

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИГ РАН)**

*На правах рукописи*

**Киселев Игорь Владимирович**

**Пространственно-временные закономерности распределения  
пассажиропотоков в системе метрополитена (на примере  
Москвы)**

Специальность: 1.6.13 – Экономическая, социальная, политическая и рекреационная  
география

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата географических наук

**Научный руководитель:**  
д.г.н., Тархов Сергей Анатольевич

**Москва – 2026**

# Оглавление

Введение .....	3
Глава 1. Теоретические основы изучения пассажиропотоков в системах метрополитена.....	8
1.1 Понятие «пассажиропоток» и его параметры. Пассажиропоток как объект исследования географии транспорта. ....	8
1.2 Исследования транспортных и пассажирских потоков Московской и других городских агломераций.....	26
1.3 Факторы распределения пассажиропотока в системе метрополитена .....	42
1.4 Исходные данные и методика изучения пространственно-временных закономерностей Московского метрополитена .....	67
Глава 2. Пространственный анализ базовых параметров пассажиропотока московского метрополитена .....	76
2.1 Входящий объем пассажиропотока станций Московского метрополитена .....	76
2.2 Интенсивность пассажиропотока и пассажиронапряженность направлений Московского метрополитена .....	98
2.3 Мощность пассажиропотока .....	115
Глава 3. Пространственный анализ структурных параметров пассажиропотока. Пространственная модель пассажиропотока Московского метрополитена. ....	126
3.1 Пространственный анализ структуры пассажиропотока станций московского метрополитена по территориальному признаку .....	126
3.2 Пространственный анализ структуры пассажиропотока станций московского метрополитена по временному признаку .....	151
3.3 Иерархия узлов и направлений .....	158
3.4 Пространственная модель распределения пассажиропотока в московском метрополитене .....	168
Заключение.....	191
Литература.....	200
Приложение.....	208
Приложение 1. Соответствие названий станций метрополитена и названий пересадочных узлов, для которых были рассчитаны параметры пассажиропотока. ....	208

## Введение

**Актуальность работы.** В последние десятилетия сформировалось как самостоятельная научная дисциплина новое направление географии транспорта – география городского транспорта. Однако спектр освещаемых ею вопросов видится несколько уже, чем в классических транспортно-географических исследованиях на более широком спектре масштаба (регион, страна, мир), прежде всего в силу ее «молодости». Если география транспорта как отдельная дисциплина социально-экономической географии возникла еще в середине-конце XIX века благодаря работам таких исследователей, как И. Коль [Kohl, 1841], Л. Лаланн [Lalanne, 1863], А. Геттнер [Hettner, 1894], то география городского транспорта сформировалась лишь в последней четверти XX века [Harvey, 1978], [Barber, 1984], [Hanson, 1986].

Одновременно с географией городского транспорта в результате развития вычислительных возможностей появилась новая прикладная дисциплина – транспортное моделирование. Фундаментальной работой в этой области считается труд Ф. Хейта [Хейт, 1978]. Мы упоминаем эту смежную дисциплину, поскольку именно в ее рамках и по сей день пишется большая часть научных трудов о транспортных (в т.ч. пассажирских) потоках в городских транспортных системах. Многочисленные работы, вышедшие более, чем за 60 лет существования этой дисциплины, посвящены методологии моделирования транспортных потоков. Однако, пространственная интерпретация полученных ею результатов крайне редко служит целью работ специалистов по транспортному моделированию. В результате все богатство накопленных эмпирических исследований по изучению пространственного распределения городских транспортных потоков по сей день ждет своих исследователей из области географии транспорта. И это крайне парадоксально с учетом того, что в географии транспорта накоплен достаточно большой опыт по изучению пространственных закономерностей распределения пассажиропотоков. Однако, главным объектом изучения у географов-транспортников остаются транспортные системы более высоких уровней пространственной организации на мезо- и макроуровне (район, страна, часть Света, мир).

Настоящая работа призвана пересмотреть негласное разделение сфер изучения транспортных потоков между географами-транспортниками и специалистами по транспортному планированию и моделированию и, наконец, формализовать наблюдения за транспортными потоками в масштабе городской агломерации (на примере Московской) сквозь призму географии транспорта.

Для этой цели в качестве объекта изучения автором выбрана система Московского метрополитена. На наш взгляд, именно эта система является релевантным исследовательским полигоном для изучения пространственной организации транспортных (пассажи́рских) потоков по ряду следующих причин:

1. Система Московского метрополитена интуитивно понятна многим читателям не только в области географии транспорта, но и смежных географических дисциплин, и даже дисциплин, далеких от географии. Это позволит эффективно верифицировать научным сообществом результаты, полученные в исследовании.

2. Система Московского метрополитена имеет сложную пространственную организацию. В конце 2025 г. в сети его линий насчитывалось три топологических циклических яруса, что говорит о большом количестве связей между всеми узлами системы и позволяет строить большое количество вариантов маршрутов между любыми двумя парами узлов. Это, в свою очередь, наталкивает нас на гипотезу о том, что сложность пространственной конфигурации пассажирских потоков внутри системы может быть связана со сложностью морфологической структуры сети.

3. Сложность морфологической структуры системы растет год от года. Так, за 10 лет (с начала 2014 г. по конец 2023 г.) в Московском метрополитене количество станций выросло со 190 до 263<sup>1</sup>, то есть более, чем на треть. Такого значительного прироста количества станций (а, следовательно, и морфологической структуры сети) за всю историю Московского метрополитена не было никогда. Соответственно, на примере изменений структуры системы метрополитена представляется возможным определить динамику пассажиропотока, а также выяснить, насколько и под влиянием каких факторов изменяются параметры пассажиропотока.

4. Система Московского метрополитена эффективно удовлетворяет транспортные потребности жителей города: ежедневно в системе метрополитена совершается до 78% поездок<sup>2</sup>. Кроме того, сеть линий Московского метрополитена имеет почти повсеместное покрытие: в конце 2023 г. лишь 15 из 125 районов т.н. «старой Москвы» (районы, входившие в состав Москвы на 1 января 2011 г.) не имеют в своих границах станции метро. Это говорит о том, что транспортные корреспонденции, совершающиеся в рамках системы Московского

---

<sup>1</sup>на момент публикации исследования (январь 2026 г.) число станций увеличилось до 275.

<sup>2</sup>Moscow GlobalCity Mobility [Электронный ресурс]. URL: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4331\\_Deloitte-City-Mobility-Index/Moscow\\_GlobalCityMobility\\_WEB.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4331_Deloitte-City-Mobility-Index/Moscow_GlobalCityMobility_WEB.pdf) (дата обращения: 15.09.2023).

метрополитена, во многом соответствуют общему рисунку направлений всех транспортных корреспонденциях города.

**Объектом исследования** выступает система московского метрополитена – сеть станций и линий. **Предмет исследования** – пространственные различия параметров ее пассажиропотоков, а также их временная динамика.

**Цель работы:** установить особенности пространственной структуры пассажиропотоков московского метрополитена и степень ее устойчивости-изменчивости во времени за 2019 – 2023 гг.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Собрать информационную базу о числе ежедневно входящих пассажиров по каждой станции за 2019-2023 гг.;
2. Разработать методику расчета объема корреспонденций на основе этой статистической базы;
3. Установить факторы, влияющие на распределение пассажиропотока;
4. Выявить степень взаимосвязи между пространственной структурой распределения пассажиропотоков и установленными факторами;
5. Оценить степень устойчивости параметров пассажиропотока во времени;
6. Определить зоны конвергенции и дивергенции пассажиропотоков.

**Информационная база** исследования состоит из следующих элементов:

- база данных валидаций пассажирами при входе на станции Московского метрополитена, предоставленных ООО «Мегаполис Информационные Технологии»;
- картосхемы линий Московского метрополитена за 2019 – 2023 гг.;
- научная литература в области географии городского транспорта.

**Научную новизну** исследования составляют:

- Разработка *географического подхода к изучению пассажиропотоков* в системе городского транспорта, включающего в себя анализ базовых параметров пассажиропотока (входящий объем, пассажирообмен, интенсивность, пассажиронапряженность и мощность), структурных параметров пассажиропотока (неоднородность входящего объема пассажиропотока, упорядоченность интенсивности пассажиропотока и протяженности направлений, доля мощности главных направлений в общей мощности пассажиропотока), а также анализ иерархической структуры узлов согласно их положению в графе главных направлений.

- Впервые использована *информация транспортных смарт-карт для анализа пространственной структуры* пассажиропотоков крупнейшего города на примере московского метрополитена, которая ранее в открытых отечественных исследованиях по географии городского транспорта не применялась;
- Разработана *авторская методика расчета транспортных корреспонденций* между остановочными пунктами транспортной системы по валидациям проездных документов на вход;
- Определена роль отдельных факторов, влияющих на распределение пассажиропотока (функциональных – на гравитационный потенциал станций, транспортно-географических – на локальные территориальные сдвиги базовых параметров пассажиропотока, временных – на изменение внутренней структуры пассажиропотока);
- Выявлена четырехчленная *пространственная модель распределения пассажиропотока*, уточняющая существующее представление о функционально-планировочной структуре Москвы.

**Практическая значимость исследования.** Анализ параметров пассажиропотоков системы метрополитена, их пространственного распределения и устойчивости во времени дает понимание эффективности и надежности работы как отдельных ее структурных элементов, так и всей транспортной системы в целом. Диссертационное исследование показывает, насколько эффективно решаются задачи, которые ставят перед собой городские власти и транспортные инженеры, а также позволяет дать прогноз динамики пассажиропотока.

**Структура исследования.** В первой главе подробно анализируется содержание понятия «пассажиропоток», его параметры и роль географии транспорта в их изучении. Обобщается накопленный опыт изучения пассажиропотоков в городских транспортных системах. Исследуется проблема использования больших данных для транспортно-географических исследований, и предлагается методика их анализа применительно к цели и задачам исследования. Далее рассмотрены факторы, влияющие на пространственное распределение параметров (транспортно-географические, функциональные, факторы времени) пассажиропотока московского метрополитена и определена методика исследования. Во второй главе анализируется пространственное распределение базовых параметров пассажиропотока и степень устойчивости характера распределения во времени. В третьей главе изучаются структурные параметры пассажиропотока, его иерархичность, а также формулируются

ключевые закономерности пространственно-временного распределения пассажиропотока в системе Московского метрополитена.

# Глава 1. Теоретические основы изучения пассажиропотоков в системах метрополитена

Первая глава посвящена изучению теоретических подходов распределения пассажиропотока в системе Московского метрополитена. Сначала рассматриваются основные параметры пассажиропотока: входящий и исходящий объем, интенсивность, пассажирооборот и другие. Проведен анализ факторов, влияющих на распределение пассажиропотока, в том числе транспортно-географическое положение станций метрополитена, их интеграция в городскую транспортную систему, а также функциональная структура городской среды. Особое внимание уделено динамике пассажиропотока, обусловленной циклическими колебаниями (суточными, недельными, сезонными) и случайными факторами. Исследование базируется на данных о транзакциях, совершенных пассажирами с использованием транспортных смарт-карт, за период с 1 октября 2019 г. по 31 декабря 2023 г. Полученные результаты представляет собой теоретическую базу, необходимую для всестороннего изучения пространственного распределения пассажиропотока в системе Московского метрополитена.

## 1.1 Понятие «пассажиропоток» и его параметры. Пассажиропоток как объект исследования географии транспорта.

**Понятие «пассажиропоток». Параметры пассажиропотока.** Свое определение термина *пассажиропоток* существует у специалистов по транспортному планированию. Г.М. Рябов определяет его так: пассажиропоток — это количество пассажиров, перемещающихся по определённому маршруту в единицу времени [Рябов, 1984]. По М.П. Кузнецову пассажиропоток представляет собой суммарное количество пассажиров, использующих транспортные услуги в определённый период времени и на определённом маршруте [Кузнецов, 1988]. По И.В. Смирнову пассажиропоток — это объём перевозок, выраженный в количестве пассажиров, перемещающихся по транспортной сети за единицу времени [Смирнов, 1995]. А.А. Лебедев рассматривает пассажиропоток как показатель, отражающий динамику перемещения пассажиров в зависимости от времени суток и сезона [Лебедев, 2000]. И, наконец, О.И. Ларин определяет пассажиропоток как движение пассажиров по определенной части транспортной сети [Ларин, 2005]. Кроме этого, он определяет такие параметры пассажиропотока как:

*объем перевезенных пассажиров* – общее число перевезенных пассажиров по маршруту, направлению или в целом по населенному пункту за определенный период времени;

*пассажиروобмен остановочного пункта* – это суммарное число пассажиров, подходящих на остановочный пункт и садящихся в транспортное средство, и пассажиров, выходящих из салона пассажирского транспортного средства на данном остановочном пункте в единицу времени;

*мощность* – количество пассажиров, проезжающих за единицу времени через конкретное сечение транспортной сети в одном направлении;

*пассажиuroоборот (транспортная работа)* – произведение объема перевозок на расстояние поездки пассажиров;

*направление* – распределение передвижений между транспортными районами.

Все авторы, кроме О.И. Ларина, в основу термина кладут количество пассажиров, совершающих перемещения в определённый период времени. Ряд авторов отмечает, что речь идет о перемещении по конкретному маршруту.

Характерно, что в настоящее время в отечественной географии транспорта отсутствует определение понятия пассажиропоток. Однако, С.А. Тархов приводит термин транспортный поток – направленное движение большой массы грузов или пассажиров (людей) с помощью транспортных средств из одного места (города, района, страны) в другое вдоль какого-либо транспортного пути или маршрута [Горкин, 2013].

При этом, термин пассажиропоток используется в работах по транспорту в том числе для обозначения валового количества перевезенных пассажиров через один транспортный узел. Пункт назначения (отправления) при этом вторичен. Оптика изучения пассажиров, совершающих перемещения в рамках транспортной системы, может быть совершенно разной (первая: изучение перемещений пассажиров вдоль одного направления, вторая: изучение перемещений пассажиров, совершающих поездку через тот или иной транспортный узел). В связи с этим, нами предлагается понимать пассажиропоток как явление, но не как измеряемую характеристику.

Таким образом, термин «пассажирский поток» можно определить как направленное движение пассажиров с помощью средств общественного и личного транспорта из одного места в другое вдоль какого-либо транспортного пути или маршрута. Еще раз подчеркнем, что пассажирский поток – это явление, процесс. Ближайшая аналогия из смежной географической дисциплины – гидрологии – сток. То, что гидрологи называют «стоком» само по себе – просто природное явление. Однако сток (точно так же, как и пассажиропоток) поддается измерению с

помощью количественных параметров: объем стока, расход воды, модуль стока и т.д. Для понятия «пассажиропоток» ранее мы приводили такие параметры как *объем перевезенных пассажиров, пассажирооборот, мощность и направление*. Этот набор характеристик прост и интуитивно понятен. Именно такими параметрами оперируют специалисты в области транспортного планирования и измеряют их с помощью ряда количественных показателей.

В рамках настоящей работы предлагается уточнить и расширить этот перечень и далее использовать приведенный терминологический аппарат в тексте работы:

- Входящий (исходящий) объем
- Общий объем
- Пассажирообмен
- Корреспонденция
- Направление
- Мощность (количество пассажиров, перемещающихся через конкретное сечение транспортной сети)
- Интенсивность (количество пассажиров, перемещающихся по данному направлению)
- Пассажиронапряженность
- Пассажирооборот

Приведенные выше показатели в совокупности дают представление о характере пассажиропотока на тех или иных элементах транспортной сети. Их совместное изучение дает понимание об общем характере распределения пассажиропотока. Далее в исследовании совокупность этих показателей будем понимать под *базовыми параметрами пассажиропотока*. Разберем каждый из показателей подробнее, а также установим географический смысл каждого из них.

1) Входящий (исходящий) объем пассажиропотока – количество пассажиров, использующих транспортный узел для входа (выхода) в транспортную систему, с целью начала (окончания) перемещения в заданный промежуток времени. Пример: входящий объем станции метро Выхино за 14 декабря 2023 г. – 57 тыс. В отличие от классификации параметров пассажиропотока по [Ларин, 2005], где объем пассажиропотока одинаково используется для различных кейсов, в настоящем исследовании во избежание путаницы предлагается использовать термин «объем пассажиропотока» только для узловых элементов транспортной системы. О количестве пассажиров на линейных элементах транспортной системе будет сказано ниже в п. 5.

Входящий и исходящий объем пассажиропотока в рамках географического анализа систем метрополитена представляют собой не только взаимосвязанные, но и взаимозаменяемые параметры, если брать временной интервал, длиной более одних суток. Это утверждение следует из того факта, что за одни транспортные сутки (интервал времени, соответствующий один к одному астрономическим суткам, в течение которого в отдельно взятой транспортной системе производятся пассажирские перевозки) количество пассажиров, вошедших в систему метрополитена всегда и при любых обстоятельствах равно количеству покинувших ее пассажиров, поскольку в подавляющем большинстве систем метрополитена между транспортными сутками существует технологическое окно, во время которого пассажирские перевозки не производятся. Следовательно, исходя из предположения, что подавляющее большинство пассажиров завершает свои перемещения по системе метрополитена в точке, откуда была начата первая в течение транспортных суток поездка, объем исходящего пассажиропотока на станции метрополитена на таких станциях будет эквивалентен объему входящего пассажиропотока. Характерный пример такого рода корреспонденций – классические маятниковые миграции по схеме «дом – работа (учеба) – дом». Разумеется, можно привести немало примеров ситуаций, когда пассажир совершает более сложный маршрут, использует альтернативные виды транспорта для перемещений по городу, и в итоге не всегда в течение транспортных суток совершает вторую поездку за сутки из пункта, в котором закончил первую, и т.д. Однако, такие ситуативные поездки больше характерны, во-первых, для более мобильных групп пассажиров (прежде всего, учащихся заведений среднего и высшего образования), во-вторых – в выходные дни, когда цели транспортных корреспонденций становятся более разнообразными (поездки к местам покупок, досуга и т.д.). Количество поездок, совершаемых подобным образом, не способно коренным образом изменить всю пространственную структуру корреспонденций в системе метрополитена. Следовательно, для цели настоящего исследования мы допускаем, что исходящий объем пассажиропотока эквивалентен входящему объему пассажиропотока; таким образом, исходящий объем пассажиропотока исключается нами из предмета исследования ввиду того, что, изучая пространственное распределение объема входящего пассажиропотока нами де-факто, также изучается пространственное распределение объема исходящего пассажиропотока. Кроме того, есть объективные ограничения в изучении объема исходящего пассажиропотока на примере Московского метрополитена, поскольку в нем не производится

валидаций<sup>3</sup> пассажиров на выход, следовательно мы не располагаем сведениями о точных значениях этой характеристики и можем рассчитать его лишь косвенно. Подробнее эта проблема изложена ниже.

В то же время отметим, что пространственное распределение исходящего объема в рамках одних транспортных суток не совпадает с распределением входящего пассажиропотока, и это уже может быть предметом географических исследований, но в рамках иной терминологии и методологии, о чем также подробно сказано ниже. Завершая размышления об исходящем объеме пассажиропотока, отметим, что этот показатель может быть наиболее интересна прежде всего в прикладных исследованиях, например при проектировании сооружений транспортной инфраструктуры.

Входящий объем пассажиропотока, как и иные параметры пассажиропотока, может зависеть от множества факторов. Коротко остановимся на важнейших из них.

Первый фактор – *транспортно-географический* – положение транспортного узла в иерархической структуре транспортной сети. Определяется такими критериями, как набор числа видов транспорта в транспортном узле, положение относительно узлов внешнего (междугородного и международного) транспорта, частота транспортного сообщения и т.д. Сюда входит и топологическое положение в графе транспортной сети. При этом, с одной стороны, наиболее мощные транспортные узлы с большим объемом входящего пассажиропотока могут притягивать к себе дополнительные элементы транспортной инфраструктуры (например, Белорусский вокзал – важный транспортный узел, через который сначала в 2019 г., затем в 2023 г. проложены новые части транспортного каркаса Москвы – Московские центральные диаметры). С другой стороны, именно пересечение двух и более транспортных линий значительно расширяет географию возможных пунктов назначения и стимулирует увеличение пассажиропотока.

Второй фактор – *функциональный* – положение транспортного узла относительно функциональных зон города. Ничто не определяет характер транспортных поездок в городской агломерации, как ее функциональное разнообразие. Чем большее количество функций у территории, тем большим гравитационным потенциалом она обладает, генерируя больший объем транспортных потоков. Это подробно исследовано в многочисленных работах по теории центральных мест, сквозь призму которой изучена в том числе и территория Московской агломерации [Шупер, Эм, 2012].

---

<sup>3</sup> Под валидацией понимается факт оплаты проезда пассажиром с использованием автоматизированной системы контроля оплаты проезда

На сегодняшний день доминирует представление о том, что положение территории относительно транспортных связей определяет функциональность. Об этом писал В. Бунге [Бунге, 1967], применительно к развитию городского пространства; эта тема развита в трудах Я. Гейла [Гейл, 2013], Э. Глейзера [Glaeser, 2020]. В подтверждение этого аргумента можно привести примеры из развития Московской агломерации и ее транспортной системы. Первый пример: строительство Солнцевской линии Московского метрополитена. С одной стороны, оно произошло намного позднее появления масштабной селитебной зоны, расположенной на территории городских административных районов Солнцево и Новопеределкино. С другой стороны, транспортно-географическое положение этих районов было привлекательным для расширения Москвы именно в этом направлении: исторически здесь проходил Боровский тракт, в конце XIX века проложена линия Брянской железной дороги. Сочетание этих факторов, а также относительной близости к центральной части Москвы (Солнцево находится не дальше таких районов как Чертаново Южное, Бирюлево Западное) позволило разместить здесь селитебную зону, с последующим включением этой территории в городскую черту Москвы. Второй пример: продление Сокольнической линии на территорию т.н. «Новой Москвы» (Новомосковский административный округ). Только после строительства станций метрополитена, а также ряда магистральных улиц, началось строительство многочисленных жилых комплексов, торгово-развлекательных центров и даже междугороднего автовокзала в этой части города.

2) Общий объем пассажиропотока – количество всех перемещений пассажиров в рамках транспортной системы в заданный промежуток времени. Пример: общий объем пассажиропотока Московского метрополитена за 1 октября 2022 г. – 7,7 млн пассажиров.

Этот параметр применим как к совокупности объектов, образующих собой транспортную систему отдельно взятой территории (например, именно величина характеризует, сколько пассажиров воспользовалось Московским метрополитеном в течение любого ограниченного временного интервала), так и как собирательную характеристику для нескольких транспортных систем. Важно заметить, что общий объем пассажиропотока никак не отражает неоднородность пассажиропотока внутри транспортной системы. Именно этот параметр под разными названиями чаще всего используют географы-транспортники, поскольку ее использование наиболее релевантно для исследований на мезо- и макроуровне.

3) Пассажирообмен – это суммарное число пассажиров, подходящих на остановочный пункт и садящихся в транспортное средство, и пассажиров, выходящих из салона пассажирского транспортного средства на данном остановочном пункте в единицу времени.

Это определение, взятое у О.Н. Ларина, оставлено без изменений. Этот параметр представляет для нас яркий исследовательский интерес, исходя из повседневных наблюдений за пассажиропотоком. Речь идет о том, что в определенные моменты времени часть остановочных пунктов используется преимущественно на вход или преимущественно на выход пассажиров. Наиболее заметно это явление в будничные часы пик. В утренние часы входящий объем пассажиропотока на объектах транспортной системы, расположенных в спальном районе города, кратно превышает исходящий поток. Ровно противоположная ситуация наблюдается у объектов транспортной системы, расположенных в центрально-деловой части города.

Отметим, что это явление встречается не только в городских транспортных системах, но и например, у аэропортов с ярко выраженными сезонными пиками пассажиропотока. Скажем, аэропорты, расположенные в рекреационно привлекательных регионах, имеют очевидно больший исходящий поток пассажиров на излете туристического сезона, чем входящий.

Выше нами сделано допущение, что разницу между входящим и исходящим объемом пассажиропотока за конечный операционный период (например, транспортные сутки), будем считать равной нулю. Хотя в реальности, за рамками исследования это может быть не так, особенно в те дни, когда доля нетрудовых поездок в течение определенного интервала времени возрастает (например, в последний день трудовой недели – когда пассажиры могут осуществить поездку к месту работы утром, а вечером после работы совершить перемещение, например, в загород).

Возвращаясь к системе Московского метрополитена, для нас представляет интерес то, каким образом распределяется входящий объем пассажиропотока по станциям сети в течение дня, тем самым выявив характерное время положительного или отрицательного пассажирообмена на той или иной станции. Это явление было изучено автором в одной ранних работ [Киселев, 2021]. Подробнее результаты исследования и их связи с целью настоящей работы изложены в главе 3. Таким образом, географический подход к изучению пассажирообмена подразумевает переход от количественных к качественным показателям, например, типам станций по времени максимально интенсивного входящего пассажиропотока в течение суток.

4) Корреспонденция – совокупность (пара) пунктов отправления и назначения, между которыми возникает пассажиропоток. Зная местоположение пунктов отправления и назначения, можно определить маршруты вдоль линий транспортной сети, по которым осуществляются поездки. Количество корреспонденций определяется как квадрат количества

остановочных пунктов транспортной системы за исключением связей изолированных компонентов единой транспортной системы (например, трамвайная система г. Москва имеет два изолированных компонента, соответственно перемещение от остановочного пункта одного компонента к остановочному пункту другого компонента без использования иных видов транспорта невозможно, поэтому не имеет разумных оснований включать корреспонденцию между этими остановочными пунктами в анализ пассажиропотока).

5) Направление пассажиропотока – совокупность пунктов отправления и назначения. отвечает на вопрос *куда* движется пассажиропоток. Важно отметить, что направлению пассажиропотока отнюдь не всегда соответствует единственный участок транспортной сети. Если в топологической структуре транспортной сети присутствует хотя бы один цикл, то таких число участков, соответствующих направлению пассажиропотока, может быть два и более. Направление служит качественным параметром пассажиропотока.

6) Количественным измерением корреспонденции/направления пассажиропотока служит интенсивность пассажиропотока. Иными словами, интенсивность пассажиропотока – это количество пассажиров, совершивших перемещение по конкретной корреспонденции/направлению. Ключевая задача географа, изучающего этот параметр, – определить иерархию корреспонденций транспортной системы и изучить пространственное положение маршрутов этих корреспонденций. Маршруты схожих иерархических уровней могут иметь схожее географическое положение как по одной, так и по двум общим точкам начала и конца маршрута, тем самым формируя пространственную структуру поездок пассажиров по транспортной сети. Весьма вероятно, что корреспонденции с высоким уровнем интенсивности имеют начало и конец в узлах с высокими значениями входящего пассажиропотока.

7) Пассажиронапряженность определяется как отношение интенсивности пассажиропотока к расстоянию корреспонденции по кратчайшему маршруту. Чем выше значение этого показателя, тем более востребована та или иная корреспонденция. Он служит прямым аналогом показателя гравитационного потенциала социального пространственного взаимодействия между двумя территориями [Stewart, 1941]. Допускаем, что высокие значения этого показателя могут встречаться прежде всего на тех участках транспортной сети, где наблюдается территориальная концентрация узлов с высокими значениями входящего объема пассажиропотока. Соответственно, наименьшие значения показателя будут встречаться у корреспонденций между крайними точками транспортной сети, имеющими низкие значения входящего объема пассажиропотока. По характеру зависимости между значениями

интенсивности пассажиропотока и расстоянием корреспонденции по кратчайшим маршрутам можно определить территориальную нишу каждого вида транспорта и ее роль в городских транспортной системе. А непосредственно в границах самой транспортной системы пассажиронапряженность показывает наиболее эффективные участки с экономической точки зрения: именно на этих участках удельные затраты на перевозку одного пассажира минимальны. В анализе территориальных структур этот показатель известен как коэффициент ассоциативной значимости [Полян, 2014].

8) Пассажирооборот – произведение интенсивности пассажиропотока на расстояние корреспонденции. Показатель отражает валовое количество транспортной работы, выполненной перевозчиком; он обратно пропорционален пассажиронапряженности, благодаря чему имеет значительно большую размерность и гораздо менее релевантен для географических исследований.

9) Мощность пассажиропотока – количество пассажиров, перемещающихся через измеряемый створ в заданный промежуток времени. Также представляет собой сумму мощностей пассажиропотока в измеряемом створе. Створом может служить участок транспортной сети, так и транспортный узел. Рассчитывается как сумма интенсивностей пассажиропотока каждой корреспонденции, проходящей через структурный элемент сети. Для транспортного узла дополнительно можно рассчитать *мощность транзитного пассажиропотока* как разницу между общей мощностью пассажиропотока и входящим объемом пассажиропотока. Предполагается, что мощность пассажиропотока (как общая, так и транзитная) наиболее тесно связана с мерой центральности структурного элемента. Иными словами, чем выше степень связности элемента с другими аналогичными элементами, тем большая мощность пассажиропотока будет в нем наблюдаться.

Таблица 1. Параметры базовые пассажиропотока и их связь между собой. Составлено автором.

Параметр	Обозначение	Связь с другими параметрами	Географический смысл
Общий объем	$V_{\Sigma}$	$V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n V_i$	Отсутствует при изучении отдельной транспортной системы

		$I_{\Sigma} = \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^{n,m} I_{ij}$	
Входящий объем (остановочный пункт $i$ )	$V_{Ii}$		Позволяют установить пространственное положение ключевых узлов генерации пассажиропотоков
Исходящий объем (остановочный пункт $i$ )	$V_{Oi}$		
Пассажирообмен (остановочный пункт $i$ )	$E_i$	$E_i = V_{Ii} - V_{Oi}$	Позволяет установить функциональные особенности зоны обслуживания остановочного пункта. Изучается после перехода к качественным показателям.
Корреспонденция (между остановочными пунктами $i, j$ )	$i, j$		Маршруты вдоль линий транспортной сети, по которым осуществляются поездки
Направление (от остановочного пункта $i$ к $j$ )	$\vec{i, j}$		Направленные маршруты вдоль линий транспортной сети, по которым осуществляются поездки
Интенсивность (между остановочными пунктами $i, j$ )	$I_{ij}$		Позволяет определить пространственную иерархию транспортных связей
Общая мощность (остановочный пункт $i$ )	$Q_i$	$Q_i = \sum_{k=1}^n I_i$	Позволяет установить пространственную иерархию структурных элементов транспортной сети
Транзитная мощность (остановочный пункт $i$ )	$Q_{Ti}$	$Q_{Ti} = Q_i + E_i$	
Пассажиронапряженность	$T_{ij}$	$T_{ij} = \frac{I_{ij}}{l}$	Позволяет определить наиболее востребованные локальные корреспонденции
Пассажирооборот	$A_{ij}$	$A_{ij} = I_{ij} * l$	Позволяет выявить пространственное положение маршрутов, на которых перевозчиком выполняется наибольшее валовое количество транспортной работы

Географический анализ базовых параметров, служащих количественным измерением направления пассажиропотока (интенсивность, пассажиронапряженность, пассажирооборот), может выполняться двумя способами. Первый способ: изучение валовых объемов показателей. Это позволяет определить наиболее важные узловые и линейные элементы транспортной системы. Второй способ: группировка направлений по пунктам отправления/назначения. Это позволяет определить внутреннюю пространственную структуру перемещений пассажиров от/до остановочных пунктов, в терминах географии морских перевозок – внутреннюю структуру «форланда» каждого остановочного пункта. Для нас важно проследить, каковы территориальные различия в структуре отправок внутри совокупности изучаемых остановочных пунктов. П. Хаггет [Хаггет, 1968] пришел к выводу о том, что интенсивность транспортных потоков зачастую зависит от величины транспортного плеча. Применительно к системе метрополитена это наблюдение порождает гипотезу о зависимости интенсивности пассажиропотока от расстояния, преодолеваемого пассажирами.

Размышления о «форланде» неизбежно наталкивают нас на мысль об изучении «хинтерланда» остановочных пунктов, то есть зон обслуживания станций метрополитена в городском пространстве, а именно их границ. Однако, этот вопрос находится за пределами объекта настоящего исследования и требует значительного расширения эмпирического материала и методологического аппарата.

Под **структурой пассажиропотока** нами понимается его качественный состав: совокупность групп пассажиров, выделенных на определенном основании. Выше нами приведен пример группировки пассажиропотока по территориальному признаку. Рассмотрим и иные основания для классификации пассажиропотока по признаку внутренней неоднородности.

Обратимся к труду К. Мохамеда и др. [Mohamed K. et al., 2014]. Эти исследователи пытаются обнаружить зависимости между особенностями суточных ритмов загрузки автобусов и станций метрополитена агломерации французского города Ренн и социально-экономическими характеристиками населения прилегающих территорий. Исходные данные использовались за период с 31 марта по 25 апреля 2014 г.

Авторами на основании данных, полученных из автоматизированной системы сбора оплаты проезда, выделены следующие группы пассажиров:

- пассажиры трудоспособного возраста, совершающие регулярные трудовые поездки (“subscribers”);

- пассажиры, совершающие одну поездку (“free riders”);
- пассажиры младшей возрастной группы (“young subscribers”).

Подробнее результаты работы проанализированы в разделе 3.2.1. В настоящем разделе они приводятся лишь как пример основания для определения структуры пассажиропотока.

Б. Ду и др. анализировали транспортное поведение различных групп пассажиров в системе Пекинского метрополитена. [Du B. et al., 2018] было отмечено несколько групп пассажиров, совершавших регулярные поездки по отличным от большинства иных пассажиров маршрутам. Так, этими авторами выделены туристы, посетители торговых центров, и даже такая экзотическая группа пассажиров как воры.

Пример иного подхода к изучению структуры пассажиропотока представлен в труде Л. Чэн и др. [Cheng L. et al., 2014] Здесь авторы смотрят, насколько дисперсно пассажиры используют пространство крупных транспортных узлов, в частности аэропортов. Выделены группы одиночных пассажиров, пассажиров в малых группах, пассажиров в больших группах и пассажиров с сопровождающими.

Среди трудов российских ученых по этой теме отметим работу О.А. Медведя [Медведь, 2011]. Им ставилась цель сегментировать пассажиров Санкт-Петербургского железнодорожного узла в зависимости от направления и частоты поездок, способа оплаты, возраста, места жительства, а также определить сводный показатель уровня удовлетворенности потребителей услугами пригородного железнодорожного комплекса. Для исследования был проведен социологический опрос в течение марта 2010 г. Во время обследования было опрошено 1199 человек в возрасте от 16 до 65 лет. Пассажиры были сегментированы по полу, возрасту, роду деятельности, семейному положению и направлению следования. В этой работе не проводился пространственный анализ полученных результатов. Однако здесь для нас важно почерпнуть, по каким основаниям можно определить структуру пассажиропотока.

И.С. Смирнов и П.С. Степанов анализировали расовый состав пассажиров Вашингтонского метрополитена и дали широкую оценку пространственной неравномерности пользования метрополитеном среди расовых групп [Смирнов, Степанов, 2014]. Было выделено несколько зон, каждая из которых отличается по расовому составу пассажиров. На западе города преобладают белые пассажиры, в восточной и юго-восточной частях – черные. Центр города представляет собой место смешения различных рас и наибольшего расового разнообразия. Азиатов относительно много как в центре, так и на западе. Представители

других рас встречаются везде, но в небольшом количестве; их доля немного выше в центре и на западе. Западная часть сети характеризуется более высоким уровнем расового разнообразия, аналогично центру города. Наиболее загруженными участками являются центр, север, северо-восток и восток, в то время как остальные районы значительно уступают им по количеству пассажиров.

Изучением неоднородности входящего пассажиропотока по времени входа пассажиров на станцию в течение суток занимался К. Су и др. [Xu Q., Mao B. H., Bai Y., 2016]. Авторы провели кластерный анализ станций по суточному режиму загрузки пассажиропотоков. Результаты представлены на рис. 1. Группа 1 имеет наибольший сдвиг режима к вечернему часу пик, группа 10 – к утреннему часу пик. Опять же, характерно, что загрузка станций Пекинского метрополитена, расположенных в узлах графа сети, отличается от режима даже соседних станций, расположенных на расстоянии одного межстанционного перегона метро. А различия в суточном режиме загрузки станций, расположенных в центре циклического остова и за его пределами, наиболее контрастны. Очевидно, что станциям, расположенным на окраине сети, соответствует функциональная периферия Пекинской агломерации. При этом функциональный центр агломерации смещен на восток относительно географического центра.

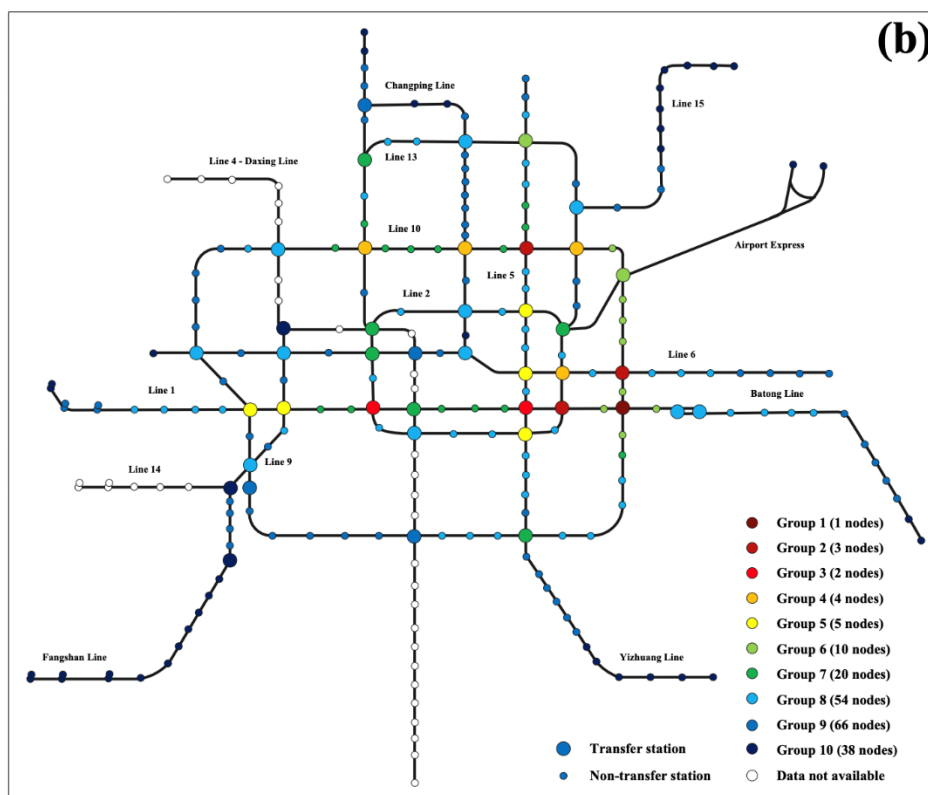


Рисунок 1. Группы станций Пекинского метрополитена по режиму суточной загрузки. Составлено К. Су и др. [Xu Q., Mao B. H., Bai Y., 2016].

Автором настоящего исследования уже была предпринята попытка выделить пространственную неравномерность пассажиропотока московского метрополитена на основании типов проездных документов [Киселев, 2021] по вышеприведенной методике К. Мохамеда [Mohamed K. et al., 2014]. Установлено, что заметно контрастируют по структуре входящего пассажиропотока в основном станции Кольцевой линии метрополитена (где преобладают разовые поездки, совершаемые туристами, а также транзитными пассажирами Московского транспортного узла), незначительно выделяются станции в некоторых спальных районах благодаря более высокой доли пожилых людей. В остальном структура пассажиропотока, выделяемая по группам пассажиров, во многом схожа вне зависимости от пространственного положения той или иной станции. По этой причине, в текущей работе будет исследована структура пассажиропотока каждого остановочного пункта, выделяемая по территориальному признаку (различия в неравномерности количества отправленных пассажиров, о которых мы говорили выше).

На примере вышеупомянутых исследований [Xu Q., Mao W. H., Bai Y., 2016], [Киселев, 2021] показано, что такой параметр пассажиропотока как пассажирообмен может быть предметом географических исследований сквозь поиск различий в его внутрисуточных значениях для каждого отдельно взятого остановочного пункта. Однако, не располагая данными об исходящем объеме пассажиропотока, для изучения внутрисуточной неоднородности применяются качественные параметры, получаемые, например с помощью статистического кластерного анализа.

Таким образом, основания для выделения тех или иных групп пассажиров, формирующих собой структуру пассажиропотока, могут быть совершенно разными. Задача географа – понять, каким образом та или иная группа пассажиров пользуется метрополитеном: есть ли ареалы концентрации тех или иных групп в пространстве, есть ли различия в географии корреспонденций между выделяемыми группами, как пространственная неравномерность использования транспортной инфраструктуры города различными группами пассажиров связана с территориальной структурой города. Параметры, с помощью которых изучается неоднородность пассажиропотока, выделяемая по тому или иному основанию, будем обозначать как *структурные*.

**Иерархичность пассажиропотоков.** Вопрос иерархии узлов транспортной системы интересовал географов на протяжении всего существования географии транспорта как отдельной научной дисциплины. Л. Лаланн изучал изменение иерархии городов под влиянием

расширение транспортных сетей [Lalanne, 1863]. П. Хаггет и Р. Чорли [Haggett, Chorley, 1969] систематизировали ключевые существовавшие на тот момент методики определения степени иерархии транспортных узлов (в основном на основе сочетания видов транспорта и географии транспортного сообщения). Среди отечественных работ отметим труд К.В. Самбунова [Самбунов, 2023], в котором определение иерархии транспортных узлов было ключевой целью (на примере сети железных дорог России). Этим автором была предложена методика выделения уровня иерархии железнодорожных узлов России на основе двух ключевых критериев: входящий объем пассажиропотока узла, а также количество прямых связей с другими узлами. Общим выводом во всех работах, посвященных изучению иерархии транспортных узлов, служит наличие взаимосвязи уровня иерархии и пространственного положения узла.

Таким образом, параметры пассажиропотока позволяют установить пространственную иерархию транспортных узлов. Отсюда следует, что пассажиропотоки между узлами разных иерархических уровней также иерархически соподчинены друг другу в пространственном отношении. То есть обладают свойством *пространственной иерархичности*.

Для Московского метрополитена применяемый в свежем исследовании К.В. Самбунова подход, учитывающий количество прямых связей, совершенно неприменим: за отсутствием вилочной системы перевозок прямые связи существуют только в пределах отдельно взятых линий метро. При этом пересадка пассажиров между линиями является расхожей практикой, позволяющей пассажирам гибко подходить к построению маршрутов внутри сети. В связи с этим прямыми можно считать совершенно любые транспортные связи, не выходящие за рамки системы метрополитена.

Для установления иерархии транспортных связей в ряде работ применяется метод Лувена или метод главных компонент. Если представить все существующие в рамках сети корреспонденции в виде логической схемы (высокосвязного графа), то исключая все кроме наиболее высокоинтенсивных корреспонденций от каждого транспортного узла, мы получим т.н. главные компоненты – ключевые транспортные связи, логической схемой которой как правило служит простой граф-дерево, в котором четко выделяются узлы с большей центральностью относительно всех остальных узлов. Чем выше центральность узла, тем выше уровень иерархии. Этот метод был применен как для транспортных сетей высоких уровней пространственной организации, например, авиационного транспорта [Sun, Wandelt, Zanin, 2017], так и для городских транспортных сетей, например, сети внутригородских автобусных перевозок [Wang et al., 2020].

Таким образом, ключевой задачей для установления иерархии пассажиропотоков служит расчет главных компонент или в рамках терминов, определенных в начале текущего раздела, – *главных направлений*. Под ними будем понимать направления от каждого остановочного пункта с максимальными значениями количественных параметров пассажиропотока ( $\vec{l}, \vec{j}(I_{ij} = \max)$ ,  $\vec{l}, \vec{j}(T_{ij} = \max)$ ). Расчет главных направлений позволяет установить цепь ключевых пунктов тяготения пассажиров, определить степень иерархии каждого узла и соотнести ее с пространственным положением узла. Получившийся граф главных направлений обозначает ключевые зоны дивергенции (узлы низшей степени иерархии) и конвергенции (высшей степени иерархии). Построение иерархической структуры позволит решить одну из ключевых задач настоящей работы.

**Динамика пассажиропотока.** Каждый из ранее детерминированных нами параметров имеет привязку не только к пространству, но и ко времени. Это означает, что системное изучение пространственного распределения пассажиропотока (под которым нами понимается изучение всех параметров пассажиропотока и их взаимосвязь между собой) имеет смысл только тогда, когда все параметры пассажиропотока измерены за одинаковый временной интервал. Отсюда следует, что, если принять к изучению некий другой равнозначный временной интервал по продолжительности и иным параметрам (например, по сезонности), то можно наблюдать отличное значение даже при прочих равных условиях. В рамках метрологии такой способ исследования мер называется дискретизацией.

Еще во введении было указано доказательство непрерывного усложнения Московского метрополитена как системы. С учетом этого обстоятельства, дискретизируя изучение параметров пассажиропотока во времени, выявление качественного иного их распределения высоко вероятно. Именно поэтому автор использует в названии темы настоящего исследования формулировку «пространственно-временные закономерности распределения пассажиропотока».

Отсюда мы плавно переходим к изучению такого параметра пассажиропотока второго порядка как динамика. Сама по себе она не служит самостоятельной измеряемой характеристикой. Это, скорее, свойство пассажиропотока, которое можно выразить как количественно, так и качественно. Мы определяем динамику пассажиропотока как меру изменчивости значений параметров пассажиропотока во времени.

Далее неизбежно встает вопрос о том, как измерять динамику пассажиропотока? Наиболее часто применяется статистический метод: сравнение значений за одинаковые по продолжительности периоды [Кулешова, 2020]. Этот метод подходит для описания значений,

не имеющих регулярных на протяжении измеряемого периода значительных отклонений от среднего арифметического. Он позволяет зафиксировать основные тренды изменения параметров пассажиропотока при сравнительно небольшом количестве наблюдений (до нескольких десятков).

Существует и иной подход к измерению динамики пассажиропотока. Если статистический метод наиболее эффективно применим, когда число наблюдений сравнительно невелико, то с увеличением количества наблюдений на порядки (сотни, тысячи наблюдений) вероятность смены трендов возрастает, так же, как и возрастает вероятность увеличений количества значительных отклонений от среднего арифметического. В своей работе О. Кэтс и Е. Дженелиус [Cats, Jenelius, 2014] исследуют использование коэффициента вариации для анализа изменений пассажиропотока в системах общественного транспорта. Авторы акцентируют внимание на значимости размера выборки и единиц измерения при интерпретации полученных данных. В результате они приходят к выводу, что эти методы представляют собой полезные инструменты для анализа, однако предостерегают о необходимости внимательного отношения к проблемам, связанным с выборками и измерениями. Схожая методика была применена автором в одной из ранних работ [Киселев, 2025b].

Дискретная агрегация значений может совершаться на совершенно разных временных масштабах. Например, по дням, месяцам, кварталам года. Однако, подбор периода дискретизации напрямую зависит от факторов, имеющих детерминированную периодичность во времени (например, цикл будни/выходные). Актуальные для Московского метрополитена факторы будут рассмотрены в главе 2.

**Пассажиропоток как объект исследования географии транспорта.** Впервые на пассажирский поток как на один из основных объектов изучения географии транспорта обратил внимание С.В. Бернштейн-Коган [Бернштейн-Коган, 1930], вдохновившись идеями А. Геттнера. В своем фундаментальном труде он анализирует в основном грузовые потоки СССР и крупнейших капиталистических стран конца 1920-х. Приводится подробная статистика грузооборота по важнейшим направлениям и товарной номенклатуре того времени, а также подробный разбор, каким образом сформированы анализируемые транспортные потоки.

Традиционно в географии транспорта наибольшую изученность пассажиропотока имеет воздушный транспорт. Из фундаментальных трудов в этой области отметим работу Э. Таафе, разработавшего методику определения иерархии городов США на основе

пассажиropотока на американских воздушных линиях [Taaffe, 1962]. Похожая по методике работа была выполнена и для индийских авиалиний Ридом [Reed, 1970].

П. Хаггет [Хаггет, 1979] в своих работах рассматривает пассажиропоток как важный аспект транспортной системы, акцентируя внимание на его влиянии на планирование и управление транспортными услугами. Он анализирует факторы, влияющие на пассажиропоток, такие как экономические условия, демографические изменения и инфраструктурные аспекты. Хаггет также подчеркивает важное значение моделирования пассажиропотока для оптимизации маршрутов и повышения эффективности транспортных систем. Он исследует методы сбора и анализа данных о пассажиропотоке, что позволяет лучше понять поведение пассажиров и их предпочтения.

Наибольшее внимание изучению пассажиропотоков среди отечественных географов-транспортников уделял Г.А. Гольц [Гольц, 1981]. В своих исследованиях он широко использовал результаты опросов пассажиров, собственные наблюдения на остановках и в транспорте, а также анализ расписаний и временных интервалов. Главный труд Г.А. Гольца – «Транспорт и расселение», в котором представлены результаты его многолетней работы по изучению расселения городских агломераций. Среди поднятых им вопросов являются:

- транспортные объекты как центры притяжения для размещения промышленных предприятий, предприятий сферы услуг и населения;
- влияние видов транспорта на систему городского расселения с глубоким историческим анализом;
- влияние транспортной доступности на хозяйственное развитие территорий.

К главному результату его научной деятельности можно отнести установление пространственно-временного изоморфизма городских систем расселения: пространственные границы городской агломерации имеют временные ограничения. Продолжительность транспортной корреспонденции от границы городской агломерации до ее функционального ядра составляет от полутора до двух часов. Таким образом, величина городской агломерации прямо пропорциональна скорости сообщения транспорта внутри агломерации. Строительство скоростных и высокоскоростных путей сообщения способно увеличить размер городской агломерации до нескольких сотен километров в радиусе. Подобные без преувеличения выдающиеся научные результаты были бы невозможны без подробной статистики внутриагломерационной мобильности населения.

И.М. Маергойз [Маергойз, 1986] выделял три элемента территориальных структур хозяйства: интегрально-пространственную, множественную территориально-отраслевую и питательно-распределительную структуры. Пространственная структура пассажиропотока транспортной системы любого уровня относится именно к последнему типу. П.М. Полян [Полян, 2014] разработал систему параметров, определяющих степень ключевых пространственных отношений (территориальные концентрация, дифференциация, интеграция и композиция) для систем расселения. Предметом анализа служат линейные и узловые элементы системы расселения, которые во многом эквивалентны элементам транспортной системы, поэтому система показателей может применяться в том числе для анализа пассажиропотоков.

## **1.2 Исследования транспортных и пассажирских потоков Московской и других городских агломераций**

### **Исследования транспортных и пассажирских потоков Московской агломерации.**

В настоящее время транспортная система Московской агломерации изучена достаточно широко и глубоко: проведен ряд разнообразных исследований, о которых пойдет речь ниже. Характерно, что подавляющее большинство этих исследований выполнено специалистами в области вычислительной математики.

Большая работа по изучению маятниковой миграции выполнена коллективом авторов под руководством Ю.Ю. Шитовой. Результаты исследования опубликованы в серии статей [Mitroshin P. A. et al, 2021], [Шитова, 2022]. Основная их цель – анализ трудовой мобильности в регионе с использованием ГИС-сервисов. Этими авторами разработана, апробирована и внедрена методика непрерывного автоматического сбора и накопления информации о состоянии транспортной сети и погодных условиях. Сбор первичных данных о трудовой миграции населения осуществлялся с помощью ГИС-платформы Яндекс.Карты. Авторами выполнена реконструкция маршрутов передвижения жителей от дома до работы на основе данных загруженности дорог. Была разработана структура хранения параметров, характеризующих каждого условного сотрудника, совершающего трудовые поездки в пределах исследуемого региона. Выявлены характерные годовые циклы загруженности дорог, а также влияние введения карантинных мер из-за пандемии COVID-19 на снижение

интенсивности движения. Авторы отмечают, что более детальный анализ собранных данных в настоящее время ведется, и его результаты будут опубликованы в ближайшее время.

В работе В.В. Иванова и Е.С. Осетрова [Иванов, Осетров, 2018] поднят вопрос прогнозирования общего объема пассажиропотока на Московском метрополитене. Целью этих авторов – разработка методики для среднесрочного прогнозирования суточных объемов пассажирских перевозок на Московском метрополитене. Для настоящей работы наиболее содержателен раздел 1, в котором анализируются временные ряды, содержащие сведения об общем объеме пассажиропотока на Московском метрополитене.

Уже предприняты попытки изучить топологическую структуру сети Московского метрополитена. И.А. Евин и др. [Евин, Соловьев, Чернобровкин, 2013]. Эти авторы ставили целью исследовать сетевую структуру Московского метрополитена с использованием методов теории сложных сетей. Для этого была построена математическую модель эволюции сети этого метрополитена с момента открытия до настоящего времени, проанализированы топологические характеристики сети линий метро, такие как распределение узлов по числу связей, коэффициент кластеризации<sup>4</sup>, ассортативность<sup>5</sup> и центральность по посредничеству<sup>6</sup> (в примечании внизу отрази смысл этих терминов). Кроме этого, в этой работе поставлен вопрос: как добавление новых станций влияет на параметры и эффективность сети. Установлено, что распределение узлов по числу связей подчиняется степенному закону, характерному для безмасштабных сетей, а добавление новых станций в целом снижает загрузенности степень центральности по посредничеству наиболее нагруженных узлов.

Идейно близкой в части анализа режимов загрузки станций метро является статья М.И. Некраплённой, Д.Е. Намиота [Nekraplonna, Namiot, 2019], которые поднимают методологические вопросы обработки данных за период с 1 по 28 февраля 2018 г., полученных от телекоммуникационных операторов, функционирующих на Московском метрополитене, а также краткосрочного прогнозирования пассажиропотоков. Ими предложена классификация подходов к созданию прогностических моделей. Среди прочих сюжетов рассматривается дифференциация станций Московского метрополитена по суточным ритмам загрузки. Выделено три группы: с преобладающим утренним пиком, с преобладающим вечерним пиком и с одинаковыми утренним и вечерним пиками. Однако в силу специфики предметной области,

---

<sup>4</sup> отношение существующих связей, соединяющих соседей узла друг с другом, к максимально возможному числу таких связей

<sup>5</sup> свойство, отражающее степень закономерности образования связей между теми или иными узлами графа

<sup>6</sup> см. раздел 1.3

авторы не уделяют внимания причинам выявленной дифференциации. Тот факт, что имеются группы станций со сходными ритмами загрузки, авторы используют для экстраполяции методики прогнозирования на небольшие подгруппы в пределах каждой линии. В заключении авторы отмечают, что выявленная дифференциация типов распределения отрывает новые возможности для дальнейших исследований.

В другой своей работе эти же авторы [Nekraplonna, Namiot, 2021] проверяли гипотезу о наличии наиболее популярных маршрутов для каждой из станций в системе Московского метрополитена. Был составлен граф по методу главных компонент (методу Лувена), в котором каждая станция соединена со станцией, до которой совершается наиболее количество поездок (рис. 2). В центре этого графа расположилась станция "Чеховская", на которую сходятся 82 из 207 выявленных связей. Таким образом, именно эта станция, согласно выводам авторов, имеет наиболее устойчивые и географически распределенные пассажирские потоки. Кроме этого, авторы утверждают, что структура выявленных связей не меняется даже в выходные дни.

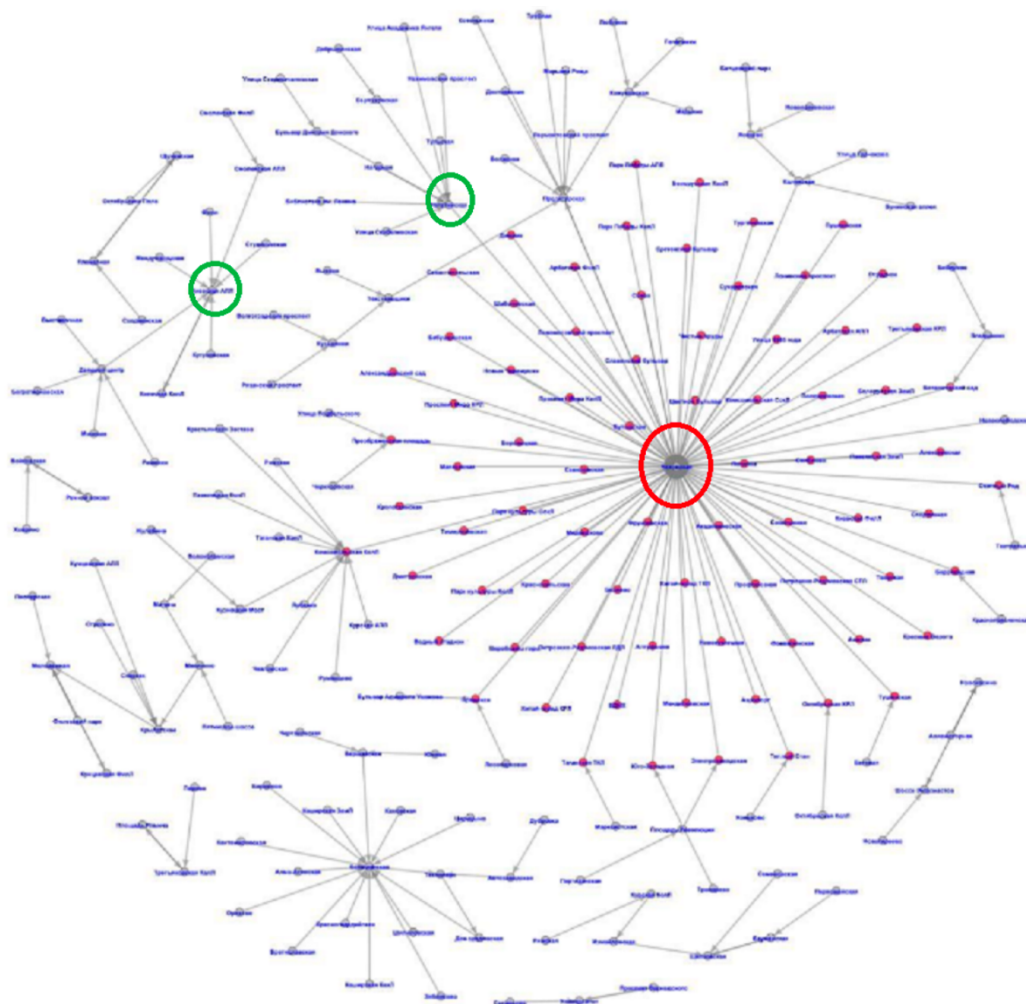


Рисунок 2. Граф наиболее устойчивых транспортных корреспонденций в системе Московского метрополитена.

Составлено М.И. Некраплённой, Д.Е. Намиот [Nekraplonna, Namiot, 2021].

Ещё одна работа за авторством Ф.С. Поматилова и Д.Е. Намиот [Поматилова, Намиот, 2019] также посвящена использованию данных операторов мобильной связи для анализа пассажиропотока Московского метрополитена. Авторы строят модели почасового распределения пассажиропотока по станциям метрополитена, используя данные за июнь 2016 г. Для анализа неравномерности распределения пассажиропотока в течение суток авторами вводится т.н. коэффициент перекоса пассажиропотока (КПП), который отображает соответствие станций равновесию между прибывшими и убывшими пассажирами за единицу времени и исчисляется по формуле:

$$\text{КПП} = \frac{П - У}{П} * 100\%$$

где КПП – коэффициент перекоса пассажиропотока, П – число прибывших пассажиров за единицу времени, У – число убывших пассажиров за единицу времени. Из формулы следует, что положительное значение коэффициента соответствует притоку пассажиров в данную единицу времени, отрицательное значение – оттоку. Далее этими авторами проводится классификация станций по значению КПП для утреннего и вечернего пиков, и приводят 4 группы станций: группа 0 – «Полюс отъездов» (утренний и вечерний КПП < 0), группа 1 – «Рабочая зона» (утренний КПП > 0, вечерний КПП < 0), группа 2 – «Жилая зона» (утренний КПП < 0, вечерний КПП > 0) и группа 3 – «Полюс приездов» (утренний и вечерний КПП > 0). В отличие от предыдущей работы, посвящённой анализу пассажиропотоков, в этой работе сделаны попытки проанализировать сложившуюся пространственную дифференциацию.

Обе вышеприведённые работы, хоть и являются близкими настоящей работе методологически, однако в значительной степени концептуально отличаются. Так, в этих работах первичны методы статистического анализа и прогноза, то есть апробация различных способов обработки данных, а в качестве примеров исходных данных приводится пассажиропоток Московского метрополитена. В настоящей работе не используется всё разнообразие подходов к обработке таких данных, но решается проблема применимости таких данных именно к транспортно-географическим исследованиям. Подробнее о концептуализации работы будет написано в следующем разделе.

В.С. Авдеев в своей работе решил задачу поиска оптимального алгоритма расчета мощности пассажиропотока на Московском метрополитене. Основной целью статьи является рассмотрение методики распределения пассажиропотока. Этот автор предложил инструментарий по мониторингу и возможному распределению пассажиропотока внутри транспортной системы. [Авдеев, 2020] Сеть Московского метрополитена представлена в виде двунаправленного графа, где станции – вершины, а межстанционные перегоны – ребра. Использован алгоритм A\* (A-star) для поиска оптимального маршрута с учетом загруженности станций. Подробнее к описанию этого алгоритма мы вернемся в разделе, посвященном изучению интенсивности пассажиропотока на Московском метрополитене. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Отметим, что этим автором не использовалась в расчетах линия Московского центрального кольца (МЦК). Учитывая, что в 2019 г. (в исследовании использовались данные именно за этот год) МЦК уже обслуживала повседневные корреспонденции москвичей, его исключение из расчетов могло серьезно повлиять на результаты исследования. Наибольшую загрузку имеют два участка сети, не входящие даже в циклический остов сети (первый участок: от станции Парк Победы до станции Киевская Арбатско-Покровской линии метро, второй участок: от станции Лермонтовский проспект до станции Таганская). Это говорит о том, что пассажирские потоки эффективно перераспределяются по сети еще до приближения к высшим топологическим ярусам транспортной сети. Кроме того, напрашивается гипотеза о том, что станции, расположенные на границах этих участков сети, имеют наиболее неравномерный суточный режим загрузки.

Оценка и апробация методов расчета распределения пассажиропотока, а также полученные В.С. Авдеевым результаты, представляют большую ценность для задач настоящего исследования.

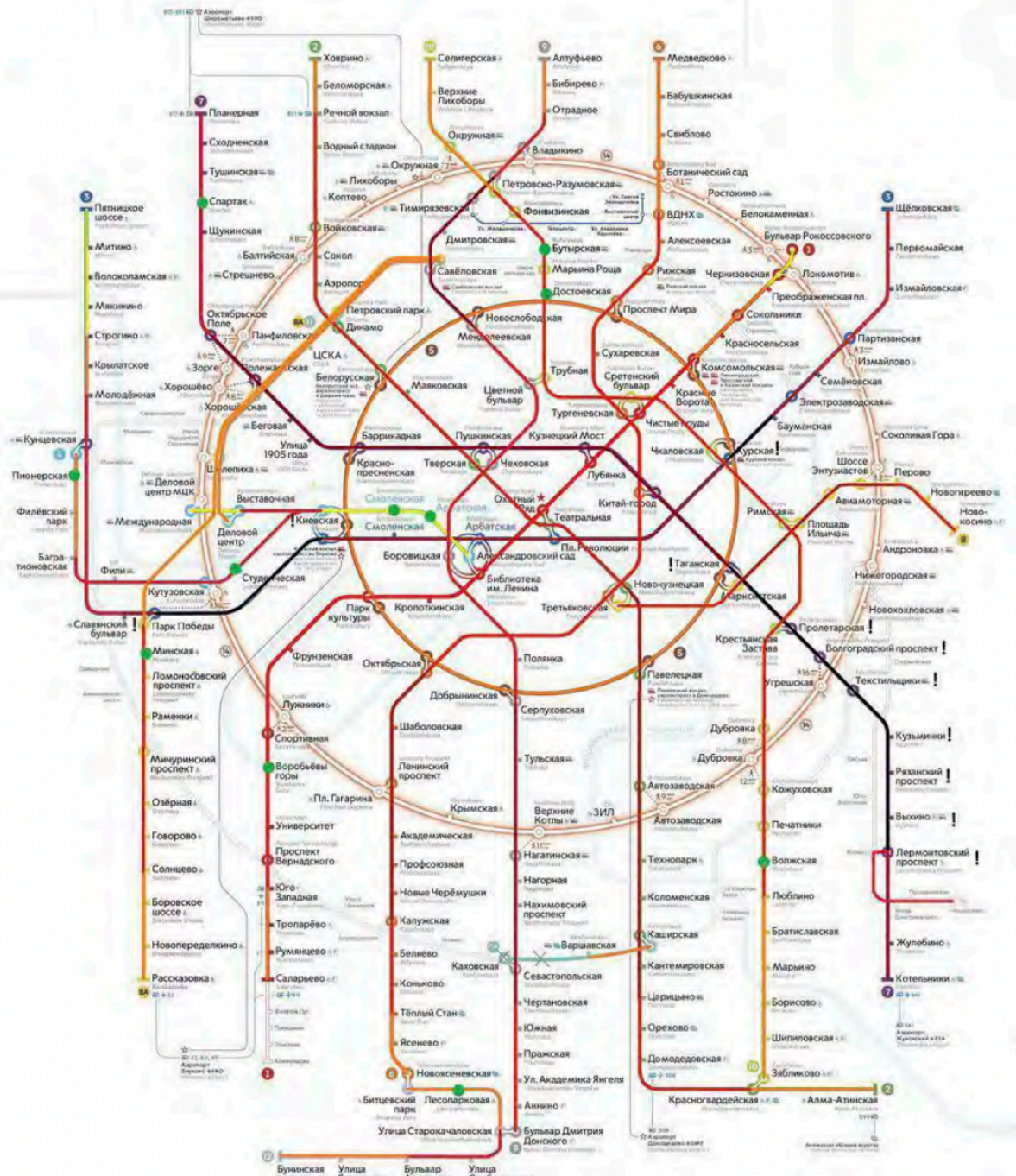


Рисунок 3. Распределение интенсивности пассажиропотока в Московском метрополитене за 2019 г.

