the International

Metro Association that unites underground railways in the former Soviet Union; China Association of Metros (CAMET) unites China’s underground railways.

The correlation analysis is used to assess the relationship between the planning structure of a city and the underground railway passenger traffic [1, 3, 10]. Linear and nonlinear regression models are applied [10].

Previously, the dependence between passenger flows in underground railways and the living area of buildings was identified for the cities of Novosibirsk [29], Ekaterinburg [30] and Kazan [31]. The authors propose to analyze all underground railways in regional cities of Russia and identify the similarities and differences associated with the impact of residential buildings within walking distance of the underground railway on passenger flows.

The method of regression analysis was used to assess the impact of residential development on passenger flows of underground railways [32]. The regression was considered as a pairwise phenomenon: the independent variable and the living area of buildings within walking distance; the dependent variable and the annual passenger flow of the underground railway. The input data were as follows:

1. *The residential area of buildings* within walking distance of existing metro stations. Information obtained from the open source “Reform of the housing and utilities sector”¹. It contains information about the residential building, including its total, non-residential and living areas. The residential area of the building was used in calculations. The years of construction of the building and underground stations were taken into account. Within the framework of the period under study, for each year separately, the residential area was summed up for all buildings located within the radius of the entire underground railway system.

2. *The passenger flow of the underground railway.* The annual passenger flow of the entire underground railway system in an analyzed city was taken for calculations. The following cities were considered: Novosibirsk, Nizhny Novgorod, Samara, Ekaterinburg, Kazan. The input data were received from Metro International Association. For Novosibirsk this information was provided by MUP Novosibirsk Metro till 1990.

3. *The radius of walking distance.* Residential development was considered within the following radii: 0–400, 0–800, 0–1200, 400–800, 800–1200 m.

4. *Evaluation time period.* The calculation will be made for two time periods: from the opening of the underground railway to 2020; from 2005 to 2019. The second period takes into account the influence of socio-economic factors (Fig. 1).

A pronounced drop in the passenger traffic in 2005 (in 2009 in Ekaterinburg) was triggered by a reform

¹ State Corporation — Fund to Promote Reform in the Residential and Utilities Services Sector. URL: <https://www.reformmagkh.ru/>