Составлено В.С. Авдеевым [Авдеев, 2020].

**Исследование пассажиропотоков агломераций мира.** На примере системы метрополитена г. Шэньчжэнь [Liu, Viderman, Ratti, 2009] авторы выявили главные центры

притяжения пассажиров: центрально-деловые районы и районы около рекреационных зон. Выявлены пиковые часы поездок (с 7 до 8 часов утром и с 17 до 18 часов вечером в будние дни; в 10, 14 и 17 часов – в выходные дни). Особое внимание авторы обращают на ярко выраженный утренний пик в субботу, отмечая особенности организации трудовой деятельности на территории Шэньчжэня.

С. Хасан и др. установили пространственно-временные закономерности поездок пассажиров в системе Лондонского метрополитена. [Hasan S. et al., 2013]. Авторы произвели выборку из 626 пассажиров и наблюдали за ними в течение трех месяцев. Пассажиры регулярно посещали 2-3 основных места (вероятно, дом и место приложения труда), а остальные места посещались с убывающей вероятностью по закону Ципфа. Была проанализирована и продолжительность пребывания пассажира в этих местах. По итогам исследования была предложена простая модель описания наиболее вероятных маршрутов поездок пассажиров.

К. Ким и др. на основе данных о пассажиропотоках разработали подход для пространственной кластеризации станций Сеульского метрополитена [Kim K. et al, 2014]. Были выделены пространственные кластеры с преимущественно утренними отправлениями пассажиров, преимущественно вечерними отправлениями пассажиров, а также кластеры, в которых не доминировал ни один из суточных пиков.

О. Кэтс и др. [Cats, Wang, Zhao, 2015] включили в свое исследование не только метрополитен, но и наземные виды городского транспорта Стокгольма. Было идентифицировано 17 пространственных статистических кластеров в Большом Стокгольме по трем показателям: общий объем пассажиропотока транспортного узла, разница между входящими и исходящими потоками и относительная величина входящих потоков. Центральный деловой район Стокгольма (T-Centralen) по-прежнему доминирует и является основным центром притяжения. Некоторые другие внутригородские районы также имеют схожие характеристики, но меньшей интенсивности. Только один центр за пределами внутригородской зоны (Kista) выделяется как важный региональный центр притяжения, хотя и второго порядка.

Н. Юн и др. [Yong N. et al., 2018] искали различные типы транспортных корреспонденций среди пассажиропотока Пекинского метрополитена. Им удалось выявить несколько базовых паттернов и проанализировать их характеристики. Так, были выделены стабильные и случайные паттерны. К стабильным отнесены:

1. Поездки из жилых районов к местам работы и транспортным узлам в утренние часы пик, а из мест работы и транспортных узлов в жилые районы в вечерние часы пик.

2. Основные поездки совершаются из жилых районов в транспортные узлы, также места рекреации и развлечений в утренние часы, а из мест развлечений и транспортных узлов в жилые районы – в вечерние часы.

К случайным паттернам отнесены поездки в дни с измененными рабочими часами (например, во время проведения саммита АТЭС в Пекине). Отправление и прибытие в эти дни имели смешанные пространственно-временные характеристики между рабочими и выходными днями.

Еще одна задача, которую ставили перед собой исследователи – определение наиболее важных станций в системе метрополитена. Ф. Ся и др. нашли ответ на этот вопрос на примере системы метрополитена г. Шанхай. [Xia F. et al., 2019] Критерий «важности» станции определялся ее положением в топологической структуре сети, положением относительно наиболее загруженных направлений, объемом входящего пассажиропотока в различное время суток и дни недели. Таким образом, вопрос потребовал всеобъемлющего изучения практически всех параметров пассажиропотока. Авторы пришли к следующим выводам:

1. В будние дни наблюдается более высокий объем пассажиропотока в часы пик утром и вечером, по сравнению с дневным временем. Это связано с регулярными поездками людей на работу и обратно.

2. В выходные дни паттерны пассажиропотока более равномерны в течение дня, без ярко выраженных часов пик. Это отражает более разнообразный характер поездок в нерабочее время.

3. Существуют станции с наибольшим входящим объемом пассажиропотока, такие как станции Народная площадь, Шанхайский железнодорожный вокзал, Луцзяцзуй. Эти станции играют ключевую роль в транспортной сети.

4. Направление пассажиропотока между станциями различается в будние и выходные дни. В будни преобладают поездки из жилых районов в деловые центры, а в выходные – более разнообразные поездки для досуга и развлечений.

Помимо изучения повседневных пассажиропотоков, формирующих рисунок пространственного распределения пассажиропотока, некоторые исследователи обратили внимание и на менее изученный сюжет: пространственная структура пассажиропотоков в нерабочее время. З. Ду и др. [Du Z. et al., 2017.] поставили целью изучить динамику потоков в системе метрополитена Шанхая. Для этого, помимо данных о количестве перевезенных

пассажиры, были использованы данные микроблогов в сети Интернет, которые позволили установить наиболее посещаемые места городской агломерации. Была выявлена взаимосвязь между количеством перевезенных пассажиров и их активностью в соцсетях, выявлены ядра концентрации населения в выходные и вечернее время.

Пожалуй, именно математики и специалисты в области анализа данных наиболее глубоко подошли к изучению пассажиропотоков. Это вполне объяснимо: результаты исследования имеют важнейшее значение для принятия решения об эффективности работы системы городского транспорта, а главное позволяют моделировать различные сценарии работы системы.

К. Чжан и др. в своей работе [Zhang Q. et al., 2021] внесли важный вклад в систематизацию накопленных знаний о моделировании пассажиропотоков в системах. Авторы сделали выборку из более тридцати наиболее актуальных источников, в которых рассматривается моделирование пассажирских потоков в городских транспортных системах. Все работы были классифицированы ими по следующим признакам:

- территориальный охват;
- тип транспортной системы;
- источник данных о пассажиропотоке;
- исследуемый объект транспортной системы;
- исследуемый параметр пассажиропотока;
- метод прогноза пассажиропотока;
- условия прогноза пассажиропотока.

Для нас, как географов, наибольший интерес представляет территориальный охват исследований, а также интерпретация результатов с географической точки зрения.

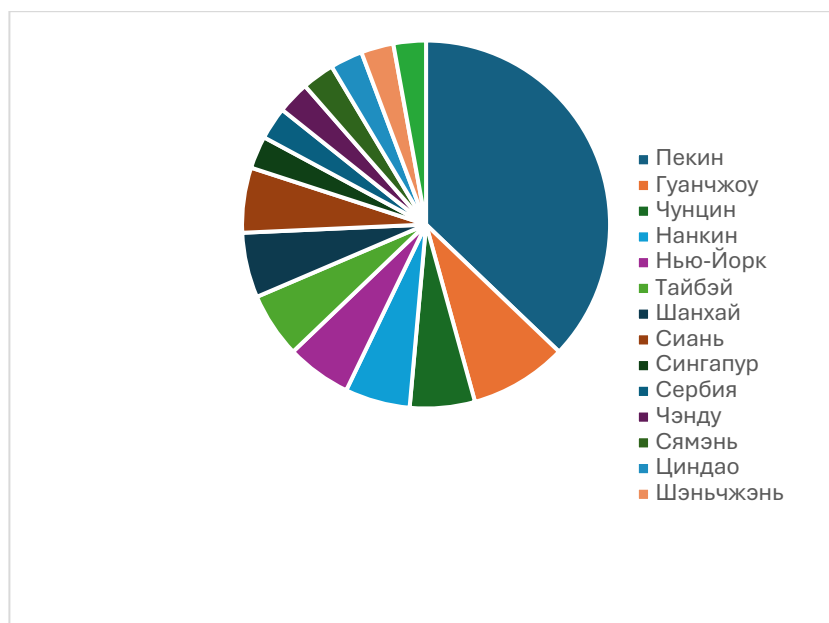


Рисунок 4. Изученность городских рельсовых транспортных систем мира специалистами по моделированию пассажирских потоков по наиболее цитируемым публикациям за последние 15 лет.

Составлено по материалам К. Чжан и др. [Zhang Q. et al., 2021].

Большая часть анализируемых работ посвящена изучению пассажиропотоков в системах метрополитена, небольшая часть – системам городских железных дорог. Наибольший интерес среди исследователей представляла система метрополитена г. Пекин. И этот выбор логичен – она занимает первое место в мире по количеству перевезенных пассажиров в 2022 г. Кроме этого, наряду с системой Московского метрополитена пекинская – одна из наиболее быстро растущих в мире (с 2017 по 2023 гг. число станций увеличилось на треть – с 345 станций до 490)<sup>7</sup>.

Не будем подробно останавливаться на методах прогноза пассажиропотока, используемых авторами: на наш взгляд, этот вопрос целиком лежит в плоскости вычислительной математики и не имеет отношения к географии. При этом отметим, что ни в одной работе из этого списка, включающего в себя более 30 наименований, не уделяется внимание географической интерпретации полученных результатов. Разумеется, мы, как географы, не можем винить их в этом – исследователи ставили перед собой совершенно другие цели и задачи. Основной их фокус лежит на оптимизации вычислительных методов

<sup>7</sup> Urban Rail Transit Statistics and Analytics Report 2023 (PDF). 中国城市轨道交通协会 (in Chinese) [Электронный ресурс]. URL: <https://oss.camet.org.cn/u/cms/www/202403/28125736mgzp.pdf> (дата обращения: 02.02.2024).

прогнозирования пассажиропотока. К тому же, это всего лишь выборка наиболее часто цитируемых работ по моделированию пассажиропотока.

Разумеется, прогнозирование пассажиропотока в системах метрополитена – не единственная исследовательская проблема, освещенная в ранее опубликованных работах. Влияние пространственных факторов на распределение пассажиропотока также интересует математиков. Наибольшую изученность получила проблема поиска взаимосвязи между топологической структурой транспортной сети и пространственной структурой распределения пассажиропотока.

Г. Човелл Г. [Chowell, 2005.] анализирует данные о перемещении 1,6 млн человек в городе Портленд, полученные с помощью системы моделирования транспортных потоков TRANSIMS. Была поставлена цель – выявить статистические закономерности и структурные особенности сети. Авторы построили направленный взвешенный граф, где узлы соответствуют физическим местам, а ребра – перемещениям людей между этими местами. Они проанализировали статистические свойства этого графа, такие как распределение исходящих степеней узлов, распределение весов ребер (интенсивности потоков), кластеризацию, среднее расстояние между узлами и т.д. Также они исследовали временную эволюцию крупнейшей компоненты связности графа. Была выявлена сильная линейная корреляция между степенями узлов и суммарными весами их исходящих ребер. Кроме того, они проследили динамику крупнейшей компоненты связности графа, наблюдая резкий скачок ее размера около 6 утра.

Наиболее близко к поставленной нами исследовательской проблеме подошел К. Су с соавторами [Xu Q., Мао В. Н., Bai Y., 2016]. Мы уже рассматривали эту работу в разделе 1.1, однако вернемся к этой работе еще раз. Цель их исследования – изучить параметры и структуру пассажирских потоков в крупной городской системе метрополитена на примере Пекина. Для достижения этой цели ими были поставлены задачи:

- построить направленную взвешенную сеть пассажирских перемещений на основе топологии инфраструктуры метро и данных о поездках пассажиров;
- проанализировать статистические свойства и временные закономерности пассажирских потоков в сети;
- проверить наличие связи статистических свойств пассажиропотока с полицентрической структурой города.

Это исследование ценно для настоящей работы еще и тем, что оно – одно из немногих, где результаты исследования представлены в виде картосхемы.

Для выполнения задачи авторы построили направленный взвешенный граф сети линий Пекинского метрополитена, используя данные транспортных смарт-карт. Выполнен статистический анализ распределений размеров потоков, входящих и исходящих пассажирских потоков на станциях, показавший обратную степенную зависимость между дальностью поездок и количеством пассажиров. Авторы выделили 10 кластеров. При этом пространственное распределение этих кластеров полицентрично. На основе этого авторы делают вывод, что центры (и соответствующие им периферии) полностью подчиняются ритмам ежедневной маятниковой миграции. Через эти центры проходит более 60% суточного пассажиропотока. Характерно, что данные центры расположены в узлах графа сети Пекинского метрополитена, тяготея к центральной части циклического остова сети.

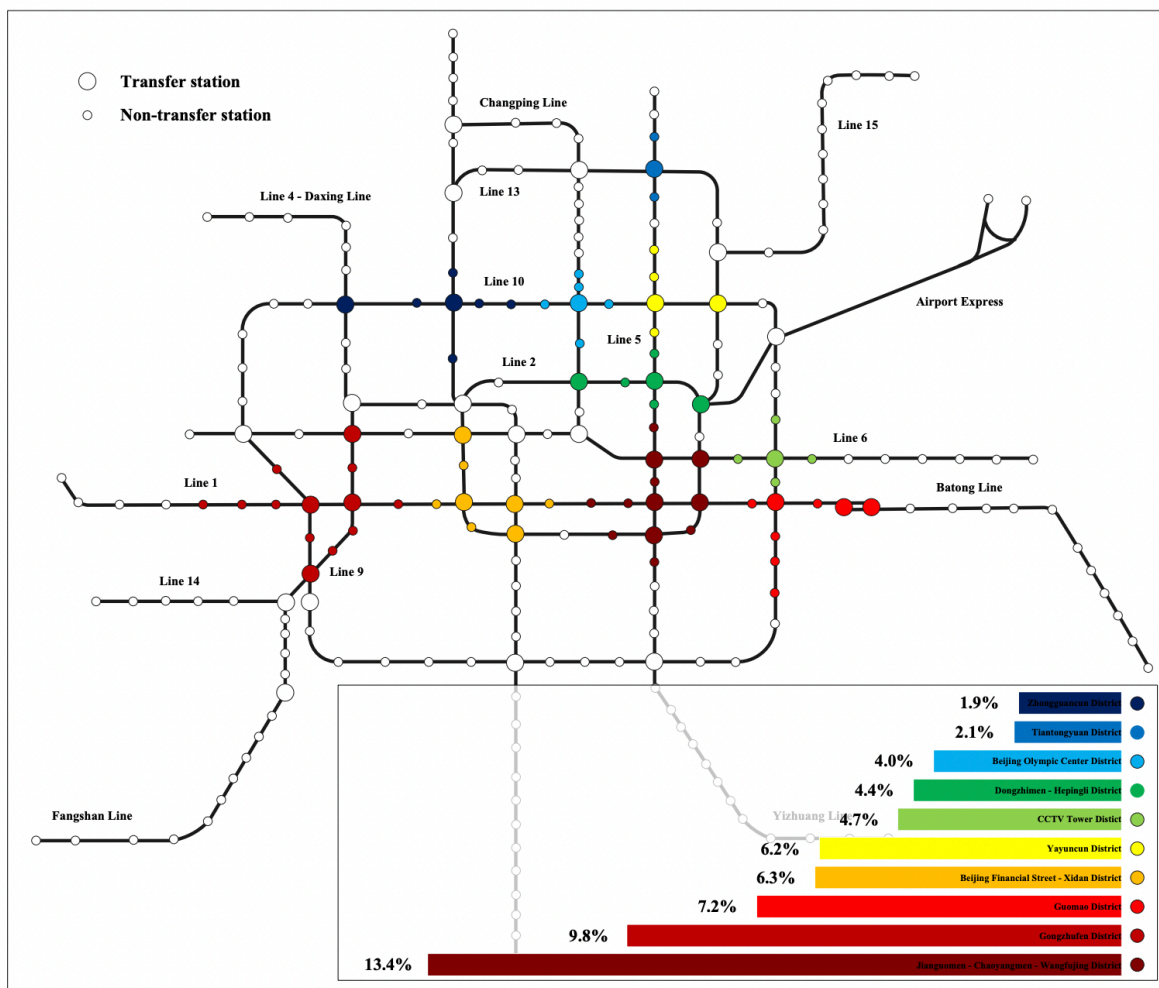


Рисунок 5. Иерархическая организация полицентров, составленная на основе статистических параметров пассажиропотока в сети Пекинского метрополитена. Составлено К. Су и др. [Xu Q., Mao B. H., Bai Y., 2016].

Я. Чжан в своей работе [Zhang Y., Li N., 2022] выделила такой пространственный параметр пассажиропотока, как баланс центростремительных и центробежных пассажиропотоков в суточной динамике. Кроме этого, автор предлагает измерять неравномерность загрузки линии городского транспорта, который рассчитывается как отношение среднего значения пассажиропотока одного перегона между станциями к максимальному значению.

Измерение соотношения распределения пассажиропотока по сети линий метрополитена и топологической структуры системы имеет и прикладное значение, что доказано в исследовании Чопра и др. [Chopra S. et al., 2016]. Эти авторы разработали подход, который синтезирует информацию о структуре сети, пространственном расположении и потоке пассажиров, чтобы изучить влияние как глобальных свойств (топология и группы станций), так и локальных свойств (уязвимые узлы и ребра) на устойчивость системы метрополитена в г. Лондон. Был проанализирован характер пространственного распределения пассажиропотока, а также степень ассортативности сети. Установлено, что пассажиропоток линий лондонского метрополитена увеличивается экспоненциально, что указывает на уязвимость к сбоям на нескольких критических станциях. Выявлены конкретные источники структурной и функциональной уязвимости, которые необходимо устранить для повышения устойчивости сети. Также определены группы взаимозависимых станций, что позволяет понять каскадные эффекты при сбоях.

**Применение данных транспортных смарт-карт для проведения транспортно-географических исследований.** О роли смарт-карт для транспортно-географических исследований рассуждают М. Багхи и П. Уайт [Bagchi, White, 2005]. Работа была опубликована на заре появления транспортных смарт-карт в крупнейших городских транспортных системах мира. К моменту опубликования этой статьи транспортные карты уже применялись в таких городах, как Гонконг, Лондон, Сеул, Токио и многих других. Следует заметить, что рассматриваемая работа – одна из первых, посвященных изучению данных транспортных смарт-карт, хотя с момента внедрения первых таких карт прошло почти 10 лет.

В самом начале работы авторы обращают внимание, что данные транспортных смарт-карт имеют неоспоримые преимущества, которые будут описаны в следующем разделе, однако не могут служить полной заменой другим способам сбора транспортных данных. Среди недостатков приводятся следующие доводы:

1. *Транспортные смарт-карты отображают лишь общие транспортно-поведенческие паттерны, однако не способны отслеживать перемещение каждого пользователя.* Этот довод был справедлив на момент опубликования статьи, однако в настоящее время транспортные смарт-карты, используемые в том числе и в рамках исследования, имеют уникальный идентификатор, позволяющий отследить путь пассажира.

2. *Пересадки внутри системы одного вида транспорта не учитываются транспортными картами.* Это утверждение справедливо и для Московского метрополитена. Более подробно о специфике исходных данных будет сказано в следующем разделе.

3. *В структуре данных одиночные поездки неотделимы от поездок с возвращением в пункт отправления и более сложно спланированных поездок.* В целом это схоже с тем, о чём авторы пишут в первом пункте, и снова отсылает нас к тезису о неактуальности этого утверждения на сегодняшний день.

Приводятся определения понятий «поездка» и «пользователь». Так, применительно к исследованию транспортных смарт-карт, по мнению авторов, поездкой может считаться каждая новая транзакция вне зависимости от того является ли эта транзакция единственной на пути пассажира из пункта А в пункт Б (т.е. использует единственный вид транспорта) или она занимает место в цепочке из нескольких транзакций (т.е. когда пользователь совершает пересадки с одного вида транспорта на другой). Однако, ещё раз обратим внимание, что современная структура данных позволяет с высокой (но не абсолютной!) точностью определить точное количество пересадок, а также начало новой поездки. Пользователем считается любой обладатель смарт-карты, то есть подразумевается, что у каждой уникальной смарт-карты если свой уникальный владелец. Выделяются «активные» и «пассивные» пользователи. Активные пользователи проводят поездки на регулярной основе, а пассивные – нет. Однако точная временная граница частоты пользования смарт-картами не приводится.

Далее авторы рассуждают о свойствах данных транспортных смарт-карт. Выделяются три измерения, по каждому из которых в отдельности или по их попарным комбинациям возможно проводить транспортные исследования: пространственное измерение, временное измерение, структурное измерение. Последнее подразумевает собой величину охвата транспортными смарт-картами единого транспортной системы города, т.е. какие виды транспорта попадают под действие смарт-карт. Авторами выделяется «высокий» уровень исследования, подразумевающий изучение транспортных данных при вовлечённости всех видов транспорта в единую систему и «низкий» уровень – изучение данных по отдельным видам транспорта.

Проблема недостаточности данных для построения матриц корреспонденций уже поднималась в работах зарубежных авторов.

В статье М. Трепанье и Р. Шабло [Trepanier, Charleau, 2006] авторы представляют метод оценки пункта назначения пользователей общественного транспорта на основе данных смарт-карт. Этот метод включает анализ закономерностей использования смарт-карт, таких как время и место касания карты, чтобы сделать вывод о вероятном пункте назначения пользователя. В статье показана эффективность метода с использованием данных системы общественного транспорта Монреаля (Канада). Авторы называют высоковероятным прогноз пункта для 66% поездок. При этом наибольшая точность достигнута для поездок в часы пик. Отмечено, что большая часть прогноза пунктов назначения с низкой точностью прогноза относится к малочастотным поездкам, совершаемым пассажирами зачастую спонтанно.

Цз. Чжао и др. [Zhao J. et al., 2017] использовали комбинацию методов кластеризации и визуализации для анализа данных смарт-карт. Сначала они предварительно обработали данные, чтобы удалить любые выбросы, а затем сгруппировали оставшиеся транзакции на основе их пространственно-временных особенностей. Эти авторы использовали алгоритм кластеризации на основе плотности под названием DBSCAN для идентификации кластеров транзакций, которые были близки друг к другу во времени и пространстве. Затем они визуализировали кластеры, используя тепловые карты, чтобы определить общие модели поездок.

Для дальнейшего моделирования поездок использовался метод, называемый авторами «метод цепей поездок». Он включал отслеживание пути отдельных пользователей через транзитную систему путем связывания их карточных транзакций в хронологическом порядке. Затем были применены методы сетевого анализа, чтобы определить наиболее часто используемые маршруты и станции, а также наиболее распространенные точки пересадки между различными видами транспорта.

Эти авторы также использовали статистический анализ для выявления корреляции между моделями поездок и демографическими факторами, такими как возраст, пол и доход. Это позволило им выявить модели поведения в поездках, характерные для разных групп пользователей.

Схожий методологический аппарат использован Д. Ли с соавторами [Li D. et al., 2011] на примере системы наземного городского транспорта в городе Цзинань (Китай). Сначала они предварительно обработали данные, удалив все неполные или недействительные записи. Затем они использовали алгоритм кластеризации для группировки транзакций на основе их

пространственно-временных особенностей. Авторы использовали алгоритм кластеризации на основе плотности под названием DBSCAN для идентификации кластеров транзакций, которые были близки друг к другу во времени и пространстве.

Затем по аналогии с предыдущей работой был использован метод цепей поездок, чтобы связать отдельные транзакции в полные поездки. Далее авторы применили метод матричной факторизации, называемый неотрицательной матричной факторизацией (NMF), для оценки матрицы отправителя-назначения. NMF — это метод разложения матрицы на две матрицы меньшей размерности, содержащие неотрицательные элементы. Авторы использовали NMF для разложения матрицы транзакций на две матрицы меньшей размерности, представляющие места отправления и назначения поездок. Наконец, они оценили точность своего метода, сравнив предполагаемую матрицу корреспонденций с данными опроса пассажиров, обнаружив, что их метод позволяет точно оценить матрицу отправления-назначения с частотой ошибок менее 10%.

Работа А.-С. Брайанд с коллегами [Briand A. S. et al., 2017] исследует использование транспортных смарт-карт для анализа долгосрочных изменений в пассажиропотоке автобусной системы г. Оттава. Целью исследования являлась кластеризация пассажиров по временным паттернам использования ими общественного транспорта и проведение лонгитюдного анализа<sup>8</sup> изменений в этих паттернах. Для этого применена двухуровневая генеративная модель на основе смеси гауссовских распределений, а оптимальное число кластеров определялось с помощью критерия интегрированной завершённой вероятности. Результаты показали наличие различных временных профилей активности пассажиров и устойчивость их принадлежности к кластерам с течением времени, особенно для двухпиковой активности, а также более разрозненное пространственное распределение для диффузных профилей.

Авторы еще одного исследования [Chakirov, Erath, 2011] провели анализ данных системы электронной оплаты проезда EZ-Link в Сингапуре для характеристики использования общественного транспорта и моделирования поведения пользователей, а также выявление специфических предпочтений и моделей поведения пассажиров. Для достижения этой цели применяются статистический анализ и методы анализа данных транспортных смарт-карт, включая сравнение с данными обследования домашних хозяйств 2008 г. при изучении мультимодальных моделей поездок и разработку методов идентификации мест регулярной

---

<sup>8</sup> исследование одних и тех же объектов (в данном случае – пассажиров), которые существенно меняют какие-либо свои признаки в течение изучаемого периода

активности. Результаты показывают высокую концентрацию поездок в часы пик, стремление пассажиров занимать места в поездах, а также разработанные методы оценки времени ожидания на станциях метро и факторов выбора маршрута. Также предложены подходы для моделирования мест проживания и работы на основе данных о поездках, что требует дополнительных данных и стратегий для более глубокого понимания активности пользователей.

### 1.3 Факторы распределения пассажиропотока в системе метрополитена

В разделе 1.1 упомянуты два важнейших фактора для объяснения пространственной неравномерности распределения входящего объема пассажиропотока в узлах городской транспортной системы: функциональный и транспортно-географический. Перед тем, как изучать параметры пассажиропотока в системе Московского метрополитена, охарактеризуем транспортно-географическое положение (ТГП) ее структурных элементов. Далее перейдем к анализу функционального зонирования территории города.

**Топологическая структура Московского метрополитена и территориальный охват исследования.** Понимание особенностей пространственного распределения пассажиропотока не только в сети метрополитена, но и любой другой транспортной сети невозможно без понимания структуры строения транспортной сети. Поэтому, перед тем как мы перейдем к анализу параметров пассажиропотока, крайне важно обратить внимание на особенности территориального развития сети Московского метрополитена, предшествующие появлению той конфигурации, которая будет исследована.

Для анализа морфологии сети Московского метрополитена применим методику С.А. Тархова [Тархов, 1989] которая основана на представлении элементов транспортной системы в виде *графа*. Преимуществом данного подхода является его простота и ясность терминологии. Вершины графа обозначаются как *узлы*, а линии, соединяющие их – как *ребра*. Замкнутые контуры сети формируют *циклы*, а незамкнутые – *ветви*. Ветви объединяются в *дерево*, тогда как скопление циклов, где каждая пара имеет хотя бы одно общее ребро, называется *циклическим остовом*. Сложность этого остова, как и всей системы, определяется количеством *топологических ярусов*. Первый ярус включает циклы, которые имеют хотя бы одно общее ребро или вершину с границей системы. Для второго и последующих ярусов ограничивающей линией служит граница предыдущего яруса. Чем больше ярусов в анализируемой транспортной сети, тем выше уровень ее развития. Все станции, находящиеся на пересечении

двух и более линий группируются в узлы графа. Однако, если на пересечении линии отсутствуют станции, между которыми построен переход, то такое пересечение линий не может быть узлом и не учитывается как структурный элемент графа сети.

Топологический метод позволит оценить положение внутренних элементов системы метрополитена относительно друг друга. Однако, для более полного понимания их транспортно-географического положения, необходимого нам для изучения закономерностей распределения пассажиропотока, необходимо учитывать и взаимосвязь с элементами внешних транспортных систем (наземного городского пассажирского транспорта, пригородного железнодорожного и транспорта, узлов междугородного и международного транспорта).

В рамках исследования отследим ключевые показатели развития сети: количество циклов и топологических ярусов. Результаты подсчетов представлены на рис. 6.

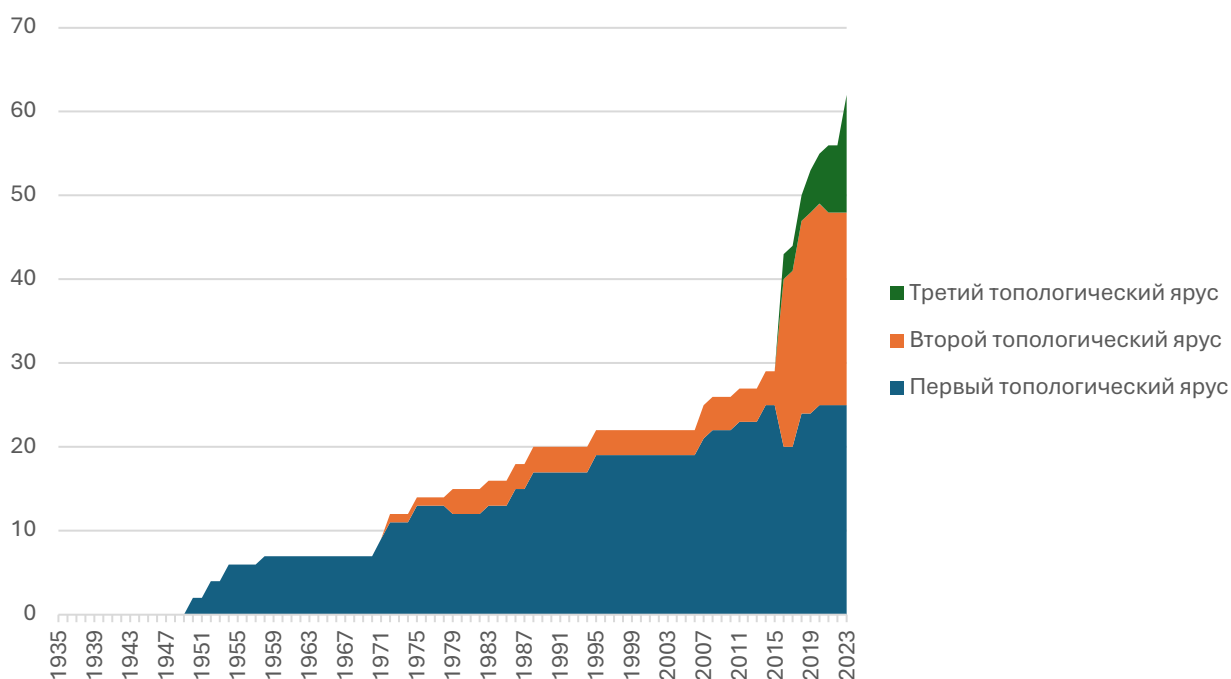


Рисунок 6. Эволюция топологической структуры сети линий Московского метрополитена с 1935 г. по 2023 г. Составлено автором.

Московский метрополитен был открыт 15 мая 1935 г., став первым в СССР. Первая линия, под названием Кировско-Фрунзенская (ныне – Сокольническая), протянулась от станции Крымская площадь до станции Сокольники. На станции Охотный ряд было организовано виловое движение поездов до станции Смоленская, но уже в 1938 г. на участке Курская – Киевская организовано движение по новой Арбатско-Покровской, включивший в

себя участок Охотный ряд – Смоленская. Кроме этого, было открыто движение по новой Горьковско-Замоскворецкой (ныне – Замоскворецкой) линии метро. В военное время и в первые послевоенные годы (к 1949 г.) Замоскворецкая и Арбатско-Покровская линии были продлены до станций «Завод им. Сталина» (ныне Автозаводская) на юге города и Измайловская (тогда Измайловский Парк) на востоке. Таким образом, основные урбанизированные ареалы Московской агломерации на тот момент оказались соединены системой метрополитена.

В 1950 г. появился циклический остов и его первый топологический ярус сети благодаря открытию южного участка Кольцевой линии от станции Парк Культуры им. Горького до станции Курская. Остов включал в себя всего два цикла. Еще два цикла добавилось после продления Кольцевой линии от станции Курская до станции Белорусская в 1952 г., а сомкнулась Кольцевая линия, образовав шесть циклов в 1954 г.

С 1958 г. начался рост древовидного компонента сети благодаря строительству Филевской и Рижской (ныне – Калужско-Рижской). В последующие 13 лет топологического усложнения сети не происходило, а древовидный компонент развивался преимущественно в юго-западном, юго-восточном и северо-восточном направлениях (введена в эксплуатацию Ждановская, ныне – Таганско-Краснопресненская линия метро, построен Калужский радиус до станции Калужская, продлены Филевская, Арбатско-Покровская линии). Во многом это было обусловлено территориальной экспансией города: включением в его состав ближайших пригородов (таких как Бабушкин, Кунцево, Тушино и др.) и последующей многоквартирной застройкой. Мощности существовавших тогда наземных транспортных связей оказалось бы категорически мало для обслуживания этих территориях в условиях практически экспоненциального роста людности Московской агломерации.

В 1971 г. Калужский радиус и Ждановская линии метро были продлены вглубь контура Кольцевой линии и соединены на общей для обеих станции с кроссплатформенной пересадкой (первой в системе Московского метрополитена) – Площадь Ногина (ныне – Китай-Город). А уже в следующем 1972 г. благодаря соединению Калужского и Рижского радиусов и образования единой Калужско-Рижской линии на станции Тургеневская, имеющую пересадку со станцией Кировская (ныне – Чистые пруды) топологическая сложность сети метро заметно увеличилась: число ярусов достигло двух. Новый ярус расположился в пределах станций Проспект Маркса (ныне – Охотный ряд) – Кировская (Сокольническая линия), переход на Калужско-Рижскую линию – Новокузнецкая, переход на Замоскворецкую линию – Площадь Сверлова (ныне – Театральная), переход обратно на Сокольническую линию. В 1975 г.

благодаря соединению Ждановского и Краснопресненского радиуса, число циклов во втором радиусе увеличилось до двух.

В последующие годы было продолжено расширение сети уже существующих линий и строительство новых за пределами ее циклического остова: построены Калининский и Серпуховский радиусы. Вектор экспансии сети сменился преимущественно на южный и восточный. В 1982 г. в сети появился первый цикл за пределами Кольцевой линии: Замоскворецкая и Серпуховская линии соединились на станции Севастопольская (Каховская). К 1988 г. Серпуховский радиус продлен через центр города к станции Савеловская с образованием новой Серпуховско-Тимирязевской линии.

В 1991 г. завершился советский этап развития сети Московского метрополитена. Радиальные линии метро в субмеридианальном направлении практически достигли Московской Кольцевой автодороги. В то же время, линии в субширотном направлении не покрывали территорию города столь плотно, из-за чего значительная часть новых районов все еще не имела прямой связи по системе метрополитена с центром ядра агломерации.

Снова улучшаться связность системы метрополитена стала лишь в 2004 г. с открытием линии Московского монорельса на севере Москвы, соединив Серпуховско-Тимирязевскую и Калужско-Рижскую линии. Однако, благодаря отсутствию удобных пересадок с радиальными линиями метрополитена, а также значительными интервалами графика движения поездов и низкой скоростью их движения по сравнению со системой метрополитена, линия почти не использовалась жителями города, поэтому нельзя говорить о ее важной роли в повышении связности и реальному усложнению топологической структуры сети линий метрополитена.

Появившаяся в 1995 г. новая Люблинско-Дмитровская линия опять-таки продолжала увеличивать покрытие города сетью в субмеридианальном направлении. В 2007 г. эта линия продлена вглубь контура Кольцевой линии, увеличив число циклов в топологическом остове сети.

О реальном развитии сети в субширотном направлении можно говорить лишь начиная с 2008 г., когда было построено продолжение Арбатско-Покровской линии на запад города, до станции Строгино, затем удлиненное в 2010 г. до станции Митино. В 2011 г. Люблинско-Дмитровская линия продлена до станции Марьино Роща, однако из-за того, что на станции Достоевская не была создана возможность совершить пересадку на Кольцевую линию, реального повышения связности сети не произошло. Но эта же линия была продлена и в южном направлении: на конечной станции Зябликово возникла возможность совершить пересадку на

станцию Красногвардейская Замоскворецкой линии, таким образом добавился один еще цикл вне контура Кольцевой линии.

Следующее значительное расширение сети произошло в 2016 г. Было введено в эксплуатацию Московское Центральное кольцо (МЦК). Несмотря на то, что МЦК по техническим особенностям эксплуатации к метрополитену не относится, также, как и Московский монорельс, но, благодаря гораздо наличию большого количества удобных пересадок практически на все радиальные линии метрополитена, а также единой системе оплаты проезда вместе с метрополитеном, не требующей доплаты за пересадку, быстро завоевало популярность среди пассажиров, навсегда изменив их транспортное поведение. Кроме этого, МЦК, с момента (жуткий журнализм) ее открытия и по сей день управляется ГУП «Московский метрополитен». В частности, также как и на московском метрополитене, здесь используется тактовое движение (через одинаковые интервалы времени). На этих основаниях Московское центральное кольцо можно считать частью Московского метрополитена, за исключением наличия консистентности<sup>9</sup> с московским метрополитеном в части подвижного состава и типа питания электропоездов (на МЦК используется постоянный ток 3 кВ и верхний токосъем, как на линиях железной дороги, в метрополитена – 825 В и нижний токосъем). МЦК стало крупнейшим единовременно введенным в эксплуатацию участком системы Московского метрополитена протяженностью 54 км. По всем перечисленным основаниям Московское центральное кольцо включается нами в дальнейший анализ. Кроме этого, начало эксплуатации МЦК резко усложнило топологическую структуру сети метрополитена – сразу же образовался третий топологический ярус, а число циклов в сети скачкообразно возросло до 39.

В 2017 г. введен в эксплуатацию Солнцевский радиус, значительно улучшивший транспортную доступность районов в западной части Московской агломерации. В 2018 г. он был продлен с обоих концов – в сторону района Солнцево, а также в сторону районов Хорошевский и Савеловский, расположенных в северо-западном секторе города ближе к его центральной части. Последний из перечисленных участков (от станции Деловой центр до станции Шелепиха) в последствии станет на некоторое время частью новой Большой кольцевой линии. Таким образом, заметно улучшилась связность сети именно в ее северо-западной части.

В 2019 г. была введена в эксплуатацию система Московских центральных диаметров (МЦД; Белорусско-Савеловский диаметр МЦД-1 и Курско-Рижский диаметр МЦД-2). В

---

<sup>9</sup> взаимной согласованности

официальном пресс-релизе Московского метрополитена для их названия был использован термин «наземное метро»<sup>10</sup>. Однако, в действительности данная транспортная система имеет ограниченное отношение к метрополитену. Фактически проведен ребрендинг уже существующего пригородного железнодорожного сообщения. Из значительных нововведений следует отметить внедрение единой системы оплаты проезда, совместимой с Московским метрополитеном. Тем не менее, пассажиры Московских центральных диаметров (МЦД) по-прежнему имеют возможность приобретения билета на разовую поездку вне тарифной линейки Московского метрополитена. Кроме того, эксплуатация МЦД осуществляется структурами Российских железных дорог (РЖД) и Центральной пригородной пассажирской компании (ЦППК), к которым впоследствии присоединилась Московско-Тверская пригородная пассажирская компания (МТППК). В средствах массовой информации также поднимался вопрос о корректности использования термина «наземное метро»<sup>11</sup>.

Вернемся к анализу эволюции сети Московского метрополитена. По вышеперечисленным причинам линии МЦД и их пассажиропоток в исследование не включены, соответственно, влияние на топологическую структуру сети линий московского метрополитена нами также не рассматривается. Хотя, безусловно, связность всей совокупной сети рельсового транспорта Московской агломерации значительно возросла.

Наряду с открытием МЦД, в 2019 г. в сети московского метрополитена вновь произошло субширотное расширение – была введена в строй действующих Некрасовская линия, соединившая районы города, находящиеся за пределами МКАД в юго-восточной части с сетью линий метрополитена. Топологическая структура сети осталась без существенных изменений.

В 2020 г. линия была продлена до станции Электровзаводская Арбатско-Покровской линии. Таким образом был продолжен тренд, начатый при расширении Солнцевского радиуса: линии метрополитена больше не ведут к топологическому центру сети в пределах Кольцевой линии. На это могут быть несколько причин:

---

<sup>10</sup>Метро — Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы [Электронный ресурс]. URL: [https://stroj.mos.ru/moskovskiiie-tsentral-nyie-diametry-stroi\\_mos#:~:text=%D0%9E%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5,%C2%AB%D0%90%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%E2%80%93%20%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D0%B9%C2%BB\).](https://stroj.mos.ru/moskovskiiie-tsentral-nyie-diametry-stroi_mos#:~:text=%D0%9E%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5,%C2%AB%D0%90%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%E2%80%93%20%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D0%B9%C2%BB).) (дата обращения: 01.02.2024)

<sup>11</sup>Строй. Москва. Официальный сайт. Метрополитен [Электронный ресурс]. URL: <https://www.m24.ru/articles/transport/21112017/151602> (дата обращения: 01.02.2024)

- 1) Экономическая: стоимость строительства может быть значительно выше, чем в других частях города;
- 2) Градостроительная: приоритет градостроительной политики на увеличение функционального разнообразия в срединной и окраинной зонах ядра Московской агломерации, джентрификация промышленных зон, строительство новых жилых массивов и офисных центров и появление необходимости транспортного обслуживания таких территорий (заметим, что как Солнцевская (участок будущей Большой Кольцевой линии), так и Некрасовская линия как раз частично проходят по таким территориям).
- 3) Транспортная: снижение нагрузки с центральных участков сети благодаря появлению новых пересадочных контуров.

В 2021 г. открыт первый, западный участок Большой Кольцевой линии (БКЛ) от станции Хорошевская до станции Каховская. Таким образом, вся западная половина города получила дополнительный обширный контур: пересадочные станции были оборудованы на всех пересечениях с радиальными линиями метрополитена.

Наконец, в 2023 г. достроен и введен в эксплуатацию восточный участок Большой Кольцевой линии. В него вошел уже ранее введенный участок Некрасовской линии от станции Нижегородская до станции Электrozаводская. Таким образом, в сети линий московского метрополитена появилось уже третье по счету кольцо. Кроме этого, были продлены Люблинско-Дмитровская и Солнцевская линии на городских окраинах.

К 2023 г. сеть московского метрополитена насчитывает 15 линий протяженностью 475,3 км. В это число не входит линия Московского монорельса, а также линии Московских центральных диаметров. Сеть его линий почти полностью покрывает территорию в границах т.н. «Старой Москвы».

Монорельс исключен из исследования, поскольку его роль в повседневных поездках несравненно мало в сравнении с любой системой (достаточно обратиться к объему входящего пассажиропотока: даже на станциях с относительно крупным объемом, например ВВЦ, суточное значение едва ли превышает 1 тыс., что не идет ни в какое сравнение со станциями метрополитена с минимальным объемом (от 5 тыс. пассажиров ежедневно и выше). Такой объем пассажиропотока больше характерен для остановок системы наземного пассажирского транспорта Москвы.

Кроме этого, в отличие от Московского центрального кольца, которое в рамках исследования пассажиропотоков мы считаем де-факто частью системы московского

метрополитена, Московские центральные диаметры мы включить в исследование не можем.

Еще раз перечислим основания:

- 1) Линии МЦД простираются к периферии Московской агломерации, в то время как система метро охватывает лишь наиболее высокоурбанизированный ареал агломерации, преимущественно входящий в границы Московской Кольцевой автодороги.
- 2) Неполная интеграция систем оплаты проезда в МЦД и ММ. Из-за этого мы не располагаем информации о достоверной географии поездок пассажиров МЦД, а также недополучаем сведения о входящем объеме пассажиропотока.
- 3) Эксплуатация сети МЦД, по сути являющаяся сетью пригородных железных дорог, началась задолго до ребрендинга этой сети. Таким образом, ребрендинг не мог существенно повлиять на характер мобильности пассажиров метрополитена. Транспортное поведение пассажиров в сети пригородных железных дорог и ММ складывалось параллельно друг с другом на протяжении десятилетий. По этой причине сеть пригородных железных дорог Московской агломерации может быть объектом отдельного исследования.

Выше нами был выбран временной охват исследования: с 1 октября 2019 г. по 31 декабря 2023 г. Подробный анализ топологической структуры сети метрополитена на начало и конец периода был осуществлен в одних из ранних работ автора [Киселев, 2025а]. Ниже приведены важнейшие выводы, полученные в ходе этого анализа.

- 1) Циклический остов сети имеет неправильную форму. В северной и восточной частях он ограничен МЦК, тогда как на юге и западе выходит за его пределы, формируя несколько внешних циклов. Кроме этого, в силу отсутствия пересадок между некоторыми расположенными рядом станциями в сети метрополитена характерно наличие накладывающихся друг на друга циклов.
- 2) Границы второго топологического яруса также имеют неправильную форму; его геометрический центр смещён относительно других ярусов, что подчёркивает асимметрию циклического остова. В совокупности с протяжёнными древовидными компонентами это свидетельствует о незавершённости развития сети в 2019 г. (рис. 7), что подтверждается интенсивным ростом её структуры в 2016–2023 гг.

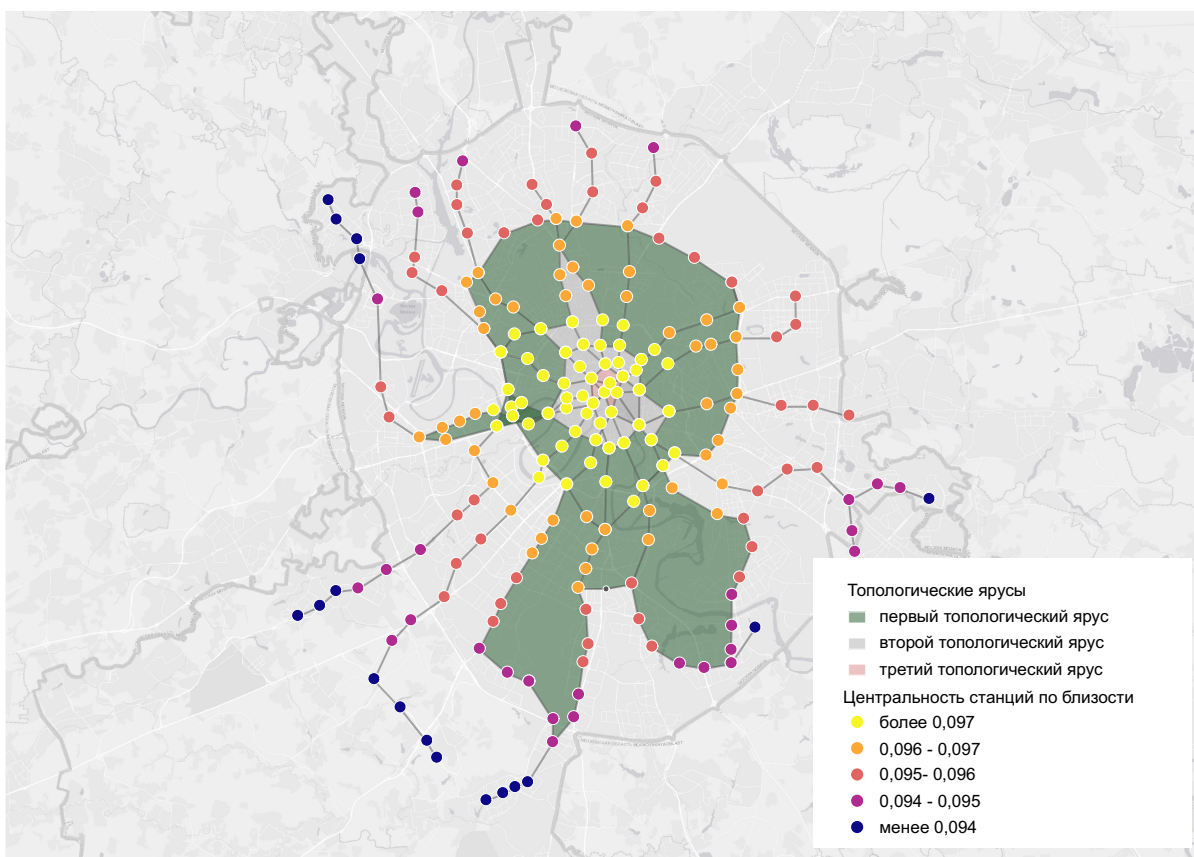


Рисунок 7. Топологическая структура системы Московского метрополитена по состоянию на 1 октября 2019 г.

Составлено автором [Киселев, 2025а].

- 3) Третий топологический ярус занимает небольшую территорию исторического центра, практически не выходя за пределы Бульварного кольца. Топологический центр сети локализуется в узле станций Театральная — Площадь Революции — Охотный Ряд. Он определён с использованием показателя центральности по близости, рассчитываемого на основе взвешенных по длине рёбер кратчайших путей.
- 4) К концу 2023 г. (рис. 8) были введены Большая Кольцевая линия, продолжения Некрасовской, Люблинско-Дмитровской и Солнцевской линий, а также изменена трассировка Солнцевской линии. Эти изменения расширили границы существовавших топологических ярусов, но не привели к появлению нового яруса, поскольку МЦК и БКЛ занимают взаимодополняющее, асимметричное положение относительно центра агломерации. При этом эксцентриситет циклического остова сохраняется.

- 5) Изменения геометрии сети привели к сокращению протяжённости около 23% кратчайших маршрутов, прежде всего в юго-западной части ядра агломерации, тогда как более половины маршрутов остались неизменными. В отдельных случаях (около 2%) протяжённость маршрутов увеличилась, что связано с изменением трассировки Солнцевской линии и перераспределением пересадок через узел Деловой центр.
- 6) Несмотря на развитие сети, её морфология по-прежнему характеризуется неправильной геометрией, что указывает на продолжающуюся фазу активного роста, подтверждаемую анонсами строительства новых линий. Расширение сети привело к росту центральности по близости прежде всего у станций, приблизившихся к циклическому острову, главным образом в южных и западных секторах. Существенных пространственных диспропорций при этом не возникло; напротив, ранее сложившиеся различия в центральности сократились.

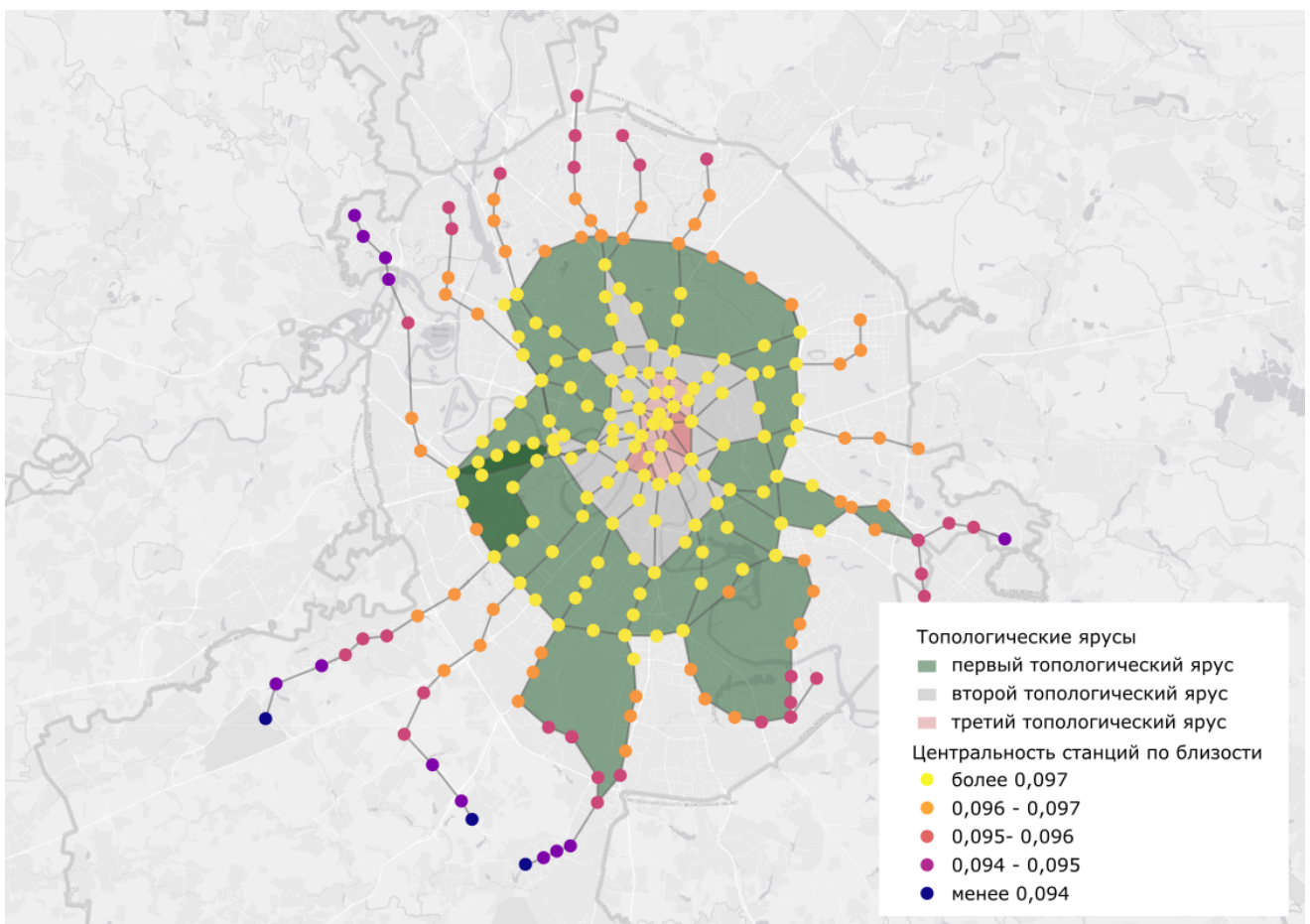


Рисунок 8. Топологическая структура системы Московского метрополитена по состоянию на 1 октября 2023 г.

Составлено автором.

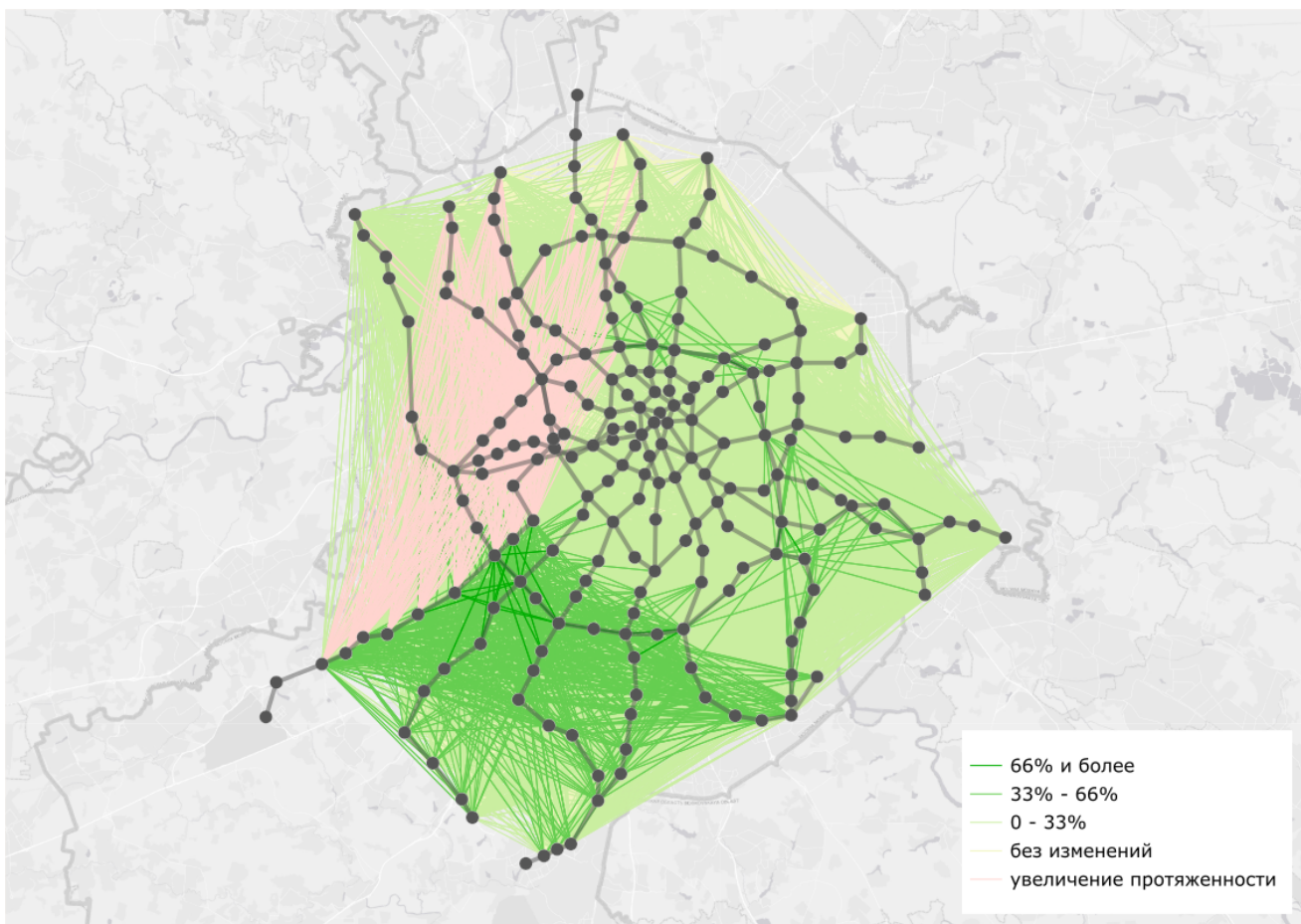


Рисунок 9. Сокращение протяженности кратчайших маршрутов между всеми парами станций (узлов) Московского метрополитена между состояниями на 2019 г. и 2023 г.

Составлено автором.

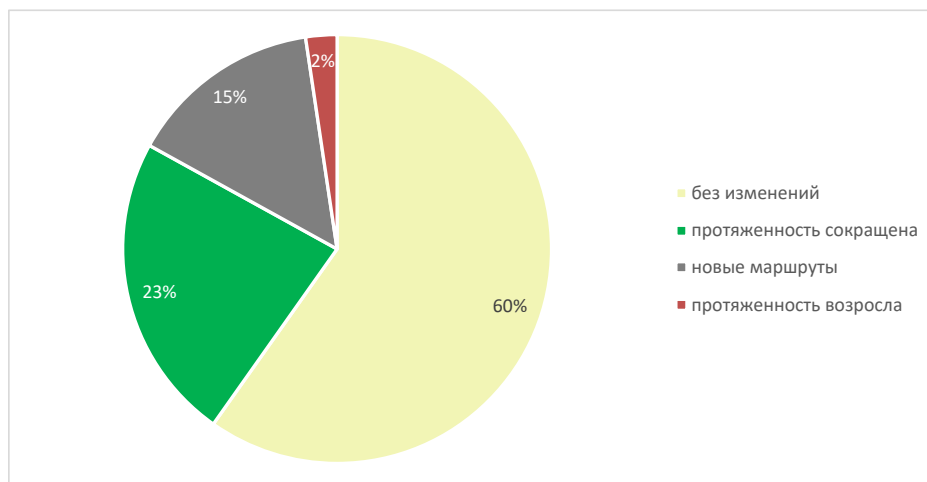


Рисунок 10. Структура изменения протяженности кратчайших маршрутов между всеми корреспонденциями Московского метрополитена между состояниями на 2019 г. и 2023 г.

Составлено автором.

Подведем промежуточные итоги. Первые десятилетия развития сети линий приходились на этап экстенсивного развития сети: расширялся территориальный охват, при этом связность и надежность сети долгое время оставались на достаточно низком уровне. Все изменилось с вводом Московского центрального кольца, когда в сети появился третий топологический ярус, что говорит о переходе на качественно новый этап развития сети, который мы можем назвать интенсивным. Именно на этот этап приходятся границы временного охвата исследования. Ряд признаков указывают на то, что этот этап на момент проведения исследования еще не окончен. Центростремительная пространственная структура сети активно перестраивается: благодаря строительству новых линий повышается связность сети и степень центральности по близости станций, находящихся в периферийной части сети. Поэтому, если ранее структура сети предполагала резкое преобладание центростремительных пассажирских потоков, то в настоящий момент характер развития сети говорит о том, что потоки могут начать перераспределяться. Также о возможном начале перераспределения пассажирских потоков говорит и характер трансформации городской среды в Москве, благодаря чему не только новые, но и давно эксплуатируемые участки сети, расположенные в зонах джентрификации, могут перетянуть на себя часть пассажиропотока. Мы полагаем, что временной интервал, выбранный для проведения исследования позволит зафиксировать описанный выше тренд. Хотя сразу оговоримся, что интервал не включает в себя ни начало, ни конец этого тренда. Более того, он может продолжаться десятки лет, как это было на этапе экстенсивного развития сети.

**Положение структурных элементов метрополитена в транспортной системе Московской агломерации.** Как было сказано выше, метрополитен – главный магистральный вид транспорта Москвы, практически равномерно покрывающий территорию ядра городской агломерации. Очевидно, что несмотря на эффективность этого вида транспорта, подтверждающуюся долей в модальной структуре поездок и значительным валовым количеством перевезенных пассажиров, его территориальная ниша имеет объективные ограничения. Так, например, метрополитен не эффективен в корреспонденциях районного значения и т.н. «последней мили» в следствие относительной удаленности его станций друг от друга в масштабе отдельного административного района. Поэтому эту нишу занимает наземный городской пассажирский транспорт (НГПТ). Также, ограничения возникают по экономическим причинам, например сообщение ядра агломерации с пригородными ареалами могло бы выполняться повсеместно, однако стоимость строительства системы метрополитена не соотносится с потенциальной эффективностью транспортной работы. Поэтому данная

территориальная ниша занята пригородным железнодорожным транспортом, а также автобусным сообщением. Кроме этого, на территории города размещены многочисленные узлы внешнего транспорта.

Таким образом, помимо непосредственного обеспечения связности территории города, метрополитен играет значительную роль в перераспределении пассажирских потоков между иными видами транспорта. Из этого следует неизбежное возникновение в городской транспортной системе хабов – интермодальных транспортных узлов. Рассматривая транспортную систему Москвы, сложно представить себе хабы, в состав которых не входили бы станции метро. В правовых актах региональной исполнительной власти для обозначения хабов используется термин «транспортно-пересадочный узел» (ТПУ). Исполнительными властями утвержден официальный перечень таких узлов<sup>12</sup>. Однако этот перечень включает в себя не только, собственно ТПУ, но и узлы, по факту не служащие хабами (например, ТПУ «Красные ворота», представляющий из себя станцию метрополитена, а также несколько павильонов остановочных пунктов, обслуживающий лишь два маршрута НГПТ). По этой причине автором создан собственный список транспортных хабов, включающих в свой состав станции метрополитена, на территории г. Москва на основании реально существующего транспортного сообщения. Размещение хабов в границах ядра Московской агломерации представлено на рис. 11.

---

<sup>12</sup>Правительство Москвы. Постановление от 6 сентября 2011 года N 413-ПП "О формировании транспортно-пересадочных узлов в городе Москве" (с изменениями на 29 июня 2021 года).