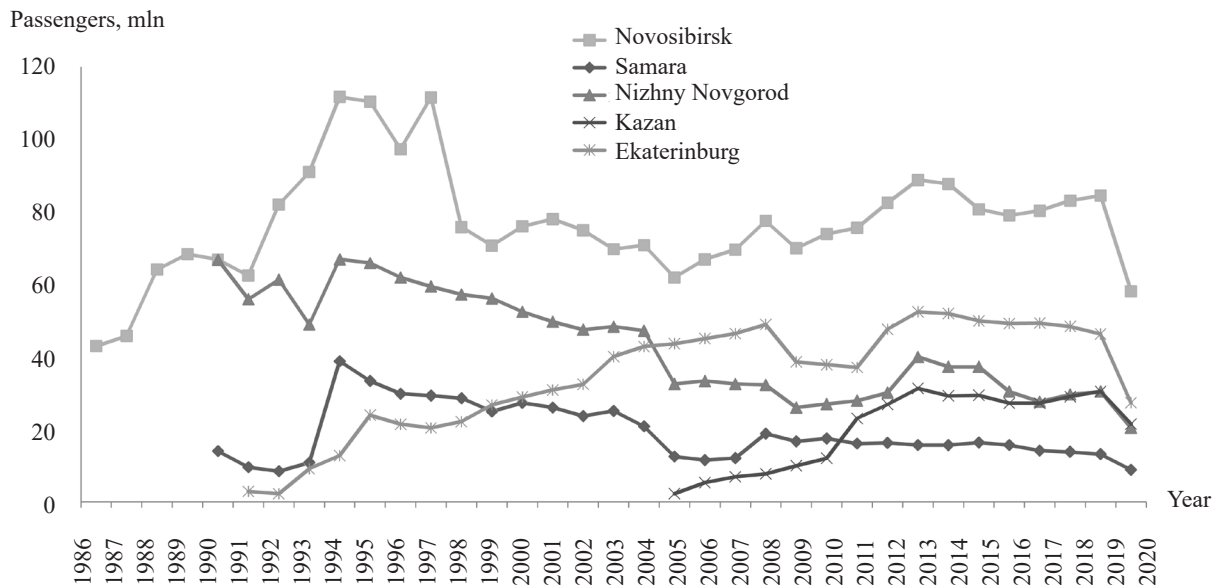


Fig. 1. The dynamics of the underground railway passenger traffic in regional cities of Russia

that had replaced in-kind benefits with cash benefits (Federal Law No. 122-FZ of 22.08.2004), the so-called monetization of benefits. Ekaterinburg was an exception due to the fact that the implementation of the law was postponed till 2009. The benefits were provided in kind and allowed their recipients to make an unlimited number of trips. In 2020 compared to 2019, the decrease in the underground railway passenger traffic was as follows: Novosibirsk — 31 %, Nizhny Novgorod — 33 %, Samara — 33 %, Ekaterinburg — 41 %, Kazan — 29 %. The main factor included the restrictive measures related to the spread of the COVID-19 virus.

Since the independent variable is the residential area of buildings, other factors that can influence

the underground railway passenger flow, including passenger flows generated by business activities, drop-off routes, transfers between means of transport, will represent model errors.

A brief characteristic of underground railways in regional Russian cities is provided in Table 1.

RESEARCH RESULTS

The correlation between the residential area within walking distance of underground railway stations and passenger traffic was identified for Ekaterinburg and Kazan (Table 2).

The scatter diagrams, combined with the linear regression plot, substantiate the correlation results (Fig. 2).

Table 1. Characteristics of underground railways in regional cities of Russia in 2020

Characteristics	Novosibirsk	Ekaterinburg	Kazan	Nizhny Novgorod	Samara
Length of lines having double platforms, km	15.9	12.7	16.8	21.82	11.6
Number of lines, pcs.	2	1	1	2	1
Number of stations, pcs.	13	9	11	15	10
Metro density, km/km ² city	0.059	0.025	0.05	0.047	0.021
Maximal travel intensity, pairs of trains per hour	20	15	10.9	11	6
Share of passenger transportation in the city, %	21.4	20.9	27.5	11	6.9

Table 2. Correlation coefficient

City	Evaluation period	Walking distance from underground railway stations, m				
		400	800	1,200	400–800	800–1,200
Novosibirsk	1986–2020	0.13	0.15	0.15	0.16	0.15
Ekaterinburg	1991–2020	0.79	0.77	0.77	0.76	0.77
Kazan	2005–2020	0.85	0.88	0.9	0.9	0.91
Nizhny Novgorod	1990–2020	-0.62	-0.66	-0.65	-0.67	-0.63
Samara	1990–2020	-0.21	-0.29	-0.32	-0.32	-0.34

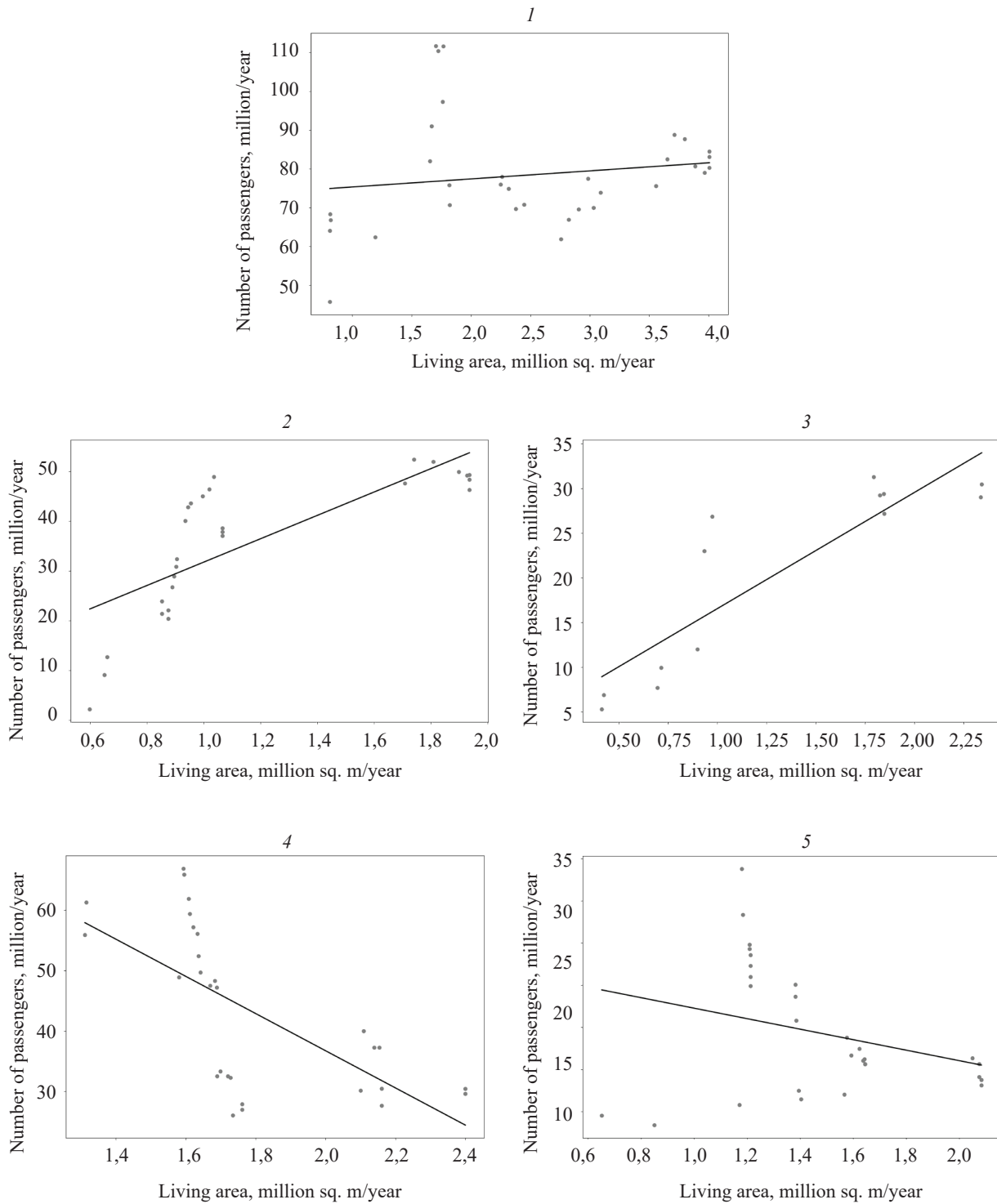


Fig. 2. The linear regression graph with the scatter diagram for the 800 m radius and the whole period of the underground railway operation: Novosibirsk (1); Ekaterinburg (2); Kazan (3); Nizhny Novgorod (4); Samara (5)

To evaluate the demand for underground railways without taking into account the impact of reduced fares and restrictive measures due to the COVID-19 pandemic, we calculated the dependence for the period from 2005 to 2019 (Table 3). As for Ekaterinburg, the calculation was made for the period starting in 1991, because this city was reformed in 2009, and the amount of data for the evaluation would be insufficient.

When the 2005–2019 period is analyzed, living spaces become a significant factor for Novosibirsk. For Samara and Nizhny Novgorod a residential area is not a significant factor that shapes passenger flows.