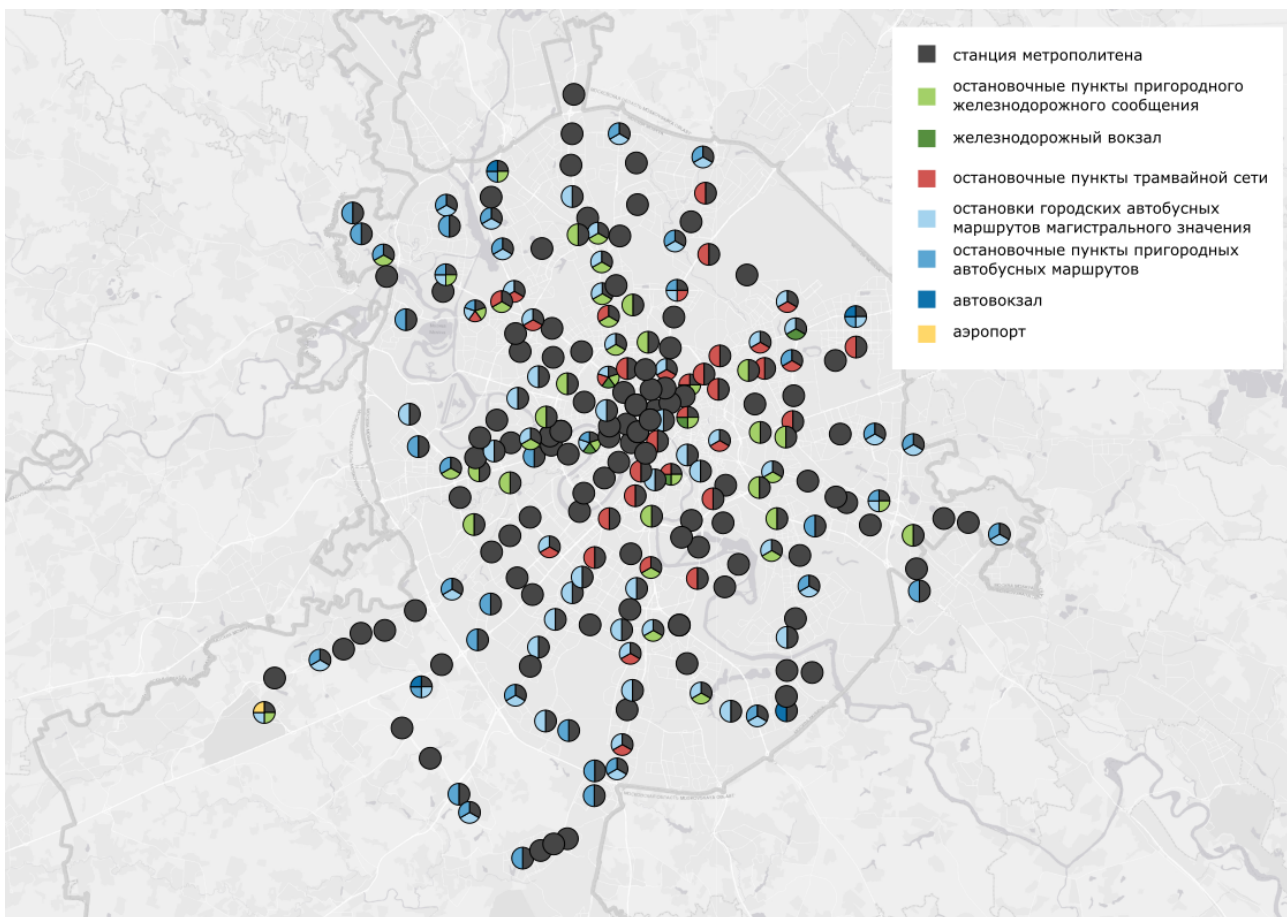


Рисунок 11. Станции метрополитена и транспортные хабы, имеющие в своем составе станцию метрополитена, на территории ядра Московской агломерации по состоянию на конец 2023 г.

Составлено автором.

Хаб выделен, если он удовлетворяет одному из следующих условий:

- имеется терминал приема подвижного состава НГПТ, оборудованный посадочными платформами для пассажиров;
- расположен конечный остановочный пункт магистральных маршрутов НГПТ (по классификации московского Департамента транспорта<sup>13</sup>;
- расположен остановочный пункт системы московского трамвая;
- расположен конечный остановочный пункт автобусов пригородного сообщения;

<sup>13</sup>Транспорт Москвы. В Москве запустили новые маршруты автобусов [Электронный ресурс]. URL: [https://t.mos.ru/mostrans/all\\_news/108187](https://t.mos.ru/mostrans/all_news/108187) (дата обращения: 10.10.2023).

- расположен остановочный пункт линий пригородной железной дороги (безотносительно принадлежности линии к системе МЦД);
- расположен железнодорожный вокзал;
- расположен автовокзал;
- расположен аэропорт.

Для удобства анализа все станции метрополитена, располагающиеся в точке пересечения двух и более линий, сгруппированы в узлы. Из 218 узлов станций метрополитена, 98 не входят в состав какого-либо хаба. Подавляющее большинство из этих узлов расположено в историческом центре города, в пределах Садового кольца. Хабы с терминалами НГПТ и конечными остановочными пунктами магистральных маршрутов НГПТ за исключением исторического центра города равномерно рассредоточены по всей его территории. Хабы с остановочными пунктами трамвая имеют территориальную концентрацию в восточной и северо-восточной части ядра агломерации, а также к юго-западу от центра, преимущественно вдоль Калужско-Рижской линии. Характерно, в южной части города, где имеется широкое присутствие трамвайной сети, хабы с пересадкой на трамвай встречаются единично. Обращает на себя расположение хабов с конечными пунктами пригородного автобусного сообщения: большая часть таких хабов тяготеет к окраинным частям ядра агломерации. Весьма вероятно, что входящий пассажиропоток станций метрополитена, расположенные в составе этих хабов наполняет во многом будет состоять из пассажиров пригородного автобусного сообщения. Хабы с остановочными пунктами пригородной железной дороги наблюдаются в широком секторе города от западного до юго-восточного сектора. Хабы, включающие в себя железнодорожные, автовокзалы, а также аэропорты, закономерным образом встречаются единично, в различных частях города.

Все отмеченные хабы можно классифицировать по числу видов транспорта, включенных в состав хаба.

1. Бимодальные хабы. Чаще всего встречаются в южной и юго-западной части города, где отмечена низкая плотность трамвайной и железнодорожной сети.
2. Тримодальные хабы. Подавляющее большинство таких хабов включает в себя узлы пригородного транспорта, как железнодорожного, так и автобусного (как правило представлен какой-либо один из них).
3. Мультимодальные хабы. Включают в себя четыре и более видов транспорта. Наибольшее число видов транспорта (пять) входит в состав хабов, куда входят

станции метрополитена Шукинская, Белорусская и Киевская. Четыре вида транспорта входит в состав хабов, куда включены станции Тушинская, Ховрино, ВДНХ, Щелковская, Выхино, Комсомольская, Павелецкая, Курская (+ Чкаловская). Ожидается, что станции метрополитена, входящие в состав таких хабов, обладают наибольшим объемом входящего пассажиропотока.

Простого критерия наличия того или иного вида транспорта в составе хаба недостаточно для корректного измерения их влияния на параметры пассажиропотока. Поэтому предлагается определить иерархию станций метрополитена по степени интеграции в городскую систему на основании весов тех видов транспорта, которые входят в состав хаба. Веса определены на основании среднего объема входящего пассажиропотока транспортных узлов по каждому виду транспорта в отдельности. Станции метрополитена классифицируются по балльной системе в соответствии с суммой весовых коэффициентов.

Изначально все хабы имеют вес равный единице (поскольку все исследуемые хабы имеют в своем составе станцию метрополитена), далее в зависимости от представленности тех или иных видов транспорта суммируется соответствующий коэффициент.

Таблица 2. Весовые коэффициенты, использованные для расчета иерархических уровней транспортных хабов на территории Москвы.

Составлено автором.

Тип транспортного узла	Средний ежесуточный объем входящего пассажиропотока	Весовой коэффициент
Станция метрополитена	32 тыс.	1
ОП городских автобусных маршрутов магистрального значения	14 тыс.	0,44
ОП пригородных автобусных маршрутов	15 тыс.	0,47
ОП трамвайной сети	9 тыс.	0,28
ОП пригородного железнодорожного сообщения	12 тыс.	0,38
Железнодорожный вокзал	71 тыс.	2,2
Автовокзал	23 тыс.	0,71
Аэропорт	39 тыс.	1,2

Важно отметить, что получившаяся оценка не дает нам объективных данных об общем объеме пассажиропотока, проходящего через хаб. Мы не ставим перед собой такой задачи. В рамках исследования было первично определить относительную значимость одного хаба перед другим для дальнейшего определения влияния альтернативных видов транспорта на параметры пассажиропотока.

Ряд станций метрополитена вошли в состав хабов уже во время периода исследования. Полагаем, это повлияет на параметры пассажиропотока этих станций в начале и конца исследуемого периода. Среди таких хабов отметим: Славянский бульвар, Волоколамская, Щукинская, Стрешнево, Марьино, Новохоловская, Печатники, Ховрино, Авиамоторная, Минская, Москва-Сити (бывш. Деловой центр/Международная). Речь идет прежде всего о строительстве станций системы МЦД рядом с существующими станциями метрополитена.

Таким образом, сеть метрополитена плотно интегрирована в общую систему Московской агломерации. Более 50% станций метро входят в состав транспортных хабов различного масштаба. Это свидетельствует о высокой роли альтернативных видов транспорта в формировании общего объема пассажиропотока системы метрополитена, а также характера перемещения пассажиропотока по сети ММ.

**Положение структурных элементов метрополитена в пространственно-функциональной структуре Московской агломерации.** Выше было описано положение станций метрополитена относительно узлов иных видов транспорта Московской городской агломерации. Очевидно, что транспортные хабы сами по себе являются лишь промежуточным звеном в структуре транспортных корреспонденций пассажиров. Чаще всего поездки с использованием транспортных хабов совершаются комьютерами либо людьми, совершающими поездки за пределы Московской агломерации. Причем это относится только в большей степени к тем хабам, которые включают в себя узлы пригородного или междугородного транспорта. В то время как повседневные поездки жителей ядра агломерации включают в себя поездки между функциональными зонами города. Поэтому в рамках исследования важно установить ключевые потенциальные точки притяжения пассажиропотока.

Обратимся к существующему опыту анализа пространственной структуры Московской агломерации. А.Г. Махрова, Т.Г. Нефедова, А.И. Трейвиш отмечают увеличение размеров как ядра агломерации, так и пригородной зоны [Махрова, Нефедова, Трейвиш, 2012]. Наиболее заметно при этом расширяется именно функциональная периферия: спальные районы в пределах и за пределами МКАД.

Э.В. Сомов [Сомов, 2015] проанализировал транспортную доступность территорий Москвы с помощью ряда различных методик. Была составлена серия карт с результатами расчетов транспортной доступности по различным территориальным ячейкам. Уровень транспортной доступности территорий во многом определяется близостью к центру и системе метрополитена. Таким образом, доступность имеет четкий градиент «центр-периферия» с относительно высокими значениями вдоль радиальных линий метрополитена. Также были изучены актуальные на тот момент направления развития системы метрополитена. Автор пришел к выводу, что не всегда строящиеся линии действительно актуально отвечают транспортным потребностям населения.

П.П. Эм [Эм, 2017] на примере Москвы представил городскую агломерацию как самостоятельную систему центральных мест. В отличие от более ранних теорий центральных

мест – классической [Christaller, 1933] и релятивистской [Шупер, 2010] – Эм рассчитывает величину центральных функций мест не с помощью людности, а с помощью ряда социально-экономических показателей. В результате было выведено 4 иерархических уровня центральных мест, имеющих четкую радиально-кольцевую структуру. При этом центральные места более высоких уровней имели протуберанцы вдоль ключевых городских магистралей.

О.И. Вендина, А.Н. Панин, В.С. Тикунов [Вендина, Панин, Тикунов, 2019] изучали социальную пространственную структуру ядра Московской агломерации. Проведено несколько типологий районов по значениям интегрального индекса развития городской среды, индексу недовольства, индексу социальных позиций. Авторами выявлена асимметричность значений индексов в пространстве: наивысшие значения закономерно получили районы, находящиеся в Центральном административном округе, более низкие значения – районы периферии центра (Пресненский, Басманный), а также ряд районов на юго-западе города (пояс от Раменок до Беляево). Средние значения наблюдаются у районов срединной зоны на юге, северо-западе и северо-востоке города. На востоке и юго-востоке города наиболее часто наблюдаются наиболее низкие значения индексов.

Наиболее актуальной экономико-географической работой по этой теме можно считать труд Н.К. Куричева, Е.К. Куричевой [Куричев, Куричева, 2020]. На основе различных функциональных и экономических классов недвижимости, построенных в 2010-х годах, авторы выделили основные зоны агломерации: центрально-деловой район в пределах Садового кольца, селитебно-деловой пояс преимущественно в пределах Третьего Транспортного кольца, а также жилой пояс на территории между Третьим Транспортным кольцом и Московской Кольцевой автодорогой. Был выделен еще ряд функциональных зон, расположенных за пределами административных границ т.н. «Старой Москвы» (см. выше разъяснение этого термина). Кроме градиента «центр-периферия», авторами выделены секторальные (радиальные) различия в развитии Московской агломерации. В частности, наибольшие объемы жилищного строительства сосредоточены в северо-западном, южном, юго-западном и восточном секторах агломерации.

Также рассмотрено влияние расширения системы Московского метрополитена на улучшение транспортной доступности объектов недвижимости, введенных в эксплуатацию в исследуемый период. Отмечено, что в селитебно-деловом поясе доступность до станций метрополитена примерно одинакова во всех секторах, а в жилом поясе наилучшую доступность имеют объекты, расположенные в юго-западных и западных секторах. Этот вывод

крайне ценен для настоящей работы, в частности для уточнения гипотезы о пространственном распределении входящего объема пассажиропотока по станциям.

Другой подход к выявлению пространственной структуры города был использован автором настоящего исследования в одной из более ранних работ. Для этого использовались несколько оснований, из которых наиболее важное – суточный режим загрузки станций метрополитена [Киселев, 2021]. Параметры станций метрополитена выступали в качестве маркеров свойств городской среды. Ключевые выводы по анализу суточных режимов работы станций метрополитена раскрыты ниже в разделе 2.2. Было выделено четыре основных функциональных зоны: полифункциональный центр, монофункциональный центр, срединная зона и периферия. А также две переходные зоны между срединной зоной и периферия с доминированием признаком той или иной зоны. Во многом пространственное положение выделенных зон совпадает с типологией районов Москвы по Вендиной и др.

Нельзя не обратить внимание на процесс непрерывной трансформации функциональных зон (джентрификации) Московской агломерации, в том числе и в самом ядре. Он непрерывно изучается еще с середины 2000-х годов [Махрова, Татаринцева, 2006]. Отмечаются такие наиболее частые формы джентрификации как реконструкция пятиэтажного жилого фонда, вывод промышленных предприятий за границы города и строительство нового жилья. В качестве примера зоны джентрификации приводится т.н. «Золотая миля» [Махрова, Голубчиков, 2012]. Наиболее актуальный обзор проблемы джентрификации проведен Н.Д. Вавилиной, Ю.М. Шпигуновой [Вавилина, Шпигунова, 2024]. Авторы выделяют такие ключевые зоны джентрификации как территория промзон ЗиЛ и «Красный октябрь». На месте последнего возник т.н. «креативный кластер» (под ним понимается пространственная зона размещения т.н. творческих индустрий, включающих в себя искусство, культуру, дизайн, медиа и информационные технологии), о чем также упоминает Н.А. Каверина и др. [Каверина, Гретченко, Гретченко, 2019]. В своей работе авторы приводят примеры новых креативных кластеров на территории Москвы: дизайн-завод «Флакон» около станции метро Дмитровская, «Фабрика» около ст. м. Бауманская, ARTPLAY около ст. м. Курская и другие. Масштабная жилая застройка развернулась на территории некогда крупнейших промышленных зон Москвы. Это явление происходит буквально на наших глазах и еще не нашло отражения в научных работах ученых в области геоурбанистики. Однако уже сейчас в массовых медиа есть

подробное упоминание об этом процессе<sup>14</sup>. В качестве примеров таких зон выделяются жилой комплекс (ЖК) «Символ» на месте завода Серп и Молот (ближайшие станции метро – Авиамоторная, Площадь Ильича) ЖК «Зиларт» на месте ЗиЛ (ст. МЦК ЗиЛ), ЖК «Ривер Парк» на месте промзоны Нагатинского затона (ст. м. Нагатинский затон), ЖК «Мещерский лес» на месте промзоны «Востряково» (ст. м. Говорово).

Таким образом, сеть Московского метрополитена проходит через все функциональные зоны ядра Московской агломерации. По состоянию на 2023 г. сеть уже имеет несколько выходов за пределы ядра, например Люблинско-Дмитровская линия на участке до станции Физтех, а также Солнцевская линия на участке Рассказовка – Аэропорт Внуково. Ранее в пригородную зону агломерации была продлена Сокольническая линия. Функциональное зонирование ядра агломерации сложилось таким образом, что некоторые линии частично совпали с границами зон. Например, Кольцевая линия метро обозначает границы полифункционального центра, Московское Центральное кольцо обозначает на различных участках границы срединной зоны и периферии либо срединной зоны и монофункционального центра. Кроме этого, ряд станций метрополитена расположены вблизи зон ревитализации городских промышленных предприятий, на месте которых создаются новые точки притяжения. Как следствие, на таких станциях ожидается увидеть изменения параметров пассажиропотока, поскольку в вышеприведенном исследовании [Киселев, 2021] установлено, что положение станции в той или иной функциональной зоне влияет на параметры пассажиропотока.

**Время как фактор перераспределения пассажиропотока в Московском метрополитене.** Среди параметров пассажиропотока второго порядка в главе 1 была обозначена динамика. Утверждается, что параметры пассажиропотока первого порядка (объем, интенсивность, мощность и др.) не постоянны во времени. Ранее в других разделах главы 2 нами рассматривались эволюционные факторы пространственного распределения пассажиропотока такие как расширение и усложнение сети Московского метрополитена и изменение функциональной структуры города. Эти факторы тоже, в определенной мере, частью сложного временного аргумента функций параметров пассажиропотока, однако все они – цепь многочисленных, но отдельных феноменов, которые плохо поддаются прогнозу на перспективу более пяти лет. Каждое изменение этих факторов приводило к территориальным

---

<sup>14</sup>Домклик. ЖК на месте промзон: как в Москве развивают территории бывших заводов? [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.domclick.ru/nedvizhimost/post/zhk-na-meste-promzon-kak-v-moskve-razvivayut-territorii-byvshih-zavodov> (дата обращения: 01.06.2024)

сдвигам параметров пассажиропотока в виде их перехода в качественно иные значения, иными словами, служили точками невозврата в состоянии системы. Однако кроме единичных, феноменальных изменений системы во времени, Московский метрополитен, как и любая транспортная система, претерпевает циклические изменения, то есть изменения, повторяющиеся из раза в раз в одинаковые промежутки времени. Для того, чтобы в этом убедиться, обратим внимание на рис. 12.

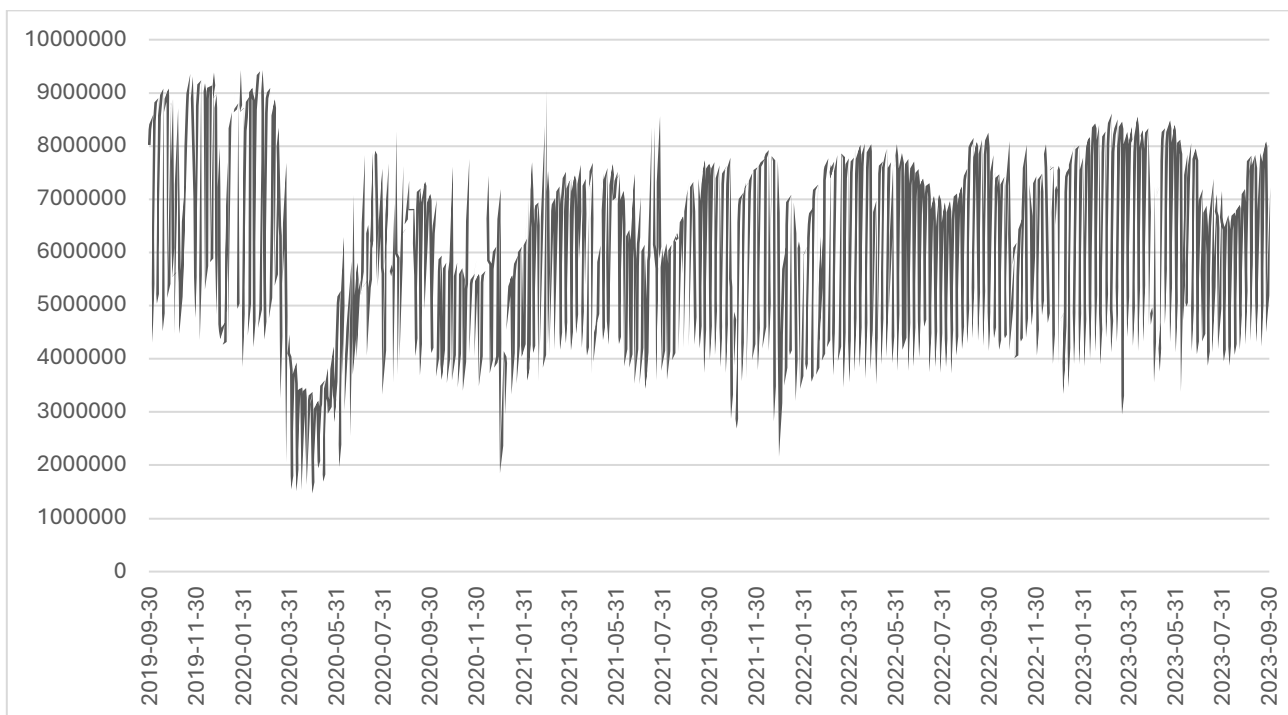


Рисунок 12. Общий ежедневный объем пассажиропотока Московского метрополитена за исследуемый период (с 1 октября 2019 г. по 1 октября 2023 г.).

Составлено автором.

На нем можно увидеть несколько разных по продолжительности циклов. Остановимся подробнее на каждом из них:

1. Цикл «будни-выходные». Возникает у большей части пассажиров в связи с отсутствием необходимости в выходные дни совершать регулярные трудовые поездки. Наиболее ярко выраженный цикл, повторяющийся на всем протяжении исследуемого периода. В выходные дни общий объем пассажиропотока может отличаться от объема в соседние будние дни на 40% и более. Принципиально важный цикл для географического не только и столько с точки зрения повторяемости, сколько из-за смены транспортного поведения. По сравнению с будними днями в выходные часть пассажиров продолжает совершать

трудовые поездки, часть – перемещения, не связанные с трудовыми (к местам рекреации, проведения культурно-массовых мероприятий и иного досуга), и еще одна часть в принципе не совершает поездки. Мы не ставим перед собой задачу изучить структуру поездок по целям их совершения и установить точные пропорции. Однако, сдвиги в структуре поездок непременно будут рождать и территориальные сдвиги. Соответственно, в выходные дни ожидается увидеть снижение количества поездок к станциям, вблизи которых сконцентрировано большое количество мест приложения труда. Прежде всего, это касается станций вблизи деловой зоны Москва-Сити [Киселев, 2021]. При этом станции, находящиеся в историческом центре города, вероятно, не будут претерпевать значительное снижение объема входящего пассажиропотока, поскольку помимо многочисленных офисных помещений, в этой части города располагается большое количество досуговых учреждений (общепит, тематические пространства и т.д.). Вероятен рост входящего объема на станциях, расположенных вблизи крупных рекреационных пространств (например, Октябрьская около ЦПКиО им. Горького, Коломенская вблизи одноименного музея-заповедника, ВДНХ вблизи одноименного парка и т.д.). Этот исследовательский сюжет подробно рассмотрен в главе 3.

2. Праздничные дни. На графике хорошо прослеживаются падения общего объема пассажиропотока в новогодние, майские праздники. При подробном изучении графика заметны падения и в выходные дни иных государственных праздников. Снижение пассажиропотока в праздничные дни по сравнению с рабочими днями составляет от 10% в дополнительные праздничные выходные дни до 60% 1 января. Все праздничные дни, попадающие в период исследования будем считать частным случаем выходных дней и производить все необходимые расчеты с учетом этого факта.
3. Сезонный цикл. На участках графика в период летнего сезона 2021 г., 2022 г. и 2023 г. заметен спад средних значений. В зависимости от года разница между средними значениями за летние и последующие осенние месяцы составляет от 10 до 15%. Такие изменения значений могут быть связаны с традиционным наступлением сезона отпусков, когда некоторые пассажиры, регулярно совершающие трудовые поездки, кратковременно перестают это делать. Кроме этого, в летний сезон спрос жителей города на поездки к зонам массовой рекреации может быть выше, чем в остальное время года.

4. Суточные флуктуации. Не наблюдаются на рис. 12, однако также имеют место быть, если произвести агрегирование данных ежечасно. Непосредственно связаны с совершением трудовых поездок и влияют на пространственное распределение такого показателя как пассажирообмен. Как уже отмечено выше, пространственная дифференциация суточных режимов загрузки станции ранее изучалась автором [Киселев, 2021]. Однако, ниже вернемся к этой теме еще раз в контексте проверки гипотезы о наличии территориальных сдвигов вследствие влияние рассмотренных выше факторов перераспределения пассажиропотока в системе Московского метрополитена в ходе исследовательского периода. Пример суточных флуктуаций входящего объема пассажиропотока представлен на рис. 13.

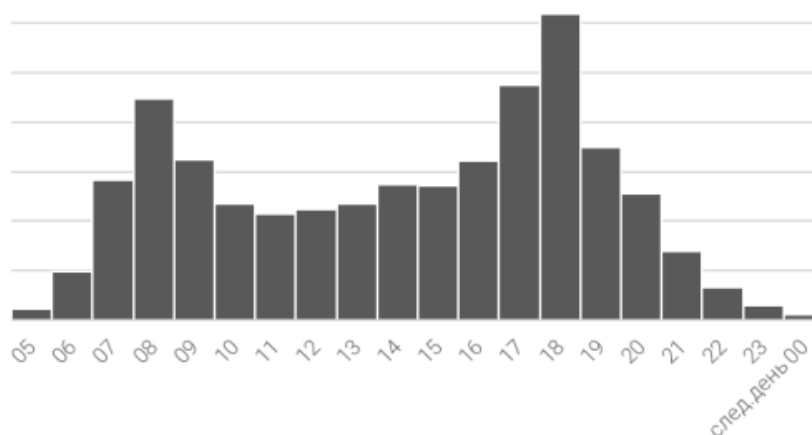


Рисунок 13. Суточные колебания входящего пассажиропотока станции метро Профсоюзная.

Составлено автором.

Помимо регулярно повторяющихся отклонений, на примере Московского метрополитена можно говорить и о случайных факторах, провоцирующих изменение общего объема пассажиропотока системы. Прежде всего, речь идет о пандемии COVID-19, которая привела к ограничению свободного передвижения граждан на территории г. Москвы в течение двух месяцев 2020-го г<sup>15</sup>. Это привело к колоссальному падению общего объема пассажиропотока во всей системе. Характерно, что даже в период пандемии сохранились недельные колебания, при этом в выходные дни наблюдались экстремально низкие значения общего объема пассажиропотока. С момента окончания ограничения свободного

<sup>15</sup> Москва. Указ Мэра Москвы от 10 апреля 2020 г. № 42-УМ О внесении изменений в указ Мэра Москвы от 5 марта 2020 г. № 12-УМ. — Москва, 2020.

передвижения граждан до полного восстановления устойчивого уровня общего объема пассажиропотока прошло около девяти месяцев. За это время показатель успел кратковременно достигнуть среднего уровня за период исследования (7-8 млн пассажиров в будни и 4-5 млн пассажиров в выходные дни), однако т.н. «вторая волна» пандемии снова привела к заметному снижению общего объема. Пандемия повлияла и на традиционные сезонные флуктуации в 2020 и 2021 гг., сделав сезонное снижение общего объема пассажиропотока не столь выраженным на фоне осенне-зимнего сезона.

Наконец, на лицо многолетняя динамика пассажиропотока. Иными словами, колебания среднесуточных значений год от года. В рамках исследования мы не изучаем пассажиропоток на многолетнем срезе, однако нельзя не сказать о тренде, который сложился в течение изучаемого периода. Прежде всего, обращает на себя внимание снижение общего объема пассажиропотока по сравнению с допандемийным периодом. Наиболее вероятно, это свидетельствует о перестройке структуры занятости в пользу увеличения доли сотрудников, работающих удаленно, и переставших совершать ежедневные трудовые поездки. В пользу этой версии говорят многочисленные исследования российского рынка труда [Костина и др., 2020], [Васильева, 2021]. При этом за три последующих года наблюдается медленное восстановление общего объема пассажиропотока. Так, если в 2021 г. среднесуточное значение в будние дни составило 7,3 млн пассажиров, то в 2023 г. этот показатель поднялся до 8,1 млн. Однако, по-прежнему эти значения так и не достигли допандемийных (8,9 млн за IV квартал 2019 г.). Сам по себе многолетний тренд не имеет регулярно детерминирующих его факторов. Постепенное увеличение за 3,5 года общего объема пассажиропотока может говорить о таких явлениях, как постепенный возврат удаленно работающих сотрудников на очный режим труда, так и увеличение людности Московской агломерации. В настоящем исследовании не ставится цель подробно изучить роль каждого из этих факторов. Однако, высоко вероятно, что этот тренд отнюдь не одинаков для каждого структурного элементов московского метрополитена в отдельности.

## 1.4 Исходные данные и методика изучения пространственно-временных закономерностей Московского метрополитена

**Исходные данные исследования.** Для достижения цели и решения задач настоящей работы используются данные транзакций, совершенных пассажирами с помощью транспортных смарт-карт. После совершения каждой транзакции в базу данных записываются:

- уникальный номер валидации;
- номер считывающего устройства;
- номер транспортной смарт-карты;
- дата и время совершения транзакции;
- код вестибюля станции;
- код типа проездного документа.

Каждый исходный набор данных ограничен транспортными сутками (примерно совпадает с режимом работы станций Московского метрополитена на вход: с 5:30 до 1:00). Все данные о транзакциях обезличены.

Для нас представляют интерес данные о номере транспортной смарт-карты, дате и времени совершения транзакции, а также коде вестибюля станции. Код вестибюля станции дешифрируется с помощью справочных таблиц, также содержащихся в базе данных.

Ключевым недостатком сведений о транзакциях, совершенных с помощью транспортных смарт-карт, как главного источника данных для исследования является отсутствие автоматизированного учёта факта выхода пассажиров из системы метро. Таким образом, в качестве исходных данных мы оперируем только данными о фактах входа пассажиров в систему метро (со всеми указанными выше атрибутами). Это не позволяет нам с точностью определить корреспонденции пассажиров. Тем не менее благодаря тому, что нам известен уникальный идентификационный номер, вносимый в базу при каждой транзакции, можно проследить путь пассажира, если он совершил более одной поездки. Отслеживание пути пассажира необходимо для составления матриц корреспонденции, с помощью которых в следующих исследованиях нами будут исследованы ключевые пространственные закономерности распределения пассажиропотока на Московском метрополитене.

**Расчет матриц корреспонденций.** Структура данных дает нам возможность воспользоваться методом анализа траектории, предложенным в работе Х. Чжао и др. [Zhao, 2017], названный авторами «метод цепей поездок». Благодаря тому, что для каждой транзакции фиксируется уникальный идентификационный номер транспортной смарт-карты,

с помощью которой она была совершена, можно отследить путь каждого конкретного пассажира внутри системы метро даже в условиях отсутствия данных о валидациях на выход. При этом, мы исходим из допущения, что каждому уникальному номеру смарт-карты соответствует единственный пассажир (то есть соответствие «один к одному»).

*Этап 1 построения матриц корреспонденций: агрегирование по уникальному номеру карты.* Исходный набор данных (набор из нескольких миллионов (в зависимости от дня измерений) строк записей о транзакциях) агрегируется по уникальным номерам карт. Новый набор данных показывает нам, сколько поездок за сутки совершил каждый уникальный пассажир (при соблюдении вышеприведённого допущения).

*Этап 2 построения матриц корреспонденций: фильтрация записей.* Из массива данных исключаются записи о картах, по которым была произведена лишь одна транзакция за транспортные сутки, поскольку отсутствие записи о каких-либо следующих транзакциях не позволяет нам установить, куда именно была совершена поездка. Тем не менее, потеря этих не столь существенна, в чём можно убедиться на примере массива данных за 7 октября 2019 г. В этот день было осуществлено 8,8 млн поездок, совершённых с помощью 4,6 млн транспортных смарт-карт. Разовые поездки были совершены по 1,4 млн транспортных смарт-карт, что составляет 30,4%. Как можно убедиться из рисунка 14, помимо группы смарт-карт, по которым в день совершается одна поездка, по одной смарт-карте производится главным образом две, три или четыре поездки (в сумме дают 67,4% всех поездок). Карты, по которым было совершено 5 и более поездок также исключаются из анализа, поскольку в противном случае могло бы возникнуть существенное замедление обработки данных, при том, что удельный вес карт с таким количеством поездок ничтожно мал.

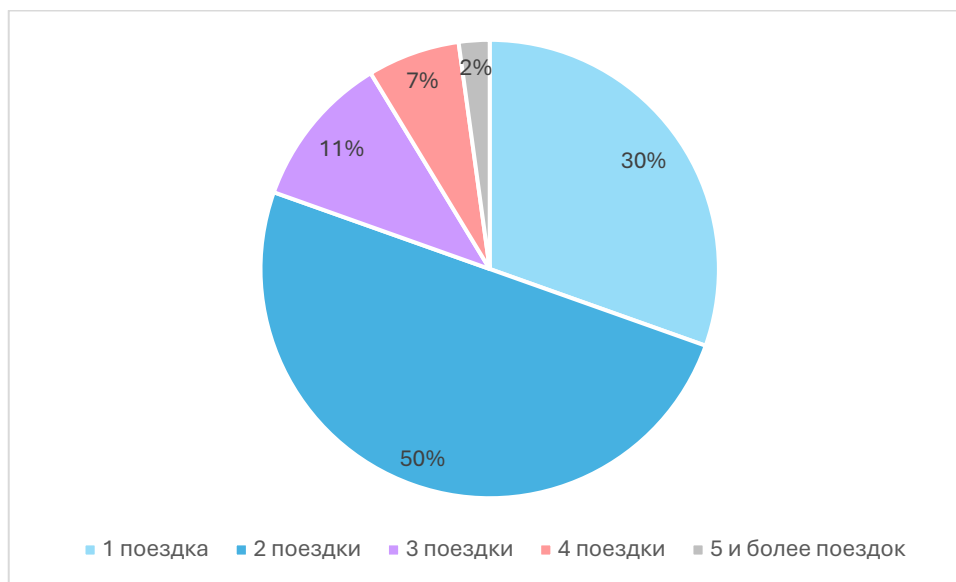


Рисунок 14. Соотношение количества поездок, совершаемых по уникальным транспортным смарт-картам.

Составлено автором.

*Этап 3 построения матриц корреспонденций: вычисление пунктов отправления и назначения.* После фильтрации исходных данных по каждому уникальному номеру карты данные сортируются в хронологическом порядке. Здесь мы вынуждены прибегнуть к ещё двум допущениям:

1. Пункт отправления каждой следующей поездки по одной и той же смарт-карте совпадает с пунктом назначения предыдущей поездки.
2. Если по одной и той же карте было совершено три или четыре поездки, то в последней поездке пассажир возвращается в исходный пункт отправления (то есть в пункт, из которого была совершена первая поездка). Возьмём реальный пример перемещений пассажира: в течение суток транзакции были осуществлены на станциях метро «Измайловская», «Бауманская», «Тимирязевская», «Семеновская» (в хронологическом порядке). Согласно применяемой нами методики пассажир осуществил следующий путь: Измайловская — Бауманская — Тимирязевская — Семеновская — Измайловская.

Мы не можем утверждать с полной уверенностью, что пассажир осуществил свою последнюю поездку именно до станции «Измайловская»; эти поездки моделируются нами самостоятельно. Таким образом, в нашу выборку попадает дополнительно 0,7 млн записей (почти 9% всех возможных записей о поездках, то есть в том числе о поездках с неустановленным пунктом назначения).

В силу специфики контроля оплаты проезда пересадка со станций системы метро на станции системы МЦК и наоборот требует повторной валидации. Пассажир, осуществляющий классический комьютинг из пункта А в пункт Б и обратно, вынужден производить четыре валидации на своём пути. Первая: на входе на станцию метро; вторая: на входе на станцию МЦК с достижением конечного пункта поездки; третья: с той же станции МЦК до станции метро, на которой ему пришлось выйти для пересадки на МЦК ранее; четвертая: на только что упомянутой станции метро. Станции метрополитена и станции МЦК в данном случае могут поменяться местами, но суть остается прежней. Автором был проведен замер времени между двумя валидациями (первая – на вход в систему метрополитена, вторая – на вход в МЦК) для всех конечных станций линий, а также некоторых иных станций. В более, чем 95% случаев

время составляло менее 40 минут. Таким образом, все валидации, совершенные конкретным пассажиром в течение 40 минут нами считаются как одна поездка.

*Этап 4 построения матриц корреспонденций: агрегирование рассчитанных поездок по направлениям.* После вычисления пунктов отправления и назначения формируется итоговый список всех поездок. Под поездкой подразумевается путь, осуществленный пассажиром в одном направлении (из пункта А в пункт Б). То есть, количество поездок, осуществленных одним пассажиром, эквивалентно количеству валидаций, осуществленных одной и той же картой. После получения итогового списка поездка происходит их агрегирование по каждому из направлений, которых в общей сложности насчитывается 72,9 тыс.

*Этап 5 построения матриц корреспонденций: ввод поправочных коэффициентов.* После агрегирования мы получаем предварительную версию матрицы корреспонденций. Однако, после фильтрации записей на Этапе 2, сумма всех поездок, совершенных от станции  $i$  до всех остальных станций не равна ранее рассчитанному входящему объему пассажиропотока станции  $i$ . По этой причине вводится поправочный коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$k = \frac{\sum_1^{n-1} I_{ij}}{V_i}$$

где  $i$  – станция метрополитена,  $I_{ij}$  – интенсивность пассажиропотока между станциями  $i$  и  $j$ ,  $V_i$  – входящий общий пассажиропотока на станции  $i$ . Все значения параметров используются за одни транспортные сутки.

Далее итоговое значение интенсивности пассажиропотока  $I_{ij}^*$  рассчитывается по формуле:

$$I_{ij}^* = I_{ij} * k$$

Таким образом, было получено число поездок между всеми парами станций метрополитена. По состоянию на IV квартал 2019 г. в системе Московского метрополитена насчитывается 199 станций и узлов, между которыми проложено более 39 тыс. маршрутов. По состоянию на IV квартал 2023 г. – 217 станций и узлов, проложено более 47 тыс. маршрутов.

Для каждого направления (как от станции  $i$  до станции  $j$ , так и от станции  $j$  до станции  $i$ ) рассчитана интенсивность пассажиропотока (количество пассажиров, совершивших перемещение по тому или иному направлению), так и пассажиронапряженность (отношение интенсивности пассажиропотока к протяженности маршрута) – показатель фактической востребованности маршрута.

**Расчет маршрутов корреспонденций и направлений.** На сегодняшний день известно множество алгоритмов расчета распределения пассажиропотока по ребрам графа транспортной сети. Однако, мы не ставим перед собой задачу проанализировать эффективность различных алгоритмов расчета, с этим могут справиться гораздо успешнее транспортные инженеры и специалисты по вычислительной математике. Для развития географии гораздо интереснее пространственная интерпретация получившихся результатов расчета, о чем неоднократно говорилось выше. Ранее нами изучено исследование В.С. Авдеева [Авдеев, 2020], в котором были рассмотрены алгоритмы расчета распределения пассажиропотока по транспортной сети. Важно, что объектом исследования была сеть Московского метрополитена. Следовательно, нет оснований не доверять полученным выводам об эффективности использованных методов расчета. Для целей своей работы автором был отобран так называемый алгоритм A-Star (A\*) согласно его свойствам:

- Оптимальность: алгоритм гарантированно найдет наилучшее из возможных решений;
- Полнота: если решение существует, то алгоритм гарантированно его найдет.

Этот алгоритм рассчитывает маршрут между двумя заданными точками, обладающий наименьшей стоимостью. Под стоимостью понимается параметр, обозначающий степень сложности прохождения пути. Наиболее часто встречающаяся в работах географов параметр стоимости пути – расстояние (кроме этого, встречается время, цена, пропускная способность и иные параметры). Подробно вопрос стоимости (затрат на преодоление) пути был рассмотрен В. Бунге в своем фундаментальном труде [Бунге, 1967], а в отечественной географии – в работах В.Н. Бугроменко при разработке методики интегральной оценки транспортной доступности территорий [Бугроменко, 1987]. Поэтому подробно на теоретических вопросах понятия «стоимость пути» останавливаться не будем. Модель не перераспределяет поездки по неоптимальным с точки зрения стоимости маршрутам, хотя в реальности поездки по таким маршрутам могут иметь место (при условии, что пассажир не покидал систему метрополитена, в противном случае согласно алгоритму расчета матрицы корреспонденций отсчитывается новая поездка, начинающаяся из промежуточного пункта).

На основе повседневных наблюдений за пассажиропотоком в модель закладывается еще один параметр – минимизация количества пересадок. Поэтому в случае, если кратчайший по расстоянию маршрут возможен с совершением двух пересадок, то в таком случае выбирается минимально возможный по протяженности маршрут, включающий в себя не более одной пересадки. Однако перепробег должен осуществляться в рамках разумного, поэтому было введено ограничение о допуске перепробега не более, чем на 25% от протяженности

кратчайшего маршрута с двумя пересадками. Также из-за особенностей топологической структуры, в сети Московского метрополитена есть такие корреспонденции, сообщение по которым в целом возможно только при совершении двух пересадок, например Раменки – Зорге.

**Методика изучения базовых параметров пассажиропотока.** В разделе 1.3 нами были установлены ключевые факторы, влияющие на пространственное распределение пассажиропотока: транспортно-географический и функциональный. Для выполнения цели и задач исследования необходимо понять специфику каждого из этих двух факторов в рамках Московской агломерации. Для более осмысленного понимания текущего контекста, а также наиболее вероятных будущих тенденций развития будет отслежена эволюционная динамика элементов транспортной и функционально-планировочной структуры Московской агломерации.

Кроме этого, определены параметры пассажиропотока, представляющие собой наибольший интерес в рамках географического подхода к изучению пассажиропотока в системе метрополитена, состоящей из структурных элементов – станций (узлов) и перегонов (ребер).

К узловым структурным элементам относится единственный базовый параметр:

- входящий объем пассажиропотока

Параметры, относящиеся к линейным структурным элементам системы:

- интенсивность пассажиропотока
- пассажиронапряженность
- мощность пассажиропотока

В исследовании будет определена взаимосвязь между значением каждого параметра и транспортно-географическим положением структурного элемента, а также положением в рамках функционально-планировочной структуры города. Совокупное изучение базовых параметров позволит определить общий характер распределения пассажиропотока внутри системы метрополитена, необходимый для понимания ключевых пространственно-временных закономерностей распределения пассажиропотока.

Для изучения вышеприведенных параметров произведена выборка суточных значений за IV квартал 2019 г. и IV квартал 2023 г. Эти периоды исключают влияние сезонного фактора изменения общего объема пассажиропотока, отмечающегося в весенне-летний период, а также в период январских праздников. Кроме того, такой объем данных позволяет минимизировать отклонения рассматриваемых показателей путем расчета среднего значения входящего объема

пассажиропотока. Временной интервал продолжительностью четыре года между сравниваемыми периодами включает в себя активную интенсификацию развития сети, о чем мы подробно говорили в разделе 1.3, поэтому такой временной охват позволит увидеть изменения значений у большинства станций. Будет найден ответ на вопрос: как и в какой мере изменение факторов распределения пассажиропотока в динамике предопределило его пространственное перераспределение.

Далее будет проведено сравнение пространственных конфигураций параметров пассажиропотока в ключевых временных циклах, выявленных выше: 1) «будни-выходные», 2) «лето-зима». Для цикла «будни-выходные» будет проведен анализ на начало и конец периода исследования в отдельности, а также анализ изменений, произошедших с 2019 по 2023 гг. Сезонный цикл, как было установлено ранее, в значительной мере был размыт в результате пандемии COVID-19 в 2020 и 2021 гг., поэтому вполне уместно сравнивать данные за летний и осенне-зимний сезоны за 2023 г., когда пандемия перестала быть значимым фактором, влияющим на пассажиропоток.

**Методика изучения структурных параметров пассажиропотока.** Допускаем, что анализ базовых параметров пассажиропотока может дать ряд гипотез, связанных со значениями *структурных параметров* пассажиропотока, а также пространственным распределением этих параметров в системе метрополитена и их устойчивости на уже установленных временных циклах: будние и выходные дни 1) IV квартала 2019 г., 2) IV квартала 2023 г., 3) летние месяцы 2023 г. Структурными параметрами будут оценена:

1) Неоднородность пассажиропотока по территориальному признаку в привязке к каждой отдельной станции метрополитена. Будут изучены количественные и территориальные отличия интенсивности пассажиропотоков направлений с общим началом. В рамках соответствующего раздела будет проведена параметризация изучаемой характеристики, дано описание пространственной конфигурации рассчитанных параметров. Результаты дадут основу для изучения иерархической структуры пассажиропотока.

2) Неоднородность пассажиропотока по временному признаку в привязке к каждой отдельной станции метрополитена. Будет изучено, насколько различается среднее время пиковой нагрузки между остановочными пунктами в течение суток. Поскольку уже доказано, что существует прямая зависимость пикового времени входящего объема пассажиропотока станции метрополитена и функционального назначения зоны обслуживания станции [Киселев, 2021], то именно эта структурная характеристика позволит нам откалибровать влияние функциональных факторов на распределение остальных параметров пассажиропотока.

**Методика создания пространственной модели пассажиропотока.** В качестве основы пространственной модели предлагается оценить наиболее интенсивные связи между всеми узловыми элементами – структуру главных направлений. Изучение цепей главных направлений позволит установить уровень иерархии узлов, представляющий собой порядковый номер в иерархической цепочке, как было описано в разделе 1.1. Подробнее методика расчета уровня иерархии узлов описана в соответствующем разделе исследования. В результате будет получено понимание о доминирующих транспортных стратегиях пассажиров и территориальных различиях этих стратегий: какие транспортные узлы обладают наибольшим и наименьшим гравитационным потенциалом.

Конечным результатом исследования служит создание пространственной модели пассажиропотока в московском метрополитене. Иерархическая структура, изученная перед этим, объясняет ключевые пространственные взаимодействия между узлами. Пассажиропоток, концентрирующийся на этих узлах, также измеряется рядом параметров. Для создания модельного представления необходимо найти наиболее характерные сочетания этих параметров, проверить гипотезу о возможности территориальной концентрации узлов с разными наборами совокупных величин пассажиропотока.

Для этого будет выполнен кластерный анализ, отдельно для каждого из временных срезов. Результаты анализа смогут показать наиболее часто встречающиеся группы узлов по комбинации параметров пассажиропотока. Далее узловые элементы сети – станции – типизируются согласно наиболее часто встречающихся совпадений параметров пассажиропотока, а также устойчивости этих сочетаний на каждом из исследуемых временных срезов. Изучается структура расположения выделенных типов в пространстве. Устанавливаются наличие (либо отсутствие) зон с территориальной концентрацией узлов одного типа (либо нескольких схожих типов), и описываются преобладающие в них процессы: конвергенция либо дивергенция пассажиропотока как во внутризональном масштабе, так и в масштабе всей системы в рамках суточной динамики.

**Выводы к главе 1.** Изучена возможность применения данных транспортных смарт-карт для географических исследований пассажиропотоков. Рассмотрены методические подходы к их обработке и анализу, применяемые в отечественной и зарубежной практике.

Установлены факторы распределения пассажиропотока: транспортно-географические, функциональные, а также факторы времени. Роль каждого фактора изучена в отдельности. Во-

первых, проведен анализ эволюции топологической структуры сети Московского метрополитена с момента ее открытия в 1935 г. до настоящего времени. Выявлены ключевые этапы развития сети, определены ее морфологические особенности на начало и конец периода исследования. Во-вторых, определены ключевые транспортные хабы Москвы и установлено, что более половины станций метро входят в их состав, что свидетельствует о высокой роли альтернативных видов транспорта в формировании пассажиропотока системы. В-третьих, проанализировано положение станций Московского метрополитена в пространственно-функциональной структуре Московской агломерации. Выявлены ключевые функциональные зоны города и сделаны предположения об их связи с параметрами пассажиропотока на станциях, расположенных в их пределах. В-четвертых, установлены циклические (суточные, недельные, сезонные) и случайные (пандемия COVID-19) колебания общего объема пассажиропотока, а также многолетние тренды его изменения.

Разработан авторский алгоритм расчета матриц корреспонденций на основе данных смарт-карт Московского метрополитена. Предложена комплексная методика изучения пространственно-временных закономерностей пассажиропотока, сводящаяся к созданию модели пассажиропотока на основе иерархической структуры типизированных по сочетанию параметров пассажиропотока узлов. Перед созданием пространственной модели пассажиропотока выполняется изучение базовых и структурных параметров пассажиропотока.

Результаты обработки первичных данных, а также влияние установленных факторов на распределение пассажиропотока будут проанализированы в главах 2 и 3.

## **Глава 2. Пространственный анализ базовых параметров пассажиропотока московского метрополитена**

Выше нами рассмотрены факторы, влияющие на пространственное распределение пассажиропотока в Московском метрополитене, а также сформулированы общее теоретическое понимание его пространственной структуры. Каждый из следующих разделов посвящен пространственному распределению одного из базовых параметров пассажиропотока, которые установлены нами в главе 1. Раздел содержит набор частных гипотез и результаты расчетов, подтверждающие или опровергающие их.

### **2.1 Входящий объем пассажиропотока станций Московского метрополитена**

**Взаимосвязь входящего объема пассажиропотока и пространственного положения станций.** Теоретические предпосылки к влиянию положения станций в пространстве на входящий объем пассажиропотока установлены нами в разделах 1.2 и 1.3. Для ряда городских транспортных систем установлено, что входящий объем пассажиропотока тесно связан с положением остановочных пунктов в транспортной сети: более выгодное положение повышает вероятность наблюдения более высоких значений объема. Нет оснований полагать, что это утверждение не может быть справедливо для Московского метрополитена с ее радиально-кольцевой внутренней структурой: благодаря центростремительности транспортной сети, на станциях, расположенных в центральной части города, нами ожидается больший объем входящего пассажиропотока, чем на станциях, расположенных в периферийной части города.

Вернемся к выводам из работы Н.К. Куричева, Е.К. Куричевой [Куричев, Куричева, 2020]. Авторы заключают, что улучшение транспортной доступности жилых комплексов в юго-западном и западном секторах Московской агломерации связано с развитием метрополитена преимущественно именно в этой части города (в частности речь идет о Сокольнической линии, Солнцевской линии, а также ее продолжении, включающее в себя станции Шелепиха, Хорошевская, ЦСКА и Петровский парк, в последствии включенные в состав Большой Кольцевой линии). Поэтому на первый взгляд, логично наблюдать увеличение входящего объема пассажиропотока на станциях, расположенных на западе и юго-западе города. Однако, больший объем пассажиропотока также может быть связан с размером зоны обслуживания станций, ведь чем более разреженно расположены станции, тем больше площадь обслуживания каждой отдельной станции, а значит и входящий объем

пассажиропотока этих станций должен быть больше. На западе и юго-западе, а также на юго-востоке (Некрасовская линия) наблюдается обратное явление: увеличение территориальной концентрации станций метрополитена. Следовательно, на срезе за 2019 г. ожидаем увидеть меньший объем пассажиропотока станций в этих секторах, чем в иных. К концу 2023 г. плотность станций в перечисленных секторах увеличилась еще сильнее, поэтому весьма вероятно еще более заметное уменьшение входящего объема.

В разделе 1.3 приведен ряд станций метро, которые были включены в состав транспортных хабов в течение исследуемого периода. Нельзя однозначно сказать, какой эффект от этого ожидается увидеть. С одной стороны, это может привести к резкому увеличению количества комьютеров во входящем объеме пассажиропотока станции метро. С другой стороны, у пассажиров, которые проживают в непосредственной близости от нового хаба теперь есть возможность иначе строить маршруты своих поездок, что может привести к уменьшению, а не увеличению пассажиропотока. Поэтому при сравнении двух выбранных периодов мы обратим на эти станции особое внимание.

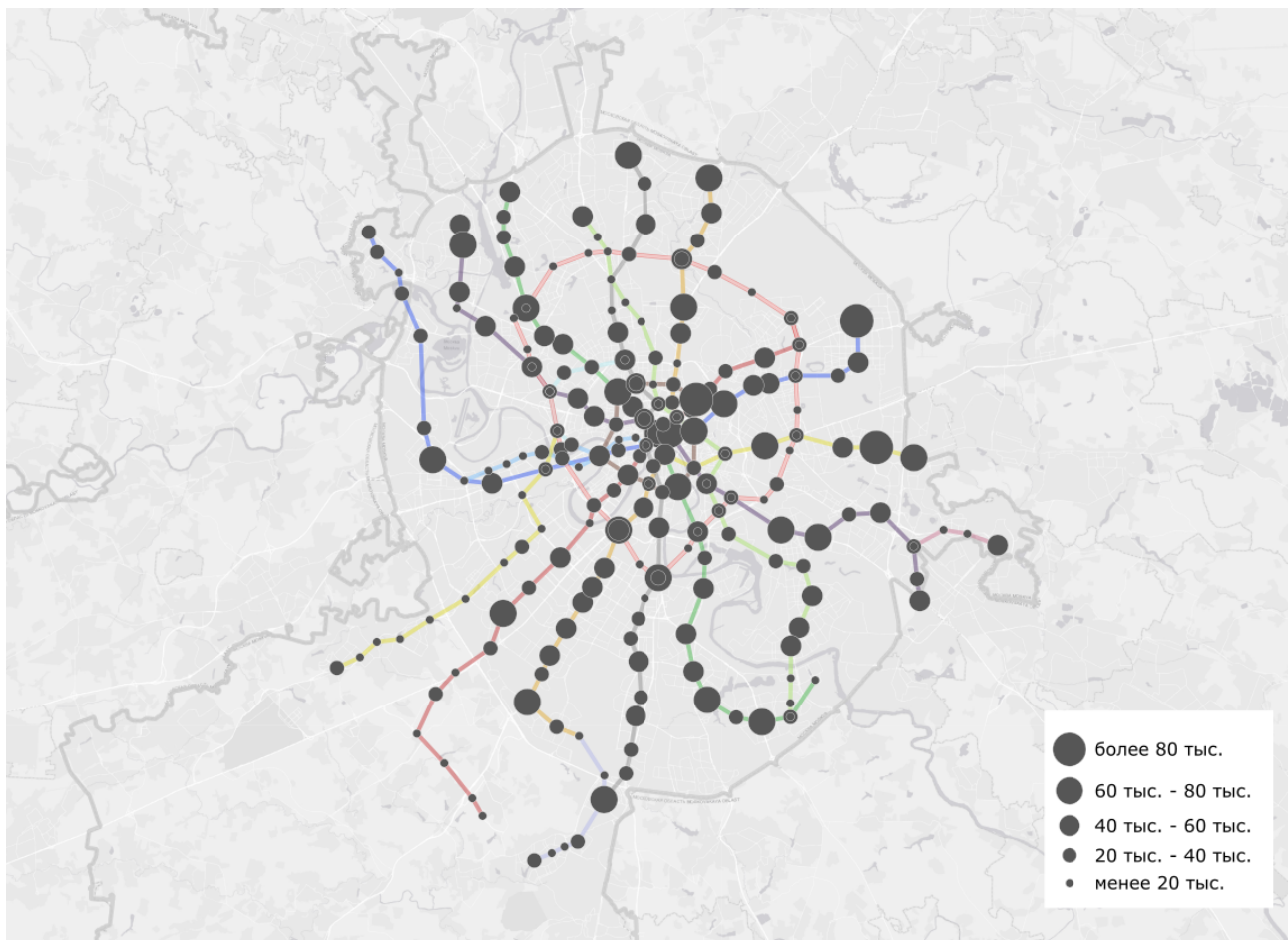


Рисунок 15. Распределение среднего входящего объема пассажиропотока по станциям Московского метрополитена в будние дни за IV квартал 2019 г.

Составлено автором.

На рис. 15 представлено распределение входящего объема пассажиропотока по станциям Московского метрополитена в будние дни за 2019 г. Обращает на себя внимание скопление станций с входящим объемом более 80 тыс. пассажиров в сутки в пределах третьего топологического яруса. Лидеры по этому показателю – станции Комсомольская и Курская не входят в состав яруса, однако все-таки расположены достаточно близко к центру сети и имеют высокие значения показателя центральности по близости благодаря положению на Кольцевой линии. Не приходится говорить об абсолютной территориальной концентрации станций метрополитена с высокими значениями. Такие станции наблюдаются и в срединной зоне ядра агломерации, и даже в окраинной. Некоторые станции, находящиеся в этих зонах, такие как Щелковская и Новогиреево, по входящему объему расположились на втором и третьем месте соответственно. Обратим внимание на станцию Выхино, долгое время считавшейся одной из наиболее загруженных станций и даже давшей название т.н. «эффекту Выхино» – ситуации, когда поезд на начальной станции линии наполняется настолько, что пассажиры следующих по ходу движения станций не имеют возможности сесть в поезд и совершить поездку, проводя в вынужденном ожидании продолжительное время. Входящий объем пассажиропотока составляет всего 58 тыс. человек, что более чем в два раза меньше станций с максимальным объемом. Обратим внимание на линии, введенные в эксплуатацию сравнительно недавно: Солнцевскую, Некрасовскую, северный участок Люблинско-Дмитровской линии. Они проходят через активно ревитализуемые промышленные площадки (например, ранее упомянутая промзона «Востряково», промзона в Огородном проезде, промзона «Очаково»), где транспортный спрос на перемещения через систему метрополитена исторически был всегда низкий. В настоящий момент эти промзоны активно застраиваются, а микрорайон на месте промзоны «Востряково» к моменту написания исследования уже заселен, что не могло не отразиться на входящем объеме пассажиропотока. Однако некоторые станции этих линий, даже находясь в густонаселенных селитебных зонах, показывают небольшой объем входящего пассажиропотока. Допускаем, что транспортное поведение жителей в окрестностях этих станций еще не перестроилось к факту начала эксплуатации станции метрополитена. Также относительно низкие значения можно отметить у станций в центральной части города, не имеющих пересадки на станции других линий (Полянка, Смоленская Филевской линии,

Кропоткинская). Сравнительно высокие значения входящего объема можно увидеть у станций Московского центрального кольца, находящихся на пересечении с радиальными линиями. Это связано с особенностями технической эксплуатации данных станций: при переходе со станции радиальной линии на станцию МЦК пассажир вынужден второй раз по ходу поездки валидировать проездной документ.

Выше нами проанализировано распределение входящего пассажиропотока по станциям. Однако, ряд станций сгруппирован в пересадочный узел, при этом каждая из них обслуживает одну и ту же территорию вокруг себя. Пассажиры, пользующиеся пересадочным узлом, имеют возможность выбирать более, чем из двух направлений для совершения поездки, в отличие от пассажиров станций вне пересадочных узлов. Сбор данных о валидациях проездных документов на большинстве станций, входящих в состав пересадочных узлов, производится отдельно для каждой станции. Хотя некоторые пересадочные узлы имеют общий вестибюль. Одним словом, организация сбора данных по разным станциям представляет собой техническую необходимость для служб метрополитена и может использоваться, например, для анализа эффективности организации работы элементов входных групп станций. Но для целей пространственного анализа это лишнее усложнение. По этой причине здесь и далее в работе будут использованы данные, агрегированные по пересадочным узлам (по аналогии с группировкой станций в узлы, проведенной в главе 2 при расчете показателя центральности по близости). В Приложении 1 представлена группировка станций в пересадочные узлы для удобства дальнейшего анализа.

После группировки станций в пересадочные узлы все значения были агрегированы по названиям узлов. На рис. 16 можно увидеть значительно возросшую поляризацию значений. Хорошо видно, что пересадочные узлы имеют входящий объем больше в два, а некоторые и в три раза, чем отдельные станции. Увеличилась разница между максимальными и минимальными значениями, а степень территориальной концентрации станций с высокими значениями заметно выросла. Так, максимальное значение входящего объема увеличилось со 128 тыс. до 164 тыс. (узел Курская/Чкаловская). Четко выделяется центр пространственной структуры, граница которого проходит примерно по Кольцевой линии. Лишь станции в западной части центра не имеют столь высоких значений. В лидеры по входящему объему выбился узел Ленинский проспект/Площадь Гагарина, близко подходит и узел Войковская/Балтийская, однако выше мы уже говорили про дублирующиеся валидации при пересадках с МЦК, поэтому к полученным значениям необходимо отнестись с осторожностью. Увеличение территориальной концентрации станций-лидеров позволило установить пояса

станций с приблизительно одинаковыми значениями входящего объема пассажиропотока вдоль южного участка Калужско-Рижской линии, а также с относительно низкими значениями практически на всех участках линий, проходящих в западной части города. Среди причин столь низких значений можно выделить сравнительно высокую плотность сети в этой части города. Кроме этого, линии проходят через районы, считающиеся наиболее престижными [Вендина, Панин, Тикунов, 2019], исходя из чего можем предположить, что в среднем резиденты этих районов чаще пользуются индивидуальным автомобильным транспортом для поездок по городу, чем общественным. Практически каждая линия метро, проходящая через периферийную часть ядра агломерации, имеет в своем составе станцию с заметно более высоким входящим объемом пассажиропотока, чем соседние в этой же функциональной зоне.

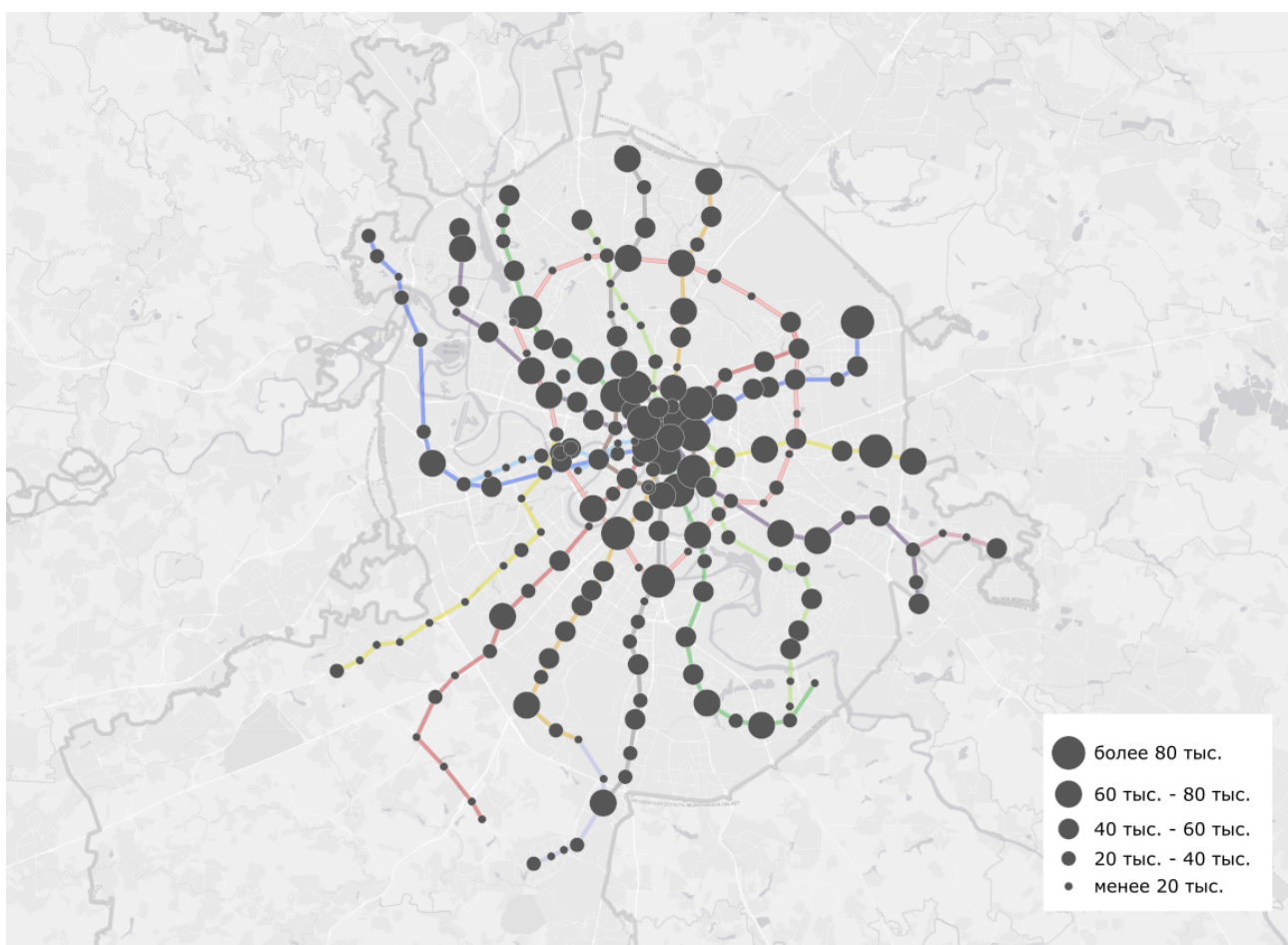


Рисунок 16. Распределение среднего входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена в будние дни за IV квартал 2019 г. Составлено автором.