A linear regression equation is composed based on the obtained coefficients:

$$y(x) = b_0 + b_1x.$$

Table 3. Results of the regression analysis (2005–2019)

City	Coefficient	Walking distance from underground railway stations, m				
		400	800	1,200	400–800	800–1,200
Novosibirsk	Correlations	0.81	0.79	0.78	0.77	0.78
	Determinations	0.65	0.62	0.62	0.59	0.61
	b_0	$34.5 \cdot 10^6$	$37.3 \cdot 10^6$	$40.4 \cdot 10^6$	$39.2 \cdot 10^6$	$44.1 \cdot 10^6$
	b_1	40.8	11.7	6.3	16.1	13.6
Ekaterinburg	Correlations	0.79	0.77	0.77	0.76	0.77
	Determinations	0.62	0.59	0.60	0.58	0.6
	b_0	$2.1 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^6$	$6.7 \cdot 10^6$	$9.1 \cdot 10^6$	$6.5 \cdot 10^6$
	b_1	97.6	24.6	11.2	32.8	20.3
Kazan	Correlations	0.85	0.88	0.90	0.89	0.91
	Determinations	0.72	0.78	0.81	0.80	0.82
	b_0	$6.7 \cdot 10^6$	$2.9 \cdot 10^6$	$-1.0 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	$-4.9 \cdot 10^6$
	b_1	44.9	13.7	7.2	19.7	14.7
Nizhny Novgorod	Correlations	0.33	0.27	0.26	0.24	0.26
	Determinations	0.11	0.07	0.07	0.06	0.07
Samara	Correlations	0.09	0.02	0.07	0.05	0.14
	Determinations	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02

Coefficient b_0 has no physical meaning. The coefficient of the equation b_1 shows a change in the average value of the passenger flow when the living area of buildings per 1 m² changes in the radius of the underground railway coverage. The coefficient of determination demonstrates the extent to which the passenger flow is determined by the living area of buildings in walking radiuses.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The demand for underground railways within the following walking distances of homes: 0–400, 0–800, 0–1,200, 400–800, 800–1,200 m was evaluated. For the evaluation period from the opening of underground railways to 2020, the residential area of buildings serves as an important factor (correlation above 0.75) affecting underground railway passenger flows for the cities of Ekaterinburg and Kazan. In 2005 to 2019, or during the evaluation period, that was free from the effect of reduced fares and restrictive measures related to the COVID-19 pandemic on the passenger flow data, the floor area of residential buildings was a significant factor for the cities of Novosibirsk, Ekaterinburg, and Kazan. The living area of buildings determines the passenger flow of the underground railway by 58–82 %. Other factors (factor) and model errors account for 18–42 %. The best determination corresponds to the radius of 0–400 m for Novosibirsk ($R^2 = 0.65$) and Ekaterinburg ($R^2 = 0.62$), and the radius of 800–1,200 for Kazan ($R^2 = 0.82$). Consequently, calculations of predicted passenger flows can be performed, based on the living area within these radii. In this case, the passenger flow is to the greatest extent identified by the residential function of Kazan.

The residential function does not serve as a universal parameter determining passenger flows in regional Russian cities, as residential areas in Samara and Nizhny Novgorod are not a significant factor. Consequently, there are other factors (or factor) that have a significant impact on passenger flows in underground railways.

The authors offer the following explanation why the living space of buildings is significant for some cities and insignificant for others. By analogy with the study [4] of the city of Qingdao (China), we can assume that for the cities of Novosibirsk, Ekaterinburg and Kazan, living areas of buildings and their commercial function change synchronously and correlate with passenger flows in underground subways. So, to avoid multicollinearity, only one of the factors can be used as an independent variable for regression analysis. Samara and Nizhny Novgorod differ from other cities since underground railway lines do not operate in the centre. The underground railway was built from the outskirts to the center mainly for the passenger traffic of factories [22]. The quantitative evaluation of offices as places of labour application shows that this indicator of the underground railway coverage area is minimal compared to other cities (Table 4).

Hence, to assess underground passenger flow in the cities of Samara and Nizhny Novgorod, two factors should be taken into account: the residential area of buildings within walking distance of the underground station, and the commercial function, as these parameters change differently and therefore should correlate differently with the underground passenger flow.

The focus of further research will be to determine the quantitative relationship between the subterranean passenger flow and other significant factors that shape it, including business activities, drop-off routes, transfers between means of transport.

Table 4. The density of residential and business functions within 1,200 m of the stations

City	The value of the indicator per metro station		
	Offices, pcs.	Housing, m ²	Passenger traffic, people/year
Novosibirsk	13	536,492	6,500,000
Ekaterinburg	18	476,506	5,144,444
Kazan	9	437,716	2,769,636
Nizhny Novgorod	6	280,353	1,900,625
Samara	4	370,251	1,312,400

REFERENCES

1. Nyunt T.K., Wongchavalidkul N. Evaluation of relationships between ridership demand and Transit-Oriented Development (TOD) indicators focused on land use density, diversity, and accessibility: A case study of existing metro stations in Bangkok. *Urban Rail Transit*. 2020; 6(1):56-70. DOI: 10.1007/s40864-019-00122-2
2. Lee S., Yi C., Hong S. Urban structural hierarchy and the relationship between the ridership of the Seoul Metropolitan Subway and the land-use pattern of the station areas. *Cities*. 2013; 35:69-77. DOI: 10.1016/j.cities.2013.06.010
3. Gutiérrez J., Cardozo O.D., García-Palomas J.C. Transit ridership forecasting at station level: an approach based on distance-decay weighted regression. *Journal of Transport Geography*. 2011; 19:1081-1092. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.05.004
4. Lin C., Wang K., Wu D., Gong B. Passenger flow prediction based on land use around metro stations: A case study. *Sustainability*. 2020; 12(17):6844. DOI: 10.3390/su12176844
5. An D., Tong X., Liu K., Chan E. Understanding the impact of built environment on metro ridership using open source in Shanghai. *Cities*. 2019; 93:177-187. DOI: 10.1016/j.cities.2019.05.013
6. Liu S., Yao E., Li B. Exploring urban rail transit station-level ridership growth with network expansion. *Transportation Research Part D Transport and Environment*. 2018; 73:391-402. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.006
7. Nawrocki J., Nakagawa D., Matsunaka R., Oba T. Measuring walkability and its effect on light rail usage: A comparative study of the USA and Japan. *Urban transport XX*. 2014; 138:305-316. DOI: 10.2495/UT140261
8. Berawi M.A., Saroji G., Iskandar F.A., Ibrahim B.E., Miraj P., Sari M. Optimizing land use allocation of Transit-Oriented Development (TOD) to generate maximum ridership. *Sustainability*. 2020; 12(9):3798. DOI: 10.3390/su12093798
9. Vuchik V.R. *Transport in cities convenient for life* / transl. from English. A. Kalinin, under scientific ed. M. Blinkina. Moscow, Territory of the future, 2011; 574. (rus.).
10. Ozgur-Cevher O., Altintasi O., Tuydes-Yaman H. Evaluating the relation between station area design parameters and transit usage for urban rail systems in Ankara, Turkey. *International Journal of Civil Engineering*. 2020; 18(4):951-966. DOI: 10.1007/s40999-020-00506-7
11. Kim N.J. Estimating the subway station influence area by the distribution of walking distance and the change of housing sale prices. *Journal of the Korea Planners Association*. 2012; 47(6):29-38.
12. Kim D.O., Ryu Y.G., Choi H.G. A study on the setting up method of subway access/egress area by walking and its application. *Journal of Korea Planning Association*. 2002; 37(5):177-186.
13. Yun D.S., Ko J.J. Analysis of Daegu citizens' subway use characteristics and access area of subway station. *Journal of the Korean Regional Science Association*. 2006; 22(2):251-274.
14. Buneev V.M., Novoselov V.I. *Passenger transport in Novosibirsk: Problems of efficiency and development*. Novosibirsk, NGAVT, 1999; 268. (rus.).
15. Waxman S.A. *Socio-economic problems of forecasting the development of mass transit systems in cities*. Ekaterinburg, 1996; 289. (rus.).
16. Kozlov P.I., Vlasov D.N. Passenger service quality parameters assessment at transport interchange hubs. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12:5(104):529-536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536 (rus.).
17. Namiot D.E., Pokusaev O.N., Lazutkina V.S. On passenger flow data models for urban railways. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018; 6(3):9-14. (rus.).
18. Nekraplonna M., Namiot D. Metro correspondence matrix analysis. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019; 7(7):68-80. (rus.).
19. Alexander K.E., Rudneva N.A. *High-speed rail in urban planning*. Moscow, Strojizdat, 1985; 139. (rus.).