Некоторые такие станции имеют объем не меньший, чем станции в центральной части города. Среди таких станций отметим Щелковскую, на которую мы ранее уже обращали внимание. Кроме нее, значительные величины обнаружены у станций Новогиреево, Кузьминки, Домодедовская, Царицыно, Бульвар Дмитрия Донского, Теплый Стан, Юго-Западная, Молодежная, Сходненская, Алтуфьево и Медведково. Все эти станции объединяет нахождение в составе транспортных хабов, о которых шла речь в разделе 2.2. В состав всех этих хабов входят конечные пункты магистральных маршрутов НГПТ, а также конечные пункты автобусов пригородного сообщения. Наличие таких станций метро, а также осознание факта, что станции-лидеры по объему входящего пассажиропотока находятся в составе полимодальных транспортных хабов, неизбежно наталкивает на мысль о наличии взаимосвязи между оценкой иерархического уровня транспортных хабов и входящим объемом. Этот исследовательский сюжет будет рассмотрен ниже.

**Устойчивость пространственной структуры распределения пассажиропотока по станциям метрополитена во времени.** В главе 1 нами были выделены факторы, определяющие регулярные и нерегулярные отклонения общего объема пассажиропотока. Была выдвинута гипотеза о том, что не все станции одинаково следуют этим колебаниям общей величины: часть станций следуют тренду, часть – опережают тренд, еще часть – следуют вопреки тренда. А расположение станций с различной степенью следования тренду пространственно детерминировано.

Перейдем к анализу распределений входящего пассажиропотока в выходные дни за исследуемый период (см. рис. 17). Заметно практически повсеместное снижение входящего объема пассажиропотока. По-прежнему, ярко выделяются станции с максимальными величинами входящего объема в центре города. Очевидно, эти станции обслуживают пассажиров, направляющихся к местам рекреации и проведения досуга в многочисленных заведениях и культурных учреждениях центра ядра агломерации. Станции, находящиеся в составе крупных транспортных хабов, также хорошо прослеживаются. Таким образом, никаких существенных территориальных сдвигов в пространственной структуре распределения входящего объема пассажиропотока не выявлено. Для подтверждения этого вывода обратимся к рис. 18, на котором показано изменение значений входящего объема в относительных величинах. Лишь на двух станциях – ЦСКА и Рижская объем пассажиропотока в выходные дни оказался выше, чем в будние. В случае станции ЦСКА это легко объясняется: рядом расположен крупный ТРЦ «Авиапарк», а также парк Ходынское поле, при этом отсутствуют крупные офисные кластеры, которые могли бы заметно увеличить объем

пассажиропотока в будние дни. Около станции Рижская расположен Рижский рынок – крупнейший центр оптовой торговли цветами. В будние дни объем пассажиропотока станции составляет около 9 тыс., что близко к наиболее минимальным значениям, из-за чего присутствие в зоне обслуживания станции даже такого неординарной точки притяжения становится решающим в формировании недельного ритма пассажиропотока.

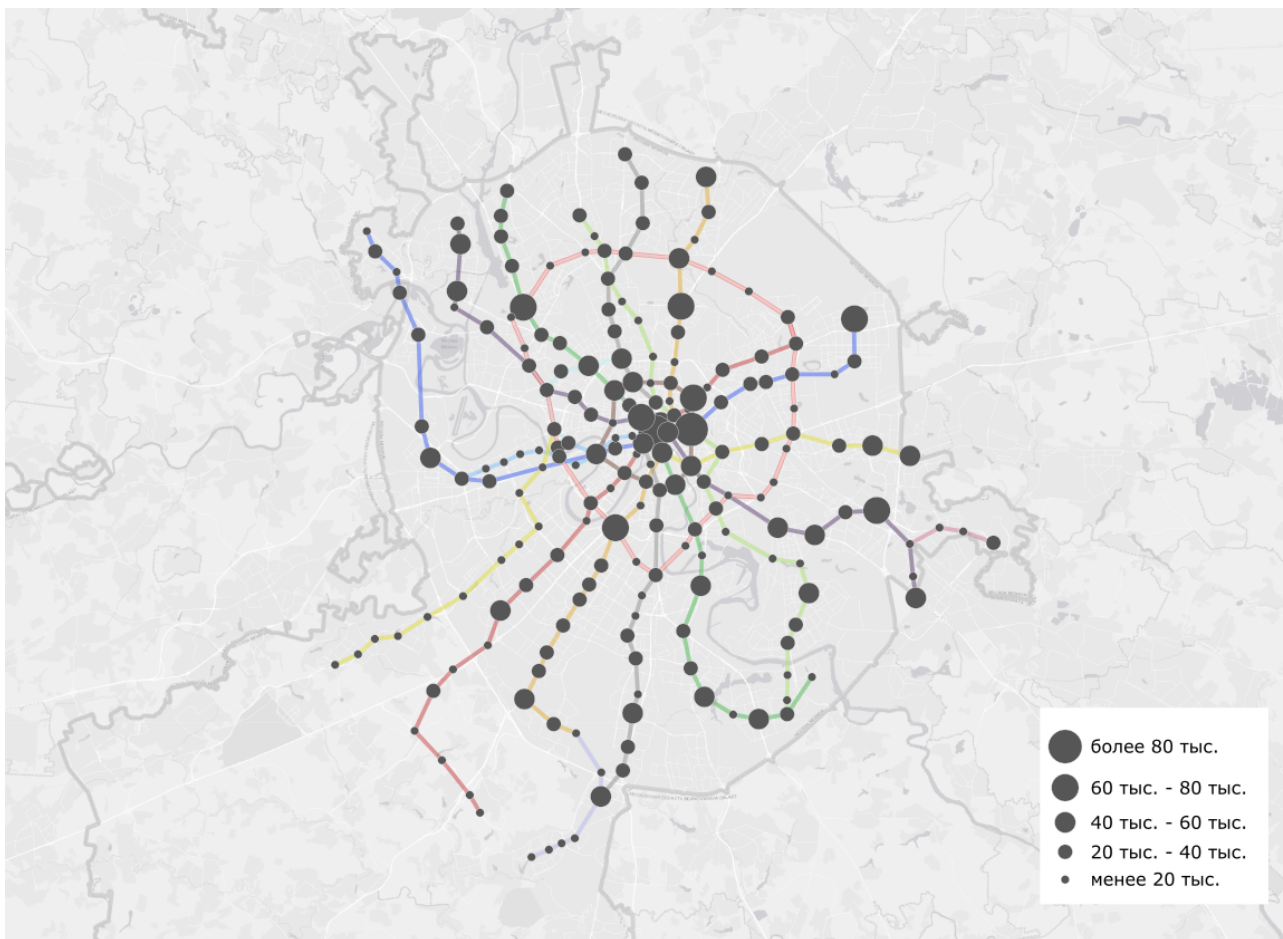


Рисунок 17. Распределение среднего входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена за выходные дни за IV квартал 2019 г.

Составлено автором.

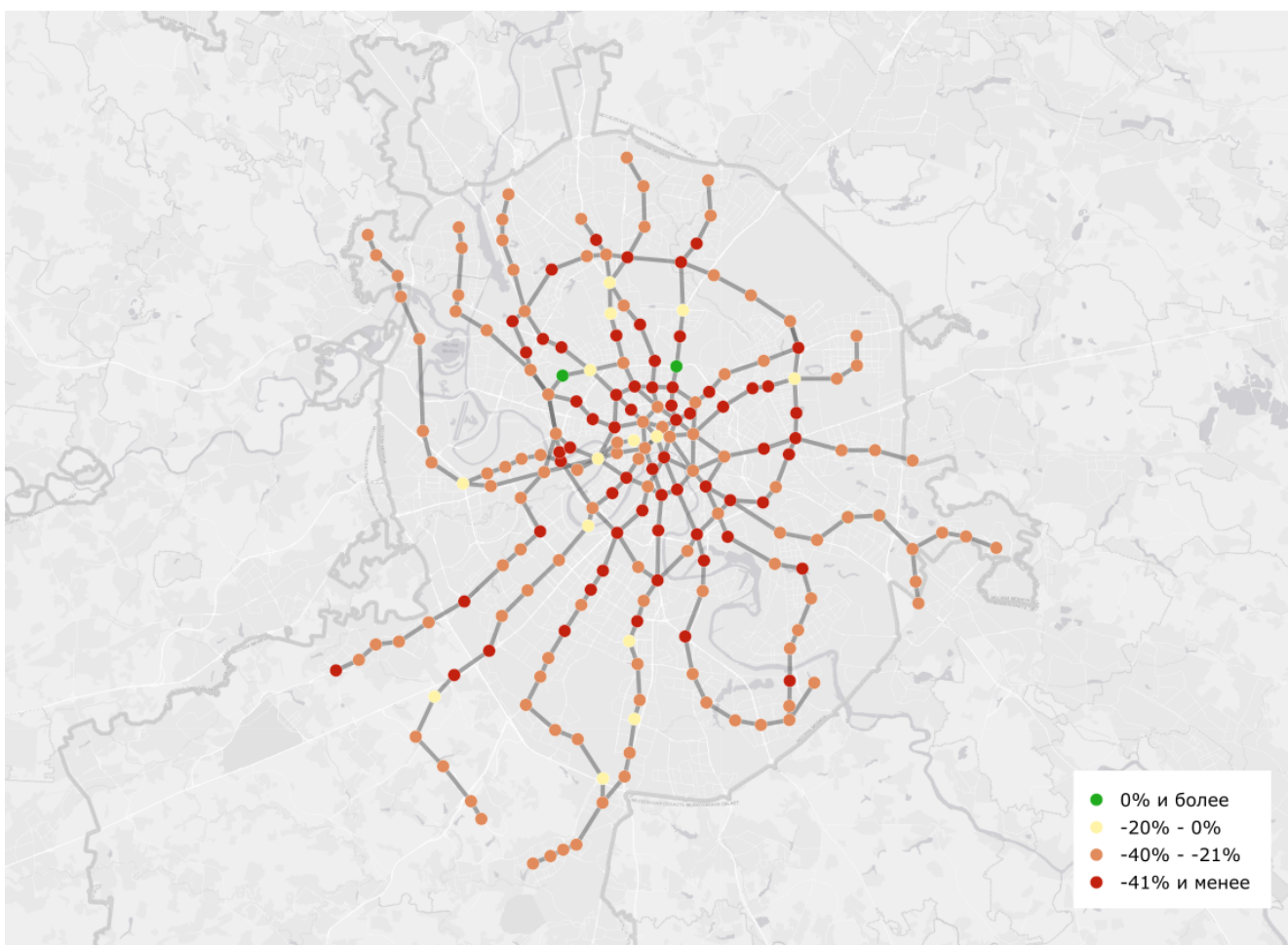


Рисунок 18. Распределение изменения входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена между будними и выходными днями за IV квартал 2019 г.

Составлено автором.

Далее перейдем к анализу объема входящего пассажиропотока за будние дни 2023 г. (см. рис. 19). Для наглядности значения классифицированы в рамках тех же границ, что и на рис. 16. По-прежнему выделяется группа станций с наиболее высокими значениями в центре города. Характерно, что условные границы этой территориальной группы практически идеально совпадают с границей третьего топологического яруса, немного смещенного на восток относительно топологического центра сети. Более четко эта граница выражена с западной стороны, менее четко – с восточной. Отметим заметное падение входящего объема в узле Курская/Чкаловская. Во много это связано с практически полным переносом дальнего сообщения с Курского вокзала на новый Восточный вокзал, а также запуском линии D4 МЦД, в составе которой появилось большое количество станций, входящих в состав хабов с

возможностью пересадки на линии метрополитена. Вероятно, что основной объем пассажиропотока переместился на станцию Нижегородская, ставшей в течение периода исследования одним из крупнейших хабов в составе Московской агломерации по числу представленных видов транспорта и географии сообщения. Нижегородская – один лидеров среди станций по приросту объема пассажиропотока за период с конца 2019 г. по конец 2023 г. (за исключением станций, открытых в течение этого периода), поднялась со 147-й на 9-ю позицию. Столь стремительный рост, помимо сдвига пассажиропотока с Курской, связан с вводом линии Большой кольцевой линии. Сравнительно недалеко расположены еще одна станции, значительно увеличившие свои позиции: Электrozаводская (с 84 на 6 место), также расположенная на БКЛ, а также входящая в состав хаба вместе с одноименной станцией недавно введенной линии D3 МЦД, в составе которой появилась прямая беспересадочная связь с северными и северо-западными районами ядра агломерации. У станций в южной, юго-западной и западной частях сети характерно снижение входящего объема пассажиропотока, особенно заметное у станций Серпуховско-Тимирязевской и Калужско-Рижской линии. Полагаем, что это произошло вследствие перераспределения пассажиропотока в пользу новых станций БКЛ, находящихся вне пересечения с радиальными линиями (Зюзино, Воронцовская). Размылось явное доминирование над соседними станциями у некоторых, входящих в состав крупных хабов, находящихся на периферии ядра агломерации. Особенно это заметно у станции Алтуфьево, в зоне обслуживания которой появились новые станции Люблинско-Дмитровской линии (Лианозово и Физтех), а также станции Сходненская.

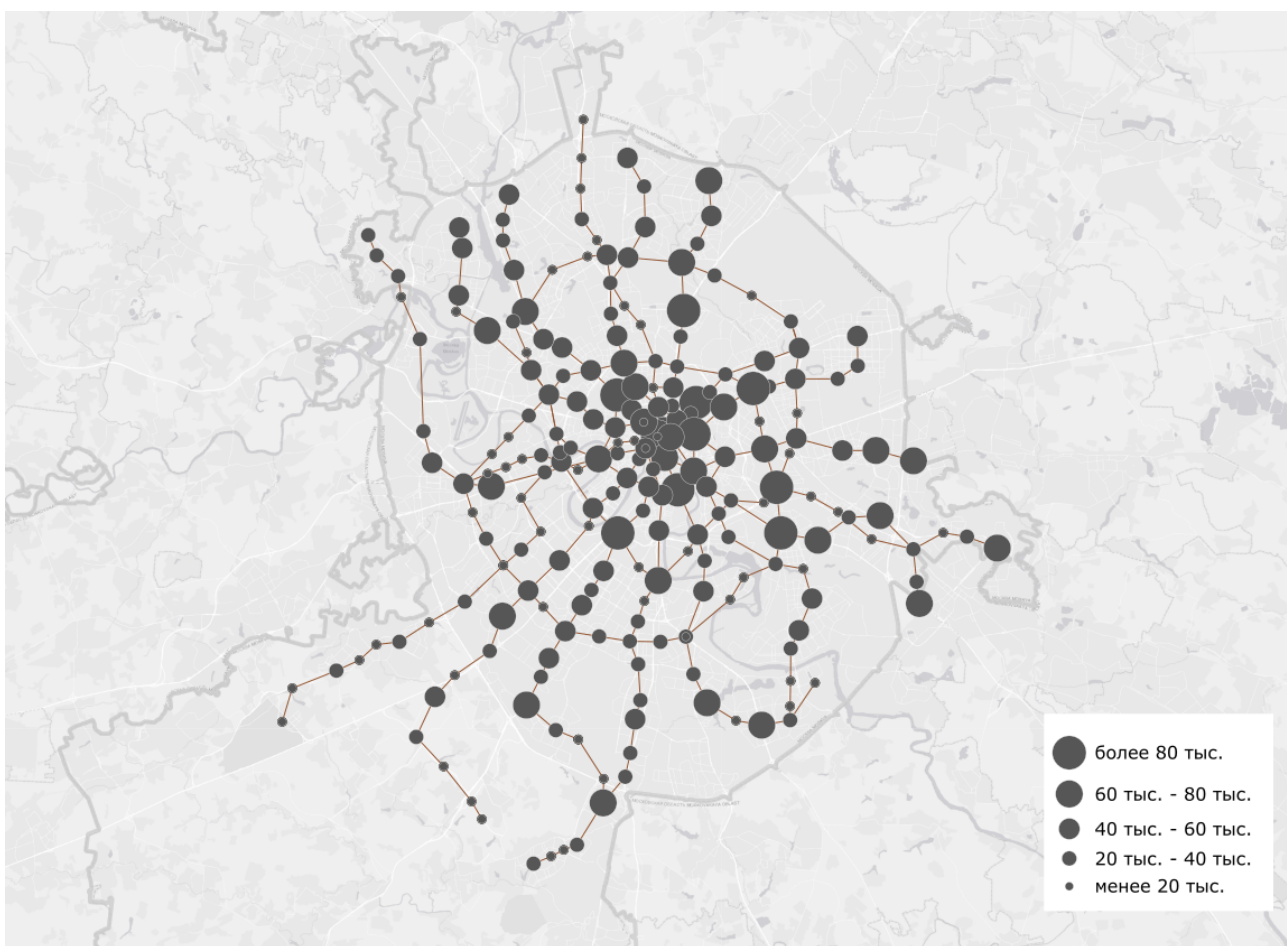


Рисунок 19. Распределение среднего входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена в будние дни за IV квартал 2023 г.

Составлено автором.

Для более наглядного изучения территориальных сдвигов входящего объема пассажиропотока обратимся к рис. 20. Среди лидеров по относительному показателю роста объема в основном находятся станции, которые были введены в эксплуатацию в течение исследуемого периода (станции восточного и юго-западного участка БКЛ, новые станции Некрасовской линии). Среди ранее введенных в эксплуатацию станций отметим территориальную группу станций на юге Бутовской линии, Сокольнической линии, западный участок Солнцевской линии, северный участок Люблинско-Дмитровской линии, а также станции Спартак и Рижская. Для всех перечисленных станций, кроме Рижской, характерно интенсивное жилищное строительство в зоне обслуживания. Некоторые из перечисленных территориальных групп станций находятся вблизи ревитализированных территорий бывших промышленных предприятий, как ранее было отмечено в главе 2. Таким образом,

предположение о влиянии джентрификации на входящий объем пассажиропотока подтвердилось. Транспортный хаб, в состав которого входит станция Рижская в течение исследуемого периода претерпел значительные изменения – через него прошла линия Большой кольцевой линии, а также две линии МЦД (одна из которых – линия D3 – соединила ранее несвязанные участки сети городских железных дорог). Наибольшее падение входящего объема пассажиропотока отмечено у станций Отрадное, Курская, Кантемировская, Коломенская, Кожуховская и Мякинино. Случай первых двух станций был проанализирован ранее. Кейс со станцией Коломенская схож с кейсом станции Отрадное: в ее зоне обслуживания открылись сразу две новые станции БКЛ: Кленовый бульвар и Нагатинский затон. Кроме этого, в течение исследуемого периода был Случай станции Кантемировская не столь очевиден. Вероятно, на столь заметное падение объемов пассажиропотока могло повлиять закрытия для обслуживания пассажиров в течение шести месяцев с осени 2022 г. по весну 2023 г. участка Замоскворецкой линии от станции Автозаводская до станции Орехово<sup>16</sup>. За полгода транспортное поведение пассажиров адаптировалось под новые реалии и поэтому лишь часть из них продолжила использовать систему метрополитена в повседневных поездках. Рядом со станцией Кожуховская почти полностью прекратила деятельность промзона «Южный порт», работники которой, вероятно, составляли основу входящего объема пассажиропотока станции. В настоящий момент на территории промзоны строится несколько крупных жилых комплексов, которые могут обеспечить рост входящего объема станции в будущем. Большая часть станций, исторически составлявших основу пространственной структуры Московского метрополитена, претерпела незначительное падение объемов.

---

<sup>16</sup>Участок метро «Автозаводская» — «Орехово» закроют с 12 ноября на шесть месяцев. Официальный сайт Мэра Москвы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru/news/item/114942073/> (дата обращения: 01.06.2024)

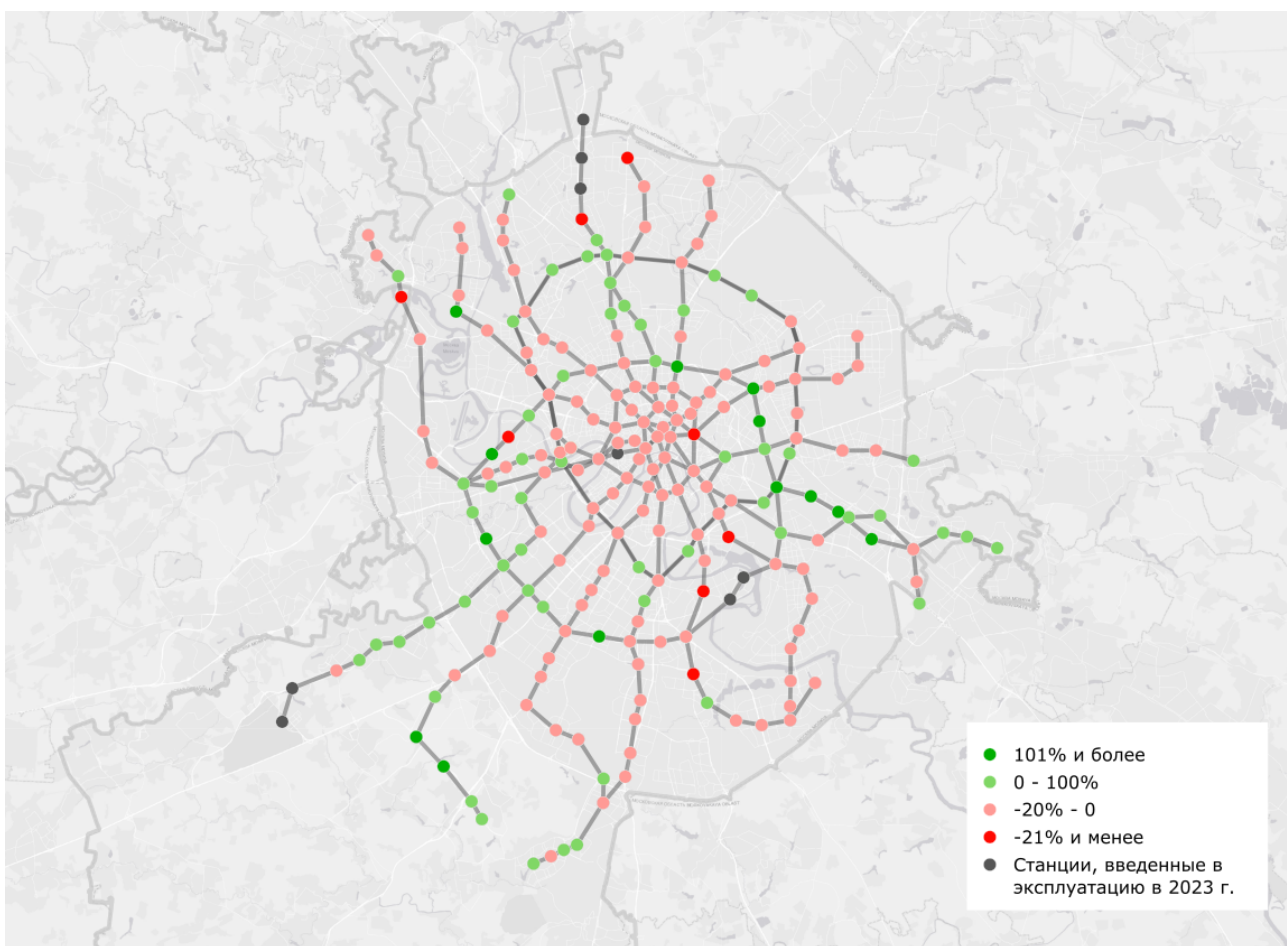


Рисунок 20. Распределение изменения входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена между будними днями IV квартала 2019 г. и IV квартала 2023 г.

Составлено автором.

Существенных территориальных сдвигов в пространственной структуре распределения входящего объема пассажиропотока за выходные дни по сравнению с IV кварталом 2023 г. (см. рис. 21) не произошло. Отдельно отметим станцию ВДНХ, ставшую лидером по этому показателю. Также на фоне соседних станций выделяются Строгино, расположенную рядом с многочисленными рекреационными зонами, Коломенская – около входа в одноименный парк, Пражская – около крупнейшего в южной части Москвы ТЦ «Коламбус». Значения у обеих станций за исследуемый период сократились, но не столь сильно как у соседних станций. Изменения значений в относительных величинах показано на рисунке 22, на котором кроме ранее отмеченной нами станции ВДНХ заметный прирост входящего объема наблюдается только у станции ЦСКА, которая по данным за конец 2019 г. также была отмечена в качестве

одного из. Таким образом убедиться, что пространственная структура динамики входящего объема пассажиропотока в выходные дни практически идентична той, что ранее была представлена на рис. 16.

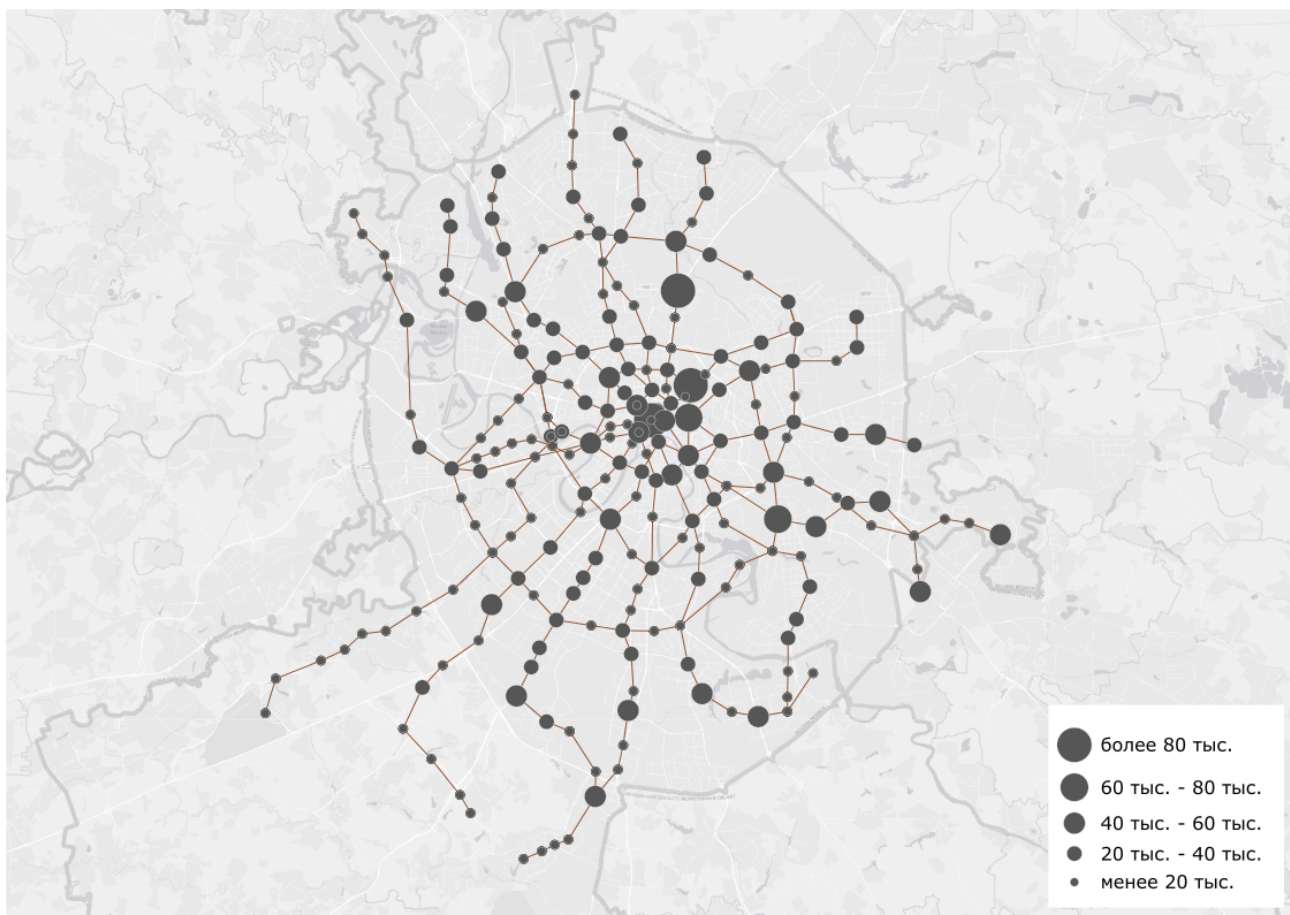


Рисунок 21. Распределение среднего входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена за выходные дни за IV квартал 2023 г.

Составлено автором.

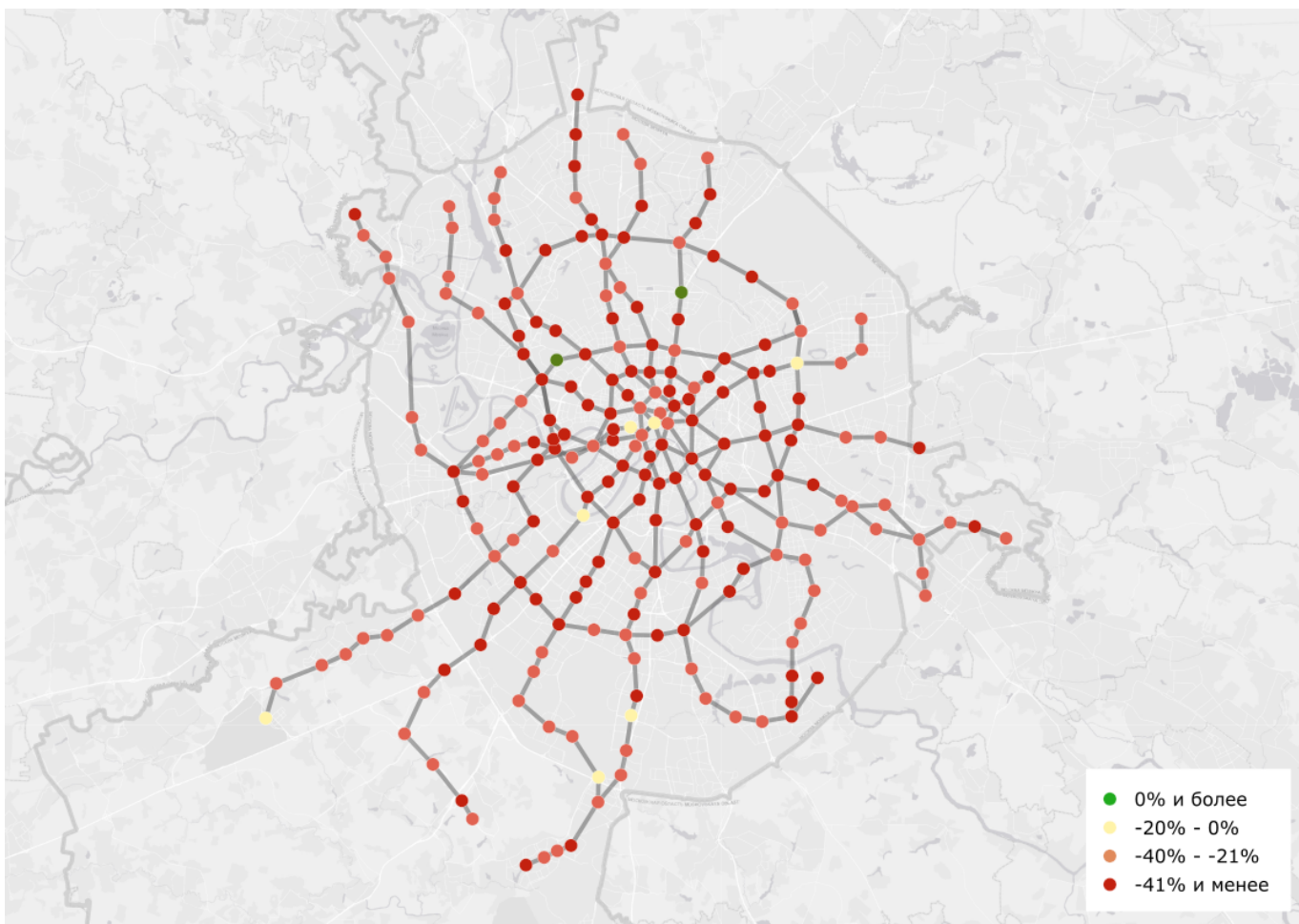


Рисунок 22. Распределение изменения входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена между будними и выходными днями за IV квартал 2023 г.

Составлено автором.

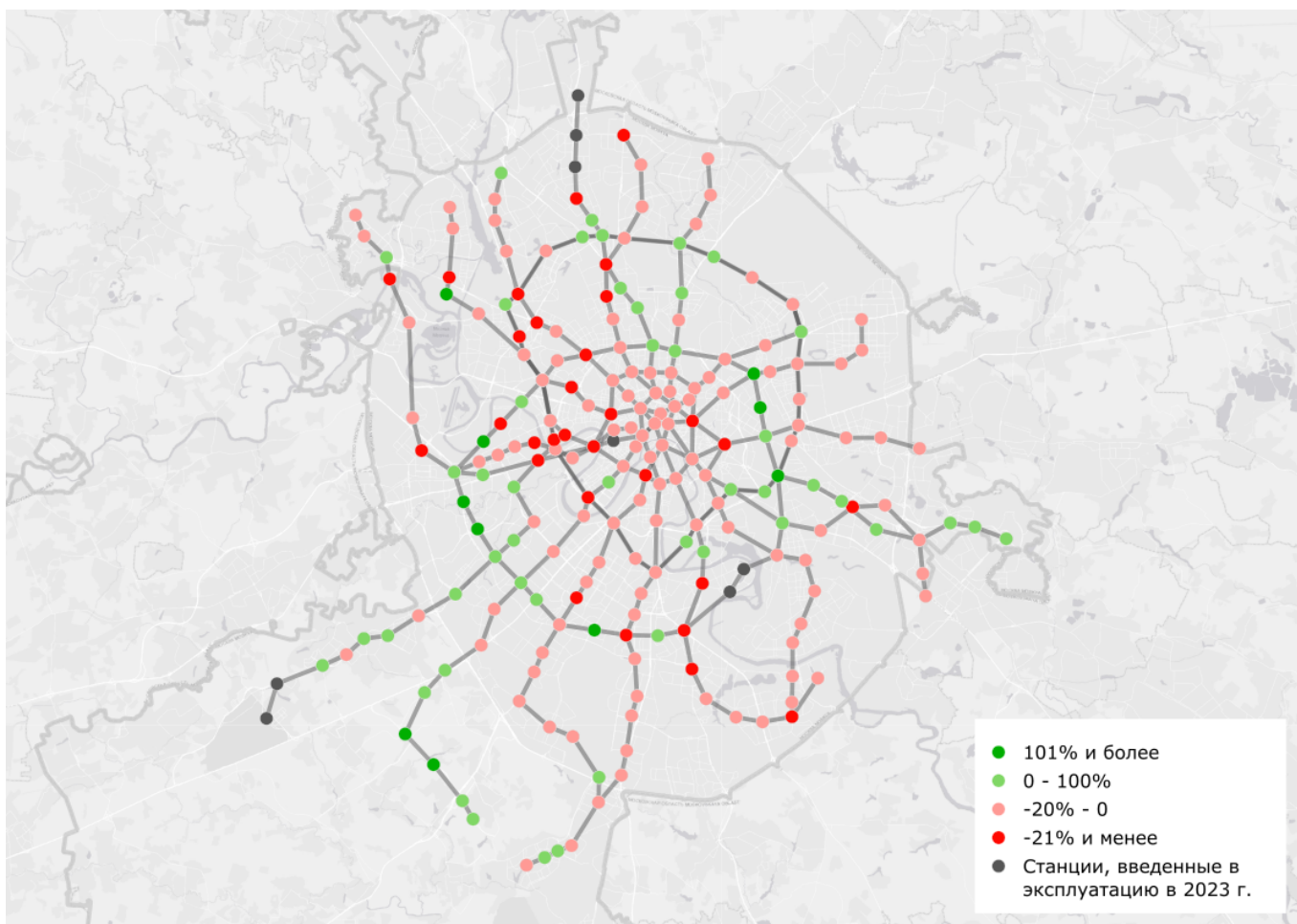


Рисунок 23. Распределение изменения входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена между выходными днями IV квартала 2019 г. и IV квартала 2023 г.

Составлено автором.

Помимо недельных колебаний общего объема пассажиропотока, в главе 2 нами были установлено наличие сезонных колебаний в летний период от средних значений осенне-весеннего периода. Было выдвинуто предположение о снижении количества трудовых поездок. В таком случае, было бы логично ожидать снижение входящего объема пассажиропотока прежде всего на станциях, к которым совершается наибольшее количество трудовых поездок, то есть к станциям, расположенным прежде всего в центре ядра агломерации, центрально-деловом районе. В то же время, ожидается увидеть увеличение объема пассажиропотока у станций вблизи крупных рекреационных зон, однако в отличие от выходных дней, допускаем, что входящий объем вблизи нерекреационных точек притяжения

останется без существенных изменений. Для этого был рассчитан средний ежесуточный объем входящего пассажиропотока за июнь – август 2023 г. (отдельно для будних и выходных дней).

Результаты представлены на рис. 24 и 25. Входящий объем пассажиропотока у большей части станций имеет незначительное снижение, сопоставимое со средним значением снижения общего объема пассажиропотока. Однако расположение станций со значительным сдвигом значений имеет несколько особенностей. В будние дни наблюдается заметный рост объема у станции вблизи популярных прогулочных зон с большой концентрацией заведений сферы услуг (узел Баррикадная/Краснопресненская и Арбатская Филевской линии – Московский зоопарк и Патриаршие пруды, узел Охотный Ряд/Площадь Революции/Театральная – улица Никольская и Красная площадь, Китай-город – улица Маросейка), рекреационных зон (Воробьевы горы, Лесопарковая). Также характерно положение многих станций с наибольшим падением значений: зачастую они расположены около крупнейших столичных вузов (Юго-Западная – МГИМО, РАНХиГС, РТУ МИРЭА, РУДН, Университет и Ломоносовский проспект – МГУ им. Ломоносова, Аэропорт – Финансовый Университет и МАДИ, Бауманская – МГТУ им. Баумана, узел Новослободская/Менделеевская – РХТУ им. Менделеева и т.д.), а также около крупных комплексов студенческих общежитий (Сокол, Студенческая, Академическая). Из этого, можно сделать вывод, что студенты, в летнее время не посещающие занятия и редко проживающие в кампусах, составляют значительную часть входящего объема пассажиропотока этих станций. Вопреки выдвинутой гипотезе, рост значений зафиксирован у станций в центрально-деловом районе Москва-Сити. Это ставит перед исследователями вопрос о реальном функциональном назначении этой территории: вероятно, что оно заметно разнообразнее, чем просто концентрация мест приложения труда, прежде всего за счет своей ценности как туристического объекта и размещению крупных торгово-развлекательных пространств.

В выходные дни количество станций со значительным изменением входящего объема пассажиропотока заметно возросло, причем во много за счет станций, на которых объем увеличился. Выдвинутое выше предположение о росте объема на станциях, расположенных около рекреационных зон, подтверждается. В отличие от будних дней летнего сезона, в выходные дни география таких станций заметно шире (Октябрьская – ЦПКиО им. Горького, Стрешнево – парк Покровское-Стрешнево, Белокаменная – Лосиный Остров, Сокольники – парк Сокольники, узел Измайлово/Партизанская и Соколиная гора – Измайловский кремль и Измайловский парк, Царицыно и Борисово – парк Царицыно и т.д.). Было бы неправильно предполагать, что, если только станции Воробьевы горы и Лесопарковая имеют заметно

высокий рост входящего объема пассажиропотока в будние дни, значит рекреационные зоны, расположенные рядом с этими станциями, пользуются бóльшим спросом в будние дни, чем остальные. Этот рост обеспечивается эффектом низкой базы: например, в осенне-весенний период среднее ежедневное значение входящего объема пассажиропотока на станции Воробьевы горы составляет лишь 8,5 тыс. пассажиров – одно из наиболее низких значений во всей системе, поэтому сколько-нибудь значимое увеличение абсолютных значений входящего объема приводит к колоссальному росту относительных значений. Пространственное распределение станций с заметным снижением объема эквивалентно наблюдавшемуся в будние дни летних месяцев: это станции, расположенные около крупнейших вузов и студенческих кампусов.

Обратим внимание, что ни в будние, ни в выходные дни не произошло радикального сдвига значений как в селитебных зонах, так и в полифункциональном центре ядра городского агломерации. Из этого мы делаем вывод об относительной сезонной устойчивости пространственной структуры распределения. Однако эта устойчивость заметно более слабая, чем на недельном цикле пассажиропотока. Обратим внимание и на разницу в мобильности населения в выходные дни двух сезонов: в летнее время гораздо больший спрос имеют рекреационные зоны под открытым небом, в зимнее – крупные торгово-развлекательные комплексы и общественные пространства в крытых помещениях.

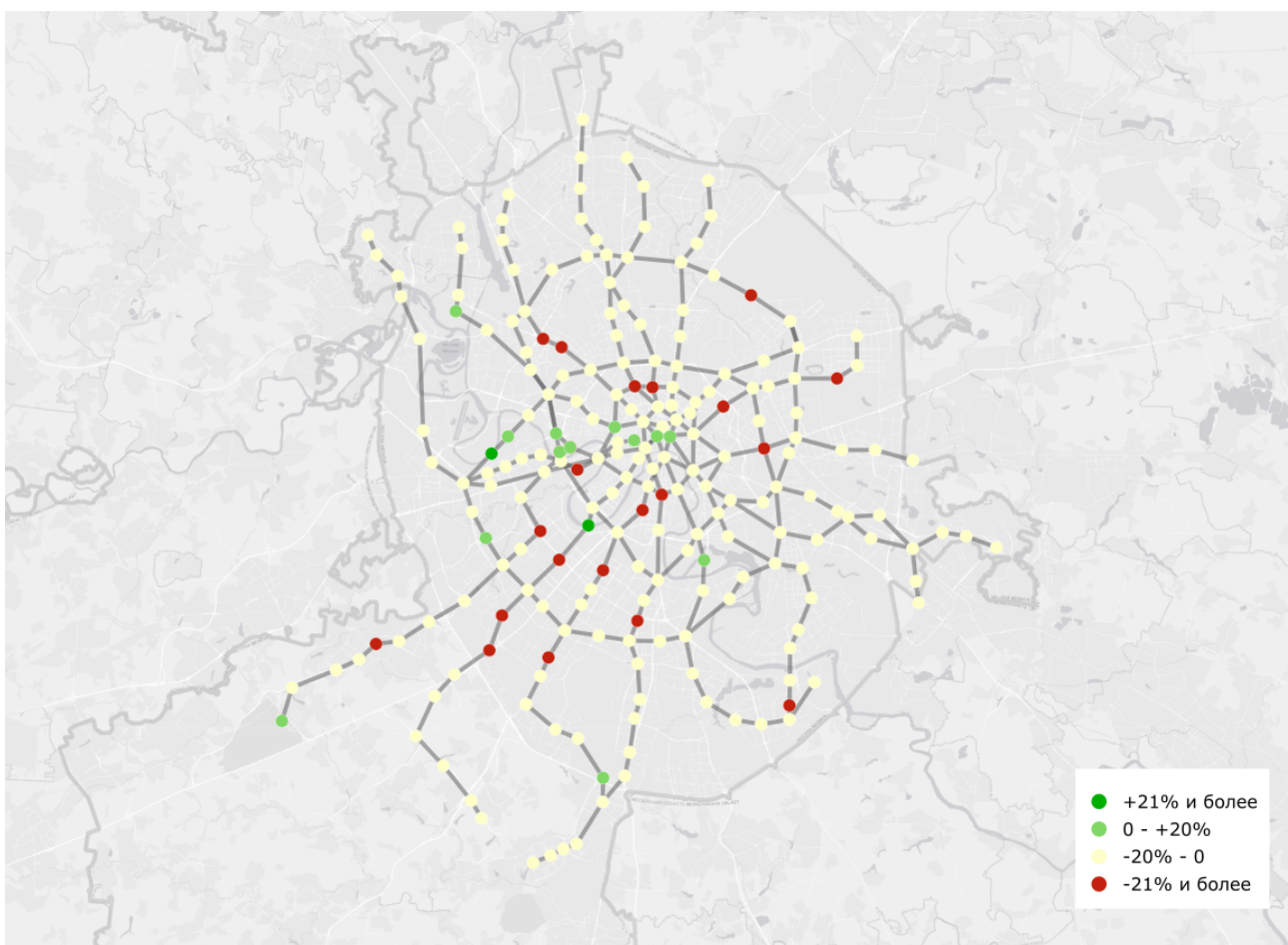


Рисунок 24. Распределение изменения входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена между будними днями IV квартала 2023 г. и летними месяцами 2023 г.

Составлено автором.

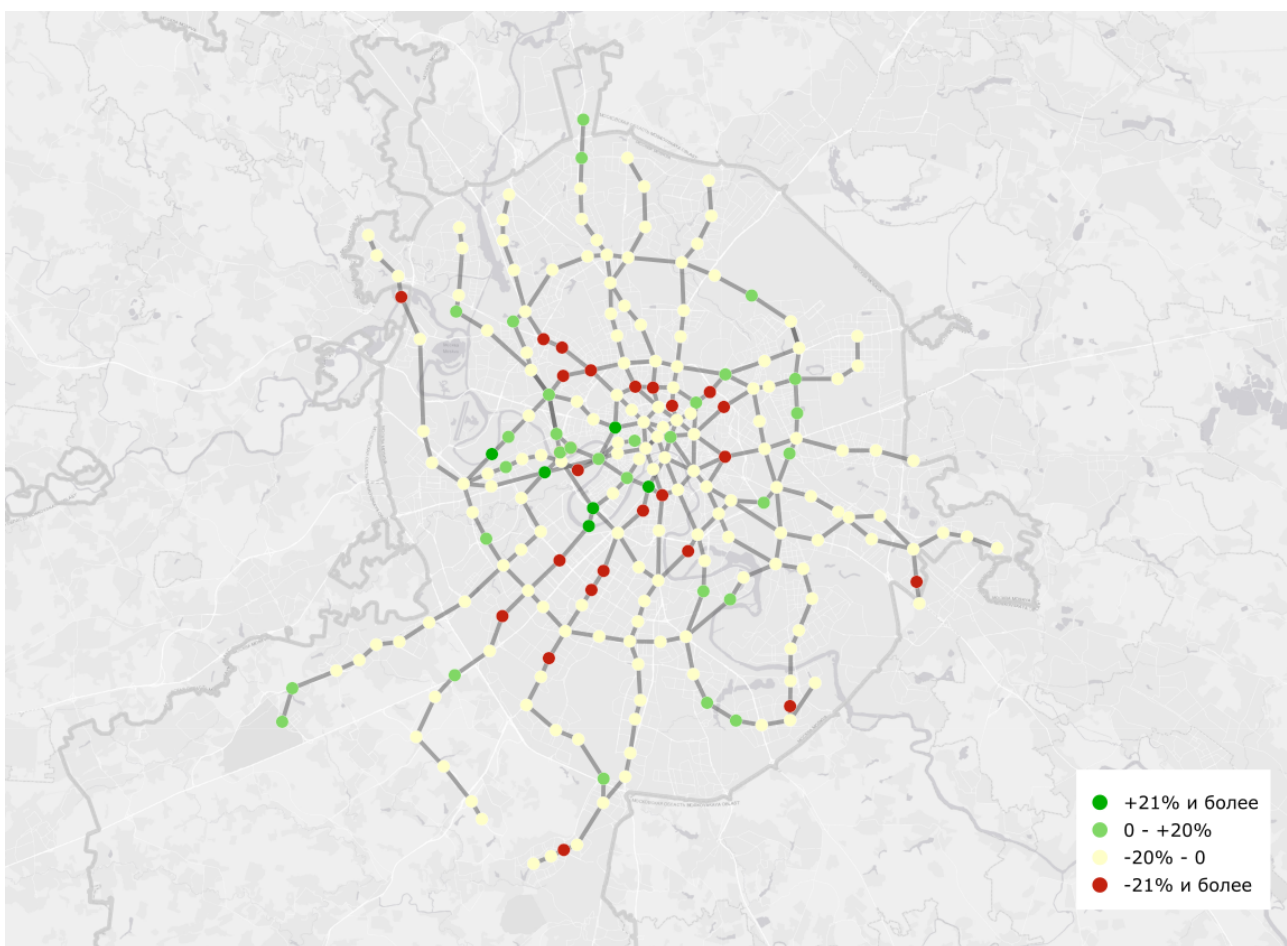


Рисунок 25. Распределение изменения входящего объема пассажиропотока по станциям и узлам (группам станций) Московского метрополитена между выходными днями IV квартала 2023 г. и летними месяцами 2023 г.

Составлено автором.

#### **Взаимосвязь входящего объема пассажиропотока и иерархии транспортных хабов.**

В период с 2019 г. по 2023 г. было введено в эксплуатацию множество новых хабов, как благодаря строительству новых станций метро, так и вводу в эксплуатацию системы МЦД и новых станций в составе пригородной железной дороги. Поэтому именно на примере состояния транспортной системы г. Москва на конец 2023 г. выполнен поиск взаимосвязи между оценкой иерархического уровня транспортных хабов и входящим объемом пассажиропотока.

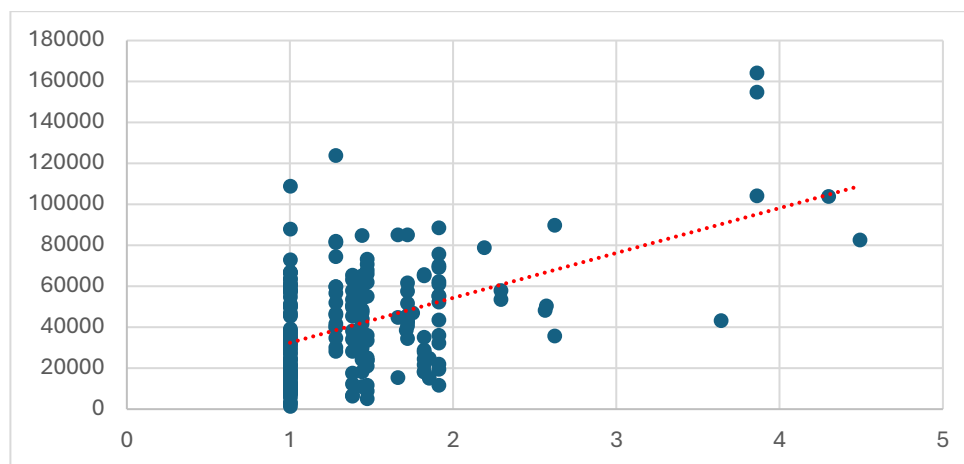


Рисунок 26. Соотношение баллов оценки иерархического уровня транспортных хабов и пассажиропотока станций метрополитена на территории Москвы.

Составлено автором.

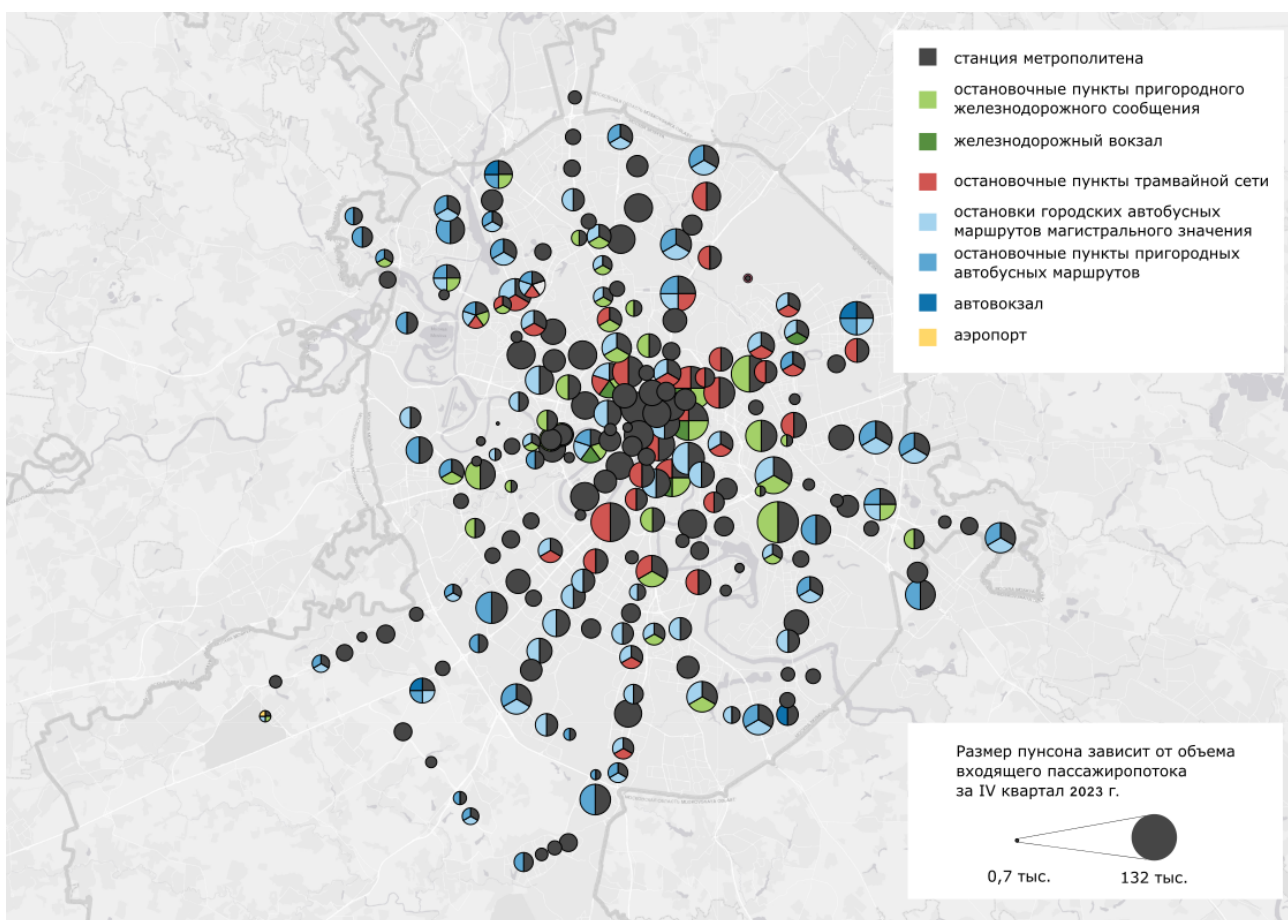


Рисунок 27. Средний входящий объем пассажиропотока станций метрополитена за IV квартал 2023 г. и транспортные хабы, имеющие в своем составе станцию метрополитена, на территории Московской агломерации по состоянию на конец 2023 г. Составлено автором.

Как можно убедиться на рис. 26, данная взаимосвязь достаточно слабая, коэффициент корреляции Пирсона составляет между значениями наблюдений составляет 0,48. Значительная часть наблюдений абсолютно не детерминирована линейно. Значения, наблюдаемые вне основного кластера, в основном принадлежат таким станциям, как Новогиреево, Кузьминки, Домодедовская, Царицыно, Бульвар Дмитрия Донского, Теплый Стан, Юго-Западная, Молодежная, Сходненская, Алтуфьево и Медведково. Таким образом, если станции со максимальным входящим объемом пассажиропотока почти всегда лежат в составе мультимодальных хабов, то нельзя утверждать обратное – что станции с низкими значениями никогда не входят в состав мульти- или хотя бы тримодальных хабов.

Отсюда можно прийти к модельному описанию пространственной структуры входящего объема пассажиропотока по станциям Московского метрополитена. Наименьший объем отмечается на станциях, расположенных в дальней периферии ядра агломерации. Подавляющая часть таких станций находится за пределами МКАД в спальнях районах с относительно низкой плотностью населения (Боровское шоссе, Прокшино, Улица Горчакова). Также к ним относятся станции, находящиеся вне пересечений с другими линиями метрополитена на участках кольцевых линий (МЦК и БКЛ), максимально удаленных от центра (Соколиная гора, Нагатинский затон). Из этого можно сделать предположение, что участки кольцевых линий с такими станциями в реальности являются не столько связующими компонентами сети, сколько фидерными участками для других частей кольцевых линий и радиальных линий. Далее с приближением к центру города (а на большинстве линий) выделяются станции с относительно высокими значениями пассажиропотока. Примеры таких станций приведены в предыдущем параграфе. Все эти станции включены в состав транспортных хабов, обслуживающих пригородные (некоторые – еще и междугородные) виды транспорта. Таким образом, реальный хинтерланд этих станций значительно шире, чем близлежащая территория. Из повседневных наблюдений за этими станциями можно выделить наличие и иных, помимо транспортной, центрообразующих функций в непосредственной близости от таких станций. Зачастую, здесь наблюдается большая концентрация заведений общепита, уличной торговли, сферы услуг, есть благоустроенные общественные пространства. Изучение особенностей городского пространства вблизи станций метрополитена могло бы стать темой отдельного исследования для специалистов по городской экономике, социологии и урбанистике. Некоторые подобные станции находятся в непосредственной близости от центра ядра агломерации (Комсомольская, Курская). В подавляющем большинстве эти

станции в пространственной структуре можно обозначить как локальные субцентры. На некоторых линиях такие станции отсутствуют (Люблинско-Дмитровская), а на некоторых – можно выделить сразу несколько в рамках одного сектора (Новокосино и Новогиреево на Калининско-Солнцевской линии, Медведково и ВДНХ – на Калужско-Рижской, Саларьево и Юго-Западная – на Сокольнической). Кроме этого, на некоторых линиях в городском пространстве вышеперечисленные признаки можно отметить на нескольких соседних станциях, однако ни одна из них не доминирует по главному анализируемому признаку – входящему объему пассажиропотока (северо-западный участок Таганско-Краснопресненской линии). Далее выделяется срединная зона – станции, имеющие значения входящего объема пассажиропотока, близкие к средним. Чаще всего располагаются в пределах циклического остова сети по состоянию на конец 2023 г. В эту зону входит большинство станций с ярко выраженными сезонными колебаниями входящего объема пассажиропотока, остальные станции обслуживают монофункциональные селитебные зоны позднесоветского периода застройки. Наконец, ярко выражено ядро концентрации станций с высокими значениями в центре ядра агломерации, совпадающим с топологическим центром сети. Большая часть этих станций не входит в состав транспортных хабов, а большой входящий объем пассажиропотока формируется благодаря большому количеству точек притяжения в зоне обслуживания станций.

Описанная выше модель представлена в виде схемы на рис. 28.

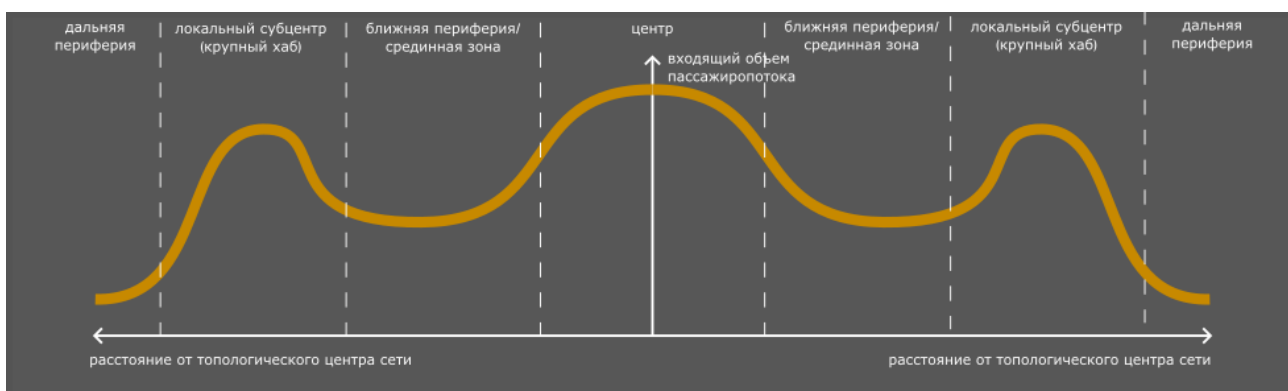


Рисунок 28. Модель пространственной структуры распределения входящего объема пассажиропотока по станциям Московского метрополитена.

Составлено автором.

## **2.2 Интенсивность пассажиропотока и пассажиронапряженность направлений Московского метрополитена**

**Связь пространственного положения корреспонденций и интенсивности пассажиропотока.** Ожидается, что в будние дни значения интенсивности будут иметь ярко выраженный центростремительный градиент: это напрямую следует из модели распределения входящего объема пассажиропотока, согласно которой наивысшие значения наблюдаются у станций в центральной части ядра агломерации, а также в периферийной части (образуя локальные субцентры). Соответственно, именно между станциями этих двух структурных частей агломерации и ожидаются наибольшие значения интенсивности пассажиропотока. Справедливо предположить сохранение таких же территориальных пропорций и в выходные дни, поскольку как установлено в главе 2, пространственное распределение входящего объема пассажиропотока меняется слабо, однако возможно увеличение значений на локальных маршрутах (в пределах нескольких перегонов между станциями) во вне центра ядра агломерации, а в большей степени наоборот – маршрутах высокой протяженности (между станциями, расположенных в диаметрально противоположных частях ядра агломерации). Цели таких поездок преимущественно нетрудовые, поэтому могут совершаться пассажирами в нерабочие дни, когда для этого есть больше времени. В летний сезон в связи с перераспределением входящих объемов от станций, расположенных вблизи крупнейших вузов, к станциям около рекреационных зон, ожидается пропорциональное перераспределение интенсивности пассажиропотока. За период исследования можем увидеть увеличение и сокращение интенсивности по отдельным направлениям, но не по всей сети целом (принимая во внимание сокращение общего объема пассажиропотока системы). Это связано прежде всего с расширением сети и вводом новых станций в эксплуатацию. Поскольку это неминуемо привело к улучшению транспортной доступности ряда станций, то пассажиры приобрели дополнительные возможности по совершению поездок от них/к ним. Поэтому необходимо обратить внимание на станции (узлы), которые приобрели более выгодное положение в топологической структуре сети: вполне вероятно, что на ряде направлений от них/к ним будет зафиксировано заметное увеличение интенсивности.

Допускаем, что пассажиронапряженность, которая прямо пропорциональна интенсивности, также распределяется по модели «центр-периферия», где в центре – наибольшие значения, а на периферии сети – наименьшие. Кроме этого, пространственные контрасты в разнице значений могут быть значительно сильнее: благодаря тому, что в центре

маршруты имеют относительно небольшую протяженность вследствие высокой плотности сети и станций. В выходные дни мы предположили повышение значений интенсивности пассажиропотока на локальных маршрутах: благодаря их низкой протяженности увеличение пассажиронапряженности будет особенно заметно. В центральной части ядра агломерации по этой же причине будут наблюдаться высокие значения, таким образом общая контрастность значений в центре и на периферии сети будет ниже. А вот характер сезонного изменения пассажиронапряженности, вероятно, не будет иметь ярко выраженной пространственной структуры: станции вблизи вузов и рекреационных зон, где отмечены наиболее яркие изменения входящего объема пассажиропотока, расположены дисперсно. Кроме того, если пассажиропоток от станции вблизи вузов, вероятно направлен прежде всего к станциям в центре ядра агломерации (где существует территориальная концентрация точек притяжения для студентов), и на этих направлениях допускается уменьшение интенсивности. Но как раз из-за дисперсного расположения этих станций будет невозможно установить характер изменения пассажиронапряженности. За период исследования благодаря расширению сети уменьшилась протяженность ряда маршрутов.

Распределение интенсивности между всеми парами станций и узлов Московского метрополитена по состоянию на IV квартал 2019 г. представлено на рисунке 29-а). Наблюдается очень яркое доминирование именно центростремительных/центробежных потоков, причем наиболее интенсивные потоки идут со станций, расположенных на окраине ядра агломерации, на которых зафиксированы относительно высокие значения пассажиропотока (локальные субцентры: Теплый Стан, Новокосино, Щелковская). Здесь и далее такие направления для удобства будем называть *магистральными*. В первом приближении наблюдается, что многие наиболее интенсивные потоки устремлены непосредственно к топологическому сети, станциям в пределах третьего топологического яруса. Таким образом, взаимосвязь между входящим значением пассажиропотока и интенсивностью полностью подтверждается. На окраинных станциях-субцентрах по значению входящего объема, пассажиропоток концентрировано перемещается в центральную часть ядра агломерациях (равно как и в обратном направлении). Обратная сторона этого явления – сравнительно низкие пассажиропотоки в иные, отличные от центра части ядра агломерации.

Более подробно наиболее загруженные направления можно изучить, обратившись к рис. 30-а). Здесь и далее на подобных рисунках для удобства анализа отобран 1% направлений с самыми высокими значениями интенсивности. Характерно практически полное отсутствие направлений со станций, находящихся в срединной зоне города. Кроме этого, главные потоки

распределены имеют асимметричное территориальное распределение по секторам ядра агломерации. Наибольшее число направлений отмечается в северо-западном секторе (от станций Таганско-Краснопресненской и Замоскворецкой линий), а также в восточном и юго-восточном направлениях (от станций Арбатско-Покровской, Калининской и Таганско-Краснопресненской линии). Направления в других секторах представлены в меньшей степени, особенно мало представлены направления из западного сектора. Ни одного направления не наблюдается с относительно новых на 2019 г. линий: Солнцевской и Некрасовской. Обратим внимание на дальность этих направлений: она также распределена несимметрично относительно центра ядра агломерации. В северо-западном секторе можем увидеть большое количество локальных направлений, то есть направлений в пределах нескольких перегонов одной линии метрополитена. К ним относятся такие направления как Водный Стадион – Войковская, Сокол – Водный Стадион, Войковская – Аэропорт, Сходненская – Тушинская и др. Кроме этого, ряд локальных направлений с наиболее высокими, зачастую выше, чем в северо-западном секторе, значениями интенсивности встречается в юго-западном секторе, например Калужская – Академическая, Юго-Западная – Университет. Направлений, соединяющих сектора между собой (а также станций разных линий в пределах одного сектора) среди крупнейших по интенсивности не выявлено, не считая направлений, проходящих между станциями Кольцевой линии. Таким образом, Московское центральное кольцо как один из главных компонентов, обеспечивающий связность сети эксплуатации за три года (с IV квартала 2016 г. по IV квартал 2019 г.) еще не стало востребованным среди пассажиров в качестве альтернативы поездкам между секторами по ранее существовавшим пересадочным контурам, а также наземному транспорту. Вероятно, транспортный спрос на подобные поездки в целом существенно ниже. Однако для того, чтобы доказать это утверждение, необходимо провести исследование пространственной структуры поездок и в наземном транспорте в том числе, что не является предметом настоящего исследования. По всей видимости, как это было ранее установлено на примере входящего объема пассажиропотока, Московское центральное кольцо служит в качестве фидерной линии для радиальных линий метрополитена.

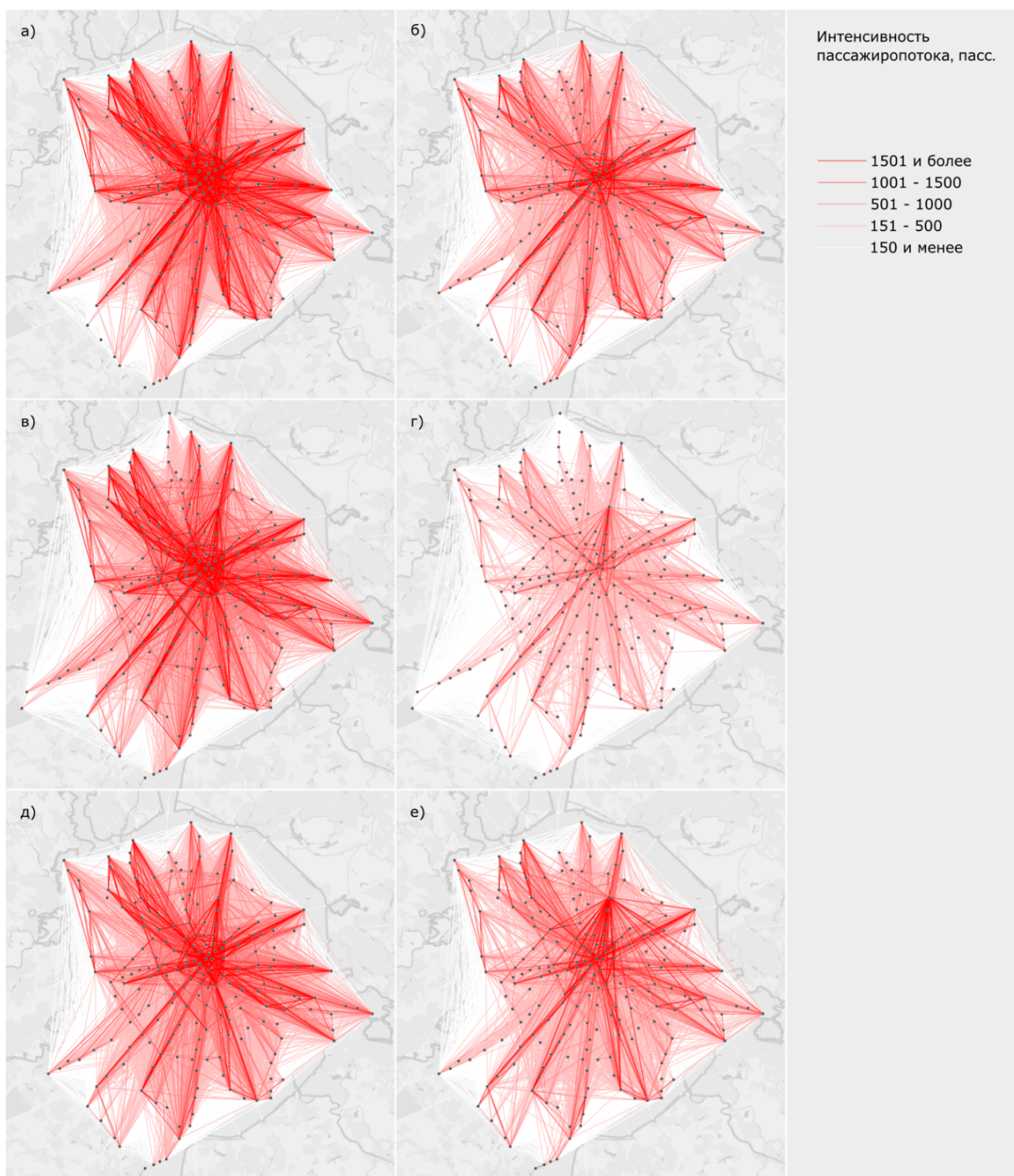


Рисунок 29. Пространственное распределение среднесуточной интенсивности пассажиропотока между всеми парами станций и узлов Московского метрополитена: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г.

Составлено автором.



Рисунок 30. Пространственное распределение 1% направлений с наибольшей интенсивностью: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

Учитывая во внимание, что наивысшая интенсивность пассажиропотока у маршрутов между станциями в центральной части сети, чуть ниже идут значения от станций на периферии сети к центру, а самые длинные маршруты имеют самую низкую интенсивность, вновь напрашивается гипотеза о взаимосвязи длины маршрута и интенсивности пассажиропотока, поднятая нами в разделе 1.1: чем больше протяженность маршрута, тем ниже интенсивность. Вернемся к этой гипотезе в главе 3.

Перейдем к анализу пространственного распределения пассажиронапряженности (отношения интенсивности пассажиропотока направления и протяженности направления) в сети московского метрополитена. Напомним, что высокие значения пассажиронапряженности свидетельствуют о том, что то или иное направление пользуется большим спросом, чем остальные. Соответственно, эти направления нуждаются в наиболее приоритетном транспортном обслуживании. На рис. 31-а можно наблюдать четкий градиент «центр-периферия» в распределении показателя, поскольку участки, расположенные в центральной части сети имеют относительно крупные значения интенсивности, при этом благодаря высокой плотности сети, расстояния между узлами здесь незначительны. Как и следовало ожидать, наименьшим спросом в сети пользуются поездки по хордовым направлениям, а также проходящим через центр. Обратим внимание, что ряд наиболее высоконапряженных направлений расположен на значительном расстоянии от центра сети (см. рис. 32-а). Наибольшее их число наблюдается в южном, юго-западном, северо-западном и восточном секторах. В остальных секторах наиболее высоконапряженные направления представлены фрагментарно. В центральной части сети расположение таких направлений тяготеет к станциям, расположенным близко к третьему топологическому ярусу.



Рисунок 31. Пространственное распределение среднесуточной пассажиронапряженности пассажиропотока между всеми парами станций и узлов Московского метрополитена: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

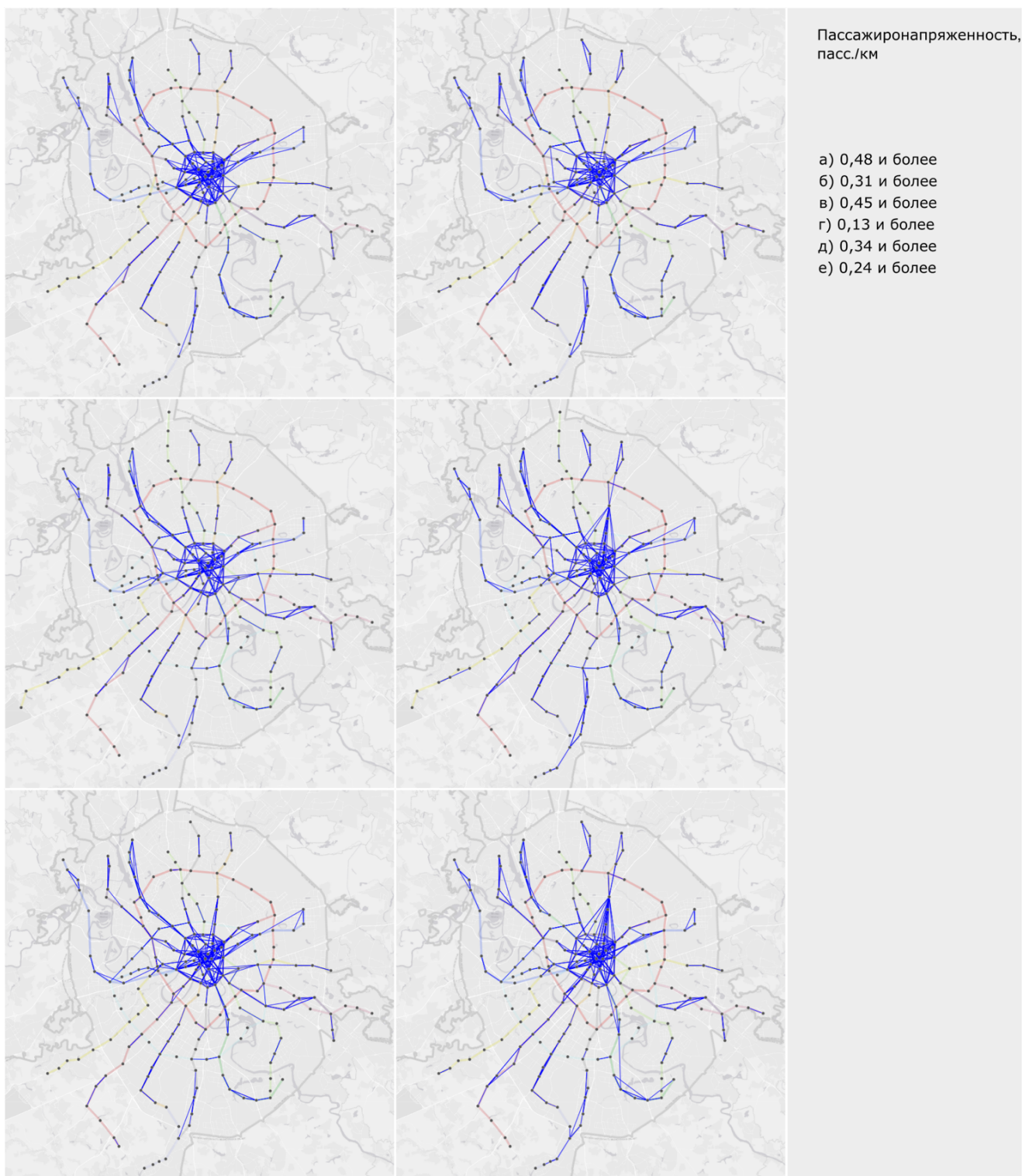


Рисунок 32. Пространственное распределение 1% направлений с наибольшей среднесуточной пассажиронапряженностью: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

**Устойчивость пространственной структуры распределения интенсивности пассажиропотока по маршрутам корреспонденций во времени.** Для определения устойчивости рассматриваемых показателей применяется та же методика, что и для анализа входящего объема пассажиропотока. Рассматриваются недельные и сезонные колебания, а также изменения к концу исследуемого периода.

Начнем с **анализа недельных колебаний** пассажиропотока. Ранее при исследовании входящего объема пассажиропотока было установлено, что при повсеместном изменении валовых значений, существенных территориальных сдвигов не произошло. Выше мы предположили наличие несущественного повышения интенсивности пассажиропотока на локальных направлениях и понижение – на магистральных.

Если обратиться к рис. 29-б, то можно обратить внимание, что интенсивность пассажиропотока на магистральных направлениях действительно преимущественно снизилась. Гораздо заметнее выделяются хордовые направления (например, Выхино – ВДНХ, Юго-Западная – Домодедовская и др.). Однако, хордовые направления по-прежнему не превышают магистральные по интенсивности пассажиропотока (рис. 30-б). В отличие от будних дней, значительно более число направлений идет от/к станции ВДНХ. Также в список направлений с максимальной интенсивностью пассажиропотока вошли три хордовых направления: Комсомольская – Савеловская, Деловой центр – ЦСКА, Динамо/Петровский парк – ЦСКА, Савеловская – ЦСКА. Ранее нами было установлено значительное увеличение входящего объема пассажиропотока на станции ЦСКА в выходные дни. Обращает на себя внимание появившаяся секторальная асимметрия в распределении направлений с наибольшей интенсивностью: если в будние дни количество направлений распределена между секторами равномерно (за исключением юго-западного и западного секторов), то в выходные дни наблюдается заметная территориальная концентрация направлений в восточном секторе. Из этого напрашивается гипотеза, что жители восточного сектора (к которому справедливо относить не только восточные районы столицы, но и ряд крупных населенных пунктов пригородной зоны) чаще перемещаются в выходные дни в центр ядра агломерации, в отличие от жителей, например, северо-западного и северного секторов. Однако для подтверждения или опровержения этой гипотезы проанализируем ряд иных показателей.

Сравним между собой значения интенсивности за будние и выходные дни (рис. 33-а и 33-б). Среди направлений как наиболее заметным ростом, так и с наиболее заметным падением прежде всего отмечаются хордовые. На первый взгляд может показаться, что представленные на рисунках направления не образуют собой пространственную структуру, однако как на

левом, так и на правом рисунках можно обратить внимание на станции, в которых концентрируется большое количество направлений. Большая часть таких станций расположена в зоне дальней периферии, на которых ранее были отмечены наиболее низкие значения входящего пассажиропотока. К ним относятся станции Волоколамская, а также на участках Солнцевской, Сокольнической, Бутовской и Некрасовской линий, расположенных за пределами МКАД. В пределах МКАД выделяются станции Спартак, ЦСКА и Белокаменная. Заметим, что станция ВДНХ, ранее отмеченная как узел территориальной концентрации большого количества направлений с наибольшими значениями интенсивности пассажиропотока, не входит в этот список. Отсюда можно сделать вывод, что станция ВДНХ обладает наиболее устойчивыми свойствами пассажиропотока в недельных колебаниях пассажиропотока. Также не наблюдается значительного увеличения интенсивности на направлениях к/от станций в восточном секторе, хотя ранее мы сделали предположение о большей пространственной мобильности жителей именно этого сектора в выходные дни. Наиболее вероятно, что, как и в случае со станцией ВДНХ, параметры пассажиропотока станций в восточной части ядра агломерации остаются наиболее стабильными относительно других станций (узлов) Московского метрополитена. Что касается направлений с наибольшей потерей интенсивности, то здесь снова выделяются станции дальней периферии. Таким образом, можно сделать вывод, что станции, расположенные на дальней периферии ядра агломерации обладают наиболее волатильным пассажиропотоком, хотя ранее это не было зафиксировано при анализе входящего объема пассажиропотока. Более того, эти станции даже не входят в число станций с наибольшей относительной потерей входящего объема пассажиропотока в недельном цикле. Однако главные узлы концентрации направлений с наибольшим падением интенсивности пассажиропотока находятся в других местах. Прежде всего, речь идет про станции (узлы), расположенные вблизи очагов территориальной концентрации офисных кварталов. Речь идет про станции (узлы) Румянцево, Деловой центр, Технопарк. Отдельно обращает на себя внимание концентрация таких направлений около станций (узлов) Соколиная Гора, Измайлово/Партизанская и Лихоборы, ведущих к узлам в центре ядра агломерации. Возникает предположение, что значительная часть пассажиров, проживающих вблизи этих станций, совершают регулярные трудовые поездки в будние дни, а в выходные – направляются в крупные рекреационные зоны, расположенные недалеко от станций (Измайловский парк, Тимирязевский парк). Однако подобного не наблюдается у других станций, расположенных вблизи крупных рекреационных зон.

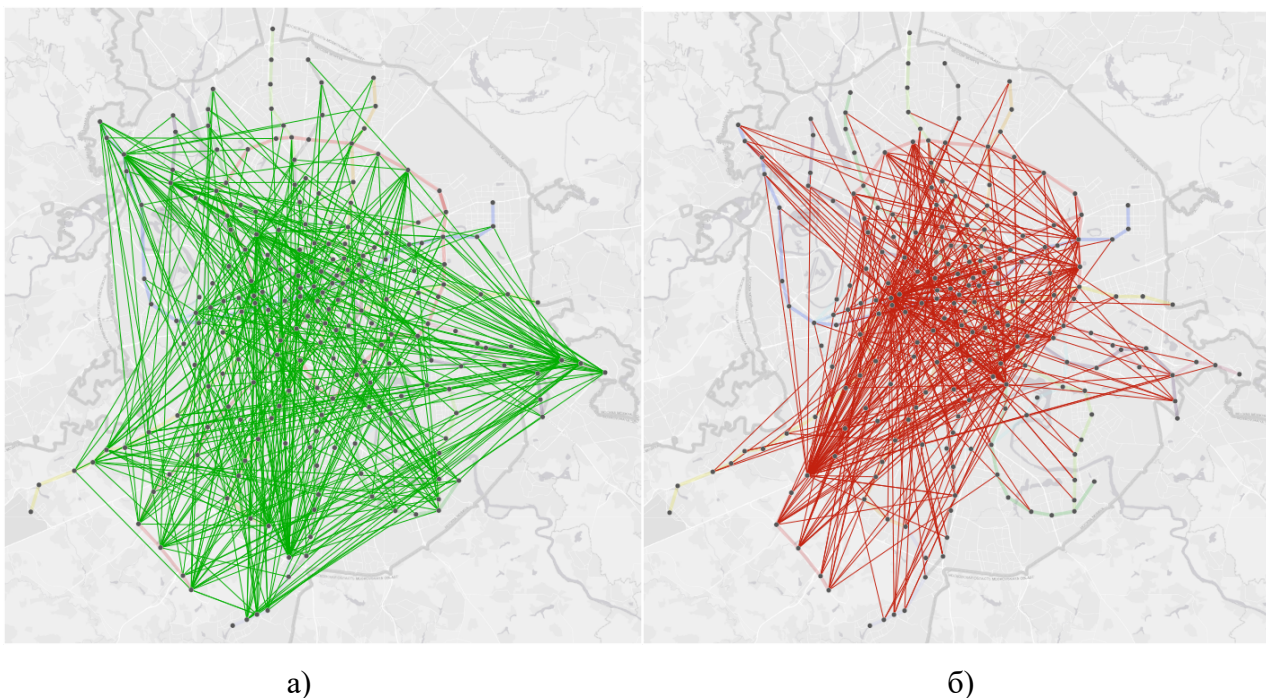


Рисунок 33. Направления с наибольшими относительными изменениями среднесуточных значений интенсивности пассажиропотока между будними и выходными днями по состоянию на IV квартал 2019 г. а) 1% направлений с максимальным ростом, б) 1% направлений с максимальным падением.

Составлено автором.

Далее рассмотрим, как меняется пассажиронапряженность в цикле недельных колебаний. Необходимо учитывать, что оба этих показателя прямо пропорциональны изменению интенсивности, соответственно все изменения пространственной структуры распределения этих показателей по направлениям тоже будут идентичны. Хотя нельзя исключать, что рассмотрение по сути того же явление под другим углом может дать новые научные результаты.

Рисунок 31-б демонстрирует отсутствие каких-либо значимых изменений в пространственной структуре распределения пассажиронапряженности в выходные дни (по состоянию на 2019 г.). Более того, в выходные отмечается сокращение напряженности даже на ряде хордовых направлений (здесь следует обратить внимание на направления от/к станциям МЦК). Анализ наиболее высоконапряженных направлений также показывает отсутствие каких-либо существенных территориальных сдвигов (рисунок 32-б). Незначительно изменились фрагментарные участки на концах радиальной линии, в частности обращает на

себя внимание группа направлений на юго-востоке, направленных к станции Домодедовская. Кроме этого, крупная зона концентрации наиболее напряженных направлений в центре ядра агломерации, ярко выделяющаяся в будние дни, в выходные оказалась в значительной степени размыта. По-прежнему направления концентрируются около третьего топологического яруса, но заметно уменьшилось количество направлений между станциями Кольцевой линии. При этом наиболее напряженные направления присутствуют на Большой Кольцевой линии.

**Анализ многолетних изменений.** Прежде чем перейдем к анализу пространственной структуры интенсивности пассажиропотока, а также пассажиронапряженности, снова обратим внимание на изменения, произошедшие в топологической структуре Московского метрополитена. Поскольку ранее было установлено сокращения протяженности ряда направлений, это могло напрямую повлиять на повышение их напряженности. Однако, результаты расчетов не подтверждают эту гипотезу в полной мере.

По состоянию на IV квартал 2023 г. пространственная структура распределения интенсивности пассажиропотока не претерпела существенных изменений (рисунок 29-в). Тем не менее, необходимо отметить заметное выделение ряда хордовых направлений на общем фоне, прежде всего связанное с вводом в эксплуатацию Большой Кольцевой линии. Именно вдоль нее и проходят большинство хордовых направлений с относительно высокой интенсивностью. Обратим внимание на географию этих направлений: как правило, они соединяют собой станции (узлы), находящиеся в смежных секторах, например, Варшавская – Калужская (южный и юго-западные секторы), Кунцевская – Проспект Вернадского (западный и юго-западный секторы). Кроме этого, заметна возросла интенсивность и на направлениях, проходящих вдоль МЦК (Стрешнево – Лихоборы, Лихоборы – Ростокино, Ростокино – Стрешнево). Все эти станции входят в состав пересадочных узлов с пригородной железной дорогой, причем Стрешнево и Лихоборы – с системой МЖД, введенной в эксплуатацию в ходе исследовательского периода. Еще одно выделяющееся на общем фоне хордовое направление – Верхние Котлы/Нагатинская – Деловой центр. Некоторые из них, как можно убедиться на рис. 30-в), приобрели значения, близкие к максимуму. Однако, кроме роста роли отдельных хордовых направлений, пространственная структура направлений с наивысшей интенсивностью также изменилась не столь заметно: по-прежнему доминируют магистральные направления восточного, юго-восточного, а также северо-западного секторов. Однако заметна концентрация направлений от/к узлам Деловой центр и ВДНХ, расположенных вне центра ядра городской агломерации. Таким образом, можно предположить

постепенное начало полицентрализации пространственной структуры поездок в Московском метрополитене.

Четкую пространственную структуру образуют направления с наибольшим относительным изменением интенсивности пассажиропотока (рис. 34-а). Наблюдается территориальная концентрация направлений в узлах Мичуринский проспект и Нижегородская, а также Волоколамская, Спартак, Филатов Луг и Прокшино. С одной стороны, эти станции трудно объединить по признаку геометрической близости. Однако, функциональные зоны обслуживания станций имеет общие свойства: Волоколамская и Нижегородская входят в состав пересадочных узлов с пригородной железной дорогой (МЖД), причем ранее нами было отмечено значительное увеличение входящего объема пассажиропотока на последней благодаря частичному переносу пригородного терминала Горьковского направления МЖД именно в этот пересадочный узел. Около остальных перечисленных станций (узлов) в течение исследуемого периода были построены крупные жилые массивы, которые дали значительный прирост входящего объема пассажиропотока. В целом, среди направлений с наибольшим относительным ростом доминируют именно хордовые. Причем, если ранее отмеченные нами хордовые направления среди лидеров по абсолютным значениям имеют достаточно небольшую протяженность и соединяют смежные сектора, то здесь протяженность направлений весьма значительна. Наблюдаются связи между северо-западным и северо-восточным секторами, юго-западным и восточным и так далее. Важно отметить, что подавляющее большинство этих направлений не служат доминирующими по абсолютным значениям интенсивности пассажиропотока. Тем не менее, тренд на рост роли хордовых направлений в общей структуре поездок очевиден.

Среди направлений с наибольшим относительным падением пассажиропотока (рис. 34-б) также в значительной мере выделяются *диаметральные* (проходящие насквозь через центр) направления. Их распределение гораздо более стохастично, выделить ядра концентрации таких направлений сравнительно непросто. Несмотря на то, что входящий объем пассажиропотока большого количества станций снизился, как было установлено ранее. Характерно, что ранее направления, наиболее часто попадающих в наш фокус внимания – локальные, магистральные и хордовые – встречаются на рисунке реже всего.

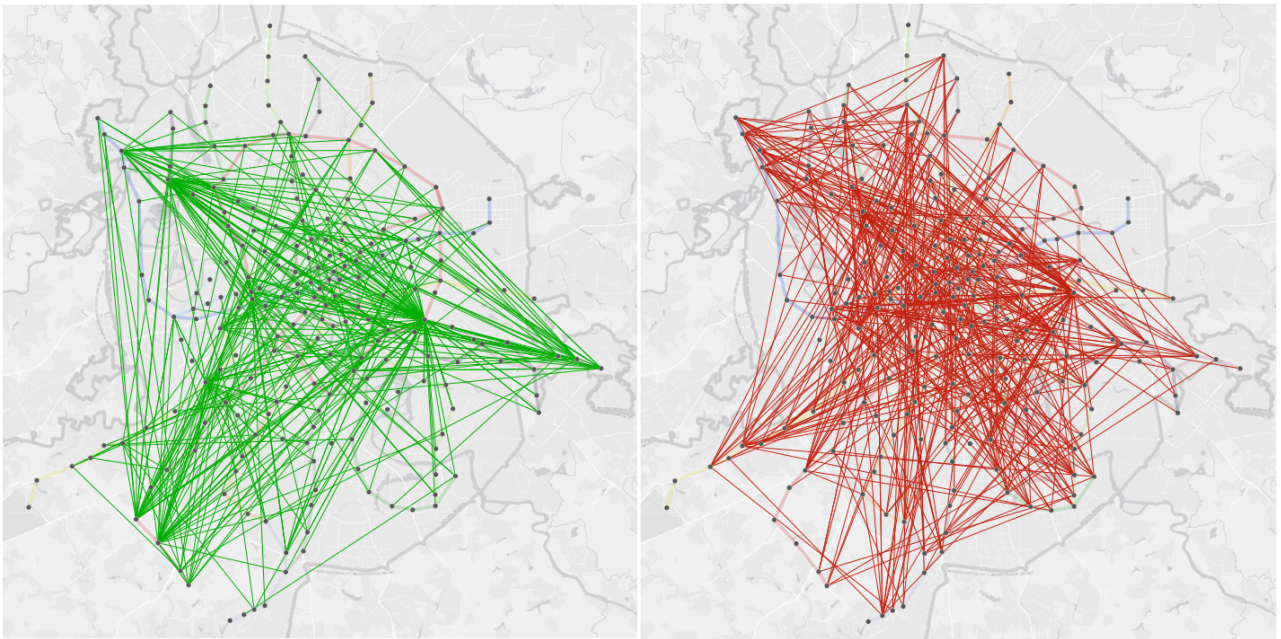


Рисунок 34. Направления с наибольшими относительными изменениями среднесуточных значений интенсивности пассажиропотока между будними днями IV квартала 2019 г. и IV квартала 2023 г. а) 1% направлений с максимальным ростом, б) 1% направлений с максимальным падением.

Составлено автором.

Далее рассмотрим изменение пассажиронапряженности по сравнению с 2019 г. Так же, как и структура интенсивности пассажиропотока, пространственная структура этих показателей осталась без существенных изменений за исключением появления хордовых связей вдоль Большой кольцевой линии, а также на северном участке МЦК (рисунок 35-в). Граф наиболее напряженных направлений (рисунок 36-в) по-прежнему состоит из множества компонентов, однако главный компонент значительно увеличился в двух секторах: северо-западном, поглотив участки Таганско-Краснопресненской и Большой Кольцевой линий, а также в восточном, поглотив направления от станций (узлов) Калининской и Таганско-Краснопресненской линии.

Получившаяся пространственная структура практически идентична только что рассмотренному показателю (рисунки 35-а и 35-б): направления с наибольшим ростом сконцентрированы вокруг ранее перечисленных узлов. Незначительные изменения есть лишь в южном и юго-западном секторе, что связано с существенным сокращением протяженности большинства хордовых направлений, проходящих здесь. Однако, можно убедиться, что фактор увеличения связности сети не стал определяющим в перераспределении пассажиропотока.

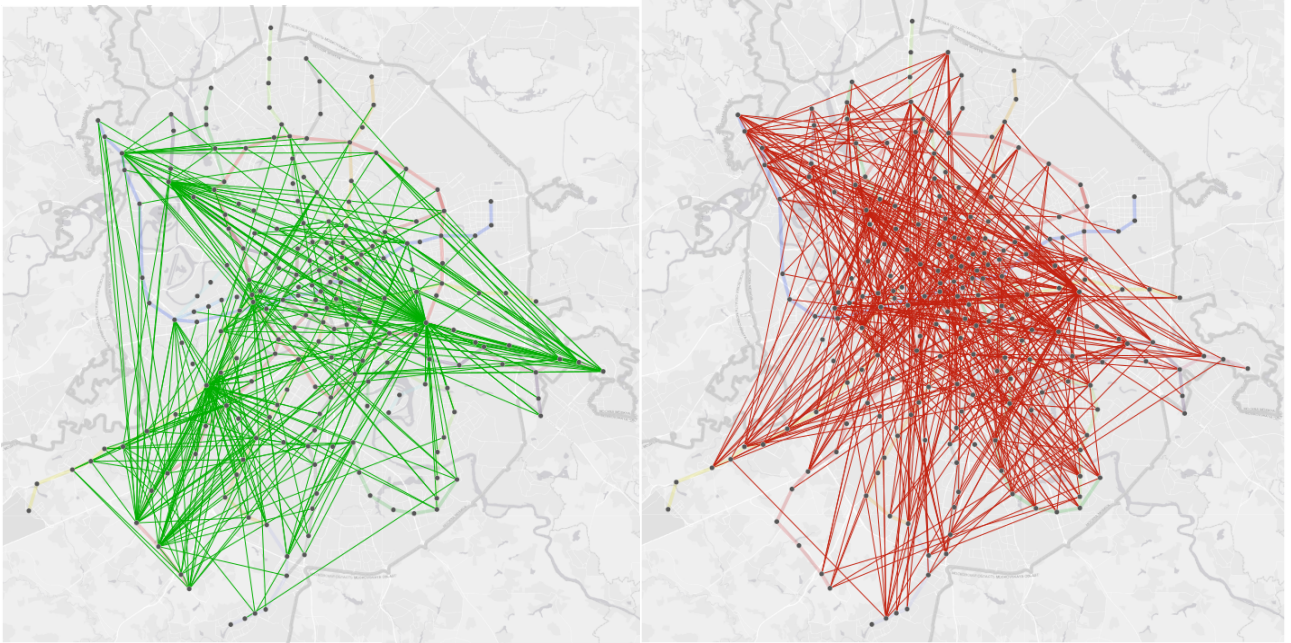


Рисунок 35. Направления с наибольшими относительными изменениями среднесуточных значений пассажиронапряженности между будними днями IV квартала 2019 г. и IV квартала 2023 г. а) 1% направлений с максимальным ростом, б) 1% направлений с максимальным падением.

Составлено автором.

В выходные дни IV квартала 2023 г, так же, как и в будние, заметно выделяются хордовые направления (рис. 29-г). Сеть направлений с наибольшей интенсивностью, по сравнению с выходными днями IV квартала 2019 г также видоизменилась: на северо-западном участке Замоскворецкой линии значительно выросло количество высокоинтенсивных направлений, кроме этого, гораздо сильнее выражен концентрации направлений к/от станции ВДНХ (рис. 30-г). По всей видимости, с течением времени одноименный парк в зоне обслуживания станции становится все более сильной точкой притяжения пассажиров в выходные дни. Однако иных значительных изменений концентрации высокоинтенсивных направлений не установлено.

С падением общего объема пассажиропотока заметно снизилась пассажиронапряженность в абсолютных значениях (рис. 31-г). Однако, если рассматривать только самые высоконапряженные направления (рис. 32-г), то можно увидеть, насколько в реальности поменялась пространственная структура: при практически полном отсутствии изменений в центре ядра агломерации, при удалении от него налицо увеличение пассажиронапряженности практически во всех секторах. Однако, центральный компонент

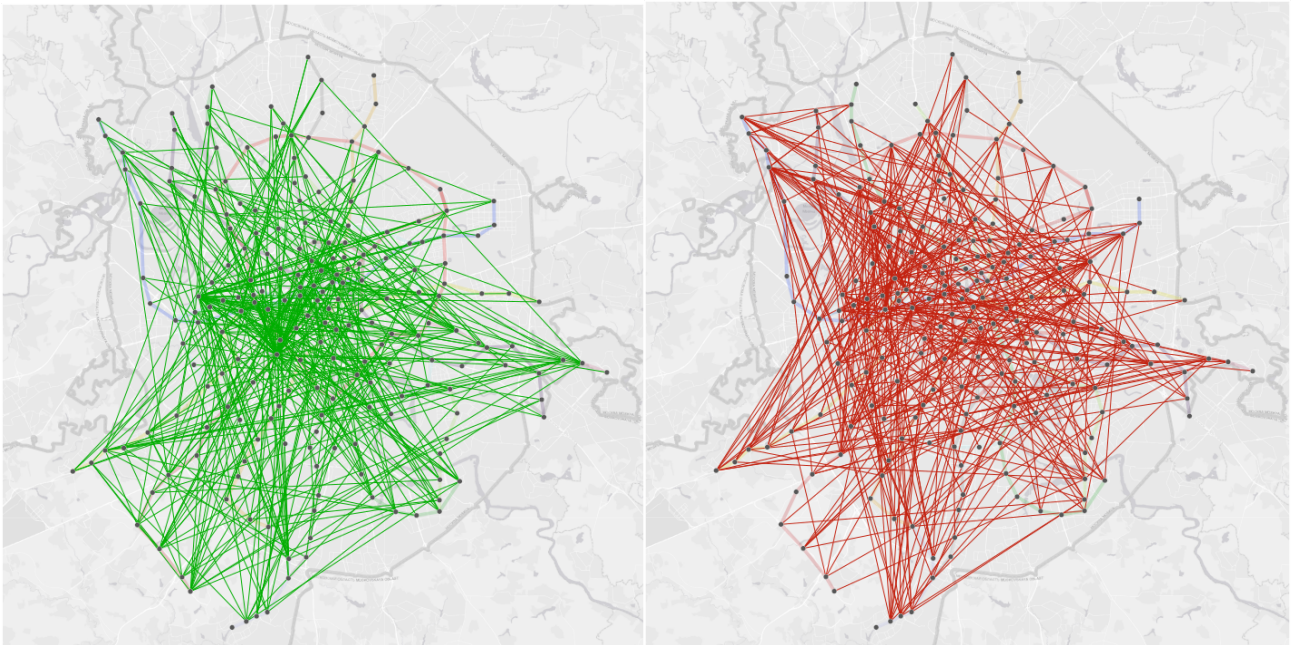
также сросся с некоторыми радиальными направлениями. Таким образом, установлено перераспределение пассажиронапряженности в сторону окраин, что может говорить о еще большем увеличении количества поездок на локальных направлениях, причем в любой зоне ядра агломерации.

В выходные дни относительное изменение значений исследуемых показателей во многом схоже с тем, как оно происходило в будни. Помимо прочих, обращает на себя внимание узел Дубровка, где именно в выходные дни наблюдается высокая концентрация таких направлений. Подробнее изменение структуры пассажиропотока этого узла будет проанализировано в главе 3.

**Анализ сезонных изменений.** В рабочие дни лета по сравнению с осенним периодом не замечено крупных изменений пространственной структуры распределения интенсивности, и пассажиронапряженности, несмотря на ранее выявленные станции с более ярко выраженным сезонным изменением входящего объема пассажиропотока (рис.29-д, 30-д, 31-д и 32-д).

Серьезных изменений в пространственной структуре интенсивности между выходными днями IV квартала 2022 г. и лета 2023 г. также не выявлено. Однако, можно обратить внимание на изменение пассажиронапряженности: в то время как в восточном секторе напряженность снизилась, рост наблюдается в юго-западном секторе: заметно больше высоконапряженных направлений выявлено от/к станциям Сокольнической линии и МЦК (рис. 29-е, 30-е, 31-е и 32-е).

Наибольший относительный рост интенсивности фиксируются вокруг станций Воробьевы горы и Терехово (рис. 36-а), а в выходные дни – (рис. 37-а) к ним добавляются узел Лужники/Спортивная и станция Спартак. Если сезонное увеличение интенсивности к станциям (узлам) Воробьевы горы и Лужники/Спортивная вполне объяснимо, то кейс станций Терехово и Спартак не столь однозначен. В зоне обслуживания обеих станций расположены обширные зоны рекреации (около станции Спартак – крупный футбольный стадион), а также крупные строящиеся селитебные зоны. Трудно сказать, как именно формируется пассажиропоток этих станций без проведения дополнительных полевых исследований. Среди направлений с наибольшим падением в будние дни явных узлов концентрации направлений не наблюдается (рис. 36-б), а в выходные дни хорошо видно большое количество направлений к/от станции Мякинино. Кроме этого, немало направлений концентрируется около станций участка Солнцевской линии, проходящим за пределами МКАД, а также узла Деловой центр.

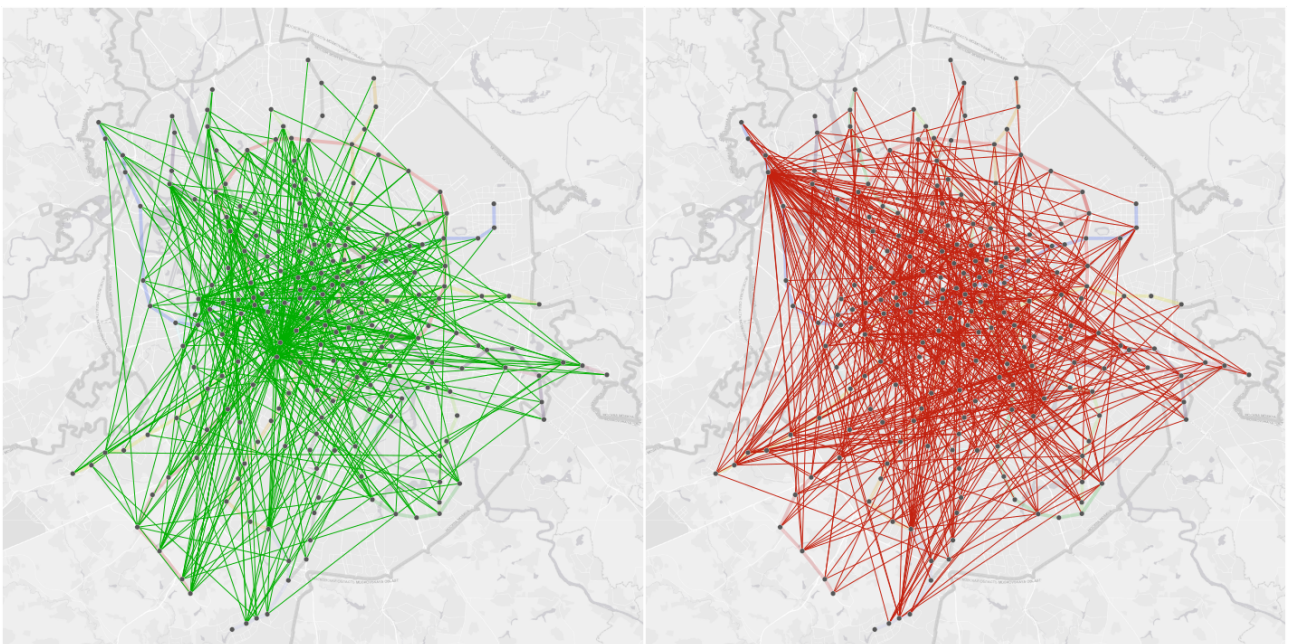


а)

б)

Рисунок 36. Направления с наибольшими относительными изменениями среднесуточных значений интенсивности пассажиропотока между будними днями IV квартала 2022 г. и лета 2023 г. а) 1% направлений с максимальным ростом, б) 1% направлений с максимальным падением.

Составлено автором.



а)

б)

Рисунок 37. Направления с наибольшими относительными изменениями среднесуточных значений интенсивности пассажиропотока между выходными днями IV квартала 2023 г. и лета 2023 г. а) 1% направлений с максимальным ростом, б) 1% направлений с максимальным падением.

Составлено автором.

## 2.3 Мощность пассажиропотока

Напомним, что мощность пассажиропотока измеряется как количество пассажиров, перемещающихся через измеряемый створ в заданный промежуток времени. Однако, не проводя полевых замеров, имеется возможность рассчитать мощность пассажиропотока как сумму интенсивности пассажиропотока всех направлений, проходящих через створ. Для текущего исследования в качестве створа используются перегоны между двумя соседними станциями (узлами).

Результаты расчета среднесуточной суммарной интенсивности по каждому перегону представлены на рис. 38. Отметим яркое центростремительное увеличение показателя с приближением от окраин к центру ядра агломерации. Однако, есть несколько деталей, демонстрирующих секторальную неравномерность распределения. Во-первых, на ряде линий с приближением к центру на участках после Московского Центрального кольца мощность потока вопреки всеобщему тренду незначительно, но ослабевает. Речь о южных участках Сокольнической, Калужско-Рижской и Серпуховско-Тимирязевской линии, а также западном участке Филевской линии и северо-западном участке Таганско-Краснопресненской линии. Помимо исходящего объема пассажиропотока, формирующегося в узлах пересечения этих линий с МЦК, заметная часть пассажиров совершают пересадку. В то время как, в остальных секторах подобного не наблюдается. Заметим, что часть МЦК, пересекающая описанные линии, проходит наиболее близко к центру, чем и объясняется заметно более высокая мощность этого участка. Во-вторых, несмотря на то, что к топологическому центру сети – узлу Охотный Ряд/Площадь Революции/Театральная подходят участки с высокой мощностью, наибольшая зафиксирована за пределами третьего топологического яруса – на участке Крестьянская Застава/Пролетарская – Марксистская/Таганская, а также на южном участке Кольцевой линии. Так же, как и на МЦК, у Кольцевой линии отметим неравномерную мощность на разных участках. При этом у Кольцевой линии между участками с минимальной и максимальной мощностью разница составляет более, чем в 6 раз. В-третьих, протяженность наиболее загруженных участков от линии к линии неодинакова. Наиболее протяженные участки с

относительно высокой (более 400 тыс. пассажиров/сутки) мощностью начинаются от станции Молодежная на западном участке Арбатско-Покровской линии и от станции Выхино на юго-восточном участке Таганско-Краснопресненской линии.

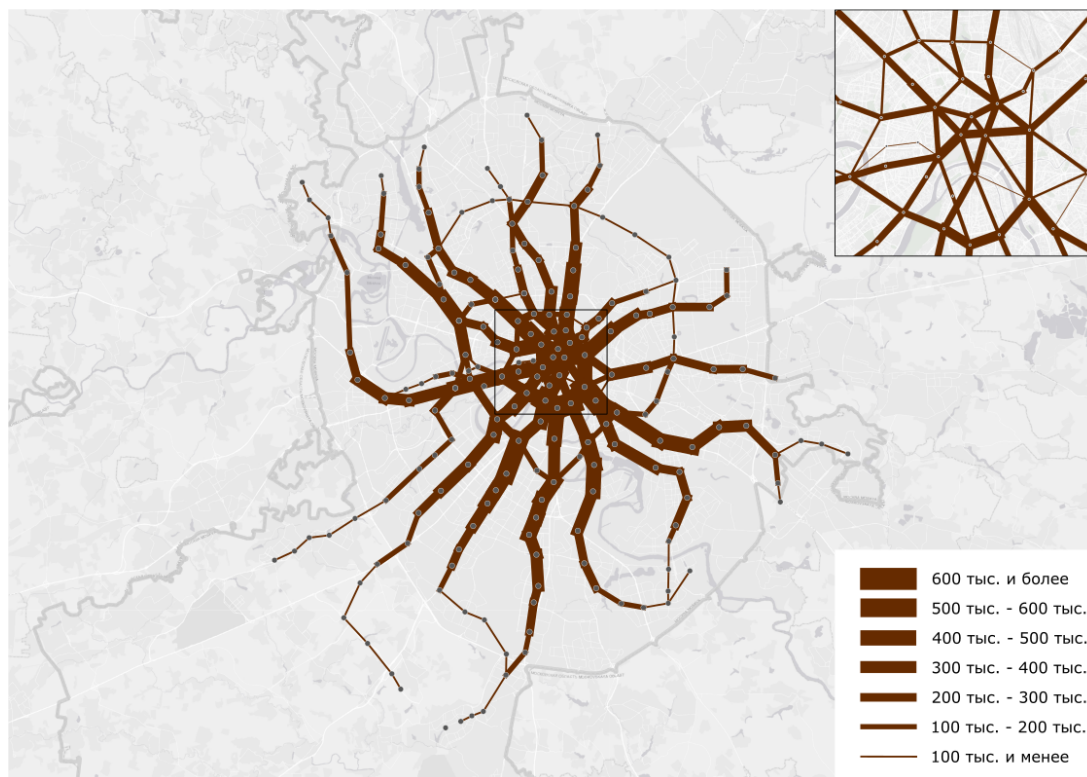


Рисунок 38. Среднесуточная мощность пассажиропотока в будние дни IV квартала 2019 г. Составлено автором.

В выходные дни IV квартала 2019 г. уменьшение мощности в связи со снижением общего объема пассажиропотока имеет практически равные пропорции по участкам сети. Однако, как можно убедиться на рис. 39, ряд участков испытывает падение мощности в гораздо меньших объемах, чем остальные. Прежде всего, речь идет об окраинных участках ряда линий (южные участки Калужско-Рижской, Серпуховско-Тимирязевской линий, Замоскворецкой и Люблинско-Дмитровской линий, юго-восточный участок Таганско-Краснопресненской линии, Некрасовская линия), а также нескольких участках около станций (узлов), которые ранее были отмечены как претерпевшие наименее значительные изменения входящего объема пассажиропотока (ЦСКА и ВДНХ). Ранее здесь также наблюдались наиболее пассажиронапряженные направления.

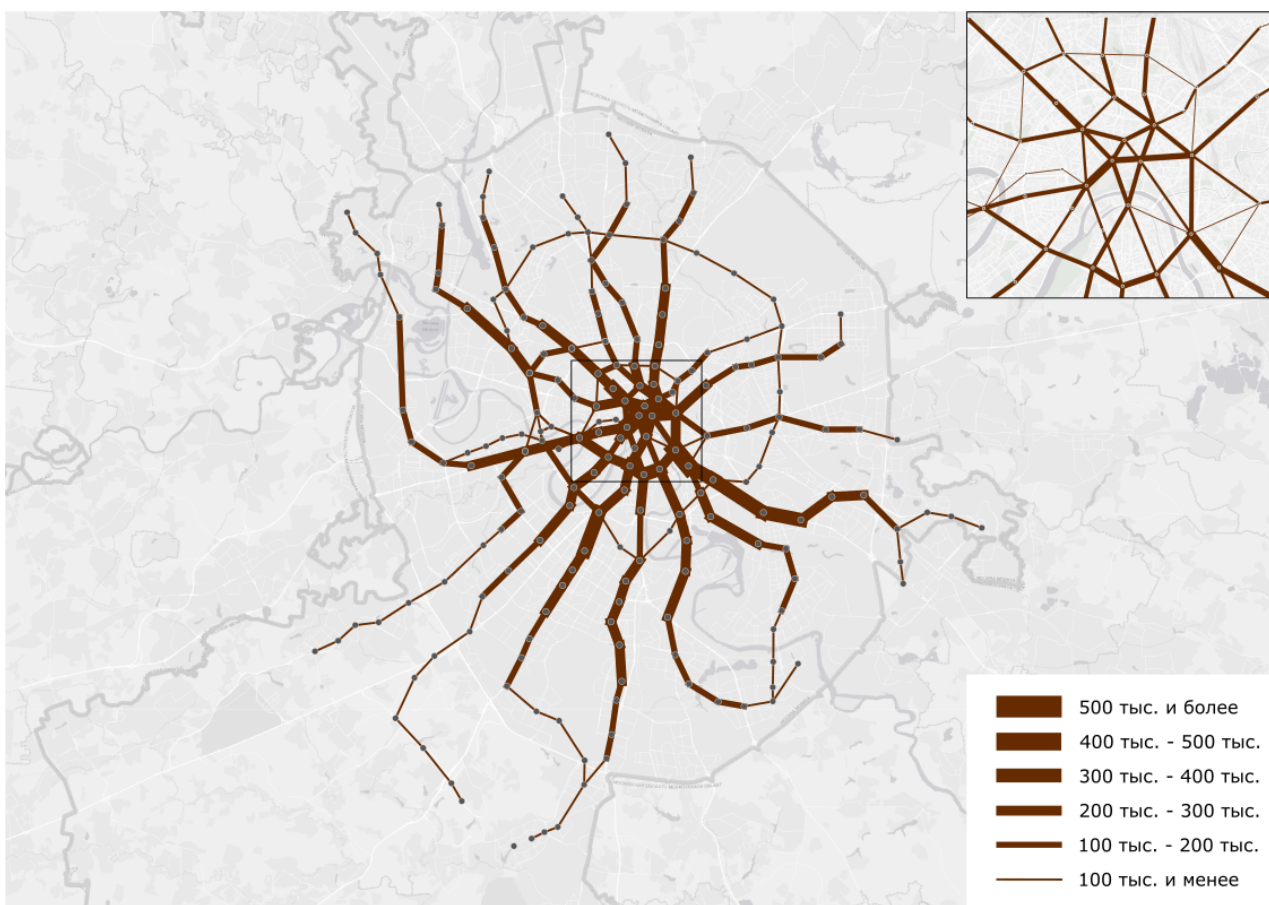


Рисунок 39. Среднесуточная мощность пассажиропотока в выходные дни IV квартала 2019 г.

Составлено автором.

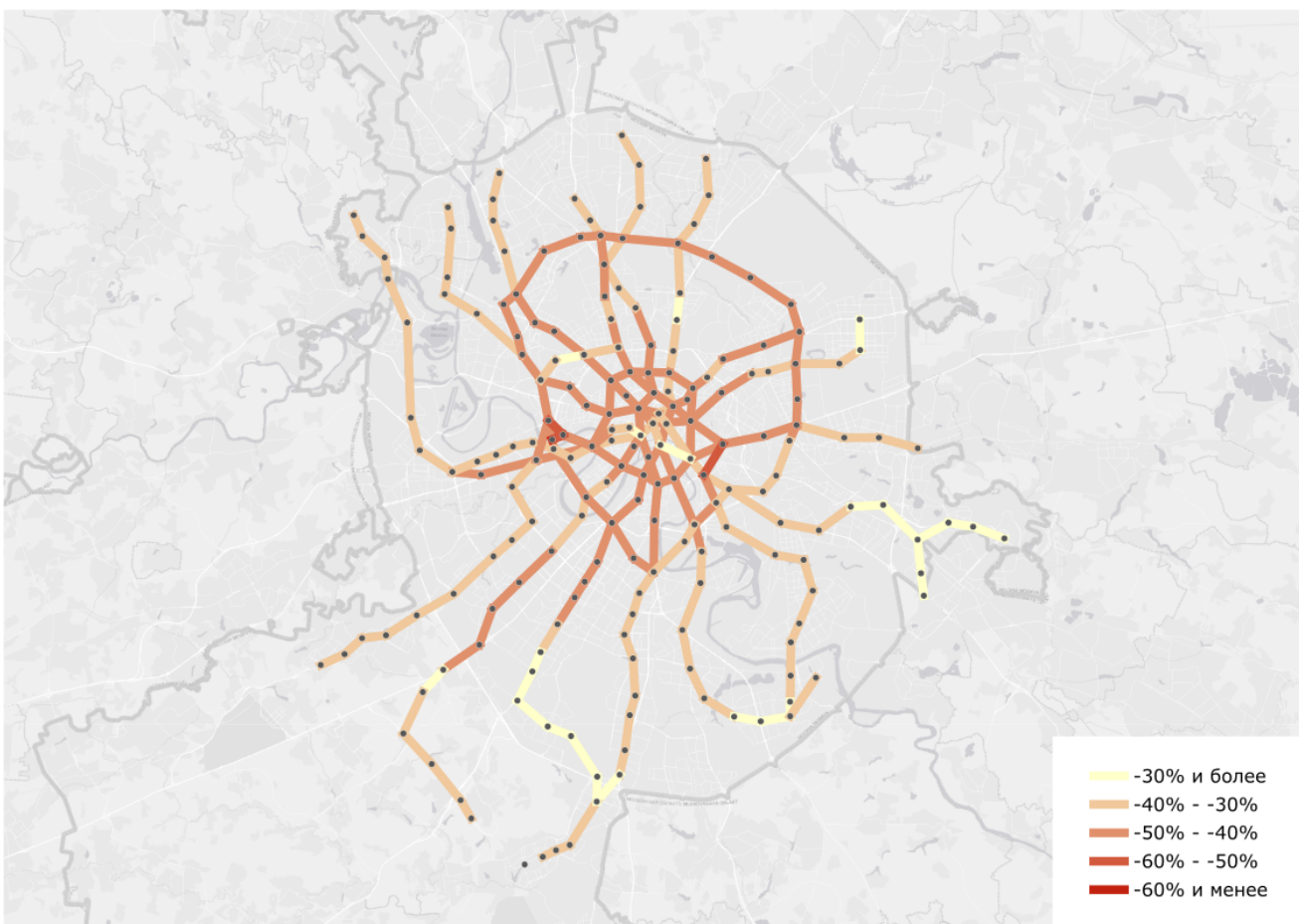


Рисунок 40. Изменение среднесуточной мощности пассажиропотока между будними и выходными днями IV квартала 2019 г.

Составлено автором.

В будние дни IV квартала 2023 г., несмотря на расширение сети, на первый взгляд коренного перераспределения мощности пассажиропотока не произошло. Наблюдается снижение абсолютных значений на большинстве направлений. Однако, анализируя относительные изменения (см. рис. 42), территориальные диспропорции видятся значительно более заметными. Они касаются, прежде всего, участков линий около пересечения с Большой Кольцевой линией в южной половине сети, а также юго-восточного участка Таганско-Краснопресненской линии, где наблюдается наиболее заметное снижение мощности. Кроме этого, в среднем относительное уменьшение более заметно с приближением к центру сети, а также в ее восточной половине. Наименее подвержены изменениям окраинные участки линий. Увеличение значений мощности, в соответствии с увеличением входящего объема пассажиропотока, наиболее характерно прежде всего для относительно недавно введенных в эксплуатацию участков сети.

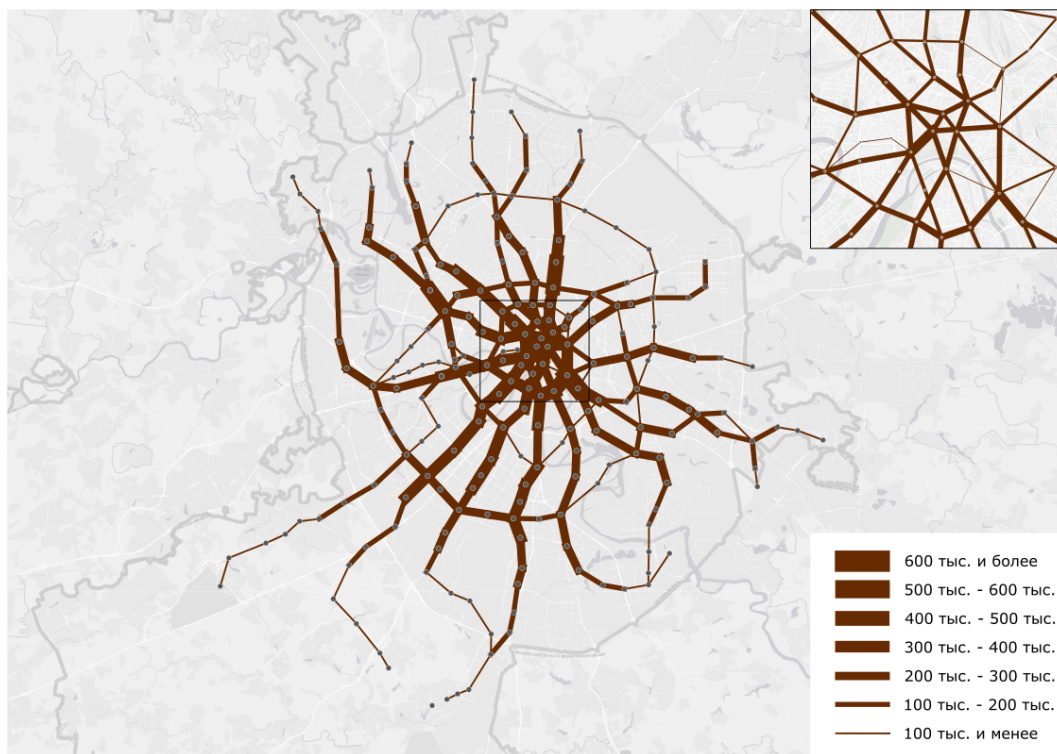


Рисунок 41. Среднесуточная мощность пассажиропотока в будние дни IV квартала 2023 г. Составлено автором.

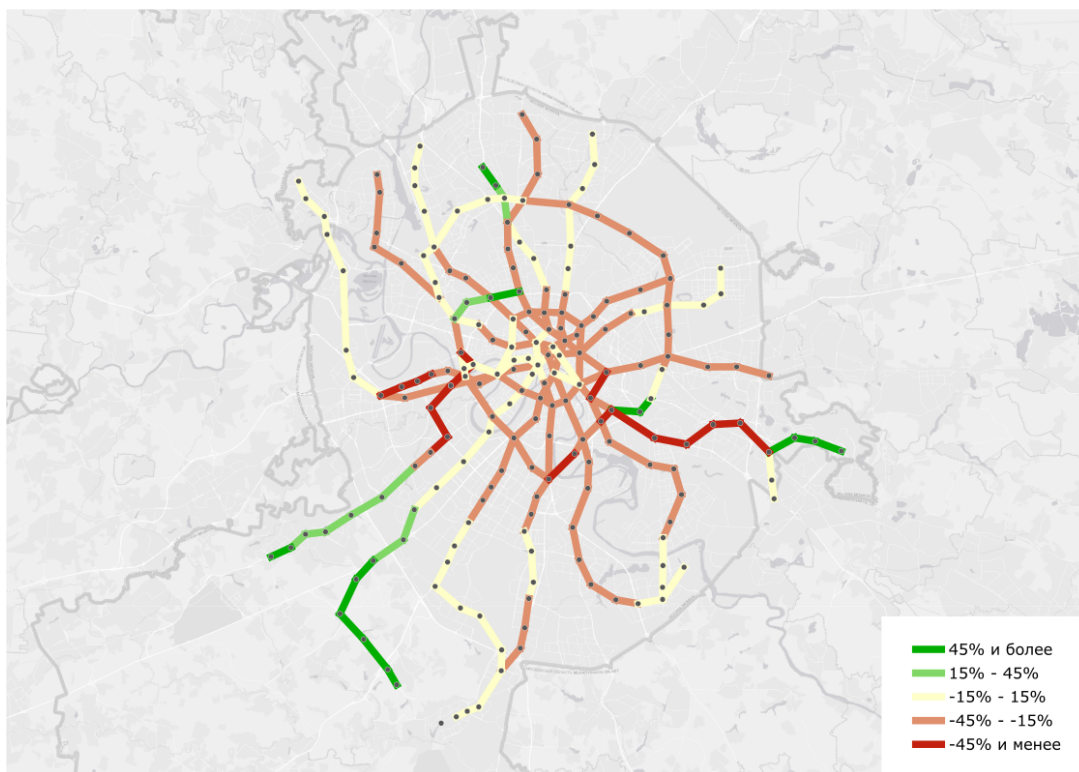


Рисунок 42. Изменение среднесуточной мощности пассажиропотока между будними днями IV квартала 2019 г. и IV квартала 2023 г. Составлено автором.

В выходные дни IV квартала 2023 г. в первые за все ранее рассмотренные временные срезы участок сети с наибольшей мощностью пассажиропотока наблюдается вне центра ядра агломерации (рис. 43). Речь идет про участок Проспект Мира – ВДНХ. Абсолютно закономерно видеть именно этот участок на первом месте по мощности, поскольку ранее станция ВДНХ была выделена как один из лидеров по входящему объему пассажиропотока, кроме этого, ряд направлений от/к ней отмечены как наиболее интенсивные и напряженные. Кроме этого, характерно существенное сглаживание различий в мощности на радиальных линиях с приближением к центру.



Рисунок 43. Среднесуточная мощность пассажиропотока в выходные дни IV квартала 2023 г.

Составлено автором.

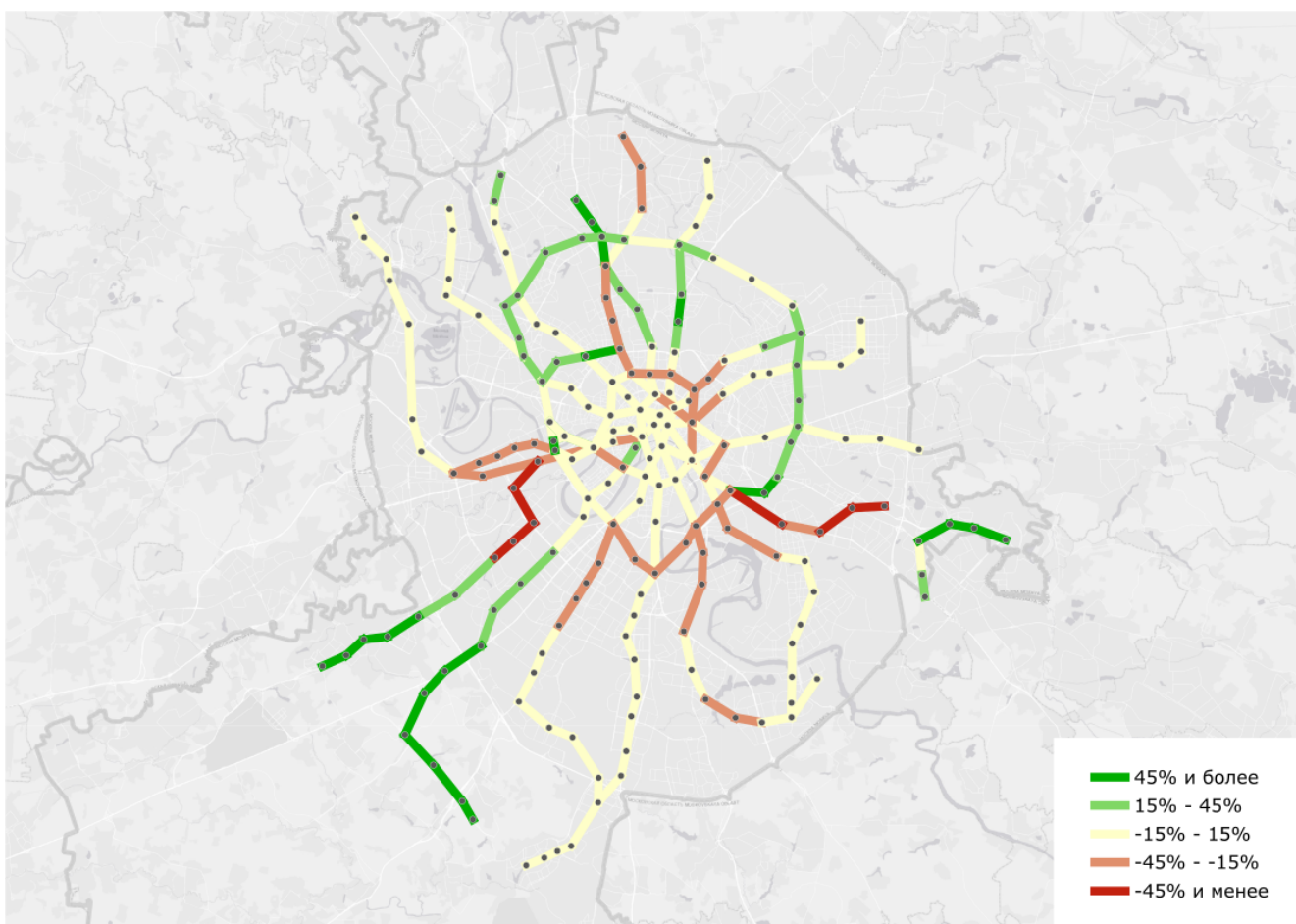


Рисунок 44. Изменение среднесуточной мощности пассажиропотока между выходными днями IV квартала 2019 г. и IV квартала 2023 г.

Составлено автором.