20. Fedorova M.V. The impact of urban mass rapid transit on urbanized regions. *World of Transport*. 2015; 13:6(61):22-35. (rus.).
21. Ataev P.G. Foreign research experience of the non-street passenger transport. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Earth Sciences*. 2020; 20(2):94-97. DOI: 10.18500/1819-7663-2020-20-2-94-97 (rus.).
22. Smirnova E.A. Subway in the structure of Russian cities. *Architecture and Construction of Russia*. 2010; 6:16-25. (rus.).
23. Kinsht A.V., Malova E.D. Development of public transport system as a factor in greening the urban environment. *Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(3):46-57. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-46-57 (rus.).
24. Smolova M.V. Typological variety of subway networks as the reflection of spatial and layout city structure. *Proceedings of KGASU*. 2017; 3(41):75-86. (rus.).
25. Safronov E.A., Safronov K.E., Semenova E.S. Innovative way of subway development in modern conditions. *Proceedings of Transsib*. 2010; 3(3):103-110. (rus.).
26. Valiev R.R. Forecasting of the metro infrastructure development in megalopolises. *Ninth All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry: Proceedings of the Conference*. 2019; 381-385. (rus.).
27. Telichenko V.I. Renovation — creating modern urban environment. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(1):11. (rus.).
28. Lu K., Han B., Lu F., Wang Z. Urban rail transit in China: Progress report and analysis (2008–2015). *Urban Rail Transit*. 2016; 2(3-4):93-105. DOI: 10.1007/s40864-016-0048-7
29. Ushakov D.E., Karelin D.V. The possibility assessment of passenger traffic forecasting of the Novosibirsk metro according to housing density. *Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities and zones of their influence : materials of the XXIV International (XXVII Ekaterinburg, II Minsk) scientific and practical conference*. 2018; 126-136. (rus.).
30. Ushakov D., Karelin D. Estimate of interrelation between development of metro and city area of Ekaterinburg. *Transport problems: XII International conference*. 2020; 849-852.
31. Ushakov D.E., Karelin D.V. Assessment of the relationship between the development of the subway and urban development of Kazan. *Actual Questions of Architecture and Construction : XIV International Scientific and Technical Conference*. 2021. (rus.).
32. Voskoboynikov Y.E. *Building regression models in MathCAD*. Novosibirsk, 2009; 220. (rus.).

Received September 26, 2021.

Adopted in revised form on January 24, 2022.

Approved for publication on January 24, 2022.

B I O N O T E S : **Dmitriy E. Ushakov** — postgraduate student of the Department of Urban Planning and Urban Economy; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; Specialist in Supervision of Design and Survey Works; **Capital Construction Department Ekaterinburg**; 110 a Sheinkman st., Ekaterinburg, 620144, Russian Federation; ID RISC: 877619, Scopus: 57195469078; u_dmitrii@mail.ru;

Dmitriy V. Karelin — PhD in Architecture, Associate Professor, Head of the Department of Urban Planning and Urban Economy; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ID RISC: 212418, Scopus: 57195479145; ggh@sibstrin.ru.

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.