Несмотря на падение общего среднесуточного пассажиропотока в будние дни лета по сравнению с будними днями IV квартала 2023 г. на, распределение изменения мощности крайне неравномерно (рис. 47). Большая часть радиальных линий испытывает заметное снижение мощности (на 15% и более), однако есть участки, где в летнее время сохранились эквивалентные значения (южный участок Замоскворецкой линии, юго-восточный участок Таганско-Краснопресненской линии). Вероятно, что участки с наибольшими изменениями маркируют наиболее вовлеченные в ежедневные трудовые миграции, которые закономерно претерпевают снижение в летний сезон. Из этого можно сделать вывод, что поездки, совершаемые пассажирами на линиях, где не наблюдается столь явное снижение пассажиропотока, в среднем чаще имеют нетрудовые мотивы. Особенно это предположение логично, если рассмотреть юго-западные окраинные участки, где теоретически доля трудовых

поездов между станциями этих участков минимальна. Пространственное распределение изменений между выходными днями IV квартала 2023 г. и лета 2023 г. за исключением еще нескольких участков радиальных линий совпадает (рис. 48), тем самым подтверждая предположение о наличии участков со сравнительно более высокой активностью в летнее время.

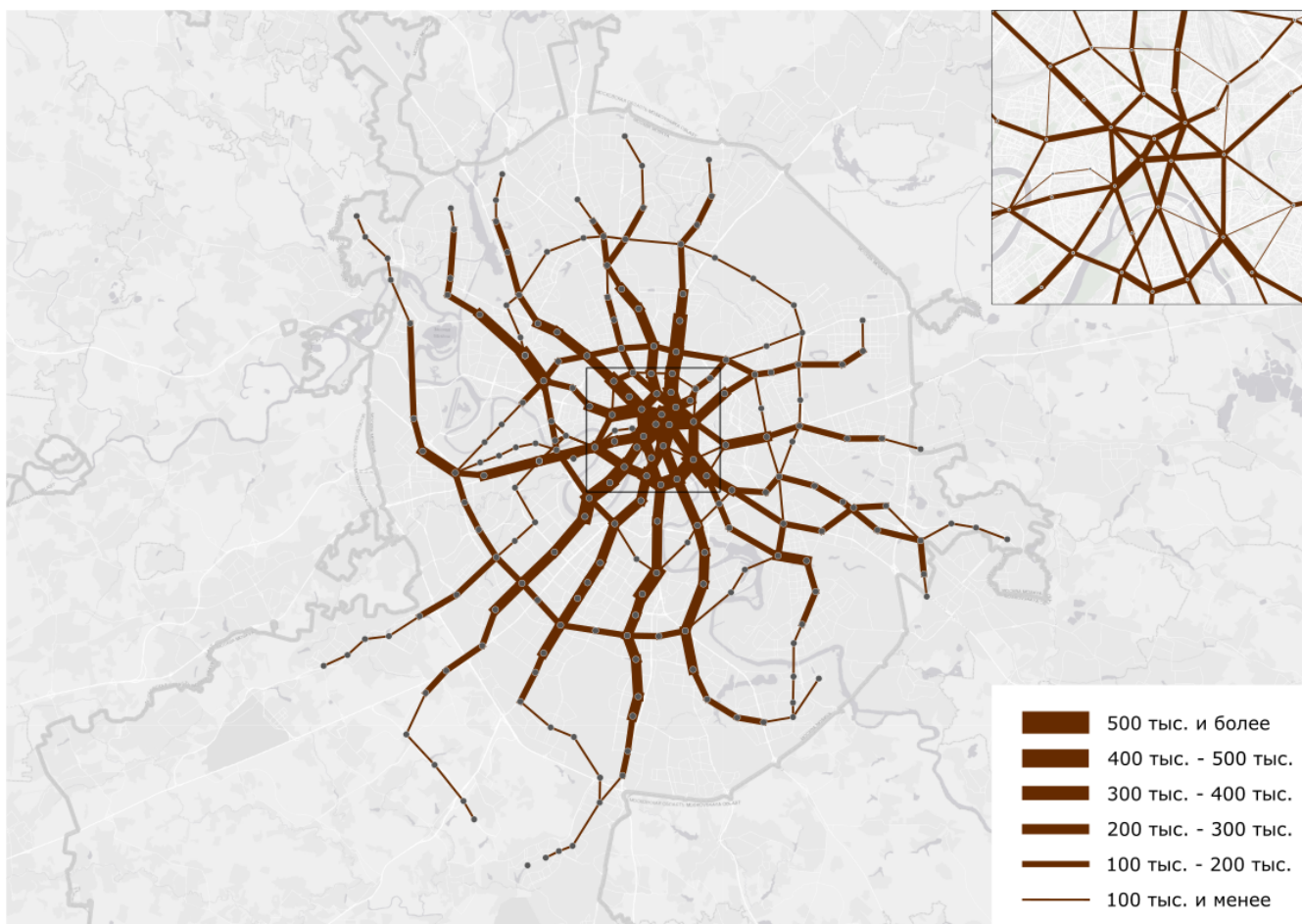


Рисунок 45. Среднесуточная мощность пассажиропотока в будние дни лета 2023 г.

Составлено автором.



Рисунок 46. Среднесуточная мощность пассажиропотока в выходные дни лета 2023 г.  
Составлено автором.

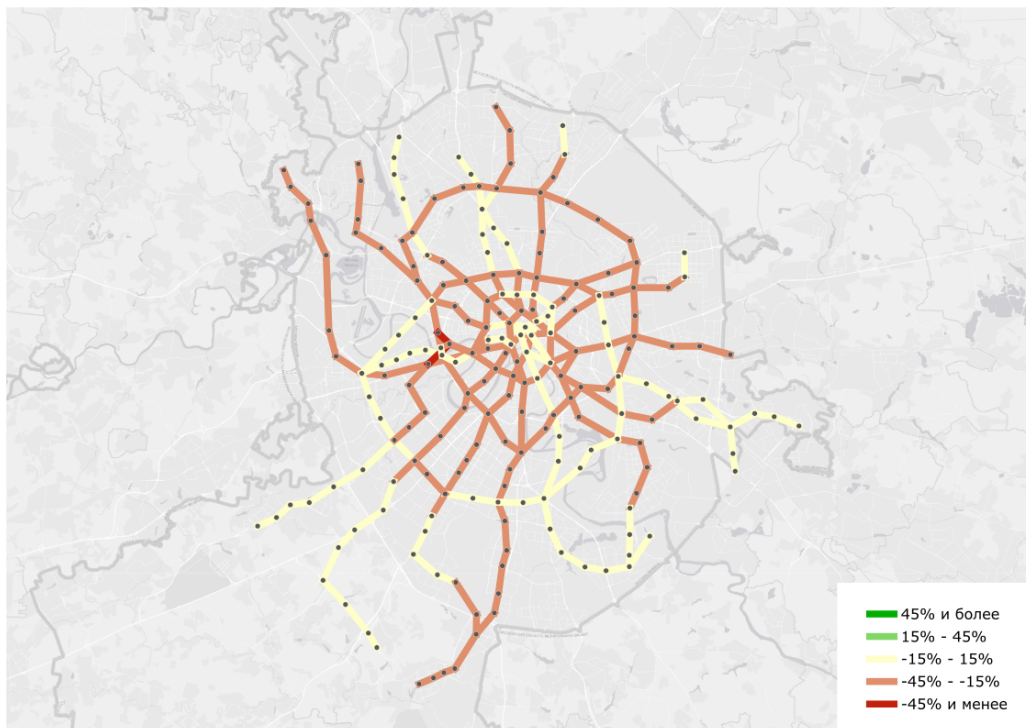


Рисунок 47. Изменение среднесуточной мощности пассажиропотока между будними днями IV квартала 2023 г. и лета 2023 г. Составлено автором.

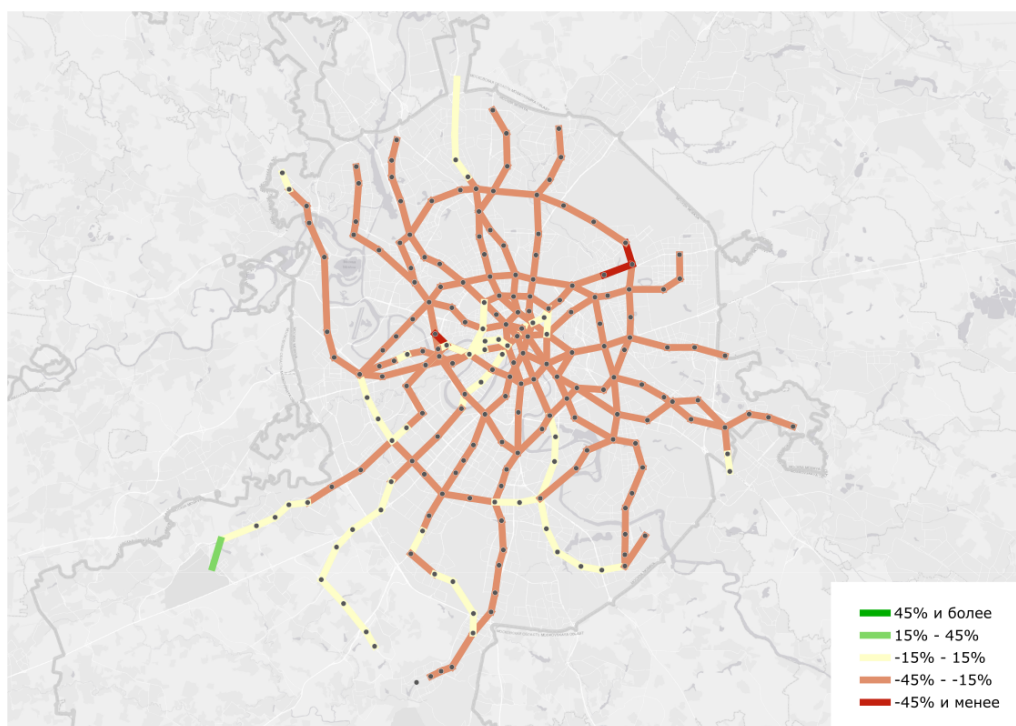


Рисунок 48. Изменение среднесуточной мощности пассажиропотока между выходными днями IV квартала 2022 г. и IV квартала 2023 г. Составлено автором.

**Выводы к главе 2.** Входящий объем пассажиропотока станций Московского метрополитена имеет четкую пространственную структуру, соответствующую модели "центр-периферия". Наибольший входящий объем наблюдается на станциях, расположенных в пределах третьего топологического яруса сети. Станции, входящие в состав крупных транспортных хабов, также характеризуются высокими значениями входящего пассажиропотока. В целом, пространственная структура распределения входящего объема пассажиропотока сохраняется во времени, однако наблюдаются изменения в абсолютных значениях, связанные с развитием транспортной сети.

Анализ интенсивности пассажиропотока и пассажиронапряженности направлений Московского метрополитена показал, что наиболее интенсивные и напряженные направления сосредоточены в центральной части ядра агломерации, а также на направлениях, соединяющих центр с локальными субцентрами на периферии. Выявлена тенденция к росту роли хордовых направлений, связывающих смежные сектора города, что может свидетельствовать о начале полицентрализации пространственной структуры поездок.

Мощность пассажиропотока Московского метрополитена имеет центростремительную структуру, с максимальными значениями в центре ядра агломерации. Однако, обнаружены

такие особенности, как ослабление мощности на участках линий после пересечения с Московским центральным кольцом, а также неравномерность мощности на разных участках Кольцевой линии.

Описанные выше закономерности дают общее представление о пространственно-временном распределении пассажиропотока в Московском метрополитене, однако обнаруживается множество важных деталей при погружении на более глубокий уровень исследования – анализа структурных параметров и иерархичности пассажиропотока, результаты которого описаны в главе 3.

## **Глава 3. Пространственный анализ структурных параметров пассажиропотока. Пространственная модель пассажиропотока Московского метрополитена.**

Первый раздел этой главы посвящен изучению структурных параметров пассажиропотока, дающих представление о неравномерности поездок в зависимости от расположения начальных точек совершаемых пассажирами корреспонденций. Отдельно обращается внимание на главные направления (направления, доминирующие по интенсивности пассажиропотока), пространственная структура которых формирует иерархию станций (узлов), изученную в разделе 3.2. Раздел 3.3 подводит итог всего исследования. В нем исследуются сочетания всех ранее изученных параметров, устанавливаются ключевые элементы пространственной модели пассажиропотока московского метрополитена, а также их устойчивость во времени.

### **3.1 Пространственный анализ структуры пассажиропотока станций московского метрополитена по территориальному признаку**

**Параметризация структуры пассажиропотока станций (узлов) по территориальному признаку. Пространственное распределение структурных параметров.** В ходе исследования нами неоднократно была предложена гипотеза о взаимосвязи между интенсивностью пассажиропотока и протяженностью кратчайшего маршрута направления. Результаты представлены на рис. 49.

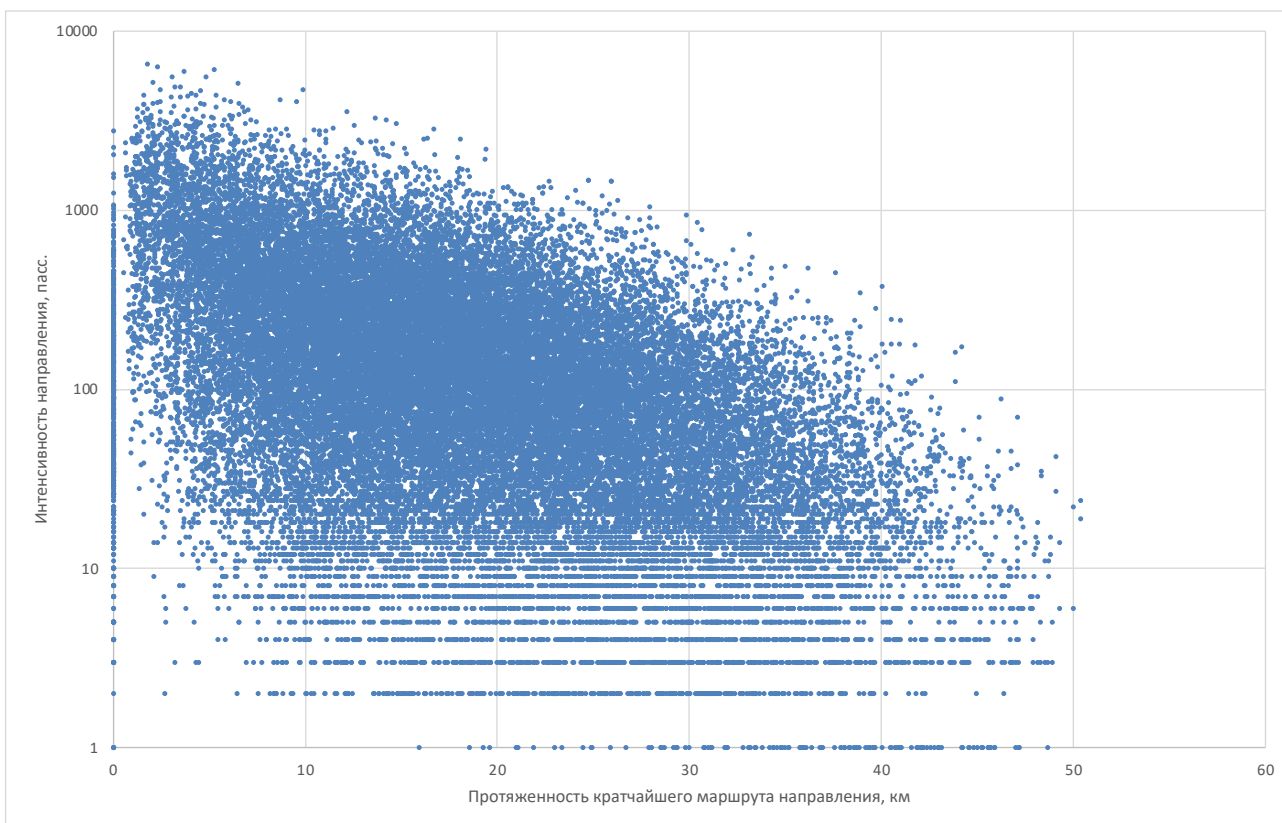


Рисунок 49. Соотношение протяженности маршрута корреспонденции и интенсивности пассажиропотока. Составлено автором по усредненным данным за будние дни IV квартала 2019 г.

Как и предполагалось, взаимосвязь этих параметров имеет обратную зависимость. Коэффициент корреляции Пирсона составляет  $-0,41$ . Однако использовать именно этот показатель для оценки степени взаимосвязи не вполне корректно: из рисунка видно, что распределение имеет отрицательный экспоненциальный тренд, соответственно разумнее применять коэффициент корреляции рангов, например Спирмена. В данном случае он составляет  $-0,48$ . Вероятно, что сравнительно невысокое значение показателя говорит о том, что присутствует заметное количество наблюдений, где при небольшой протяженности маршрута наблюдаются и небольшие значения интенсивности. Таким образом, нельзя однозначно говорить о влиянии расстояния поездки на интенсивность: пространственная структура поездок сложнее, чем простая линейная зависимость двух показателей, и предопределена иными факторами, вероятно лежащими в области анализа транспортного поведения пассажиров.

Несмотря на заметную величину дисперсии данных, установленную благодаря значению коэффициента корреляции и диаграмме рассеяния, можно предположить, что группировка направлений по станциям отправления может дать различную степень взаимосвязи длины направления с интенсивностью пассажиропотока. Представляется разумным рассчитать множество частных коэффициентов корреляций Пирсона для массива наблюдений, сгруппированных по станциям отправления и оценить пространственное положение узлов с теми или иными значениями показателя. Сравнительно высокая степень статистической взаимосвязи может наблюдаться прежде всего у станций, расположенных на дальней периферии ядра агломерации, а также от станций-локальных субцентров по объему входящего пассажиропотока, поскольку, наиболее вероятно, что поездки от этих станций совершаются преимущественно по направлению к центру, с преодолением значительного расстояния. Также высокая степень взаимосвязи может быть обнаружена у станций в центре ядра агломерации, где напротив – преимущественно совершаются поездки на короткие расстояния.

На рис. 51-а видно, что станции со сравнительно высокими значениями степени взаимосвязи размещаются в широком наборе секторов от северо-западного (Арбатско-Покровская линия) через юг до юго-восточного (Некрасовская линия). В то время, как относительно низкие значения расположены преимущественно в северо-восточной половине от центра (включая также сам центр). Отчасти, гипотеза, выдвинутая нами выше, подтвердилась – станции, расположенные на дальней периферии, действительно имеют более высокие значения коэффициента корреляции. В качестве примера можно обратить внимание на соотношение двух показателей на примере окраинной станции Пятницкое шоссе (см. рис. 50), у которой зафиксирована строгая степенная зависимость значений показателей.

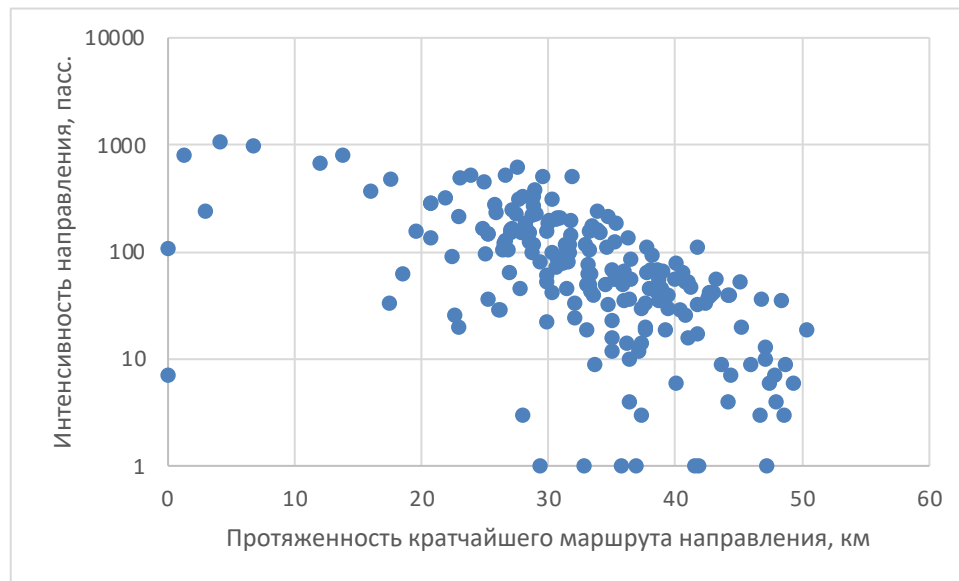


Рисунок 50. Соотношение протяженности маршрута корреспонденции и интенсивности пассажиропотока направлений, исходящих от станции Пятницкое шоссе. Составлено автором по усредненным данным за будние дни IV квартала 2019 г.

Станции в центре ядра агломерации, а также некоторые станции-локальные субцентры (Ховрино, Речной вокзал, Алтуфьево, Медведково) в противоположность гипотезе имеют более низкие значения. Обратим внимание, что значения коэффициента корреляции имеют взаимосвязь с положением станции относительно циклического остова сети: станции в его пределах, либо расположенные сравнительно рядом с ним (т.е. имеют большую степень центральности по близости, как было установлено в главе 1), имеют более низкие значения статистической взаимосвязи длины направлений и интенсивности пассажиропотока. Ранее было приведено, что центральность по близости пропорциональна сумме длин кратчайших маршрутов. Однако, отнюдь не все станции с высокой степенью центральности обладают высокими значениями суммарной интенсивности пассажиропотока (она же – входящий объем пассажиропотока), что было подробно изучено ранее.

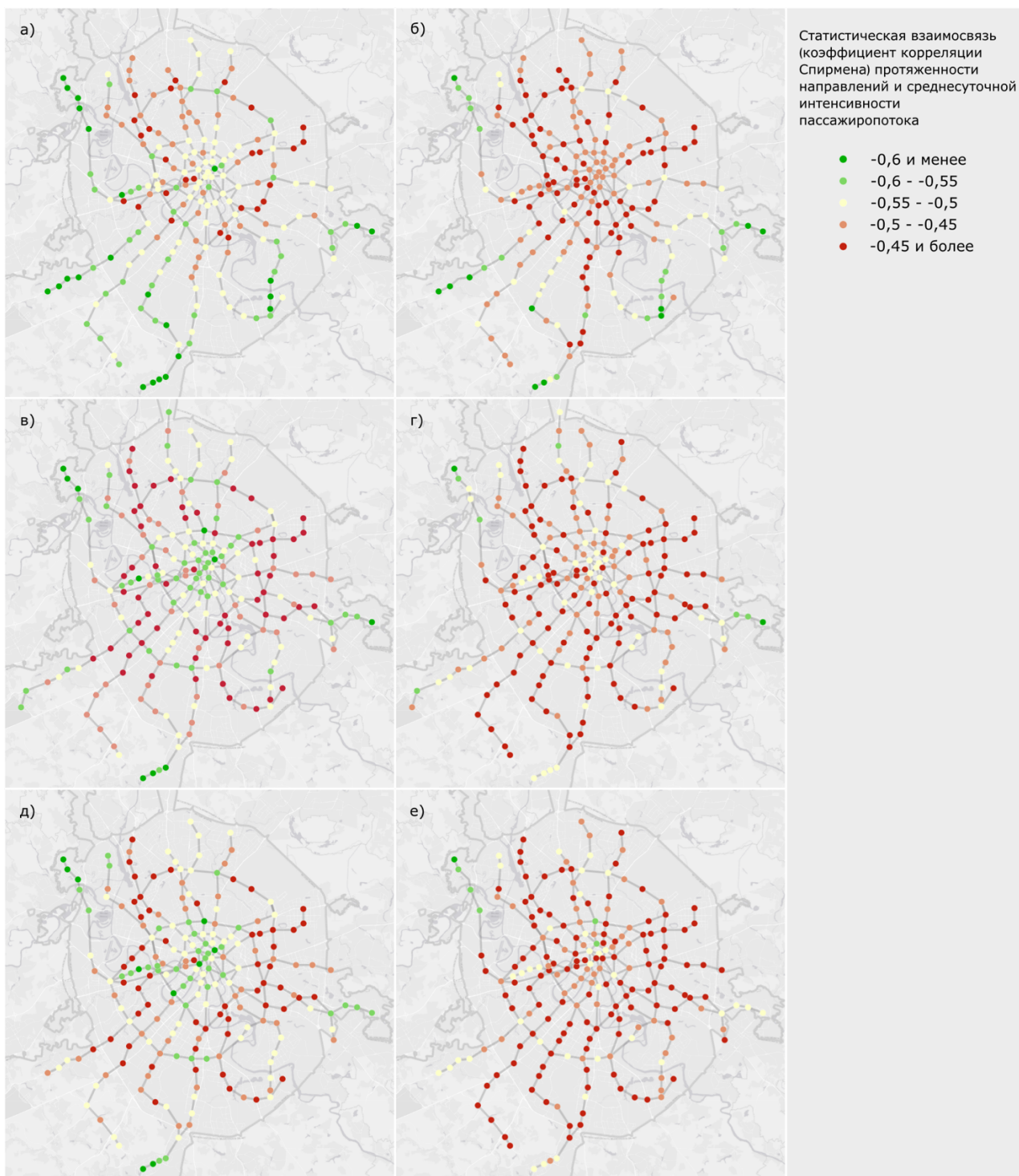


Рисунок 51. Распределение значения коэффициента корреляции длины направлений и среднесуточной интенсивности пассажиропотока в будние дни по станциям (узлам) Московского метрополитена: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

Каждая станция (узел) имеет 275 корреспонденций с остальными станциями (узлами) по состоянию на IV квартал 2019 г., а также 293 корреспонденции по состоянию на IV квартал 2023 г. Для того, чтобы оценить неравномерность распределения пассажиропотока по станциям назначения, простого сравнения долей каждого значения массива данных недостаточно. Поэтому для измерения концентрации потоков, был использован коэффициент вариации, позволяющий оценить степень разброса данных между массивами в относительных величинах, в главе 1 рассматривавшийся как способ расчета неравномерности параметров пассажиропотока во временной динамике. Благодаря тому, что коэффициент вариации – безразмерная величина, его корректно использовать в качестве сравнительной характеристики при условии однородности данных в сравниваемых массивах. Коэффициент вариации рассчитывается по формуле:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

Где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение,  $\mu$  – среднее арифметическое.

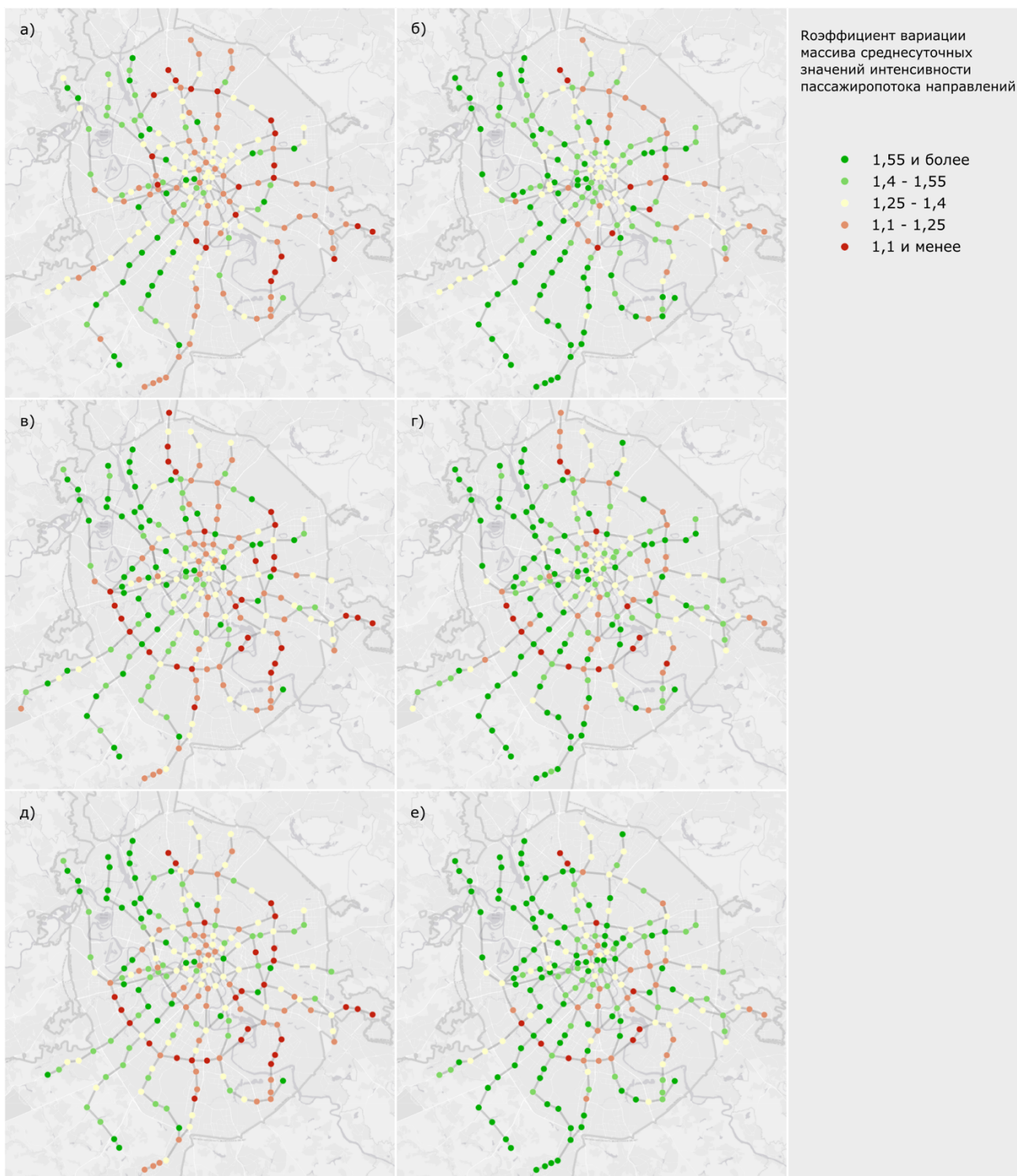


Рисунок 52. Распределение значения коэффициента вариации массива среднесуточных значений интенсивности пассажиропотока направлений, сгруппированных по станциям (узлам) Московского метрополитена: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

Результаты распределения коэффициента вариации по станциям (узлам) представлены на рис. 52-а). Характерна пространственная асимметрия размещения узлов с низкими и высокими значениями. Так, высокие значения чаще встречаются у станций юго-западных участков Сокольнической и Калужско-Рижской линий, а также северо-западных участков Замоскворецкой и Арбатско-Покровской линий. Низкие значения чаще всего встречаются у станций на участках линий, расположенных в восточной половине ядра агломерации, а также у станций с относительно небольшими значениями входящего объема пассажиропотока (Филевская линия, Солнцевская линия). Соотнося эти наблюдения с ранее полученными в ходе анализа направлений с наибольшей интенсивностью и пассажиронапряженностью, можно сделать вывод о том, что пассажиры станций, находящихся в юго-западной и северо-западной частях города чаще совершают поездки по локальным направлениям. Если обратиться к анализу доминирующих направлений, то это наблюдение подтверждается. Для примера отобраны станции Коньково (юго-западный сектор) и Речной вокзал (северо-западный сектор) с высокими значениями коэффициента корреляции, Красные Ворота и станция Маяковская со значениями, близкими к средним (центральная часть ядра агломерации), а также Новогиреево (восточный сектор) и Верхние Лихоборы (северный сектор) с низкими значениями (табл. 3).

Таблица 3. 10 направлений с наибольшей среднесуточной интенсивностью пассажиропотока в будние дни по состоянию на IV квартал 2019 г. по станциям Московского метрополитена: а) Коньково; б) Речной вокзал; в) Красные ворота; г) Маяковская; д) Новогиреево; е) Верхние Лихоборы. Составлено автором.

Станция (узел) отправления	Станция (узел) назначения	Протяженность направления, км	Интенсивность, пасс.
Речной вокзал	Балтийская (МЦК)/Войковская	4,2	3024
Речной вокзал	Сокол	6,1	2341
Речной вокзал	Водный Стадион	1,8	2225
Речной вокзал	Аэропорт	7,3	1733
Речной вокзал	Белорусская	11,4	1300
Речной вокзал	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	14,7	1083
Речной вокзал	Динамо/Петровский парк	9,3	1071
Речной вокзал	Маяковская	12,6	1006
Речной вокзал	Павелецкая	17,9	952
Речной вокзал	Пушкинская/Чеховская/Тверская	13,5	927

а)

Коньково	Тёплый Стан	1,8	2121
Коньково	Воронцовская/Калужская	2,9	1559
Коньково	Ленинский проспект/Площадь Гагарина (МЦК)	9,3	1529
Коньково	Профсоюзная	5,7	1430
Коньково	Беляево	1,2	1233
Коньково	Академическая	7,0	1124
Коньково	Новые Черёмушки	4,7	1109
Коньково	Китай-город	15,7	905
Коньково	Шаболовская	11,2	902
Коньково	Новокузнецкая/Третьяковская	14,5	876

б)

Красные ворота	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	2,4	1835
Красные ворота	Кузнецкий мост/Лубянка	1,7	1278
Красные ворота	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая	3,3	1196
Красные ворота	Сретенский бульвар/Тургеневская/Чистые пруды	0,9	1061
Красные ворота	Пушкинская/Чеховская/Тверская	2,9	950
Красные ворота	Преображенская площадь	5,4	897
Красные ворота	Красносельская	1,7	847
Красные ворота	Парк культуры	5,3	836
Красные ворота	Сокольники	3,0	712
Красные ворота	Новокузнецкая/Третьяковская	3,1	712

в)

Маяковская	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	2,1	2565
Маяковская	Новокузнецкая/Третьяковская	3,4	1859
Маяковская	Павелецкая	5,3	1722
Маяковская	Белорусская	1,2	1362
Маяковская	Пушкинская/Чеховская/Тверская	1,0	1358
Маяковская	Балтийская (МЦК)/Войковская	8,3	1196
Маяковская	Аэропорт	5,3	1150
Маяковская	Кузнецкий мост/Лубянка	2,1	1076
Маяковская	Курская/Чкаловская	4,2	1055
Маяковская	Сокол	6,5	991

г)

Новогиреево	Авиамоторная	6,5	5113
Новогиреево	Новокузнецкая/Третьяковская	12,5	2994
Новогиреево	Таганская/Марксистская	10,7	2786
Новогиреево	Павелецкая	12,1	2206
Новогиреево	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	13,0	1839
Новогиреево	Курская/Чкаловская	11,0	1818
Новогиреево	Шоссе Энтузиастов	4,6	1818
Новогиреево	Площадь Ильича/Римская	8,8	1778
Новогиреево	Новокосино	2,2	1575
Новогиреево	Белорусская	16,3	1549

д)

Верхние Лихоборы	Курская/Чкаловская	13,0	537
Верхние Лихоборы	Марьино Роща	7,8	418
Верхние Лихоборы	Трубная/Цветной бульвар	10,4	414
Верхние Лихоборы	Менделеевская/Новослободская	8,7	397
Верхние Лихоборы	Сретенский бульвар/Тургеневская/Чистые пруды	11,7	392
Верхние Лихоборы	Дмитровская	5,7	345
Верхние Лихоборы	Пушкинская/Чеховская/Тверская	11,6	336
Верхние Лихоборы	Савёловская	7,3	310
Верхние Лихоборы	Новокузнецкая/Третьяковская	13,9	296
Верхние Лихоборы	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	12,8	258

е)

Это наблюдение может говорить о том, что в этих частях ядра агломерации горожане имеют возможность закрывать больше своих повседневных потребностей в непосредственной близости от места проживания, чем жители остальных частей. Ранее при анализе функционального зонирования города как фактора распределения пассажиропотока было получено наблюдение, что прежде всего районы именно юго-западного сектора (северо-западного сектора в меньшей степени) преобладают по различным показателям качества жизни над остальными районами города. Таким образом, можно сделать предварительный вывод о косвенной связи показателей качества жизни и паттернов мобильности населения: жители районов с более высоким уровнем показателей преимущественно совершают поездки

в пределах той части города, где они проживают. Однако для его подтверждения необходимо оценить устойчивость структуры пассажиропотока во времени.

**Устойчивость структуры пассажиропотока Московского метрополитена во времени.** Как и ранее для других показателей, устойчивость структуры пассажиропотока проверяется на недельных и сезонных колебаниях, а также по окончании периода исследования.

Начнем с анализа недельных колебаний. На рис. 51-б видно, что степень статистической взаимосвязи между протяженностью направлений и интенсивностью пассажиропотока в среднем уменьшилась. Это говорит о том, что внутренняя структура отправлений значительно изменилась. Прежде всего, изменения отмечены у станций в центральной части ядра агломерации, а также в юго-западном секторе (где ранее было отмечено доминирование локальных отправлений в структуре пассажиропотока). Снова обратимся к направлениям с наибольшей среднесуточной интенсивностью для двух станций, занимающим описанное положение: Красные ворота и Коньково (табл. 4).

Таблица 4. 10 направлений с наибольшей среднесуточной интенсивностью пассажиропотока в выходные дни по состоянию на IV квартал 2019 г. по станциям Московского метрополитена: а) Красные ворота; б) Коньково.

Составлено автором.

Станция (узел) отправления	Станция (узел) назначения	Протяженность направления, км	Интенсивность, пасс.
Красные ворота	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	2,4	781
Красные ворота	Кузнецкий мост/Лубянка	1,7	541
Красные ворота	Преображенская площадь	5,4	409
Красные ворота	Красносельская	1,7	404
Красные ворота	Сокольники	3,0	377
Красные ворота	Пушкинская/Чеховская/Тверская	2,9	341
Красные ворота	Комсомольская	0,7	313
Красные ворота	Сретенский бульвар/Тургеневская/Чистые пруды	0,9	302
Красные ворота	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая	3,3	289
Красные ворота	Парк культуры	5,3	247

а)

Коньково	Тёплый Стан	1,8	2670
Коньково	Беляево	1,2	1091
Коньково	Новые Черёмушки	4,7	872
Коньково	Воронцовская/Калужская	2,9	768
Коньково	Профсоюзная	5,7	667
Коньково	Китай-город	15,7	659
Коньково	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	15,7	563
Коньково	Академическая	7,0	549
Коньково	Ясенево	4,0	528
Коньково	Новокузнецкая/Третьяковская	14,5	524

б)

Очевидно, что в структуре пассажиропотока этих станций происходят прямо противоположные процессы: распределение значений у станции Коньково поляризуется, у станции Красные Ворота, напротив, – роль доминирующего направления снижается. И то, и то приводит к тому, что взаимосвязь значений протяженности маршрутов направлений и интенсивности ослабевает.

У ряда станций не произошло значительных изменений, прежде всего это станции дальней периферии, расположенные за пределами МКАД. Это говорит о том, что как в будни, так и в выходные дни на этих станциях доминирующее положение сохраняют пассажирские потоки по магистральным направлениям.

Как только что было отмечено, на примере станций, находящихся в разных частях ядра агломерации, в выходной день одновременно отмечаются два противоположных процесса: поляризация значений у одних станций и сглаживание внутренних различий в значениях у других. Разобраться в том, как распределены эти отличия в пространстве позволит расчет коэффициента вариации по совокупности значений интенсивности пассажиропотока, сгруппированных по станциям (узлам) отправления. Результаты представлены на рис. 52-б.

В отличие от будних дней, в выходные дни высокие значения показателя распространены повсеместно. Это говорит о том, что группу приоритетных для пассажиров станций назначения становится гораздо легче идентифицировать в структуре пассажиропотока. Чтобы понять, как именно меняются территориальные различия в поездках пассажиров, разберем пример станции Борисово, на которой значение коэффициента вариации изменилось наиболее заметно.

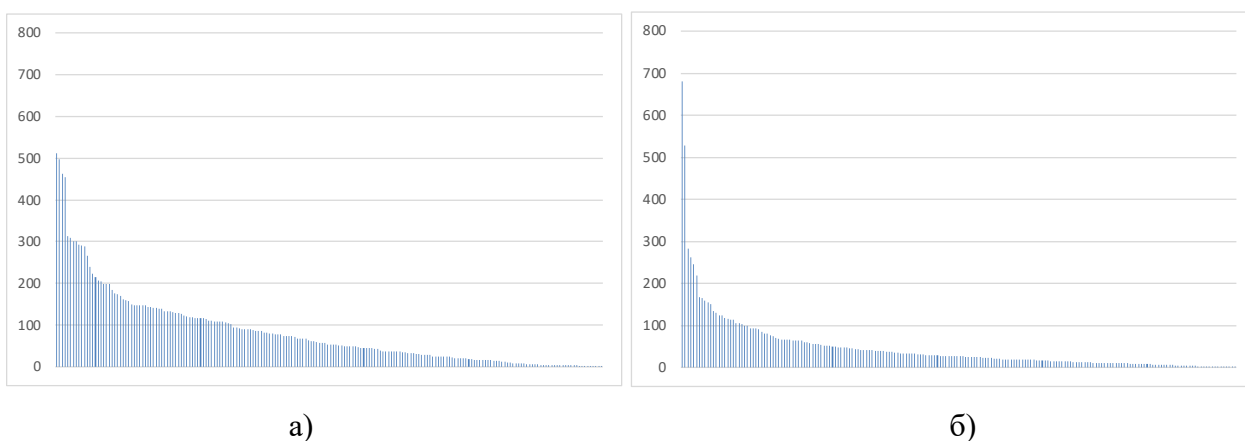


Рисунок 53. Распределение среднесуточной интенсивности пассажиропотока направлений от станции Борисово за IV квартал 2019 г.: а) в будние дни; б) в выходные дни.

Составлено автором.

В среднем за будние дни IV квартала 2019 г. со станции Борисово отправлялось 16,7 тыс. пассажиров, за выходные – 9,3 тыс. Однако, за выходные дни интенсивность потока по доминирующему направлению – Марьино – увеличилась на треть. На втором месте в будние дни – направление к узлу Курская/Чкаловская, интенсивность которого в выходные значительно сократилась – на 48%, а на второе место вышло направление к Братиславской, занимавшая 4-ое место в будние дни (интенсивность возросла на 16%). Вместе с направлением к Марьино, оно практически вдвое оторвалось от направления на третьем месте – Домодедовская. Таким образом, в выходные дни несмотря на уменьшение абсолютных значений показателей.

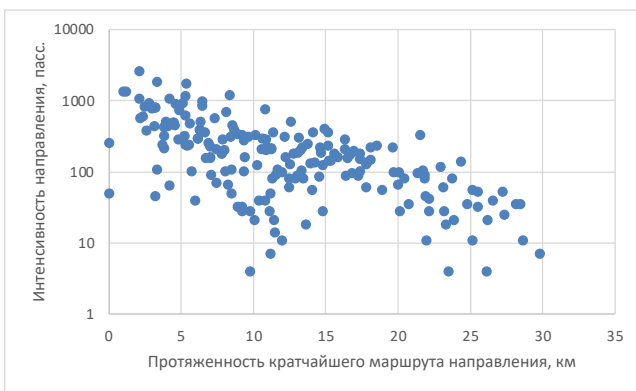
Однако, станция Борисово – один из аутсайдеров по объему входящего пассажиропотока. Она расположена на периферии ядра городской агломерации. Однако в этой же функциональной зоне города находятся станции-локальные субцентры по величине этого показателя, на которых динамика коэффициента вариации отличается. Более того, она разная даже между разными станциями этого типа: например, на Щелковской, Новокосино и Домодедовской значения увеличиваются, на Юго-Западной и Отрадное – остаются без изменений, на станции Теплый Стан – уменьшается.

Далее перейдем к анализу изменений в структуре пассажиропотока, произошедшие за период исследования. Статистическая взаимосвязь протяженности кратчайших маршрутов направлений и интенсивности пассажиропотока в будние дни IV квартала 2023 г. значительно

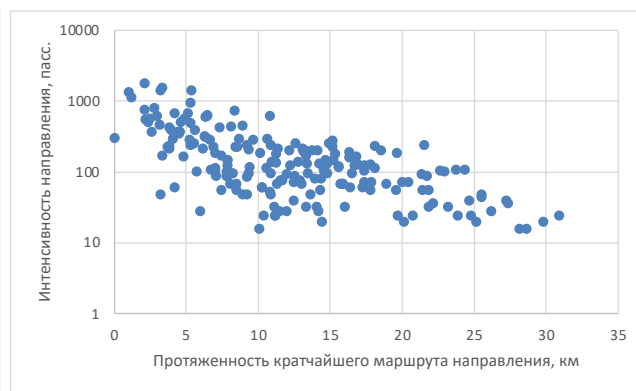
уменьшилась. Если ранее коэффициент корреляции Спирмена составлял  $-0,48$ , то теперь его значение –  $-0,37$ .

Пространственное распределение значения коэффициента корреляции заметно изменилось (рис. 51-в). Если ранее высокие значения наблюдались преимущественно у станций (узлов), находящихся на периферии циклического остова или вне него (то есть у станций (узлов) с наименее выгодным положением в сети): в юго-восточном, южном, юго-западном и западном секторах, то теперь ареал концентрации таких станций (узлов) фиксируется в центральной части сети. При этом у станций (узлов), обозначенных выше секторов, напротив, фиксируются более низкие значения показателя. Это может говорить о следующем. Как было установлено ранее, после ввода в эксплуатацию Большой Кольцевой линии, среди крупнейших по интенсивности и пассажиронапряженности не было выявлено значительного количества новых хордовых направлений (исключение составили направления, непосредственно ведущие к/от узлов на пересечении БКЛ с радиальными линиями). Таким образом, преимущественно характер перемещения пассажиров по сети метрополитена в рассматриваемых секторах, вероятно, остался прежним или изменился незначительно. Также положение в сети именно этих станций (узлов), радикально улучшилось, как было установлено в главе 1, то есть протяженность маршрута до ряда станций сократилась (при незначительном изменении интенсивности). Поэтому прежде наблюдавшаяся взаимосвязь длины направления и интенсивности пассажиропотока больше не фиксируется.

На станциях (узлах) в центре сети, а также на ее периферии в северном и северо-восточном секторах, значения коэффициента корреляции, напротив, возрастают. Согласно ранее зафиксированному тренду, это может соответствовать увеличению отрыва интенсивности пассажиропотока по направлению к близлежащим станциям (узлам) от остальных. Принимая во внимание увеличение значения коэффициента корреляции у окраинных станций в северном и северо-восточном секторе, речь идет об усилении интенсивности прежде всего на локальных направлениях. В этом можно убедиться на диаграммах рассеяния, построенных для станций Маяковская (центр ядра агломерации) и Верхние Лихоборы (северный сектор) (см. рис. 54 и 55).

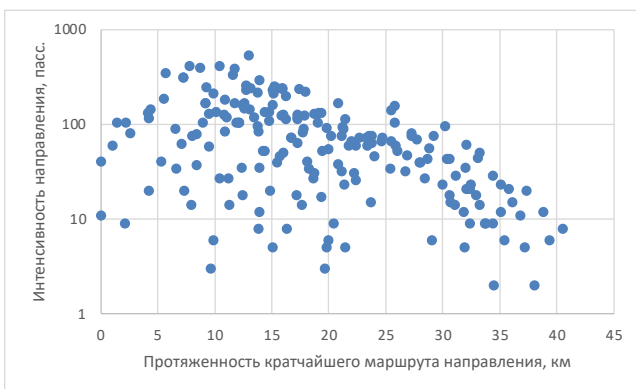


а)

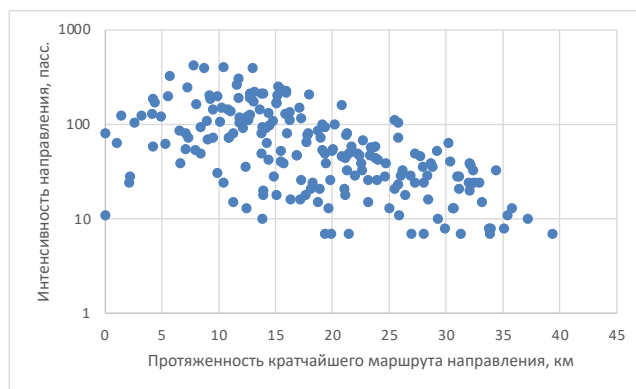


б)

Рисунок 54. Соотношение протяженности маршрута корреспонденции и интенсивности пассажиропотока направлений, исходящих от станции Маяковская. Составлено автором по усредненным данным за а) будние дни IV квартала 2019 г.; б) будние дни IV квартала 2023 г.



а)



б)

Рисунок 55. Соотношение протяженности маршрута корреспонденции и интенсивности пассажиропотока направлений, исходящих от станции Верхние Лихоборы. Составлено автором по усредненным данным за а) будние дни IV квартала 2019 г.; б) будние дни IV квартала 2023 г.

Неравномерность распределения значений по каждой станции (узлу) отправления в течение периода исследования значительно увеличилась. Это произошло вопреки расширению сети метрополитена и сокращению протяженности маршрутов ряда направлений, что в теории должно было улучшить транспортную доступность ряда станций друг до друга и привести к увеличению числа корреспонденций. Произошел обратный процесс, который был характерен для недельных циклов пассажиропотока – поляризация и увеличение доминирования главного направления либо нескольких направлений. Для примера снова возьмем станции из разных

функциональных зон агломерации, на которых зафиксирован этот тренд: Новогиреево (восточный сектор) и Маяковская (центр ядра агломерации) (см. рис. 56 и 57).

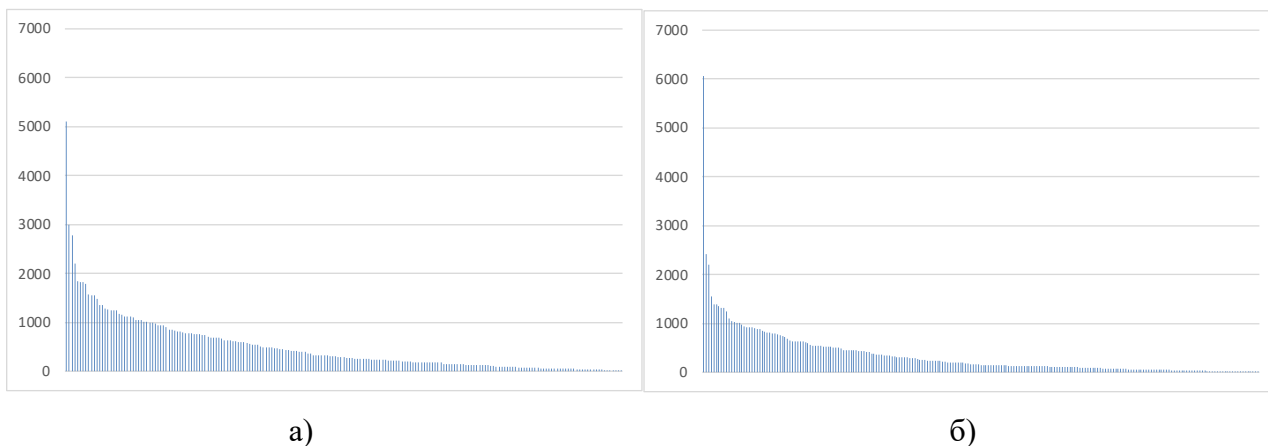


Рисунок 56. Распределение среднесуточной интенсивности пассажиропотока направлений от станции Новогиреево в будние дни за а) IV квартал 2019 г; б) за IV квартал 2023 г. Составлено автором.

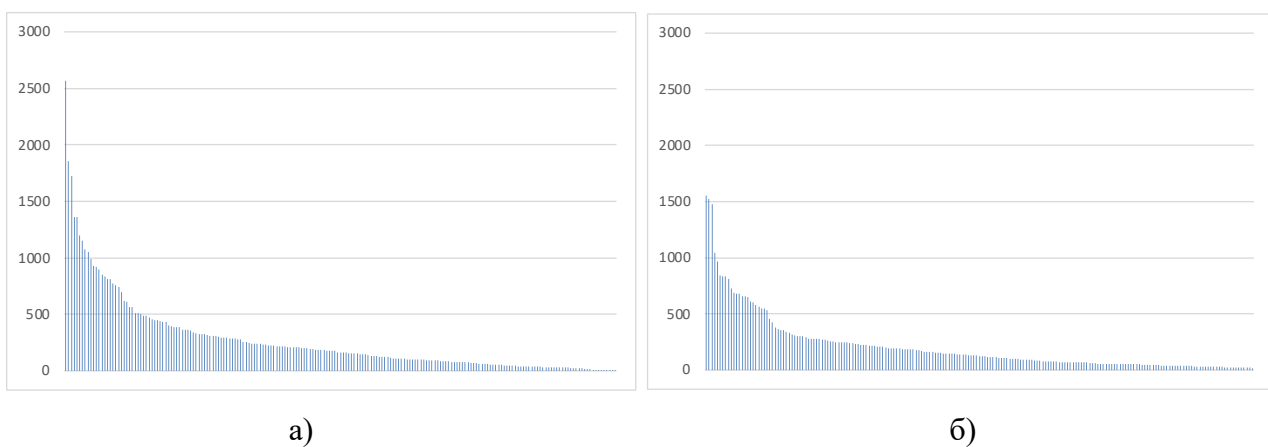


Рисунок 57. Распределение среднесуточной интенсивности пассажиропотока направлений от станции Маяковская в будние дни за а) IV квартал 2019 г; б) за IV квартал 2023 г. Составлено автором.

У станции Новогиреево этот тренд выражен предельно четко – интенсивность лидирующего направления (к узлу Авиамоторная) значительно увеличилась (на 20%), при том, что интенсивность практически всех остальных направлений снизилась. Кроме этого, стали заметнее контрастировать магистральные направления (на рис. 57-б) их можно идентифицировать по значениям от 1 до 1,5 тыс. пассажиров) на фоне остальных. У станции Маяковская на первый взгляд доминирование главного направления уменьшилась, однако значительно сильнее стали выделяться локальные направления (интенсивностью до 350

пассажиров). Таким образом, стала меняться форма графиков распределения интенсивности пассажиропотока: если ранее она строже соответствовало степенному закону, то теперь форма графика стала более ступенчатой (на образованной «ступени» преимущественно концентрируются значения интенсивности магистральных направлений). Отсутствие ярко выраженного главного направления у станции Маяковская (и других станций со схожим распределением интенсивности, в основном расположенных на станциях вне узлов в центральной части ядра агломерации) может означать постепенный рост значения иного направления в структуре пассажиропотока. Так, если у станции Новогиреево главное направление не только не изменилось, но и стало еще более доминирующим, то у станции Маяковская произошла смена главного направления с узла Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная на Павелецкую. Подробнее этот процесс описан в следующем разделе.

Нельзя исключать, что помимо отмеченного тренда на поляризацию значений на увеличение коэффициента вариации повлиял сам факт расширения сети. Кроме того, увеличение коэффициента вариации во много произошло у станций, максимально удаленных от новых линий (то есть у тех, где центральность по близости изменилась наименьшим образом), а именно на окраинных станциях восточного, северо-восточного и северного секторов. Как было установлено ранее, интенсивность пассажиропотока между диаметрально расположенными секторами наиболее низка, поэтому сам факт расширения массива за счет максимально низких значений автоматически привело к увеличению коэффициента вариации.

Исключение из тренда на увеличение неравномерности структуры пассажиропотока составляют станции южного участка Люблинско-Дмитровской линии, где заметных изменений не произошло. Кроме этого, ранее выдвинутая нами гипотеза о сокращении поляризации распределения пассажиропотока при расширении локально подтверждается у вновь образованных узлов на пересечении с Большой Кольцевой линией, однако лишь преимущественно в южном и юго-западном секторах (узлы Каховская/Севастопольская, Воронцовская/Калужская, Мичуринский проспект). Структура пассажиропотока действительно изменилась в сторону более равномерного распределения, а среди лидирующих направлений появились хордовые. Кроме того, крайне низкие значения коэффициента вариации имеют станции Большой Кольцевой линии, находящиеся вне пересадочных узлов (Давыдково, Аминьевская, Зюзино). Эти станции имеют соразмерную интенсивность пассажиропотока как по направлению по часовой стрелке (в сторону северо-западного сектора), так и против часовой (в сторону южного и юго-восточного секторов).

В выходные дни IV квартала 2023 г. сохраняются та же структура изменений значений рассматриваемых показателей. Статистическая взаимосвязь протяженности направления и его интенсивности также уменьшается, однако если ранее станции (узлы), расположенные на окраине ядра городской агломерации еще сохраняли высокие значения коэффициента корреляции, то теперь они столь же низкие, как и остальных станций (узлов) (см. рис. 51-г). Распределение коэффициента вариации также во многом сохраняется без изменений, в основном с незначительным увеличением значений (рис. 52-г). Однако у ряда станций (узлов) Люблинско-Дмитровской линии вопреки общему тренду значение показателя заметно снижается. Наиболее сильный сдвиг наблюдается у узла Дубровка (см. табл. 5). Можно убедиться, что в структуре пассажиропотока также произошли значительные изменения. Среди лидирующих по интенсивности направлений появилось значительное количество хордовых направлений, например к Терехово, где расположена одна из крупнейших строительных площадок агломерации – жилой комплекс «Остров».

Таблица 5. 10 направлений с наибольшей среднесуточной интенсивностью пассажиропотока станции Дубровка в выходные дни за а) IV квартал 2019 г.; б) IV квартал 2023 г. Составлено автором.

Станция (узел) отправления	Станция (узел) назначения	Протяженность направления, км	Интенсивность, пасс.
Дубровка	Курская/Чкаловская	4,9	215
Дубровка	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	5,9	178
Дубровка	Белорусская	9,2	172
Дубровка	Люблино	7,9	172
Дубровка	Братиславская	9,8	137
Дубровка	Улица 1905 года	10,0	107
Дубровка	Марьино	10,9	92
Дубровка	Китай-город	5,2	82
Дубровка	Новокузнецкая/Третьяковская	4,6	80
Дубровка	Сретенский бульвар/Тургеневская/Чистые пруды	6,2	79

а)

Дубровка	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	5,9	303
Дубровка	ЗИЛ	2,8	261
Дубровка	Терехово	17,6	252
Дубровка	Люблино	7,9	180
Дубровка	ВДНХ	12,5	178
Дубровка	Курская/Чкаловская	4,9	175
Дубровка	Воронцовская/Калужская	12,7	162
Дубровка	Деловой Центр	11,0	160
Дубровка	Братиславская	9,8	151
Дубровка	Ленинский проспект/Площадь Гагарина	8,8	144

б)

И, наконец, проанализируем, как сезонные колебания общего объема пассажиропотока сказываются на его структуре. Особое внимание обратим на станции, на которых был зафиксирован как сезонный спад (станции вблизи крупнейших вузов), так и станции с сезонным ростом пассажиропотока (около крупнейших рекреационных зон).

В летние рабочие дни общая пространственная структура распределения коэффициента корреляции между все также остается без существенных изменений, произошедших разнонаправленно в различных частях ядра агломерации. Из всех анализируемых станций (узлов) заметно изменилось значения показателя только на станции Студенческая, которая была ранее отмечена как станция с наиболее заметными сезонными колебаниями входящего объема пассажиропотока. Проанализируем структуру ее пассажиропотока по среднесуточным значениям за будние дни IV квартал 2023 г. и летние месяцы 2023 г.

Таблица 6. 10 направлений с наибольшей среднесуточной интенсивностью пассажиропотока в будние дни от станции Студенческая Московского метрополитена по состоянию на: а) IV квартал 2023 г.; б) летние месяцы 2023 г. Составлено автором.

Станция (узел) отправления	Станция (узел) назначения	Протяженность направления, км	Интенсивность, пасс.
Студенческая	Октябрьская	4,6	486
Студенческая	Курская/Чкаловская	7,1	482
Студенческая	Менделеевская/Новослободская	6,3	466
Студенческая	Юго-Западная	12,4	348
Студенческая	Киевская	1,3	339
Студенческая	Фили	2,3	216
Студенческая	Смоленская (ФЛ)	2,8	166
Студенческая	Савёловская	7,8	162
Студенческая	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая	4,1	130
Студенческая	Багратионовская	3,4	130

а)

Студенческая	Киевская	1,3	280
Студенческая	Фили	2,3	198
Студенческая	Багратионовская	3,4	149
Студенческая	Смоленская (ФЛ)	2,8	143
Студенческая	Курская/Чкаловская	7,1	135
Студенческая	Деловой центр	2,2	129
Студенческая	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая	4,1	114
Студенческая	Белорусская	5,2	102
Студенческая	Менделеевская/Новослободская	6,3	102
Студенческая	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная	5,0	92

б)

Обратим внимание, что структура доминирующих направлений практически полностью поменялась. В IV квартале 2023 г. поездки были совершены по ряду различных по географии направлений: как в сторону центра, так и юго-западного сектора. Это объясняется расположением около станции метро Дорогомиловского студгородка, где проживают студенты различных вузов столицы. В летние месяцы, когда поездки студентов сведены к минимуму структура коренным образом меняется: на первое место выходят самые ближайшие станции метро. Таким образом, структура пассажиропотока станции Студенческая становится

похожа на структуру других станций Филевской линии, становясь заметно более детерминированной (большая интенсивность чаще наблюдается при меньшей интенсивности пассажиропотока).

Пространственная структура распределения коэффициента вариации пассажиропотока других станций также не претерпела значительных изменений (рис. 52-д). Однако, ряд станций, преимущественно находящихся в непосредственной близости от центра ядра агломерации, демонстрируют уменьшение поляризации. В качестве примера рассмотрим структуру пассажиропотока станции Фрунзенская, у которой ярко выражено описываемое явление (рис. 64).

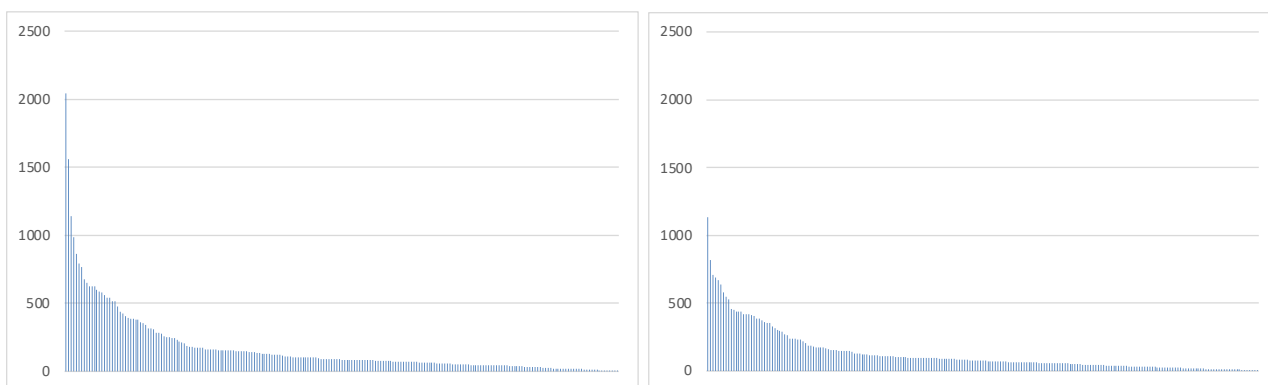


Рисунок 58. Распределение среднесуточной интенсивности пассажиропотока направлений от станции Фрунзенская в будние дни за а) IV квартал 2023 г; б) летние месяцы 2023 г. Составлено автором.

В выходные дни летних месяцев, несмотря на сезонное увеличение входящего объема пассажиропотока около крупных рекреационных зон, исследуемые показатели остаются практически без изменений по сравнению со значениями, зафиксированными в выходные дни за IV квартал 2023 г. Крайне незначительные сдвиги значений не нуждаются в дополнительных комментариях.

**Роль главных направлений в формировании мощности пассажиропотока.** Выше установлено, что главное направление может формировать до 15% всей структуры количества отправленных пассажиров. Важно понимать, что маршруты всех направлений, в том числе главных проходят по ограниченному числу ребер сети, которое существенно меньше количества всех направлений, но эквивалентно числу главных направлений. Соответственно, мы имеем возможность установить, насколько зависит суммарная мощность того или иного участка сети от главных направлений, проходящих по этому участку. Это позволит установить степень детерминированности (стохастичности) совершаемых поездок. Для этого была

рассчитана доля мощности главных направлений от суммарной мощности для каждого перегона. Результаты представлены на рис. 59.

Несмотря на рост уровней иерархии узлов с приближением к центру, в общем случае доля мощности главных направлений не только не возрастает, но и неуклонно снижается. Особенно это заметно в юго-западном секторе, где ранее были выявлены наиболее устойчивые автономные компоненты. С другой стороны, падение может объясняться высокой долей транзитного трафика на этих участках, размывающей роль главных направлений на них. При этом наиболее вероятно, что этот транзитный трафик во вне каждой рассматриваемой линии с участками. Иными словами, основу этого трафика составляют не магистральные, и тем более не локальные, а хордовые и диаметральные направления. Хотя последние два типа направлений, как установлено ранее, имеют наименьшую интенсивность по сравнению с первыми, однако за счет количества проходящих через один створ таких направлений и дает столь высокую долю транзитного трафика. Таким образом, пространственная дисперсия поездов, совершаемых через эти участки сети, наиболее высока. Характерно, что в непосредственном центре сети на некоторых участках мощность главных направлений снова возрастает. Характерно, что именно на этих участках суммарная мощность пассажиропотока меньше, чем на иных смежных, что было установлено ранее. Помимо них, отметим участки сети с наибольшей долей мощности главных направлений на окраинах сети, совпадающие с наиболее пассажиронапряженными направлениями: юго-западные участки Калужско-Рижской и Сокольнической линии, северо-западные участки Таганско-Краснопресненской и Замоскворецкой линий. Также выделяется участок, который в динамике не обладает столь высокой устойчивостью, – юг Замоскворецкой линии.

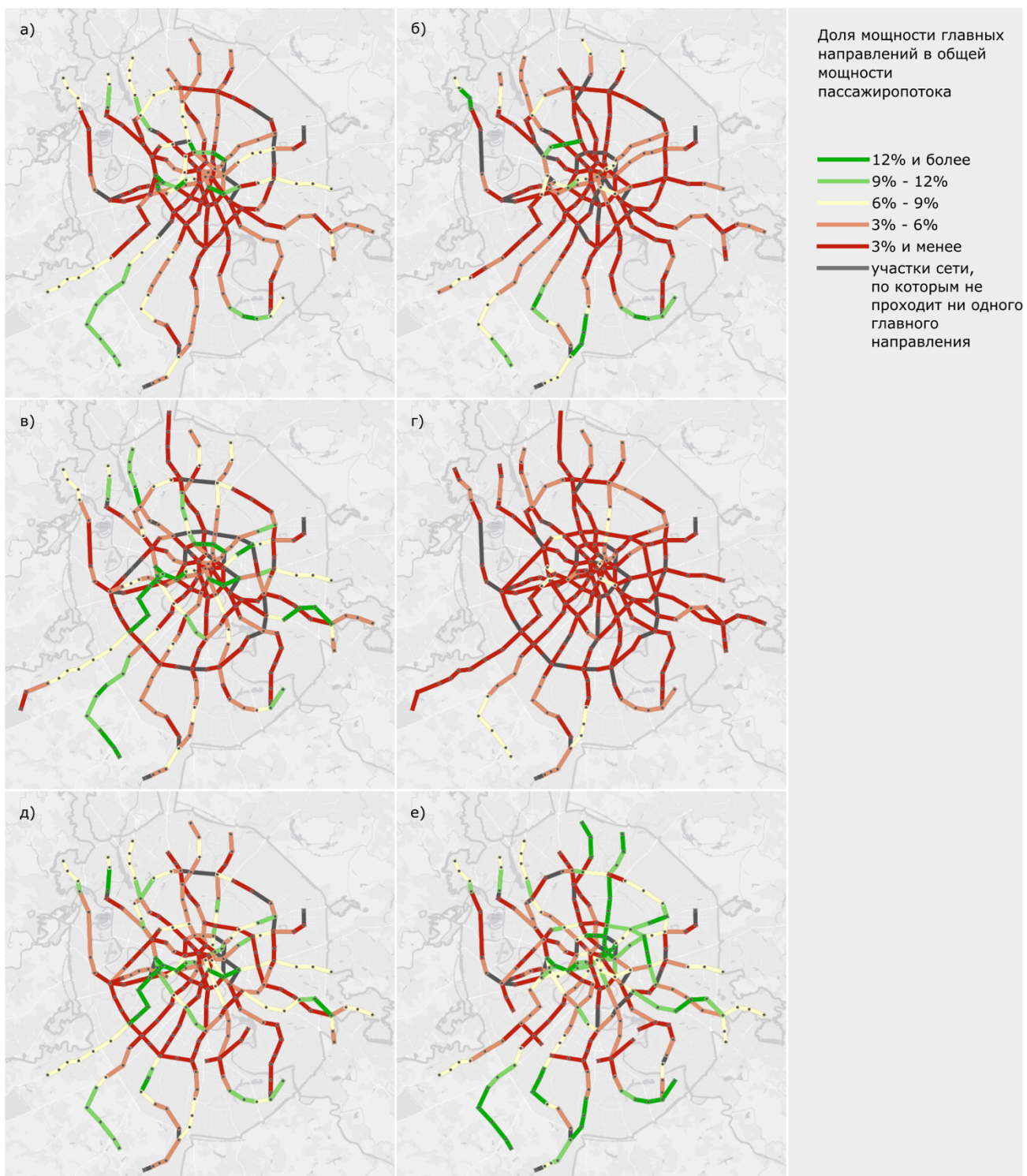


Рисунок 59. Доля среднесуточной мощности главных направлений в суммарной мощности пассажиропотока по перегонам Московского метрополитена: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

В выходные дни IV квартала 2019 г. отмечается существенное сокращение доли главных направлений. С учетом ранее выявленных несущественных изменений в территориальных пропорциях мощности пассажиропотока напрашивается вывод о том, что увеличилась прежде всего доля транзитного трафика на значительном количестве участков сети. Участки с наибольшей долей главных направлений в суммарной мощности те же, что были перечислены выше. Обратим внимание на возросшую поляризацию значений: участки со средними значениями доли (6-9%) встречаются наиболее редко.

В будние дни IV квартала 2023 г. по сравнению с будними днями IV квартала 2019 г. наблюдается разнонаправленная динамика: если в восточном секторе на ряде линий отмечается существенный рост доли главных направлений (при том, что автономные компоненты главных направлений выделены только на Таганско-Краснопресненской линии), то в юго-западном секторе, наоборот, рассматриваемый показатель снизился. Вспомним, что снижение суммарной мощности пассажиропотока, наибольшим образом проявилось именно в восточном секторе. Таким образом, этот спад произошел за счет снижения интенсивности прежде всего магистральных направлений, что неминуемо повлекло рост доли главных направлений. В случае юго-западного сектора, вероятнее всего, главным агентом изменений послужил ввод Большой Кольцевой линии, который обеспечил рост транзитного трафика на участках радиальных линий в непосредственной близости от пересечения с ней.

В выходные дни IV квартала 2023 г. зафиксирована наиболее низкая доля главных направлений, несмотря на практически неизменившуюся пространственную структуру главных направлений. Это говорит о том, что со временем характер поездок именно в выходные дни существенно изменился – стало гораздо больше поездок по направлениям, отличным от локальных. При этом в транзитном трафике на этом временном срезе не представляется возможным отделить трафик локальных направлений (которые преимущественно и служат главными). Однако, мы можем предположить, что именно диаметральные направления стали доминирующими в пассажиропотоке благодаря заметному росту входящего объема пассажиропотока, а также интенсивности и пассажиронапряженности к/от таких станций как ВДНХ и ЦСКА.

В летнее время наблюдается кардинально обратная ситуация от описанной выше. И в будние, и в выходные дни наблюдается повсеместный рост доли главных направлений, особенно в восточной части города. Однако здесь речь идет не об усилении роли локальных направлений в качестве главных, а напротив – главными направлениями для ряда станций (узлов) стали хордовые и диаметральные направления (преимущественно к станции ВДНХ).

Подтверждением этого вывода служит увеличение доли главных направлений на кольцевых линиях, по которым проходят маршруты прежде всего хордовых направлений.

### **3.2 Пространственный анализ структуры пассажиропотока станций московского метрополитена по временному признаку**

**Параметризация структуры пассажиропотока станций (узлов) по временному признаку.** Ранее нами были рассмотрены результаты работы по изучению пространственной неравномерности пикового времени на вход по станциям метрополитена [Киселев, 2021]. Эта работа проводилась на основе данных о валидациях на станциях метро в будние дни октябрь, ноябрь и декабрь 2019 г. Автором не были охвачены выходные и праздничные дни, поскольку в работе ставилась совершенно иная цель. В рамках настоящей работы предлагается:

1. Включить в исследование выходные дни. Для выходных дней будет проведена отдельная кластеризация. Допускаем, что пространственная структура станций метрополитена по признаку суточного режима загрузки будет иметь принципиально иной рисунок. Мы имеем возможность выявить размытие пространственного контраста в распределении показателей пассажирообмена между центром и периферией, и даже выделить субцентры. Предположение основано на наблюдениях за активностью пассажиров. Например, в выходные дни запрос на посещение рекреационных зон, торговых комплексов среди жителей города может быть выше. При этом объекты со подобным функциональным значением распределены достаточно равномерно по территории города и не формируют собой ярко выраженную пространственную структуру.
2. Расширить исследуемый временной интервал. Благодаря тому, что сведения о валидациях были накоплены за 4 года, есть возможность отследить, насколько постоянна во времени пространственная структура распределения пассажирообмена по станциям метрополитена.
3. Упрощить методику изучения пространственного распределения пассажирообмена в связи со значительным увеличением количества исходных данных. Если в ранее приведенном исследовании производилась кластеризация параметров распределения, то в текущем исследовании будут использованы более простые характеристики. В качестве пиковых часов, так же, как и в предыдущем исследовании, выбраны интервалы от 8:00 до 9:00 (утренний пик) и с 18:00 до 19:00 часов (вечерний пик). При анализе будних дней нами будет использоваться относительная разница между значениями

входящего объема пассажиропотока в вечерний и утренний пики. В случае, если вечерний пик доминирует, то значение показателя будет выше 1. Если утренний – ниже 1. Если значения находятся в границе от 0,8 до 1,2, то для целей пространственного анализа будем считать величину пиков эквивалентной. Как показало первое знакомство с исходными данными, в выходные дни не наблюдается ярко выраженных утренних и вечерних пиков (рисунок 61). Этот факт подтверждается рядом исследований [Mohamed, 2014] [Xu Q., Mao B. H., Bai Y., 2016]. Однако, наивысший входящий объем пассажиропотока наблюдается на разных станциях отнюдь не в одно и то же время. Например, у станции Бибирево – в интервал с 9:00 до 10:00, а в узле Китай-Город – в интервал от 18:00 до 19:00. При этом, как можно убедиться на диаграммах распределения, наибольшие значения превышают соседние по величине крайне незначительно, в отличие от будних дней, когда значение в час пик может быть кратно выше, чем в остальные часы. Таким образом, можно предположить, что чем позднее наступает пик значения в выходной день, тем больше центральных функций несет в себе территория вокруг станции.

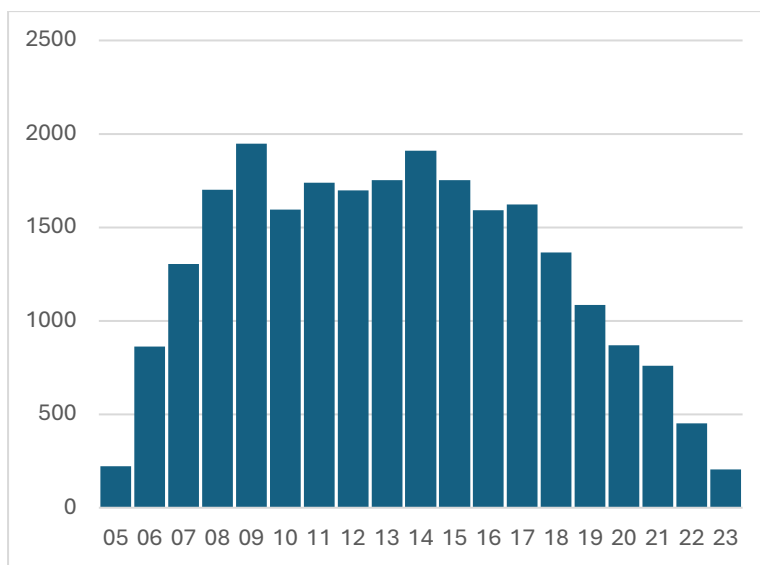


Рисунок 60. Распределение входящего объема пассажиропотока станции Бибирево по часам по средним значениям в выходные дни 2019 г.

Составлено автором.

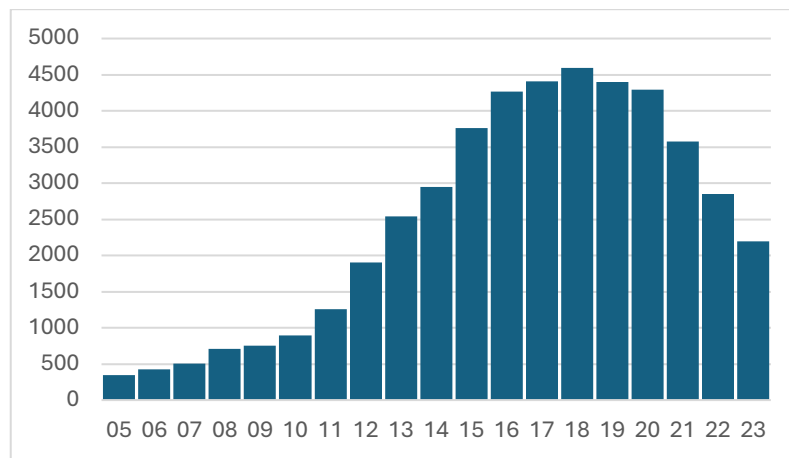


Рисунок 61. Распределение входящего объема пассажиропотока узла Китай-город по часам по средним значениям в выходные дни 2019 г.

Составлено автором.

**Пространственная структура распределения пассажирообмена по станциям метрополитена и ее устойчивость во времени.** Результаты расчетов относительного превышения значений в вечерний пик над утренним с выделением характерных типов представлены на рис. 62-а).

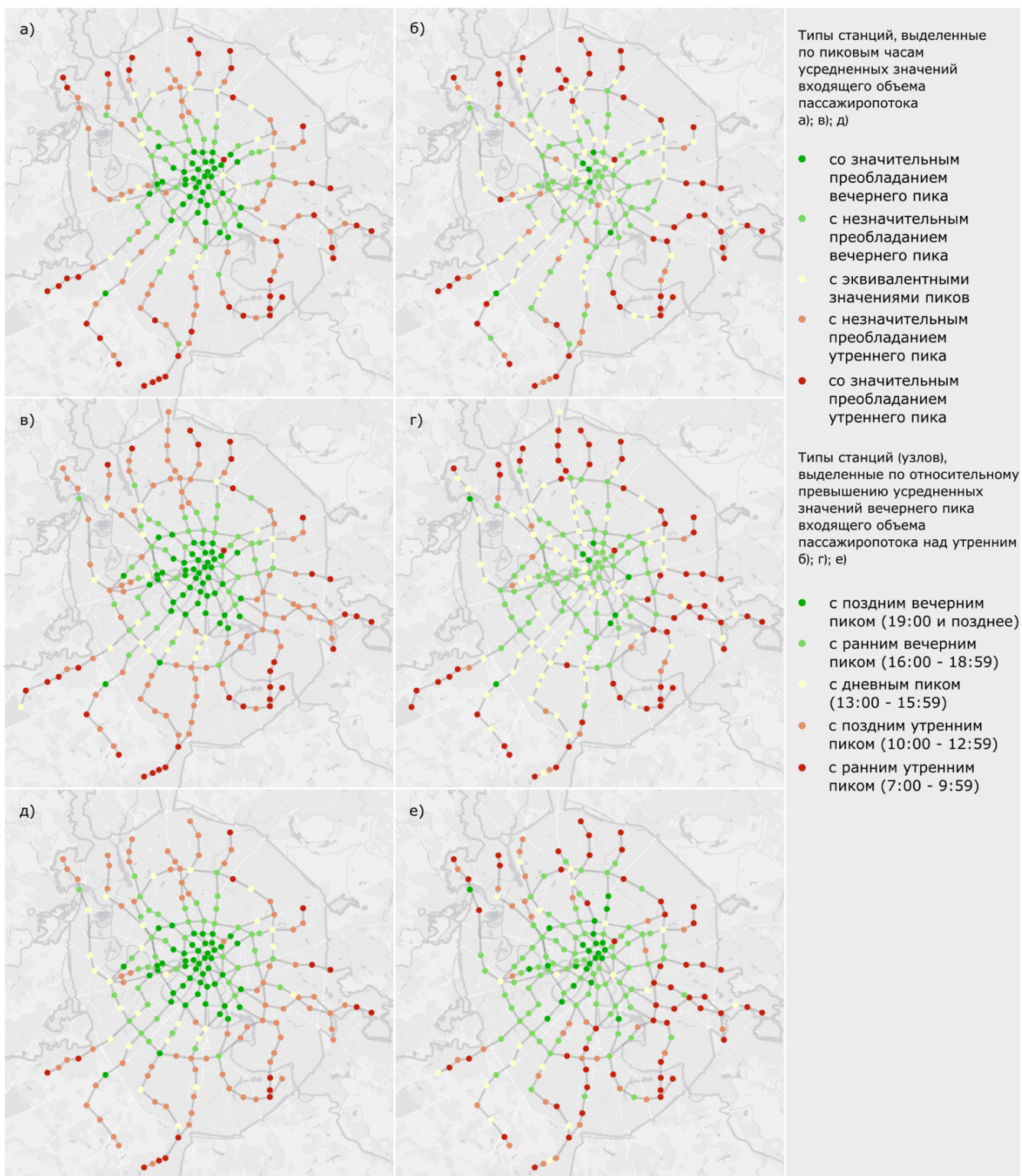


Рисунок 62. Типы станций (узлов), выделенные по относительному превышению усредненных значений вечернего пика входящего объема пассажиропотока над утренним а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

Если в ранее проведенном исследовании была проанализирована форма графиков суточного распределения входящего объема пассажиропотока, то в текущем исследовании в связи со сменой методики выделяется уже не 4, а 5 групп станций. Выделены группы со значительным и незначительным превышением вечернего пика, значительным и незначительным превышением утреннего пика, а также с эквивалентными величинами пиков суточной нагрузки. Расположение групп в пространстве, как и ранее было установлено, четко укладывается в градиент «центр – периферия» с продолжениями в сторону юго-запада и северо-запада от центра ядра агломерации. Есть и исключения: узел Комсомольская, расположенный в пределах центра ядра, основу пассажиропотока которого составляют пассажиры пригородных поездов, массово пребывающих в утренний час пик; станция Румянцево, находящаяся за пределами МКАД, что де-факто соответствует пригородной зоне, однако здесь расположен крупный одноименный комплекс офисных помещений, благодаря чему наблюдаемые паттерны пассажиропотока соответствуют станции, находящейся в центре ядра агломерации.

В выходные дни пиковые часы, как было замечено выше, очень сильно отличаются от станции к станции. Станции с наиболее поздними пиковыми часами в основном наблюдаются в центральной части ядра агломерации, что может маркировать очаги концентрации мест вечернего досуга. Станции с наиболее ранними пиковыми значениями – на периферии ядра агломерации. Тем не менее, исключений из установленной закономерности, в отличие от будних дней, заметно больше. Во многом, станции с вечерними пиками вне центра ядра агломерации тяготеют к двум типам функциональных зон – крупные торгово-развлекательные комплексы (Мякинино, Пражская, Теплый Стан, Войковская) и рекреационные зоны (Ботанический сад, Лесопарковая, Прокшино). Столь небольшое количество исключений из градиента «центр-периферия» наводит на мысль о стойкой взаимосвязи суточного распределения пассажиропотока в будние и выходные дни. Рис. 63 подтверждает эту гипотезу, коэффициент ранговой корреляции Спирмена между двумя показателями составляет 0,79. Таким образом, режим суточной загрузки станций метрополитена в будние дни позволяет предсказывать режим загрузки в выходные дни и наоборот.

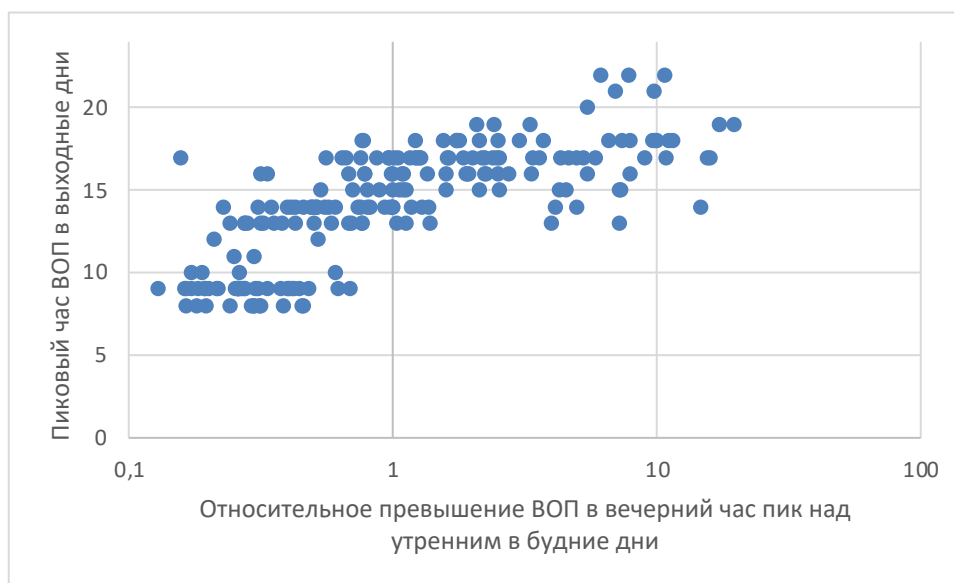


Рисунок 63. Относительное превышение входящего объема пассажиропотока в вечерний час пик над утренним в будние дни по состоянию на IV квартал 2019 г.

Составлено автором.

Пиковое значение во второй половине дня (с 14:00 до 17:00) может говорить о промежуточном положении станции в функциональной структуре ядра агломерации между центром и периферией. Несмотря на то, что эти станции (узлы), а также узлы с ранним пиковым часом находятся в преимущественно селитебной зоне, вероятно, что зоны обслуживания станций с пиком во второй половине дня имеют больше точек притяжения. То есть основная доля входящего объема пассажиропотока приходится вторую половину дня, и состоит из пассажиров, которые уже побывали в соответствующих точках притяжения. Таким образом, зоны обслуживания этих станций, вероятно, имеют некие точки притяжения, актуальные именно в выходные дни. К ним относятся такие станции (узлы) как, например, Свиблово, Беяево, Каховская/Севастопольская, Люблино и т.д.

Отдельно выделим станции (узлы), которые в будние дни демонстрируют характеристики центра, а в выходные – периферии. К ним относятся Добрынинская/Серпуховская, Беговая и Парк Победы. По всей видимости, зоны обслуживания этих станций узлов, в отличие от только что описанных, в своей зоне обслуживания имеют точки притяжения, актуальные для большинства пассажиров только в будние дни. Предположим, что в выходные дни Беговая и Парк Победы используются преимущественно комьютерами, осуществляющими пересадку с пригородного транспорта в метрополитен.

За период исследования существенных изменений в суточном режиме загрузки станций не произошло (рис. 62-в)). Тем не менее, ряд станций (узлов) в юго-западном, западном и северо-западном секторах осуществили переход от эквивалентных пиковых значений к доминированию вечернего пика (Зорге/Октябрьское поле, Мякинино, Багратионовская, Юго-Западная). Аналогичный переход совершили узлы Курская/Чкаловская и Площадь Ильича/Римская, вероятно благодаря существенным изменениям пригородного сообщения, описанным ранее в главе 1. Еще у одного узла – Воронцовская/Калужская – находящегося вне центра ядра агломерации, появился ярко выраженный вечерний пик, благодаря вводу ряда новых офисных помещений. Станции Мневники и Терехово новой Большой Кольцевой линии демонстрируют такие же параметры суточной режима загрузки станции: однако здесь не размещено никаких крупных точек притяжения, кроме масштабного строительства жилого комплекса «Остров». Вероятно, специалисты, занятые в стройке этого комплекса, и формируют входящий объем пассажиропотока этих станций.

В выходные дни IV квартала 2023 г. замечено незначительное расширение числа станции с относительно поздним временем пиковой нагрузки (начиная со второй половины дня) (рис. 62-г). Характерно, что большая часть станций Большой Кольцевой линии, несмотря на удаление от центра, также отнесены к этому типу, особенно на западном участке.

В летние месяцы зафиксировано выравнивание утренних и вечерних пиков, а у станций, до этого обладающих эквивалентными пиками – преобладание вечерних. Наиболее часто этот тренд встречаются у станций северо-западного, западного и юго-западного секторов. Вполне вероятно, что пассажиры этих станций чаще совершают поездки к многочисленным рекреационным зонам в вечернее время. У станций (узлов), где ранее было отмечено наибольшее изменения входящего объема пассажиропотока, никаких существенных изменений суточного распределения пассажиропотока не обнаружено. В выходные дни отметим заметную поляризацию значений. Поляризация так же, как и в предыдущие временные срезы, имеет градиент «центр-периферия», но имеет ряд особенностей. Во-первых, существенно увеличилось количество станций (узлов) с поздним пиком, прежде всего в центре ядра агломерации. Во-вторых, существенно увеличились контрасты между секторами: вечерний пик выявлен практически на всех станциях юго-западного и западного сектора, что редко наблюдается в остальных секторах, в которых, наоборот, доминирует ранний утренний пик.

### 3.3 Иерархия узлов и направлений

#### Пространственная структура главных направлений. Иерархия станций и узлов Московского метрополитена.

В главе 1 описан подход к выделению главных направлений относительно каждой станции (узла) Московского метрополитена. Был приведен пример анализа смежных связей таких направлений на основании показателя интенсивности пассажиропотока, ранее проведенного на примере Московского метрополитена (Nekraplonna, Namiot, 2021). Была найдена станция с наибольшим количеством связей (как прямых, так и посреднических) по состоянию на 2018 г. – Чеховская. Заметим, что анализ был выполнен вне периода настоящего исследования, а также на основе иного источника данных – операторов мобильной связи, что может повлиять на разницу в получившихся значениях.

По состоянию на IV квартал 2019 г. в сети Московского метрополитена насчитывается 202 главных направления по количеству станций (узлов) в сети (от станции  $i$  до станции  $j$ ). Узел, который не является пунктом назначения ( $j$ ) ни для одного направления из других узлов определяется как узел самого низкого уровня иерархии ( $n$ ). Они исключаются из дальнейшего анализа. Далее для каждого из оставшихся узлов аналогично определяются те, которые не являются пунктом назначения ( $j$ ) ни для одного направления из других оставшихся узлов, как узлы следующего уровня иерархии ( $n-1$ ). Итерации производятся до тех пор, пока на текущем уровне иерархии останется либо единственный узел, либо для всех представленных на этом уровне узлов найдется комплементарная пара (то есть все узлы уровня имеют главное направление, имеющее окончание в одном из остальных узлов). Количество подобных итераций будет соответствовать предварительному количеству иерархических уровней ( $n$ ). Однако в случае, если высший иерархический уровень состоит из комплементарных пар направлений, то внутри каждой пары выбирается узел с наибольшим количеством связей на предыдущих уровнях. Если количество связей тоже совпадает, то выбирается узел с наибольшим входящим объемом пассажиропотока. Совокупность таких узлов формирует новый иерархический уровень высшего порядка. Таким образом, общее количество уровней совпадает с количеством итераций поиска главных направлений в случае полного замыкания иерархии на одном узле, и превышает это количество на 1, если на последней итерации для всех узлов нашлась комплементарная пара.

Автором в рамках ранее выполненного исследования был построен граф главных направлений по вышеописанной методике по состоянию на IV квартал 2019 г. [Киселев, 2024]. Ниже коротко прокомментированы его морфологические особенности.

В будние дни IV квартала 2019 г. граф имеет древовидную структуру без циклов с большим количеством автономных компонентов (9, против 10 выявленных в труде М.Н. Некрапленной, Д.Е. Намиот [Nekraplonna, Namiot (2021)] (рис. 63). Крупнейший компонент замыкается на узле Курская/Чкаловская и включает 52 ребра. Он формируется преимущественно за счет направлений от станций Арбатско-Покровской (центральный и восточный участки) и Люблинско-Дмитровской (северный участок) линий, а также через промежуточные узлы охватывает значительные части Серпуховско-Тимирязевской, Калужско-Рижской, Замоскворецкой, Сокольнической и Калининской линий.

Наиболее длинная по числу уровней иерархии цепь в этом компоненте начинается от станции Улица Дмитриевского (10 уровень) и последовательно проходит через Косино/Лермонтовский проспект, Жулебино, Выхино, Крестьянская Застава/Пролетарская, Китай-город, Пушкинская/Тверская/Чеховская, Новокузнецкая/Третьяковская и Охотный Ряд, замыкаясь на Курской/Чкаловской (1 уровень). Другая протяженная по числу элементов цепь начинается от станции МЦК Новохоловская и через Андроновку, Верхние Котлы/Нагатинскую, Деловой центр/Международную, Киевскую, Белорусскую и Павелецкую также приходит к Курской/Чкаловской. В целом крупнейший компонент развит преимущественно в северном, северо-восточном и восточном секторах сети, частично — в южном и слабо — в западных и северо-западных направлениях.

Автономные компоненты значительно меньшего размера расположены на периферии ядра агломерации. В юго-восточном секторе компонент замыкается на станции Рязанский проспект; его устойчивость оценивается как низкая, поскольку ряд станций периодически включается в крупнейший компонент. Отдельные автономные компоненты формируются на южных участках Замоскворецкой, Серпуховско-Тимирязевской, Калужско-Рижской и Сокольнической линий, а также в северо-западном секторе вдоль Арбатско-Покровской, Таганско-Краснопресненской и Замоскворецкой линий. Их иерархические центры, как правило, представлены периферийными станциями (Домодедовская, Академическая, Юго-Западная, Молодежная, Сходненская, Сокол) и отражают высокую автономность локальных пассажиропотоков, часто связанную с широкой зоной обслуживания или концентрацией вузов. Распределение числа соединений по узлам не совпадает строго с уровнем иерархии: ряд узлов низкого уровня обладает высокой связностью (Киевская, Деловой центр), тогда как некоторые

узлы высокого уровня имеют ограниченное число связей (Сходненская, Каширская, Рязанский проспект). Первые, как правило, расположены ближе к центру ядра агломерации и включены в протяженные цепи связей, вторые — функционируют как локальные субцентры на периферии, с повышенным входящим пассажиропотоком и выраженной пространственной асимметрией, преимущественно в западной части агломерации.

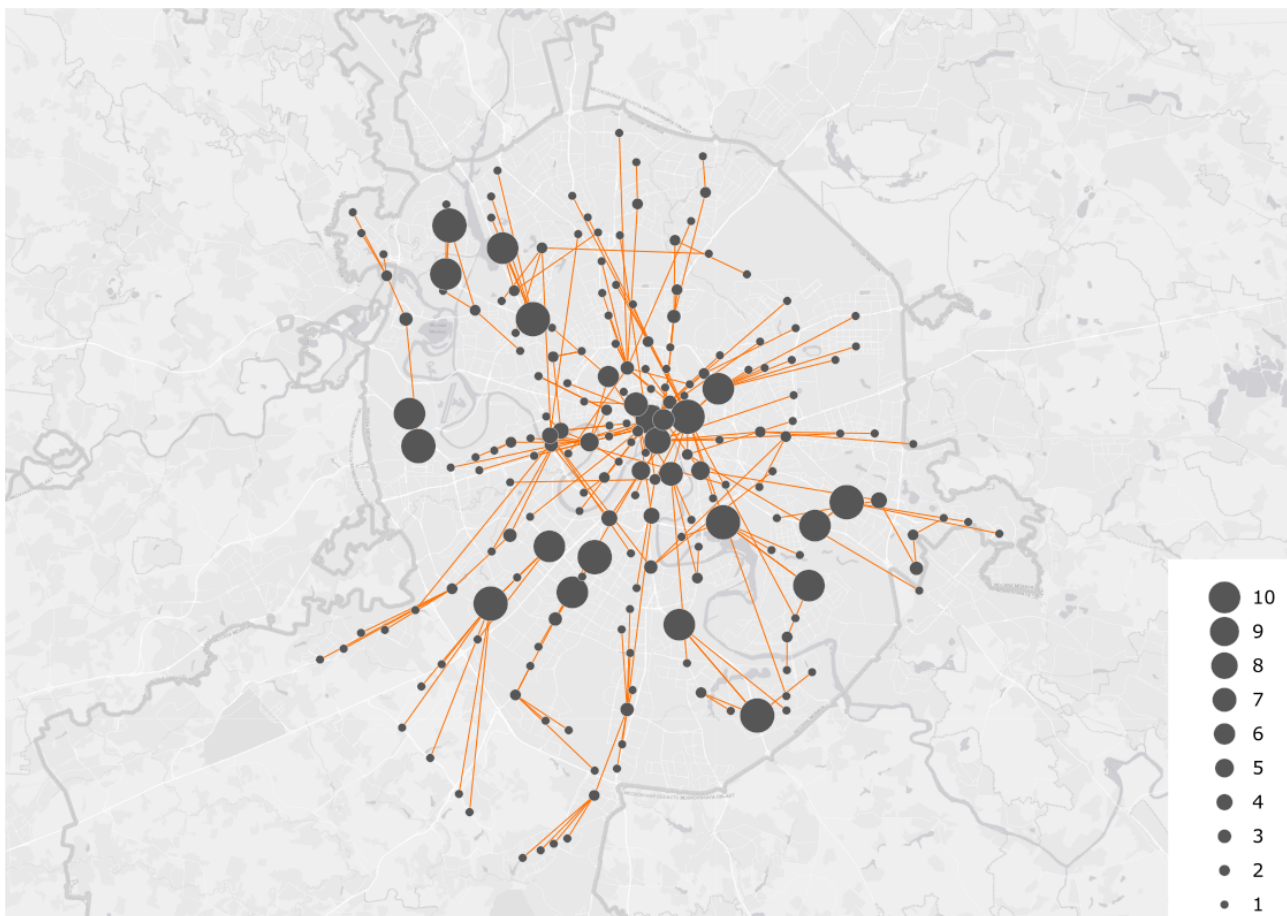


Рисунок 63. Распределение станций (узлов) по уровням иерархии в системе главных направлений по интенсивности среднесуточного пассажиропотока Московского метрополитена за будние дни IV квартала 2019 г. Составлено автором.

#### **Устойчивость иерархии станций и узлов Московского метрополитена во времени.**

Здесь, как и в предыдущих разделах, проверим, насколько установленная иерархия зависит от факторов времени: недельных и сезонных колебаний, а также в многолетнем срезе.

Если при анализе интенсивности и пассажиронапряженности в выходные дни IV квартала 2019 г. не было выявлено серьезных территориальных сдвигов по сравнению с будними днями, то анализ главных направлений демонстрирует заметные изменения пространственной структуры (см. рис. 64).

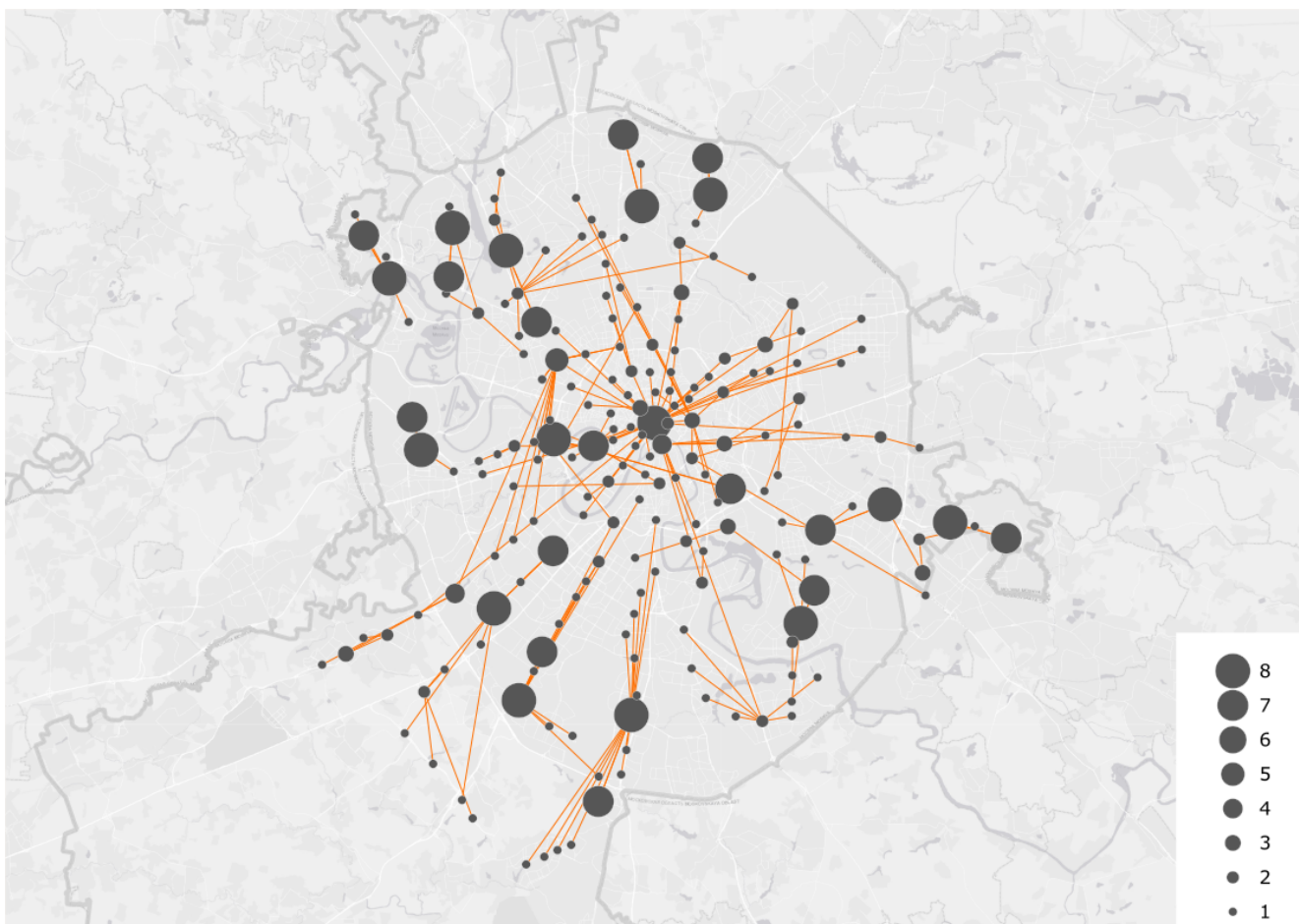


Рисунок 64. Распределение станций (узлов) по уровням иерархии в системе главных направлений по интенсивности среднесуточного пассажиропотока Московского метрополитена за выходные дни IV квартала 2019 г.

Составлено автором.

Ранее нами было установлен факт, что интенсивность пассажиропотока в восточном секторе на магистральных направлениях выражена значительно сильнее. Это же проявилось и при анализе главных направлений: многие из них замыкаются на узлах в центре ядра агломерации, по-прежнему входя в состав крупнейшего компонента. На этот раз узел с высшим иерархическим уровнем – Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная, при этом уровень Курской, которая служит лидером в будние дни, значительно снизился, до второго уровня. Всего выделяется 7 иерархических уровней. Сокращение числа уровней с 10 до 7 прямо говорит о возросшей автономности ряда систем главных направлений: цепи связей стали более короткими. Число автономных компонентов закономерно увеличилось: с 9 до 14. Узел наивысшей степени иерархии – Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная, к нему подходят цепи связей от Солнцевской линии, а также некоторых станций северных участков

Серпуховско-Тимирязевской линии и Калужско-Рижской линий, восточного участка Сокольнической и Арбатско-Покровской линии, южного участка Замоскворецкой линии, а также Калининской линии.

Заметим, что на юго-востоке появилось сразу два автономных компонента: между станциями Некрасовка и улица Дмитриевского, состоящий из пары направлений «туда-обратно», а также компонент, объединяющий несколько станций (узлов) Люблинско-Дмитровской линии и МЦК. На юге оформился самостоятельный компонент станций (узлов) Серпуховско-Тимирязевской линии. На западе Солнцевской линии возникла описанная выше полуавтономная система, входящая в состав основного компонента, замыкающаяся на станцию ЦСКА. Компонент на западе Арбатско-Покровской линии распался на два: со станциями высшего иерархического уровня Мякинино и Молодежная. Без существенных изменений остались компоненты на юге Калужско-Рижской и Сокольнической линий, а также северо-западе Краснопресненской линии. Станции (узлы) МЦК, ранее ориентированные на Деловой Центр и другие станции (узлы) в центральной части агломерации вошли в состав компонента на северо-западе Замоскворецкой линии, замыкаясь сначала на узле Балтийская/Войковская, затем – Водный Стадион.

По прошествии периода исследования в рабочие дни IV квартала 2023 г. усилилась децентрализация связей (см. рис. 65). Она не столь велика, как за выходные дни IV квартала 2019 г., но тем не менее заметна: число автономных компонентов выросло с 9 до 11. Наиболее длинная цепь связей образовалась из элементов наиболее крупного по количеству связей компонента по состоянию на IV квартал 2019 г. В рабочие дни 2023 г. она также крупнейшая по числу связей, хотя оно сократилось вдвое – с 52 до 25. Заметим, что уже дважды одна из наиболее крупных цепочек начинается в промышленной зоне юго-восточного сектора ядра агломерации, что вероятно говорит о высокой степени периферийности этой территории, несмотря на ее сравнительно малое удаление от центра агломерации.

Еще одно новое явление: некоторые главные направления стали экстерриториальными, то есть замыкаются не на один из ближайших узлов более высокого уровня иерархии, а на гораздо более удаленный. Среди направлений можно привести Шипиловская – ВДНХ, Соколиная гора – Ростокино, Ростокино – Москва-Сити, Кунцевская – Воронцовская/Калужская. Причиной появления такого явления служит ввод Большой Кольцевой линии, существенно сокративший протяженность многих направлений. Хотя ранее нами установлено, что ввод БКЛ не повлиял существенным образом на большую часть

корреспонденций, приведенные кейсы показывают, что в отдельных случаях увеличение интенсивности пассажиропотока действительно имеет место быть.

Среди автономных компонентов обращают на себя внимание два новых: замыкающийся на узле Белорусская, состоящий всего из двух направлений: Аэропорт – Белорусская, а также наконец выделившийся в отдельный, компонент, замыкающийся на узле Белорусская, в который включена большая часть станций (узлов) северного участка Серпуховско-Тимирязевской линии. Кроме этого, значительно увеличилась по числу связей та часть крупнейшего компонента, которая замыкается на Деловой Центр. Вполне вероятно, что в будущем он также может оформиться в отдельный компонент. Описанные выше наблюдения говорят о том, что постепенно в будние дни ключевые городские точки притяжения смещаются на периферию центральной части ядра агломерации.

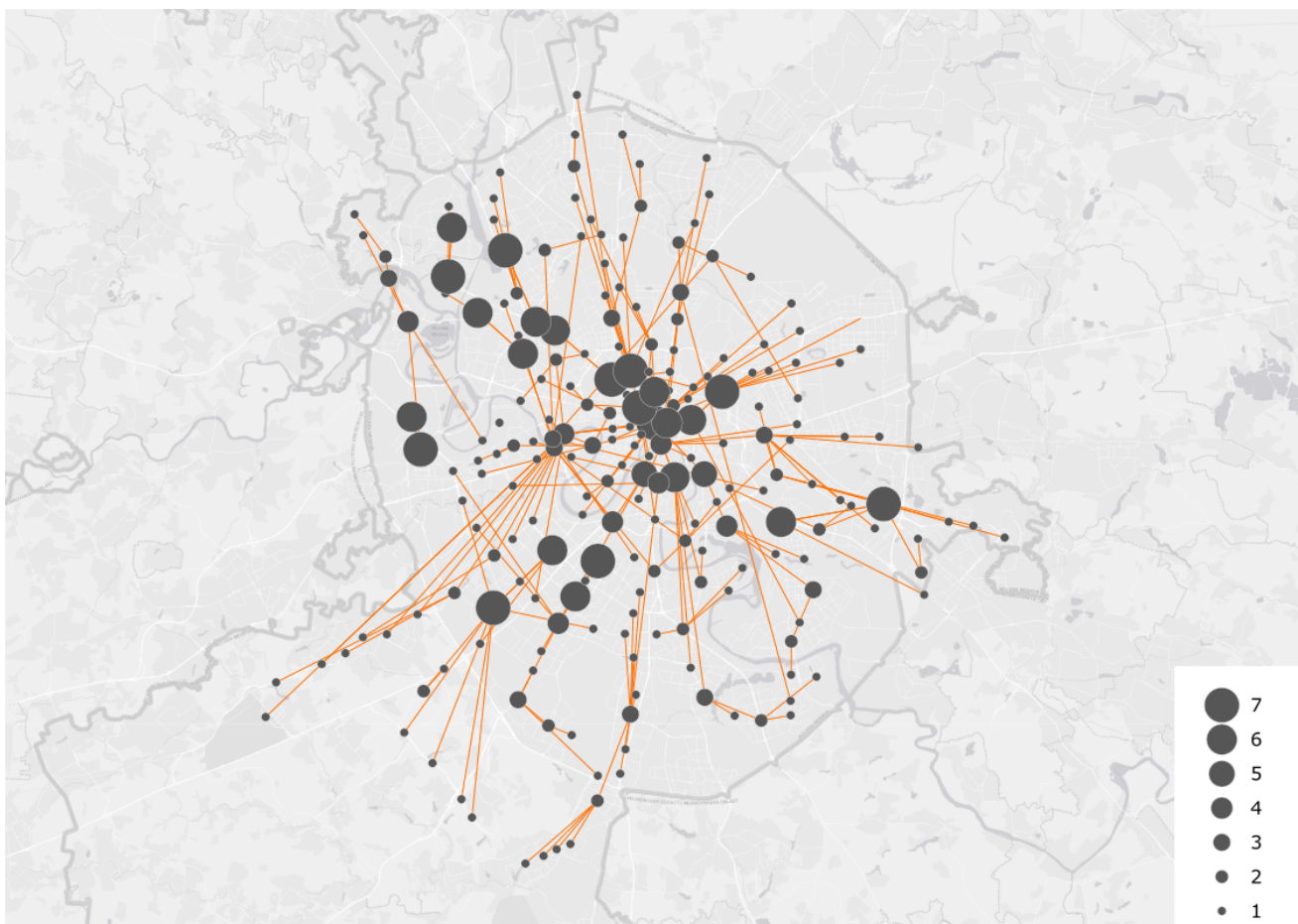


Рисунок 65. Распределение станций (узлов) по уровням иерархии в системе главных направлений по интенсивности среднесуточного пассажиропотока Московского метрополитена за будние дни IV квартала 2023 г.

Составлено автором.

В выходные дни IV квартала 2023 г. наиболее длинная цепь связей, как и в выходные дни IV квартала 2019 г., сформирована из сложных иерархических связей Солнцевской линии. Заметим, что это единственная линия, где от станции к станции практически последовательно происходит повышение иерархического уровня с приближением к центру. Ранее отмеченная децентрализация не столь характерна именно для исследуемого периода, в отличие от остальных, благодаря формированию нового узла высокого уровня иерархии – ВДНХ. Ранее в нем замыкалось лишь несколько направлений, сейчас именно к станции ВДНХ проходит главное направление от станции высшего уровня иерархии главного компонента – Охотный Ряд/Площадь Революции/Театральная. Таким образом, станция ВДНХ еще раз подтверждается как одна из ключевых точек притяжения горожан в выходные дни. Образован новый компонент с узлом высшего порядка у станции ЦСКА, ранее входящий в состав наиболее

крупного компонента. На ЦСКА замыкается большая часть введенных в эксплуатацию в ходе периода исследования станций (узлов), которые в будни дни замыкаются на другие компоненты: южные участки Сокольнической и Калужско-Рижской линии, Остальные автономные компоненты остались без существенных изменений.

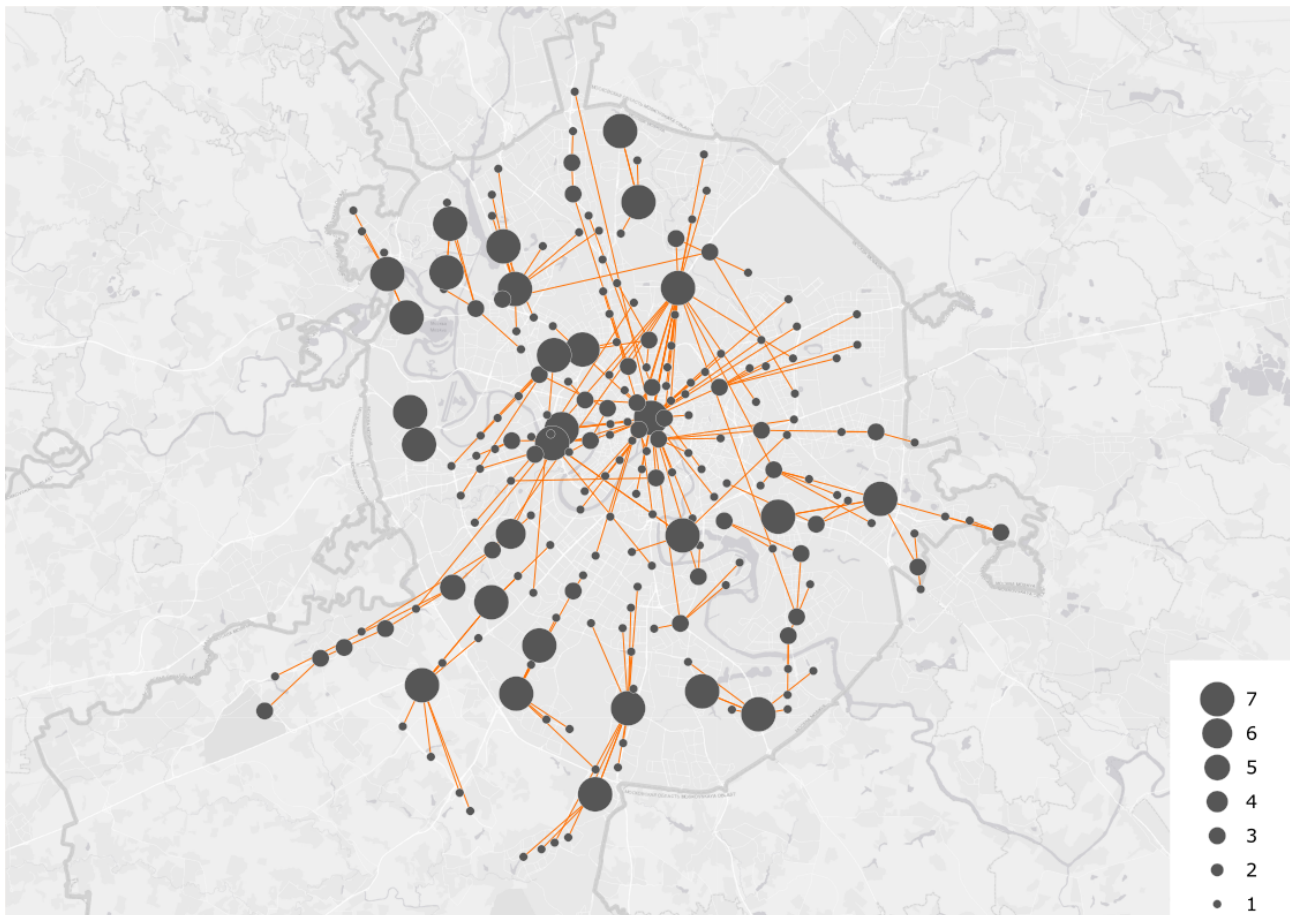


Рисунок 66. Распределение станций (узлов) по уровням иерархии в системе главных направлений по интенсивности среднесуточного пассажиропотока Московского метрополитена за выходные дни IV квартала 2023 г.

Составлено автором.

В рабочие дни летнего сезона наблюдается наибольшая степень централизации, чем в любой из ранее рассматриваемых периодов (см. рис. 67). В юго-восточном секторе полностью вошли в состав главного компонента ранее встречавшиеся здесь автономные системы. Как следствие, число ребер в главном компоненте – 71: больше, чем на каком-либо из ранее проанализированных временных срезов. Наиболее длинная иерархическая цепь также проходит в ином месте и начинается в южном участке Серпуховско-Тимирязевской линии, начинаясь со станции Зюзино, в рабочие дни IV квартала 2023 г. имеющую связь с Калужской.

Как следствие, это станция генерирует наименее устойчивый пассажиропоток. Как наблюдалось в выходные дни, у узлов ЦСКА и ВДНХ – высокий иерархический уровень, причем на ЦСКА также замыкается небольшой автономный компонент, меньшего размера, чем в выходные дни IV квартала 2023 г. Также обращает на себя внимание новый компонент, замыкающийся на Терехово, состоящий из трех направлений. Потерял автономность компонент на северо-западе Замоскворецкой линии, теперь замыкающийся на Белорусской и далее по другим направлениям главного компонента. Также части ребер лишился компонент на северо-западе Таганско-Краснопресненской линии. Без существенных изменений остались лишь компоненты на юго-западе Сокольнической и Калужско-Рижской линий, а также северо-западе Арбатско-Покровской линии.

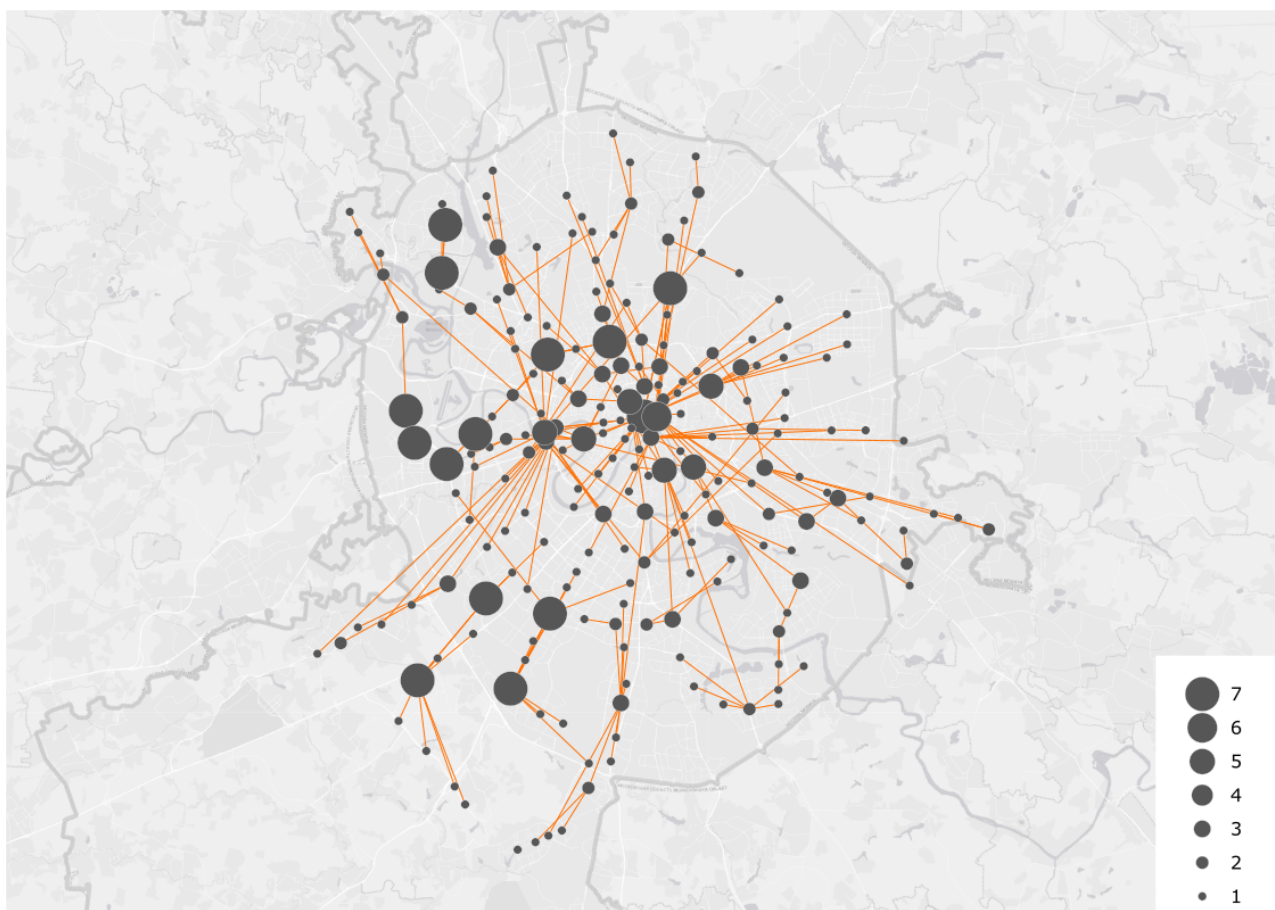


Рисунок 67. Распределение станций (узлов) по уровням иерархии в системе главных направлений по интенсивности среднесуточного пассажиропотока Московского метрополитена за будние дни лета 2023 г.

Составлено автором.

Наконец, в выходные дни лета 2023 г. также наблюдается значительная степень централизации по сравнению с выходными дни IV квартала 2023 г. (см. рис. 68). Несмотря на ранее зафиксированное большое количество высокоинтенсивных и высоконапряженных направлений к станции ВДНХ, среди них оказалось не так много главных. При этом большая часть главных направлений замыкается на узле Китай-город, хотя он не служит узлом высшего уровня иерархии. В главном компоненте зафиксированы две одинаковых по числу связей наиболее протяженных цепочки: Лианозово – Селигерская – Трубная – Пушкинская/Тверская/Чеховская – Китай-город – ВДНХ – Охотный Ряд/Площадь Революции/Театральная, а также Косино/Лермонтовский проспект – Жулебино – Выхино – Кузьминки – Китай-город – ВДНХ – Охотный Ряд/Площадь Революции/Театральная. Значительно снизился уровень иерархии узла Деловой центр, в то время как вырос уровень иерархии находящегося сравнительно неподалеку узла Лужники/Спортивная, который оттянул на себя главные направления, проходящие вдоль западного участка МЦК. Остальные автономные компоненты, зафиксированные по состоянию на IV квартал 2023 г., остались без изменений.

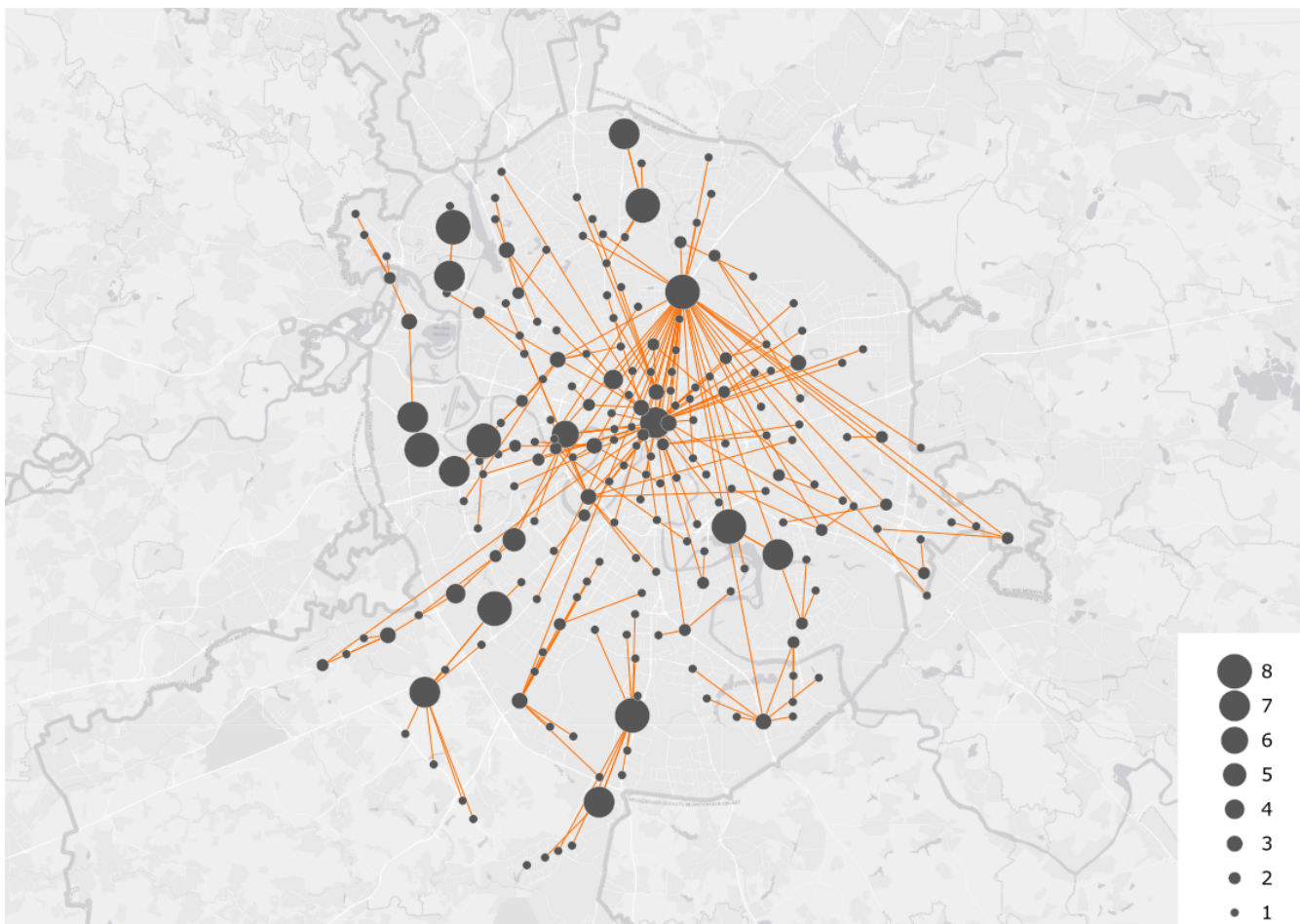


Рисунок 68. Распределение станций (узлов) по уровням иерархии в системе главных направлений по интенсивности среднесуточного пассажиропотока Московского метрополитена за выходные дни лета 2023 г.

Составлено автором.

### **3.4 Пространственная модель распределения пассажиропотока в московском метрополитене**

**Статистическая кластеризация параметров пассажиропотока.** В соответствии с методикой, определенной в разделе 1.4, после расчета всех необходимых параметров по каждой станции (узлу) московского метрополитена проводится расчет статистических кластеров на каждом из ранее рассмотренных интервалов исследования. На большинстве временных срезов, в том числе и последних в хронлогическом порядке (будние и выходные дни IV квартала 2023 г.) установлено наличие 7-8 уровней иерархии. Именно это количество примем для расчета статистических кластеров. Каждому кластеру присвоено условное обозначение. Результаты кластеризации, выполненной методом k-средних, представлены на рисунке 69.

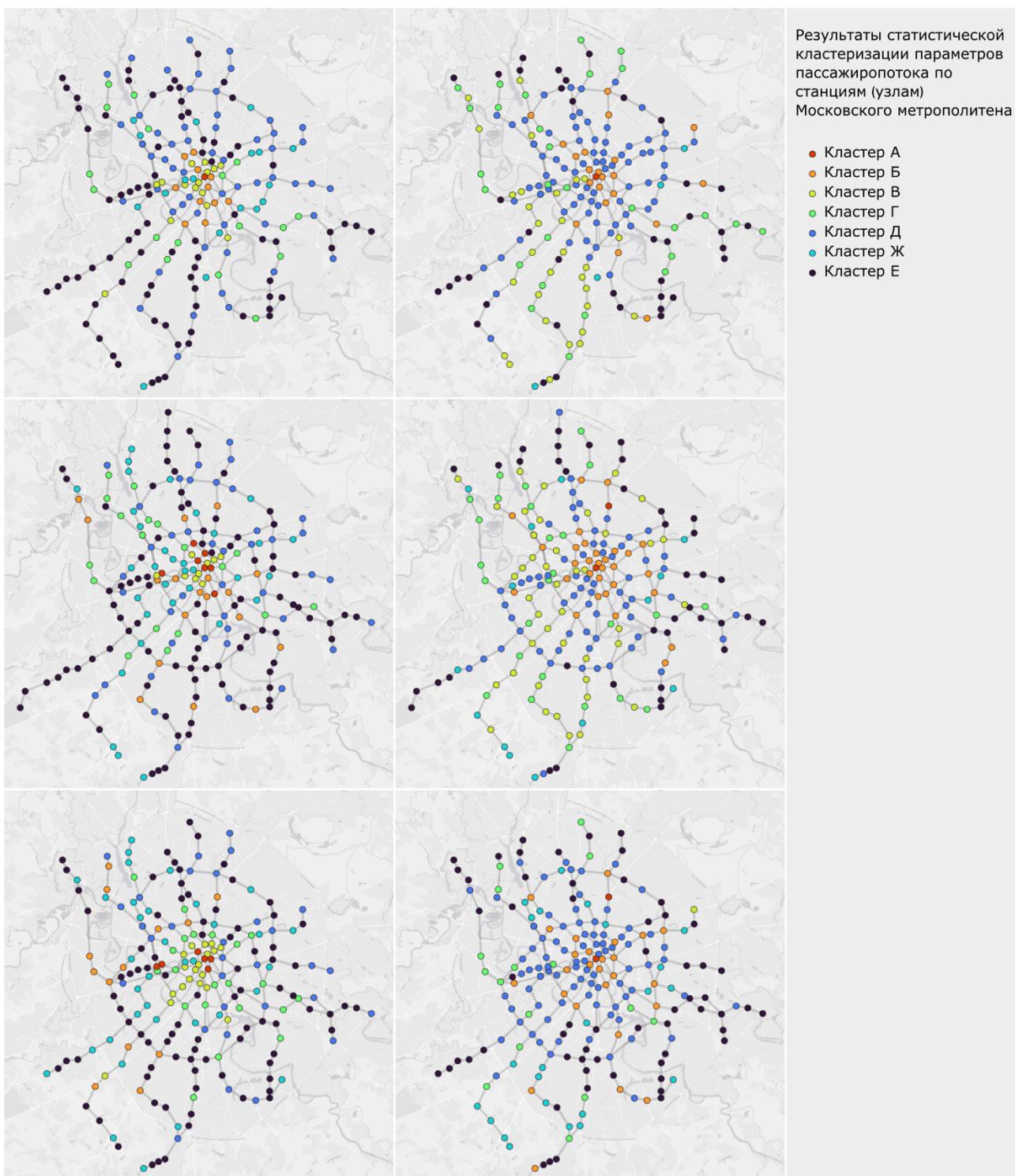


Рисунок 69. Результаты статистической кластеризации станций (узлов) Московского метрополитена по сочетаниям параметров пассажиропотока: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г. Составлено автором.

Станции (узлы), попавшие в два кластера – В и Б – характеризуются положением в центральной части транспортной сети. Исключения единичны – Деловой центр (Москва-Сити), Технопарк и Румянцево, относящиеся к кластеру В. По этим трем можно определить территориальную нишу остановочных пунктов кластера, справедливую и для остальных, – положение в преимущественно монофункциональных общественно-деловых зонах. Именно в монофункциональности зон обслуживания и видится более низкие значения входящего объема пассажиропотока (20-40 тыс. пассажиров) по сравнению со станциями кластера Б, которые в свою очередь обладают максимальными значениями этого параметра. Кроме того, они обладают и наивысшими иерархическими уровнями во всей системе метрополитена. При этом другие параметры, например характер пассажирообмена, коэффициент вариации пассажиропотока и взаимосвязь количества отправленных пассажиров с протяженностью направлений в целом схожи и имеют значения, близкие к средним по всей системе метрополитена. Все эти кластеры встречаются реже остальных (кластер Ж – 15 раз, кластер О – 11). Отдельно выделился узел Охотный ряд / Площадь революции / Театральная, представляющий собой отдельный кластер А.

В отличие от кластеров, рассмотренных выше, в кластер Е попали станции (узлы), не имеющие столь четкой территориальной ниши. Они встречаются как по границе второго топологического яруса, вблизи центральной части ядра агломерации, так и на территориях с ограниченными функциональным разнообразием в многочисленных спальных районах города. Их объединяют следующие признаки: во-первых, сравнительно высокий входящий объем пассажиропотока. В ряде случаев это и есть выделенные нами локальные субцентры по количеству отправленных пассажиров, выделенных нами в разделе 2.1 (Щелковская, Котельники, Теплый Стан). Во-вторых, большая часть остановочных пунктов кластера имеют либо низкие иерархические уровни (первый, второй), либо, будучи расположенными на окраине сети, связаны главным направлением со станциями, занимающими центральное положение. То есть, большая часть этих остановочных пунктов вовлечена в регулярные маятниковые миграции, локальные связи между станциями (узлами) кластера достаточно слабые.

Наиболее часто встречается остановочные пункты, принадлежащие кластеру Ж: 81 из 219 (40% от общего числа станций (узлов)). Чаще всего их можно увидеть за пределами циклического остова сети метрополитена на радиальных линиях. Практически все из них лежат в пределах районов многоэтажной жилой застройки. Заметно их доминирование в южных секторах, в то время как в северном, северо-восточном и восточном на периферии доминируют

ранее рассмотренные станции (узлы) кластера С. Ранее нами было отмечено, что для северных и восточных секторов характерна более низкая территориальная концентрация остановочных пунктов, что приводит к повышению входящего объема пассажиропотока, в то время как для станций (узлов) кластера Ж характерны более низкие значения. Также важной составляющей служит положение в более длинных иерархических цепочках, хотя и на таких же низких уровнях иерархии, как и остановочные пункты кластера Ж.

Станции (узлы) кластера Г единично встречаются на отдельных линиях метрополитена. Это узлы самых высоких иерархических уровней, на которые зачастую замыкаются локальные иерархические цепи (автономные компоненты). Как и остановочные пункты кластера С характеризуются сравнительно высокими объемами входящего пассажиропотока. При этом остальные параметры во многом схожи с параметрами узлов кластера Ж, с характерными чертами пассажиропотока спальных районов.

Точно так же, как и станции (узлы) кластера Г, станции (узлы) кластера Е не имеют четкой территориальной ниши, экстерриториальны. Все представленные в кластере остановочные пункты обладают низкими значениями входящего объема пассажиропотока, а также зачастую расположены на периферии центра: границе зоны сплошной застройки и промышленными (Бутырская, ЗИЛ) либо рекреационными (Белокаменная, Измайловская, Минская) зонами.

Таким образом, в будние дни IV квартала 2019 г. достаточно ярко выражено центро-периферийное распределение свойств пассажиропотока в совокупности. Наиболее ярко «центральность» параметров пассажиропотока характерна для кластеров А и Б, в меньшей мере – для кластера В. Более периферийное положение по совокупности параметров отмечена у элементов кластера Ж. Также характерно наличие экстерриториальных локальных субцентров (кластер Г), а также экстерриториальной внутренней периферии (кластер Е). Далее отследим, насколько устойчиво положение станций (узлов) в рамках того или иного кластера по уже неоднократно рассмотренным временным срезам.

В выходные дни IV квартала 2019 г. достаточно серьезно меняется как количественный, так и качественный состав кластеров. Без изменений остался кластер А, состоящий из единственного узла – Охотный ряд/Площадь революции/Театральная. В значительной мере испытал фрагментацию кластер Ж. Большой частью этот кластер поглощен кластером В, ранее занимавшим положение в пределах преимущественно в пределах Кольцевой линии, теперь – преимущественно в южном, юго-западном и, местами, северо-западном секторах (например, Севастопольская, Коньково, Речной вокзал). Увеличился в числе элементов и кластер Г, во

многим за счет элементов кластера Д (Медведково, Пражская, Теплый Стан). Заметим, что остановочные пункты кластеров В и Г как правило входят в состав автономных компонентов графа главных направлений, где узлы кластера В – узлы более низкой иерархии, узлы кластера Г – более высокой. Станции, ранее лежавшие в кластере В, теперь в большей мере относятся к кластеру Д (Кропоткинская, Полянка, Маяковская). Кластер Д также пополнил число элементов за счет кластера Ж преимущественно в северном секторе. Отметим и увеличение количества элементов в кластере Б, элементы которого теперь обнаруживаются и на окраине ядра агломерации (Щелковская, Новогиреево). Все вышеописанное говорит нам о разнонаправленных процессах: рост центральности на окраинах (как локальных субцентров, так и центров городского значения) одновременно с уменьшением центральности ряда остановочных пунктов в центре.

В будние дни IV квартала 2023 г. по сравнению с будними днями IV квартала 2019 г. общий рисунок расположения элементов тех или иных кластеров в пространстве существенно не поменялся. Подавляющее большинство введенных в ходе исследования в эксплуатацию станций (узлов) были отнесены к кластеру Ж, подтверждая соответствие территориальной принадлежности этого кластера прежде всего к спальным районам города, где преимущественно и находятся новые станции. Заметно размывание концентрации кластера Б, ранее тяготевшего к центру. Кластер В во многом сохранил свое пространственное положение и набор входящих в него элементов. Станции кластера Б, как и в выходные дни IV квартала 2019 г., отмечаются в окраинной части ядра агломерации, причем таких стало еще больше: Теплый Стан, Мякинино. В этот же кластер попали узлы на новой Большой кольцевой линии: Калужская и Авиамоторная. В кластере Е число элементов увеличилось, за счет станций в окраинной части ядра агломерации (Беломорская, Ховрино, Коммунарка). Кластер К также заметно расширился, в частности в него попал узел Москва-Сити (Деловой центр).

В выходные дни IV квартала 2023 г. структура сохраняет преимущественно положение, характерное для аналогичного периода 2019 г. Изменения носят локальный характер, в основном касаются кластера Г. появилось как несколько новых элементов (Войковская, Саларьево), так и перешло в иные кластеры (Некрасовка, Бабушкинская). В летний период (как в будни, так и выходные дни) кластер К включает лишь два элемента – Охотный ряд/Площадь революции/Театральная и ВДНХ, ранее отмеченные нами среди лидеров по ряду показателей на данном временном срезе. Обратим внимание на переход в иные кластеры станций, расположенных вблизи университетов и кампусов: Университет, Студенческая, Аэропорт и др.

В результате выполнения статистической кластеризации удалось определить ключевые группы станций по набору параметров пассажиропотока, их преимущественное пространственное положение. Кроме того, проведена оценка устойчивости кластеров в ключевых временных циклах, затрагиваемых в исследовании.

**Пространственная модель пассажиропотока.** Результаты статистической кластеризации дают основу для обоснования пространственной модели пассажиропотока в московском метрополитене. Модель учитывает выявленные в предыдущих разделах настоящей работы закономерности пространственного распределения параметров пассажиропотока, а также динамику этих закономерностей во времени. Представляет собой совокупность зон (в рамках радиально-кольцевой структуры сети – поясов), для каждой из которых характерен тот или иной тип станций (узлов), а также ключевые пространственные взаимодействия внутри зон и между ними, определяемых конфигурацией главных направлений, их интенсивностью и пассажиронапряженностью.

Предложенная четырехчленная модель состоит из следующих поясов:

1. Центральный пояс;
2. Срединный пояс;
3. Пояс локальных субцентров;
4. Пояс периферии.

Пояса иерархически соподчинены друг другу согласно иерархии входящих в них узлов на основании изученной в разделе 3.2 иерархической структуры пассажиропотока. На рис. 70 представлена теоретическая схема пространственной структуры пассажиропотока. Важно заметить, что в реальности модель имеет строгие секторальные различия, которые будут рассмотрены ниже.

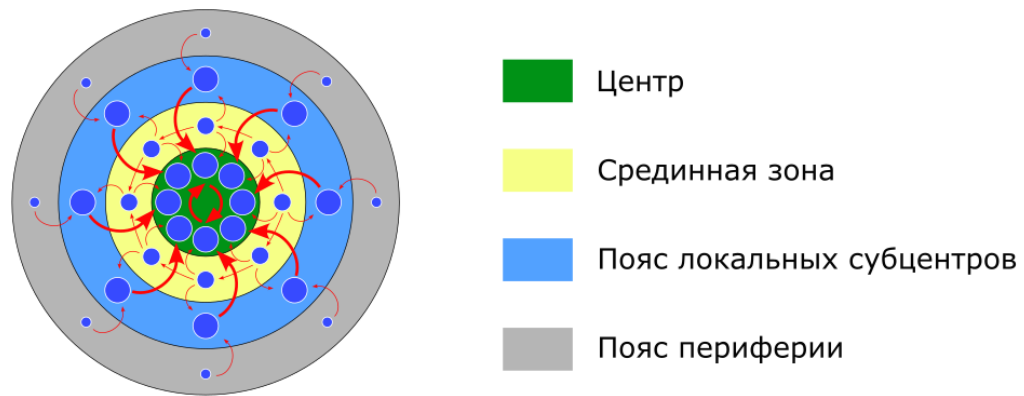


Рисунок 70. Элементы четырехчленной пространственной модели распределения пассажиропотока в системе Московского метрополитена и доминирующие пассажиропотоки в рамках модели. Ширина стрелок пропорциональна интенсивности пассажиропотока, размер пунсона – входящему объему пассажиропотока.

Составлено автором.

Переход от статистических кластеров, выделенных выше, к типам позволит учесть устойчивость выделенных кластеров во времени, поскольку ряд остановочных пунктов встречаются в соседстве со станциями, которые весьма заметно. Это склоняет нас к выделению переходных типов станций, для которых подвижность в зависимости от того или иного временного интервала весьма характерна. Выделенные кластеры дают основу для выделения базовых типов, однако состав и сбалансированность количества станций (узлов) между кластерами не может дать объективной основы для выделения кластеров. В частности, кластер С объединяет как узлы, находящиеся в срединных селитебно-деловых районах, так и станции в составе транспортных хабов, расположенных на окраине ядра агломерации. Раннее изучение отдельных параметров пассажиропотока показало, что кроме входящего объема и невысоких уровней пространственной иерархии эти станции в реальности мало что объединяет: структурные параметры пассажиропотока значительно различаются. Мы разберем эти различия подробнее ниже, комментируя каждый отдельный тип. Кроме того, наиболее типичными представителями кластера С (4 из 6 временных срезов) служат именно субцентры-хабы: Котельники, Планерная, Новокосино, Ховрино. Остальные станции (узлы) встречаются в составе кластера далеко не на каждом временном срезе. Как мы убедились выше, кластер по

своему составу довольно подвижен прежде всего в цикле «будни-выходные», что очевидно говорит о наличии неких отличных свойств пассажиропотока от потоков вышеперечисленных станций. Станции (узлы) кластеров К и О кроме разницы абсолютных значений отдельных параметров (например, входящий объем пассажиропотока) в реальности мало отличаются друг от друга, поэтому могут быть объединены в один базовый тип.

На этом основании, а также на основе наиболее часто встречающихся сочетаний «параметры пассажиропотока – пространственное положение – устойчивость во времени» было выделено 17 типов остановочных пунктов, среди них 7 базовых и 11 переходных.

1. Важнейшие узлы центра
2. Малые узлы центра
3. Узлы срединного пояса
4. Локальные субцентры
5. Субцентры-хабы
6. Узел периферии
7. Экстерриториальные малые узлы

Кроме того, выделяется ряд переходных типов. Как мы выяснили выше, совокупные изменения параметров пассажиропотока чаще всего проявляются в рамках цикла «будни-выходные». Такие узлы будут обозначены двойным названием. На первом месте – свойства наиболее характерные в будни дни, на втором – в выходные дни.

- 1-3. Важнейший узел центра – узел срединного пояса.
- 2-3. Малый узел центра – узел срединного пояса.
- 3-2. Узел срединного пояса – малый узел центра
- 3-4. Узел срединного пояса – локальный субцентр
- 4-3. Локальный субцентр – узел срединного пояса
- 6-3. Узел периферии – узел срединного пояса
- 6-4. Узел периферии – локальный субцентр
- 7-2. Экстерриториальный малый узел – малый узел центра

Отдельно выделим два типа, параметры пассажиропотока которых наиболее ярко меняются в цикле «зима-лето»:

8. Узлы с сезонным падением центральности
9. Узлы с сезонным ростом центральности

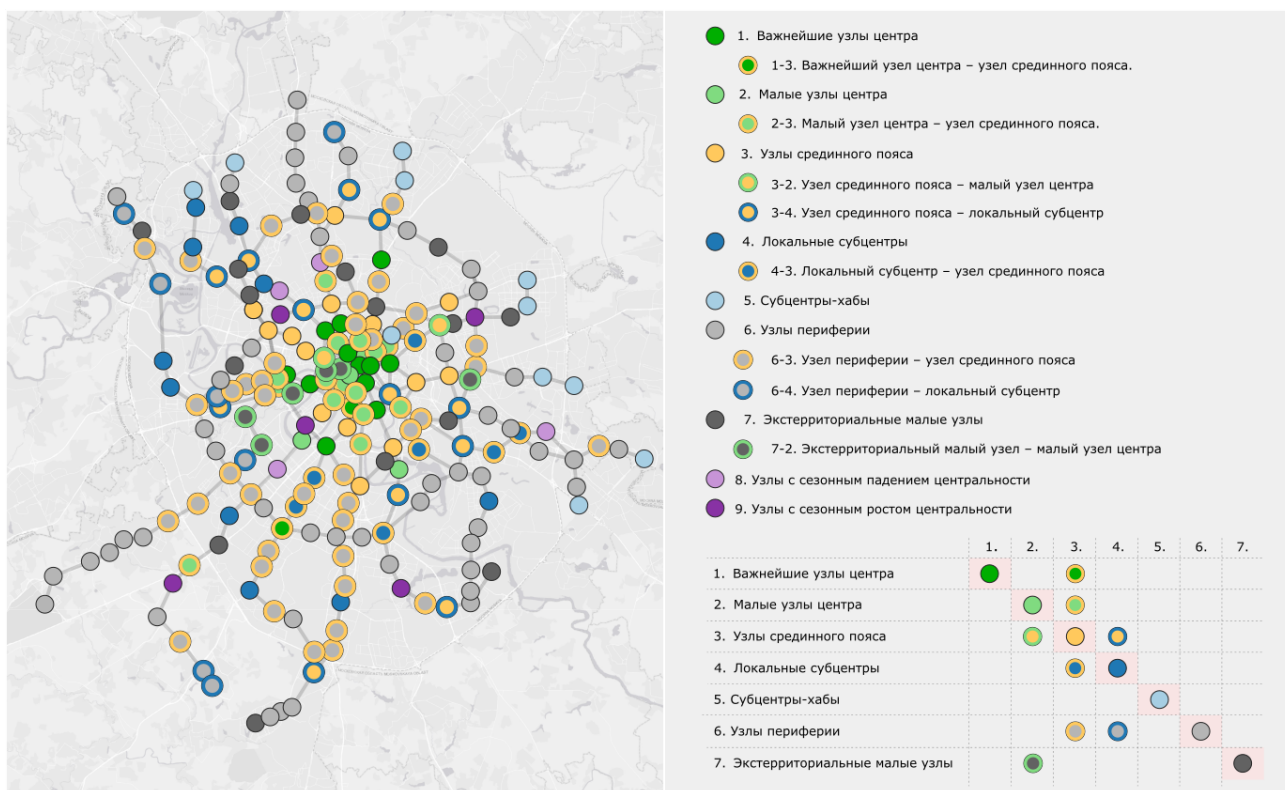


Рисунок 71. Типы станций (узлов) Московского метрополитена в четырехчленной пространственной модели распределения пассажиропотока по состоянию на IV квартал 2023 г.

Составлено автором.

Центр. Зона конвергенции пассажирских потоков высшего, общеагломерационного значения. Станции (узлы), входящие в эту зону, можно разделить на *важнейшие узлы центра*, *малые узлы центра*, а также такие два переходных типа «важнейший узел центра – узел срединного пояса», «малый узел центра – узел срединного пояса». Вне зависимости от принадлежности станции тому или иному типу их объединяют следующие признаки:

- Высокая плотность сети и станций (узлов). Определяется особенностями положения станций в топологической структуре сети: все узлы находятся в пределах второго топологического яруса. Третий топологический ярус полностью входит в границы центральной зоны.
- Особенности пассажирообмена. Все узлы в будние дни имеют преобладающий вечерний час пик, большая часть – резко преобладающий. Это говорит о том, что пассажиры этих станций в будние дни преимущественно используют эти станции для

отъезда в жилые зоны и иные места. В выходные дни узлы центральной зоны также обладают ярко выраженным вечерним пиком, что свидетельствует о наличии в зоне обслуживания большого количества мест притяжения, не связанных с маятниковой миграцией.

- Мощность пассажиропотока участков сети в этой зоне наивысшая среди остальных. Благодаря высокой доле транзитного трафика, мощность пассажиропотока главных направлений, проходящих через эту зону, в среднем сравнительно небольшая (около 6%). Однако, по этому показателю наблюдается достаточно высокая внутренняя неоднородность внутри зоны: есть устойчивые (наблюдаемые на всех или на большинстве временных срезов) участки

Далее идут различия между выделяемыми типами, о которых следует вести речь отдельно.

Важнейшие узлы центра обладают наибольшим входящим объемом пассажиропотока, обладая наиболее сильным гравитационным притяжением, которое в свою очередь, обеспечивается наибольшим функциональным разнообразием зон обслуживания этих узлов. Высокая полифункциональная концентрация порождает наиболее высокоинтенсивные поездки. Кроме этого, вследствие высокой плотности узлов на единицу площади корреспонденции между узлами этого типа наиболее пассажиронапряженные направления. Поездки к/от узлов остальных типов также имеют сравнительно высокие значения. Как следствие, пассажиропоток здесь имеет среднюю степень детерминированности, а распределение поездок по пунктам назначения практически идеально соответствует правилу Ципфа: есть доминирующие направления (в подавляющем большинстве случаев – направления к близлежащим станциям этого же типа), а роль каждого следующего направления убывает с все с меньшей разницей с интенсивностью предыдущего.

Малые узлы центра как правило занимают отличное от важнейших узлов положение: если важнейшие расположены на пересечениях линий метро, тем самым концентрируя на себе двое- и трехкратную мощность пассажиропотока, то малые узлы расположены на радиальных линиях вне пересечений с остальными линиями. Это напрямую влияет на объем входящего пассажиропотока, который здесь в большинстве случаев в 2-3 раза меньше, чем у важнейших узлов. В иерархии узлы этого типа занимают наиболее низкие уровни, не выше второго (например, Полянка). Цепи главных направлений, в которые включены рассматриваемые узлы, чаще всего состоят из единственного направления, замыкаясь на важнейшие узлы центра. Причем роль этого направления часто заметно преобладает в структуре пассажиропотока. В

зоне обслуживания административно-деловая функция доминирует над всеми остальными, что отражается в заметном падении входящего объема пассажиропотока в выходные дни. Этим обусловлен переход ряда станций (узлов) к свойствам узлов срединного пояса в выходные дни, о которых пойдет речь ниже. Речь идет про переходный тип «

Срединный пояс. За исключением отдельных секторов занимает положение внутри первого топологического яруса, а по состоянию на 2023 г. – частично второго топологического яруса. Для этой зоны характерен высокий транзитный трафик между центральным поясом и остальными выделяемыми зонами, мощность пассажиропотока сопоставима со многими участками линий в центральной зоне. География пассажиропотока станций этого пояса максимально разнообразна. Наиболее интенсивный поток (главное направление) идет к важнейшим узлам центральной зоны, поэтому узлы срединной зоны редко занимают высшие иерархические уровни. Уровень иерархии также может быть совершенно разным, однако здесь имеют место прежде всего секторальные различия, которые будут рассмотрены ниже. Между узлами срединной зоны в рамках одного сектора также наблюдаются высокоинтенсивные корреспонденции. Чаще всего, она имеет ту же степень детерминированности, что и у узлов центральной зоны. Однако у узлов срединной зоны высокоинтенсивные связи наблюдаются прежде всего с узлами того же или смежного секторов, тогда как в центральной зоне сектор пункта назначения практически не играет роли. Пиковые значения в суточном режиме входящего пассажиропотока в срединной зоне утром и вечером эквивалентны, либо наблюдается незначительное превышение вечернего пика. В выходные дни пик наблюдается в середине, либо ближе к концу дня (но не в самом конце). Положение в иерархии также может быть различным, однако практически никогда узлы срединной зоны не занимают низшее положение и имеют хотя бы второй иерархический уровень. Чаще всего узлы срединного пояса тяготеют к селитебно-деловым районам города. Однако в выходные дни, когда пояс срединного пояса значительно увеличивает свой территориальный охват, такие узлы встречаются и в селитебных монофункциональных районах. Срединный пояс – наиболее подвижный по количеству и пространственному распределению элементов, входящих в него. В выходные дни благодаря большому количеству узлов переходного типа (с переходом к свойствам срединной зоны), число элементов становится почти в два раза больше. Помимо базового типа (узлы срединной зоны) представлены два переходных типа: *узел срединного пояса – малый узел центра* и *узел срединного пояса – локальный субцентр*. Последние расположены вблизи крупных торговых объектов (Нижегородская – ТЦ «Город», Славянский

бульвар – ТЦ «Океания», Балтийская/Войковская – ТЦ «Метрополис»), основной трафик которых как раз приходится на выходные дни.

Пояс локальных субцентров. Расположен на заметном удалении от центральной зоны. Между центром и поясом локальных субцентров может находиться любая другая из оставшихся зон в зависимости от рассматриваемого сектора. Подробнее остановимся на этом ниже. В этом поясе выделяется два базовых типа узлов – *субцентр местного значения* и *субцентр-хаб*. Эти два типа имеют общее основание – существенное превышение входящего объема пассажиропотока над значениями показателя у соседних узлов, относимых к иным типам. Единичная, но повсеместная по секторам идентификация таких узлов позволяет выделить их в пояс. Разделение на два отдельных типа обусловлено различными факторами формирования входящего объема пассажиропотока. Пассажиропоток субцентров местного значения складывается благодаря различным факторам. Как правило, это один или несколько крупных объектов инфраструктуры различных отраслей (торговой, образовательной и т.д.), имеющих местное значение (торгово-развлекательный центр «Коламбус» около станции Пражская) или даже общегородское значение (Московский государственный институт международных отношений около станции Юго-Западная). Совершенно другая ситуация у субцентров-хабов, где доминирующий фактор пассажирогенерации – наличие пересадочного хаба, в состав которого входит узел. Безусловно, вокруг подобных хабов могут возникать различные объекты инфраструктуры, однако их роль в формировании пассажиропотока вторична. Скорее, появление таких объектов можно обусловить именно транспортно-географическим положением хаба. Важно отметить, что далеко не все станции, входящие в состав какого-либо хаба, отнесены к этому типу. Среди узлов срединной зоны можно выделить подобные станции, например Электрозаводская. Даже среди субцентров местного значения есть подобные узлы, как ранее рассмотренная станция Юго-Западная. Кроме этого, субцентр местного значения среди прочих функций может так же, как и субцентр-хаб, служить пересадочным узлом на иные магистральные/пригородные/междугородние виды транспорта. При прочих равных условиях, субцентры местного значения располагаются ближе к центру, хотя при рассмотрении секторальных различий может быть обнаружена и обратная ситуация.

*Субцентры местного значения* помимо более высоких значениях входящего объема пассажиропотока отличаются от соседних узлов особенностями пассажирообмена (который контрастирует на срезе выходных дней, в будние дни эти различия не столь заметны) и, главное, более высоким уровнем иерархии. Субцентры обладают более высоким гравитационным потенциалом благодаря вышеописанным факторам и могут замыкать на себе

несколько главных направлений. Благодаря этому здесь наблюдается достаточно низкий уровень поляризации структуры пассажиропотока, а интенсивность по направлениям к другим станциям (узлам) мало зависит от протяженности, поскольку она может быть совершенно разной по направлениям как к станциям зон ближней и дальней периферии, так и станциям срединной зоны и центра. Уровень иерархии может быть разным в зависимости от того или иного сектора, в том числе и высшим. Заметим, что в отличие от срединной зоны, количество субцентров местного значения с высшим уровнем иерархии заметно сильнее.

*Субцентры-хабы* по особенностям параметров пассажиропотока часто схожи с узлами периферии. Однако, как уже было замечено, входящий пассажиропоток здесь заметно выше, благодаря гораздо более широкой зоне обслуживания, часто выходящей за пределы ядра агломерации в пригородную зону. Крайне характерен пример узла Комсомольская. Несмотря на его заметно более близкое положение к центру, чем даже у некоторых узлов срединной и даже центральной зоны, все признаки указывают на то, что пассажиропоток узла формируется в периферии, хотя вокруг – сравнительно полифункциональное пространство, соответствующее как минимум срединной зоне. Все благодаря железнодорожным вокзалам, расположенным около узла, куда прибывают сотни тысяч пассажиров ежедневно. Благодаря этому узел Комсомольская не только определен как субцентр-хаб, но еще имеет одно из первых значений по величине входящего объема пассажиропотока. Совершенно аналогичные свойства пассажиропотока наблюдаются у узлов Щелковская, Новогиреево, Новокосино.

Пояс периферии. Служит зоной преимущественной дивергенции пассажиропотока. Пассажиры станций (узлов), относящихся к зоне периферии, активно участвуют в трудовых поездках, что отражается в характерных суточных пиках пассажиропотока в первой половине дня, а также дальности наиболее интенсивных поездок. Отсюда можно охарактеризовать типичную нишу для станций (узлов) этого пояса: селитебные районы ядра агломерации. Именно в будние дни с учетом станций (узлов) переходных типов этот пояс имеет наивысший территориальный охват. Чаще всего в цепях поездок замыкаются на локальные субцентры, реже – на узлы срединного пояса, в отдельных случаях – на узлы центрального пояса. Преимущественное тяготение пассажиропотока к ближайшим локальным субцентрам подтверждена анализом структурных параметров пассажиропотока: структура поездок от этих станций (узлов) чаще всего наиболее поляризованная. У узлов периферии установлена максимальная степень взаимосвязи интенсивности по направлению и его протяженности, интенсивность коротких поездок здесь заметно выше чем, например, в срединном поясе. Характерно, что эта зависимость сохранилась у значительной части узлов типа и в выходные

дни, когда структура поездок подавляющего большинства остальных узлов становилась максимально недетерминированной. Сохранение или незначительное изменение параметров, несмотря на недельные, сезонные или многолетние колебания – еще одна особенность именно этого типа. Однако, она характерна только для узлов базового типа – *узлы периферии*. Узлы базового типа, расположенные за пределами Московской кольцевой автодороги, также показали наибольший относительный рост входящего объема пассажиропотока, а также интенсивности и пассажиронапряженности наиболее часто благодаря эффекту низкой базы. Внутри пояса периферии заметны секторальные различия. Например, если в юго-восточном секторе большая часть узлов относится к базовому типу, то в юго-западном – большое количество переходных узлов к срединному поясу (*узлы периферии – узлы срединного пояса*), демонстрируя принципиально иной характер мобильности в выходные дни. Для юго-западного, западного и северо-западного секторов характерно наличие еще одного переходного типа – *узлы периферии – локальные субцентры*, что очередной демонстрирует повышенную автономность этих частей сети метрополитена в части распределения пассажиропотока.

Экстерриториальные малые узлы. В силу исключительно малого количества, а также недетерминированного положения в пространстве не принадлежат ни одному из выделенных поясов. Перечисленные узлы резко контрастируют по параметрам с соседними узлами. Их главное отличие от узлов периферии: пассажиропоток станций не вовлечен в регулярные трудовые поездки. Более того, этот пассажиропоток находится в стороне от ключевых высокоинтенсивных и высоконапряженных направлений. По структурным параметрам схож со узлами срединного пояса. Отдельные узлы имеют переходный тип к малым узлам центра в выходные дни. Прежде всего, это относится к станциям, расположенным ближе к центральной части ядра агломерации (Смоленская и Арбатская Филевской линии, Минская, Ломоносовский проспект).

Наконец, рассмотрим два специфических переходных типа, демонстрирующих изменение свойств пассажиропотока между сезонами. При этом в соответствии сезоном они сохраняют набор значений параметров пассажиропотока схожим как в будние, так и выходные дни. *Узлы с сезонным падением центральности* чаще всего имеют в своей зоне обслуживания студенческие кампусы, таким образом вуз становится ключевым центральным местом и формирует набор параметров пассажиропотока, характерный для срединной зоны или локальных субцентров. *Узлы с сезонным ростом центральности* расположены вблизи крупных рекреационных зон (Измайлово, Царицыно, Спортивная, ЦСКА).

Далее рассмотрим секторальные различия в распределении элементов четырехчленной пространственной модели (рисунок 72).

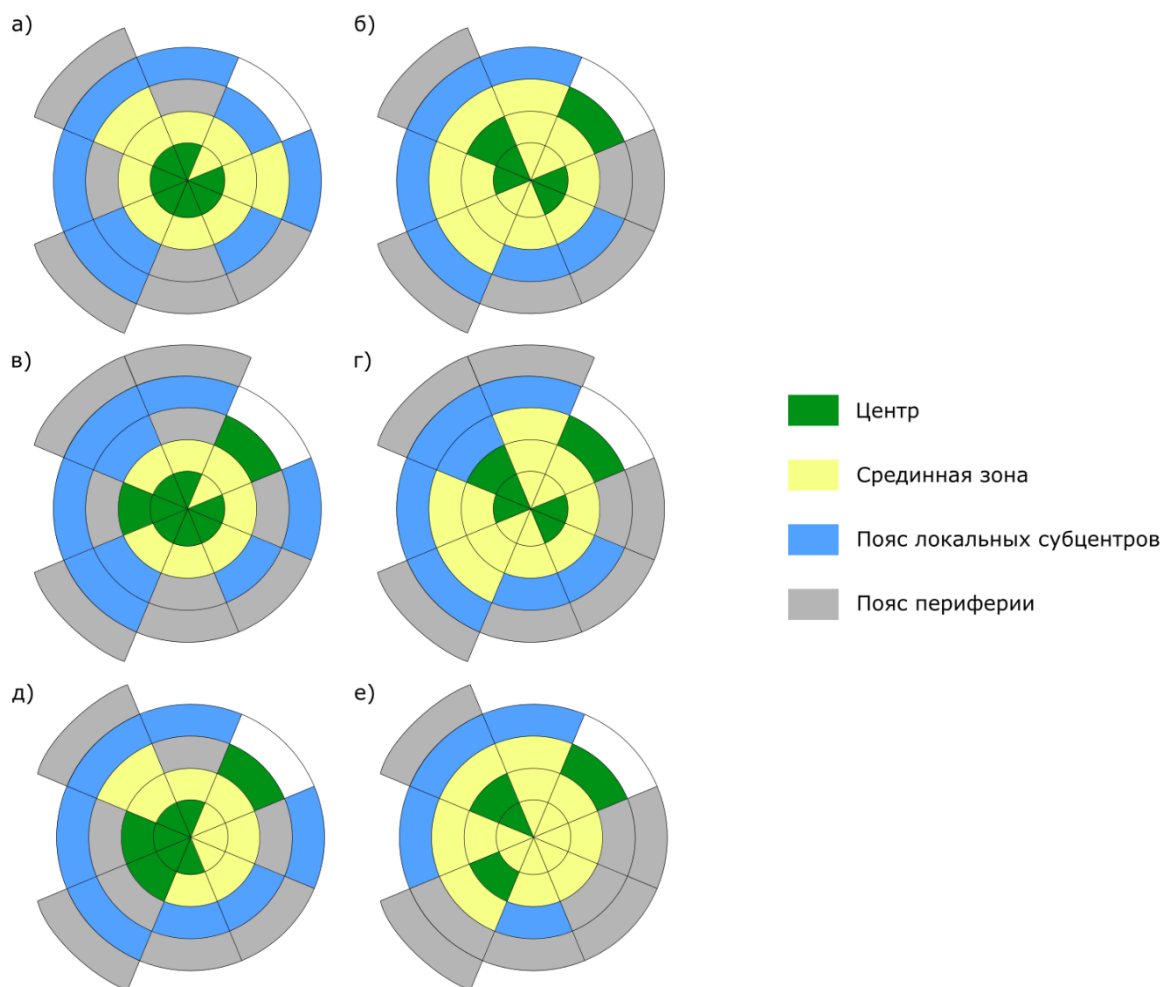


Рисунок 72. Четырехчленная пространственная модель распределения пассажиропотока в системе Московского метрополитена с поправкой на секторальные различия и пространственное развитие сети: а) в будние дни IV квартала 2019 г.; б) в выходные дни IV квартала 2019 г.; в) в будние дни IV квартала 2023 г.; г) в выходные дни IV квартала 2023 г.; д) в будние дни лета 2023 г.; е) в выходные дни лета 2023 г.

Составлено автором.

Юго-западный сектор. Центральная зона в этом секторе вытянута по направлению к окраине, захватывая участок Сокольнической линии от станции Фрунзенская до станции

Воробьевы горы и Ленинский проспект. С приближением к окраине в будние дни ярко выраженной срединной зоны не наблюдается: на разных временных срезах проявляются локальные субцентры (Университет, Академическая, Новые Черемушки) с сильным гравитационным потенциалом, который в этом секторе устойчиво высок на любом из исследованных временных срезов как ни в одном другом. Здесь наблюдаются крайне интенсивные и пассажиронапряженные направления вдоль радиальных линий (Сокольнической и Калужско-Рижской). Можно утверждать о наличии в этом секторе высокоавтономной от центра системе местных корреспонденций, практически нехарактерной для иных секторов. Система незначительно увеличилась с вводом Большой Кольцевой линии и в качестве нового полноценного центра с 2023 г. выделяется узел Воронцовская/Калужская в дополнение к еще двум субцентрам местного значения – Юго-Западная и Теплый Стан. В выходные дни эта высокоавтономная система сохраняется, однако возрастает количество поездок в другие пояса и сектора, вследствие чего происходит сдвиг рассматриваемого участка в срединную зону. Пояс периферии широко представлен преимущественно за пределами МКАД.

Западный сектор. В силу особенностей развития сети, здесь представлено сравнительно небольшое количество станций, сеть Московского метрополитена имеет наиболее слабое субширотное развитие. Центральная зона, на конец исследовательского периода приобретает продолжение в сторону западной окраины, доходящее до узла Деловой центр. Здесь наблюдается инверсия пространственного градиента: пояс периферии В выходные, как и во многих других секторах, поляризация снижается и срединный пояс значительно расширяется. От станции Крылатское к окраине Арбатско-Покровская линия переходит в северо-западный сектор. Несмотря на малое количество станций, пояс субцентров здесь представлен сразу двумя узлами – Молодежная и Крылатское. Они в качестве субцентра местного значения образует устойчивую к ключевым временным циклам локальную систему с узлами периферии, продолжающуюся в северо-западном секторе.

Северо-западный сектор. Морфологически во многом схож с юго-западным сектором, за исключением центральной зоны, которая уже не имеет продолжения в сторону северо-западной окраины. Вместо этого крайне широко представлена срединная зона, в которой особо важно выделить станцию ЦСКА. Если в будние дни она полностью соответствует своей зоне, то в выходные дни ярко демонстрирует признаки важнейшей станции центра, причем с течением времени это только усиливается. Все благодаря мощной точке притяжения – ТРЦ «Авиапарк». Срединная зона продолжается вдоль Замоскворецкой линии вплоть до узла

Балтийская/Войковская. В этом секторе она наиболее устойчива во всех временных циклах, в отличие от остальных секторов. Субцентры местного значения (Сходненская на Таганско-Краснопресненской линии и Водный Стадион на Замоскворецкой). Зона периферии на Таганско-Краснопресненской и Замоскворецкой линиях представлена фрагментарно единичными станциями, на Арбатско-Покровской линии – поясом станций от Пятницкого шоссе до Мякинино (по состоянию на 2019 г.). Последняя – наиболее нестабильная с точки зрения наблюдаемых параметров в цикле недельных колебаний. Необходимо выделить устойчивость гравитационного потенциала узла Сходненская на всех временных срезах, что дает основание выделить по образцу с юго-западным сектором высокоавтономную от центра систему местных корреспонденций. Примечательно, что ее границы совпадают с историческими границами бывшего города Тушино.

Северный сектор. Через него проходят северные участки Люблинско-Дмитровской и Серпуховско-Тимирязевской линий. После непродолжительной срединной зоны начинается обширная зона ближней периферии. В течение исследовательского периода прошла эволюцию параметров пассажиропотока в сторону узлов центрального пояса станция Дмитровская: в ее зоне обслуживания получили развитие арт-пространства «Винзавод» и «Флакон». На Люблинско-Дмитровской линии не выделено ни одного субцентра, субцентры этого сектора сосредоточены на Серпуховско-Тимирязевской линии: Отрадное и Алтуфьево, а также станциях Калужско-Рижской линии: Медведково и Бабушкинская. Отрадное и Алтуфьево при этом их нельзя выделить в качестве стабильных субцентров – их влияние становится заметным только в выходные дни. Малая гравитационная сила и удаленность от центра не позволила им стать полноценным субцентром.

Северо-восточный сектор. Включает в себя единственную линию –Калужско-Рижскую (участок до станции ВДНХ). Срединная зона здесь доходит до станции ВДНХ, которая в течение периода исследования заметно повышает свою роль не только в локальных, но и общегородских перевозках, достигая практически максимального уровня иерархии в выходные дни летних месяцев, что дает основание перейти ей в тип важнейших станций центра. В другие временные срезы станция также имеет значительный гравитационный потенциал. Остальные станции чаще всего замыкаются на станции в центральной зоне, благодаря чему отнесены к узлам срединной зоны.

Восточный сектор. Представлен тремя линиями – Сокольнической, Арбатско-Покровской и Калининской. Имеет ярко выраженную срединную зону, а также зону ближней периферии. В отличие от всех остальных секторов здесь отсутствует хоть сколько-нибудь

выраженный субцентр местного значения, что обозначает здесь зону сильной дивергенции пассажиропотоков. Пояс субцентров представлен лишь субцентрами-хабами (Щелковская, Новокосино и Новогиреево), не обладающих высоким гравитационным потенциалом.

Юго-восточный сектор. Единственный сектор, в котором не наблюдается синхронного зонирования линий. Если срединная зона здесь представлена однородно на каждой линии, то с продвижением к окраине ядра агломерации различия нарастают все больше. Внушительная часть узлов, расположенных на Таганско-Краснопресненской линии, обслуживает пригородный пассажиропоток, в то время как узлы Люблинско-Дмитровской, а с 2023 г. еще и Некрасовской линии в основном принадлежат к узлам периферии. Отсюда же с течением времени рождается постепенный дрейф периферийной функциональной зоны от дальней периферии к ближней. На Таганско-Краснопресненской и Некрасовской линии зона дальней периферии расположена на значительно более далеком расстоянии от центра, чем на Люблинской, формируясь вокруг субцентра местного значения – Люблино. Однако, как Люблино, так и не обладают столь мощным гравитационным потенциалом, как узлы центра, и проигрывают им конкуренцию в выходные дни.

Южный сектор. Включает в себя южные участки Серпуховско-Тимирязевской и Замоскворецкой линий, а также МЦК и БКЛ. В отличие от других секторов, срединная зона в будние дни здесь фактически не выражена. Однако в выходные дни, напротив, срединная зона здесь достигает окраины циклического остова – как и в юго-западном секторе, что говорит об увеличении интенсивности поездок, прежде всего внутри обнаруженной зоны. Отдельно стоит выделить узел Технопарк как экстерриториальный малый узел центра. Ключевая особенность этого сектора – наиболее близкая к центру зона периферии, начинающаяся уже от пересечения радиальных линий с Большой Кольцевой. Гравитационный потенциал субцентров местного значения – Пражская и Домодедовская – выше, чем у субцентров юго-восточного сектора, но ниже, чем у субцентров юго-западного, что проявляется в их нерегулярной автономности.

**Влияние факторов распределения пассажиропотока на его пространственную модель.** Установленная пространственная модель по набору элементов (четыре пояса) во многом совпадает с актуальными исследованиями. П.П. Эм выделил в пространстве ядра Московской агломерации как самостоятельной системе центральных мест четыре иерархических уровня [Эм, 2017]. Н.К. Куричев [Куричев, Куричева, 2020] выделил шесть поясов во всей Московской агломерации, из которых четыре встречаются в пределах ее непосредственного ядра.

Отметим подвижность границ выделенных поясов как в территориальном, так и временном аспекте. Более того, результаты исследования наглядно демонстрируют, что речь не идет о дискретных границах: переход между поясами осуществляется во многом континуально даже несмотря на наличие ярко выраженных физических и административных барьеров, четко разделяющих зоны обслуживания станций, тем не менее обладающих схожими свойствами пассажиропотока. В качестве примера отметим обширный пояс локальных субцентров в северо-западном секторе, представленный станциями (узлами), относящихся к соответствующему базовому типу.

Наиболее подвижны границы в рамках цикла «будни-выходные». Вне зависимости от временного среза в данном цикле наблюдается деконцентрация узлов центральной зоны и уменьшение разницы потенциалов между центром и окраиной, что во многом соответствует пространственной конфигурации параметров пассажиропотока, выявленной при изучении структурных параметров пассажиропотока по территориальному признаку (раздел 3.1). Кроме того, в выходные дни серьезно увеличивается срединная зона как за счет узлов центрального пояса, так и периферии, а также увеличивается количество узлов-локальных субцентров. Это говорит о существенном снижении «разницы потенциалов» между центральной и окраинной частями ядра агломерации. Очевидно, речь идет о перераспределении пассажиропотока к точкам притяжения, интерес к которым. Среди наиболее ярких «якорей» выделим торговоразвлекательные центры и рекреационные зоны.

Эволюция выявленной четырехчленной структуры в ходе исследовательского периода также имеет место. В основном осуществляется за счет изменения параметров пассажиропотока отдельных. Доминирующим процессом служит рост срединного пояса и пояса локальных субцентров, во многом за счет сокращения периферии. Все это мы также видели и на более ранних этапах исследования: когда в близких к окраинным частям ядра агломерации был установлен рост количества наиболее пассажиронапряженных направлений. Самая высокая концентрация таких направлений (а вместе с ними – и автономных компонентов главных направлений, которые зачастую совпадают с наиболее пассажиронапряженными) встречается в: 1) центре ядра агломерации, 2) юго-западном секторе, 3) северо-западном секторе. Таким образом, помимо того, что гравитационный потенциал центральной части агломерации отнюдь не столь сильный, каким его принято считать; еще наблюдается и его рост в юго-западном и северо-западном секторах с формированием не просто локальных субцентров, а субцентров городского масштаба. Однако

с точностью можно будет утверждать лишь по происшествии хотя бы нескольких лет с момента окончания исследовательского периода.

Обратим внимание на морфологию юго-западного и северо-западного секторов чуть подробнее. В самом начале исследования установлено, что именно в эти части города исторически метрополитен получил приоритетное развитие. Долгое время метрополитен не доходил до обширных спальных районов в северной, южной, юго-восточной частях ядра агломерации, что, помимо прочих факторов (таких как близость к промышленным территориям, экологический фактор и т.д.), предопределило их более низкое качество жизни по ряду социально-экономических показателей [Вендина., Панин, Тикунов, 2019]. С наступлением рыночной экономики в 1990-е годы разница в уровне жизни определила качественные и количественные различия в размещении центральных функций между северо-западом, западом и юго-западом с одной стороны и широким поясом от северной до южной части ядра агломерации через восток с другой стороны. Весьма вероятно, что именно более высокая территориальная концентрация центральных функций в юго-западном и северо-западном секторах обеспечила более высокий гравитационный потенциал отдельных центральных мест на локальном масштабе и, соответственно, рост пассажиронапряженности локальных направлений. В остальных частях ядра Московской агломерации именно низкая концентрация центральных функций обеспечивает высокоинтенсивные потоки из периферии в центр и обратно.

Преимущественное территориальное развитие сети метрополитена в северо-западном, западном и юго-западном направлениях обеспечило более высокую концентрацию станций (узлов). На этом фоне в среднем станции этих секторов имеют более низкий объем пассажиропотока. Особенно хорошо это видно на примере наземного участка Филевской линии (от узла Кунцевская до станции Фили). Кажется, что более низкий входящий объем пассажиропотока должен давать более низкий наземный пешеходный трафик, что должно отразиться в количестве центральных функций. Для ряда станций это действительно выполняется, однако по вышеописанным причинам центральные места все же имеют свойства к концентрации вокруг небольшого, но весьма ярко заметного набора станций (узлов), пассажиропоток которых качественно отличаются по значениям параметров от соседних. Ранее мы неоднократно обращали внимание на эти станции: Университет, Академическая, Водный Стадион, Сходненская. В остальных секторах более низкая территориальная концентрация станций логичным образом дала в среднем более высокий объем входящего пассажиропотока. Это особенно заметно, например, на восточной окраине Калининской

линии. При этом, по всей видимости, одного лишь высокого трафика оказывается недостаточно для того, чтобы сформировать вокруг этих станций (например, Бабушкинская, Новогиреево, Люблино) такие центральные функции, которые смогли бы качественно изменить параметры пассажиропотока к более «центральным».

Таким образом, мы можем говорить о двух пространственных инвариантах распределения пассажиропотока, характерных для ядра Московской агломерации. Первый: с ярко выраженной периферией и локальными субцентрами, концентрирующем в своей зоне обслуживания большое количество центральных мест, характерный для юго-западного, западного и северо-западного секторов. Локальные направления здесь более заметны в структуре поездок. Второй: также с выраженной периферией (в масштабе всего ядра агломерации), но не столь контрастирующими на их фоне субцентрами (т.е. гравитационный потенциал этих субцентров преимущественно слабее, чем субцентров в инварианте первого типа). Локальные направления здесь заметны в структуре поездок значительно слабее, гравитационный потенциал центра ядра агломерации выше. Через эти два инварианта объясняется анизотропия параметров пассажиропотока внутри ядра Московской агломерации. Однако, еще раз отметим, что данная анизотропия в значительной степени размывается в выходные дни.

Далее выделим изменения функциональных элементов города, повлекших за собой неизбежные изменения параметров пассажиропотока. Например, узлы, расположенные в районе делового центра Москва-Сити, приобрели признаки важнейших узлов центра, сохраняя их не только в будние, но и выходные дни, что связано с ростом символической ценности этого района, за которой последовало расширение качественного и количественного разнообразия в сфере ритейла, общепита и иных услуг. Наглядна эволюция параметров пассажиропотока станции ВДНХ, также перешедшая в важнейшие узлы центра. Процессы джентрификации, которые были отмечены как характерные для Московской агломерации, очевидно, имеют более длинный временной лаг, чтобы быть реально выраженными через изменения параметров пассажиропотока в крупнейших очагах этого процесса (Нагатинская, ЗИЛ, Бутырская и т.д.). Однако характерен пример станции Дмитровская, ранее проявлявшая признаки узла срединной зоны и ставшая к концу периода малым узлом центре, пусть и в рамках переходного типа. В ее зоне обслуживания получили развитие как арт-пространства «Хлебзавод» и «Флакон», ставшие якорем для многочисленных офисных пространств в комплексе «Савеловская Сити» и окрестностях.

Рост транспортной сети в ходе исследовательского периода поспособствовал сдвигам как отдельных параметров пассажиропотока, однако не повлиял на его общую пространственную структуру. Замыкание Большой кольцевой линии (БКЛ) в юго-западном секторе привело к сдвигу параметров пассажиропотока узла Воронцовская/Калужская к значениям, характерным для центрального пояса. Характерно, что для восточного сектора, где благодаря строительству Некрасовской и Большой кольцевой линий плотность сети приблизилась к значениям в юго-западном секторе, подобных сдвигов не произошло. Можно сделать вывод о том, что БКЛ лишь способствовало процессу автономизации, который и ранее наблюдался на юго-западе. Подробнее процесс влияния ввода Большой кольцевой линии на перераспределение пассажиропотока отражено в отдельном исследовании [Киселев, 2025a].

Таким образом, функционально-планировочная структура города имеет преимущественное влияние на пространственное распределение пассажиропотока, определяя ключевые векторы пространственного взаимодействия. Транспортно-географические факторы отчасти способствуют формированию локальных субцентров и перераспределению пассажиропотока в локальном масштабе. Среди временных факторов стоит выделить преимущественное влияние цикла «будни-выходные», приводящее к размыванию контрастов между центральным поясом и поясом периферии с формированием протяженного срединного пояса. Сезонные факторы влияют на параметры пассажиропотока отдельных станций (узлов). Многолетние изменения связаны либо с изменением социальных и транспортных привычек (нарастающее доминирование более коротких поездок), либо с эволюцией центральных функций в городском пространстве, неизбежно влияющих на изменение параметров пассажиропотока.

**Выводы к главе 3.** Взаимосвязь между протяженностью маршрута корреспонденции и интенсивностью пассажиропотока имеет обратный экспоненциальный характер, особенно заметный на периферийных станциях агломерации. Интенсивность пассажиропотока по станциям отправления распределена неравномерно: станции юго-западного и северо-западного секторов ядра агломерации характеризуются высокой концентрацией на локальных направлениях, в то время как восточные станции показывают более равномерное распределение. Со временем неравномерность распределения интенсивности пассажиропотока по станциям назначения возрастает, что указывает на поляризацию структуры пассажиропотока и усиление доминирующих направлений.

Анализ пассажиропотока станций Московского метрополитена по времени пиковой нагрузки выявил четкую пространственную структуру, соответствующую модели "центр-

периферия". Станции, расположенные в центральной части ядра агломерации, характеризуются преобладанием вечернего пика пассажирообмена, в то время как на периферийных станциях доминирует утренний пик. Выявлена устойчивость этой пространственной структуры во времени, несмотря на изменения в абсолютных значениях пассажирообмена.

Граф главных направлений, представляющую собой основу иерархической структуры пассажиропотока в московском метрополитене имеет древовидную форму с изолированными компонентами, при этом узлы высших уровней сосредоточены в центре ядра агломерации. Устойчивость этой структуры меняется в зависимости от рассматриваемого временного среза: в выходные дни наблюдается большая децентрализация, а в будние дни и летом — централизация. Доля мощности главных направлений в суммарном пассажиропотоке снижается по мере приближения к центру ядра агломерации, что указывает на значительную роль транзитного трафика в этих зонах.

Для описания ключевых закономерностей пространственно-временного распределения пассажиропотока предложена четырехчленная пространственная модель, включающая центральный пояс, срединный пояс, пояс локальных субцентров и пояс периферии. Каждому поясу соответствуют базовые и переходные типы станций (узлов) по совокупности параметров пассажиропотока. Выявлены заметные межсекторальные различия по порядку расположения, мощности и набору характерных типов станций (узлов), сводящиеся к двум основным пространственным инвариантам. Сделаны выводы о влиянии факторов распределения пассажиропотока, выделенных в главе 1, на свойства пространственной модели.

## Заключение

В диссертационном исследовании поднят вопрос о роли географии транспорта в изучении пассажирских потоков *городских* транспортных систем. Ранее географы-транспортники в основном фокусировали свое внимание на изучении пассажиропотоков транспортных систем более высоких уровней иерархии пространственной организации (район, страна, мир). Работа вводит в научный дискурс географический подход к изучению пассажиропотоков в городских транспортных системах на примере системы Московского метрополитена.

Уточнено понятие «пассажиропоток» и его основные параметры. Пассажиропоток рассматривается как явление, а не только как измеряемая величина. Выделены *базовые параметры*, описывающие общий характер распределения пассажиропотока в сети, а также *структурные параметры*, дающие понимание о роли каждого узла в формировании корреспонденций различной пространственной конфигурации, а также о пиковом времени как маркере функциональности зоны обслуживания. Определен исследовательский период: с IV квартала 2019 г. по IV квартал 2023 г.

Доказано, что для транспортно-географических исследований вполне применимы данные транспортных смарт-карт. Отмечаются как преимущества, так и ограничения их использования, а также подходы к их анализу, применяемые в зарубежных исследованиях. На основе структуры исходных данных разработана методика расчета матрицы корреспонденций в транспортных системах, которые ведут учет пассажиров только на входе. Согласно ей, конечной точкой поездки служит начальная точка следующей поездки (если таковая имеется), а также делается поправка на входящий объем пассажиропотока.

Рассмотрены *группы факторов*, определяющие пространственное распределение параметров пассажиропотока: *транспортно-географические и функциональные*, а также факторы *времени*, актуальные для исследовательского периода: с IV квартала 2019 г. по IV квартал 2023 г., в течение которого сделан срез по средним значениям в будние и выходные дни, а также по средним значениям в летний и осенне-зимний сезон 2023 г. для выявления сезонных изменений в распределении параметров пассажиропотока. В течение периода исследования (с 1 октября 2019 г. по 31 декабря 2023 г.) произошел спад общего объема пассажиропотока, инициированный пандемией COVID-19. К концу периода исследования он восстановился на величину 91% от изначального.

Транспортно-географические факторы имеют преимущественно локальное влияние на интенсивность и напряженность отдельных направлений, наиболее выраженное в юго-западном и западном секторах. Функциональные факторы определяют гравитационный потенциал станций, измеряемый уровнем иерархии. Временные факторы повлияли на снижение общего объема пассажиропотока, а также оказывают наибольшее влияние на неоднородность пассажиропотока.

Определена методика исследования, включающая в себя анализ базовых параметров:

- входящий объем;
- интенсивность;
- пассажиронапряженность;
- мощность;

а также структурных параметров:

- неоднородность входящего объема пассажиропотока по территориальному признаку;
- упорядоченность интенсивности пассажиропотока и протяженности направлений;
- доля мощности главных направлений в общей мощности пассажиропотока;
- неоднородность входящего объема пассажиропотока по времени пиковой нагрузки.

Распределение как базовых, так и структурных параметров пассажиропотока тесно связано с их положением в транспортной системе города. Для распределения базовых параметров характерны следующие закономерности:

1. Станции (узлы), расположенные в центральной части города, в пределах второго топологического яруса сети, имеют наибольшие значения входящего пассажиропотока.
2. Станции (узлы), входящие в состав крупных транспортных хабов, также характеризуются высокими значениями входящего пассажиропотока вне зависимости от их пространственного положения. Такие станции (узлы) зачастую контрастируют с соседними по величине этого показателя, образуя на поперечном профиле локальные субцентры.
3. Между двумя вышеприведенными группами станций (узлов) проходят магистральные направления с наибольшим количеством перевезенных пассажиров (преимущественно в северо-западном, а также восточном и юго-восточном секторах). Кроме того, высокоинтенсивные направления сконцентрированы в

центральной части ядра агломерации, преимущественно в пределах границ третьего топологического яруса сети метрополитена.

4. Самые высоконапряженные направления сконцентрированы на окраинах и в разной мере представлены в разных радиальных секторах (преимущественно в юго-западном, северо-западном, а также восточном). Зачастую они тяготеют к субцентрам по входящему объему пассажиропотока.
5. Станции с низким входящим объемом пассажиропотока располагаются преимущественно в селитебном поясе ядра Московской агломерации.
6. Подтверждено центрально-периферийное распределение мощности пассажиропотока. Для кольцевых линий характерно увеличение мощности на южных и западных участках. Обнаружено ослабление мощности на участках линий после пересечения с Московским центральным кольцом, а также неравномерность мощности на разных участках всех кольцевых линий (наиболее загруженные участки – южные, юго-западные).
7. В выходные дни происходит падение входящего объема и интенсивности пассажиропотока в среднем на 20-40%.
8. В летнее время снижен входящий объем пассажиропотока вблизи университетских кампусов. Кроме того, наблюдается рост интенсивности пассажиропотока к станциям (узлам), расположенным около крупнейших рекреационных зон.
9. Наибольший рост базовых параметров пассажиропотока наблюдается на станциях (узлах) и направлениях, появившихся либо в изученный нами период, либо в течение нескольких лет до него. Это говорит о том, что эволюционные изменения сети линий метрополитена имеют длительно распределенное во времени влияние на пространственное распределение пассажиропотока, связанное как со сменой транспортного поведения пассажиров, так и изменений параметров городской среды в зоне обслуживания этих станций (узлов).

Для распределения структурных параметров пассажиропотока выявлены следующие закономерности:

1. Величина интенсивности пассажиропотока по кратчайшему маршруту между двумя станциями (узлами) имеет обратную экспоненциальную зависимость от его протяженности. В зависимости от местоположения станции (узла) отправления, эта зависимость может проявляться с разной силой.

2. Для юго-западного и, в меньшей степени, северо-западного секторов характерно преобладание поездок на малые расстояния (доминирование *локальных* направлений в структуре поездок).
3. В выходные дни поляризация структуры пассажиропотока возрастает у большинства остановочных пунктов, за исключением станций (узлов), расположенных в центральной части ядра агломерации. Поляризация нарастает и в течение изученного периода, вместе с ростом упорядоченности значений интенсивности пассажиропотока в зависимости от протяженности маршрута.
4. **Ввод в эксплуатацию Большой кольцевой линии носит локальный и селективный характер, способствовав увеличению интенсивности потоков на ряде отдельных хордовых направлений, но не изменив ключевые паттерны мобильности, характерные для всей системы метрополитена.**
5. Пространственное распределение станций по типам неравномерности суточного входящего объема пассажиропотока имеет четкое центрo-периферийное распределение вне зависимости от изучаемого временного среза.
6. В будние дни выделяются утренний и вечерний пик; утренний доминирует у станций, близких к окраине, а вечерний – у станций в центре ядра агломерации. В выходные дни у станций наблюдается только один пик, поэтому измерения проводились с использованием расчета временного интервала, когда наблюдается пик. С приближением к центру пик выходного дня наблюдался все позднее.
7. В юго-западном, западном и северо-западных секторах при движении от центральной части ядра агломерации к окраинной наблюдается более сглаженный переход от типов с преобладающим вечерним пиком к типу с преобладающим утренним пиком, в остальных – этот переход более резкий.

Отдельно изучены *главные направления* – наиболее высокоинтенсивные, исходящие из каждой станции (узла), позволившие установить иерархическую структуру пассажиропотока. Для каждого из временных срезов был составлен граф главных направлений и определен уровень иерархии каждого узла графа. В результате этого анализа получены следующие выводы:

1. Сеть главных направлений московского метрополитена представляет собой древовидный граф, состоящий из нескольких автономных компонентов. В состав каждого из них входит узел высшей степени иерархии, являющийся конечным элементом в цепях главных направлений.

2. Крупнейший автономный компонент включает в себя направления, сосредоточенные в центральной части ядра Московской агломерации, а также имеет продолжение в северном, северо-восточном, восточном, юго-восточном и южном секторах ядра агломерации.
3. Остальные автономные компоненты в будние дни сосредоточены в юго-западном, западном и северо-западном секторах. Они имеют линейный характер (направления сосредоточены вдоль одной из линий метрополитена); часто совпадают с наиболее пассажиронапряженными направлениями. Эти компоненты наиболее устойчивы на протяжении всех рассмотренных временных срезов.
4. Число иерархических уровней за изученный период вследствие редуцирования крупнейшего автономного компонента снизилось с 11 до 8.
5. В выходные дни также наблюдается редукция (сжатие) крупнейшего автономного компонента с увеличением числа автономных компонентов. Они представлены почти во всех секторах окраинной части ядра агломерации.
6. Количество станций (узлов) распределено по иерархическим уровням неравномерно; доминируют низшие и высшие уровни иерархии, промежуточные уровни встречаются в основном в пределах крупнейшего автономного компонента.

Для комплексного анализа ключевых закономерностей пространственно-временного распределения пассажиропотока *предложена четырехчленная модель*, базирующаяся на иерархической структуре главных направлений, соединяющих между собой узлы, отнесенных к тому или иному типу по сочетанию значений параметров пассажиропотока, а также устойчивости этих сочетаний во времени. Для выделения типов узлов была проведена статистическая кластеризация по каждому из шести временных срезов, изучены переходы узлов от одного кластера к другому. Выявлены семь статистических кластеров, большинство из не изменили свое географическое положение в каждом из изученных временных срезов.

1. Благодаря кластеризации определено *восемнадцать типов* станций (узлов) по сочетанию параметров пассажиропотока и их устойчивости. Выделены *базовые типы*, сохраняющие набор значений параметров пассажиропотока по всем временным срезам, а также *переходные типы*, отражающие подвижность параметров пассажиропотока станции (узла) в цикле «будни-выходные».
2. Большинство станций (узлов) имеют свою характерную пространственную нишу, что позволяет выделить **четыре пояса** в пространственной структуре ядра городской агломерации: *центральный пояс, срединный пояс, пояс локальных субцентров и*

*пояс периферии*. Каждому поясу соответствует один или несколько из 18 типов станций и узлов.

3. Несмотря на общую радиально-кольцевую структуру в теоретической модели, применительно к существующему рисунку городского пространства ядра московской агломерации, *эти пояса* преимущественно *фрагментарны*, имеют разрывы и смещения в зависимости от рассматриваемого сектора.
4. Три выделенных типа (экстерриториальные малые узлы, узлы с сезонным падением центральности, узлы с сезонным ростом центральности) имеют специфические территориальные ниши за пределами поясов (например, в бывших промышленных районах, на границе с крупными рекреационными зонами, а также вблизи университетских кампусов).
5. Распределение порядка расположения относительно центра, а также мощности (ширины) поясов в ядре Московской агломерации *анизотропно* по сторонам света. Выявленный набор поясов сохраняется у всех 6 изученных временных срезов.
6. Четырехчленная модель пространственного распределения пассажиропотока наиболее лабильна в рамках цикла «будни-выходные». Вине зависимости от временного среза в этом цикле наблюдается *деконцентрация узлов центральной зоны* одновременно с расширением срединного пояса.
7. С 2019 по 2023 гг. лишь несколько станций (узлов) совершили переход в типы, характерные для более центральных станций (узлов), что говорит о высокой степени устойчивости установленной четырехчленной модели в масштабе нескольких лет.

Проведенное исследование позволило прийти к следующим общим выводам о степени (характере) влияния факторов распределения пассажиропотока на структуру идеальной четырехчленной пространственной модели.

1. Число выделенных поясов совпало с количеством структурных элементов, установленным в других исследованиях, посвященных анализу пространственной организации ядра Московской агломерации.
2. Выявленная пространственная конфигурация пассажиропотоков формировалась эволюционно на протяжении экстенсивной стадии роста сети линий метрополитена (с 1950 г. по 2016 г.) и обусловлена как неравномерностью ее территориального развития, так и нарастающими диспропорциями функциональной и социальной пространственных структур самого города.

3. Функционально-планировочная структура города в настоящий момент влияет преимущественно на пространственное распределение пассажиропотока, определяя ключевые векторы пространственного взаимодействия частей ядра агломерации между собой, отличающиеся по сторонам света и сводящиеся к двум ключевым пространственным инвариантам: 1) с ярко выраженным поясом субцентров и дискретными границами между поясами, 2) с размытым поясом субцентров и континуальным переходом от периферии к центру
4. За изученный период обнаружен сдвиг значений параметров у ряда станций (узлов) (Москва-Сити, Воронцовская/Калужская, ВДНХ) с увеличением центральных функций в зоне их обслуживания. Отдельно выделяются станции (узлы), в зоне обслуживания которых наблюдаются процессы джентрификации (Дмитровская).
5. Транспортно-географические факторы в настоящий момент способствуют формированию локальных субцентров и перераспределению пассажиропотоков в локальном масштабе с вводом новых структурных элементов (станций и линий) в сеть метрополитена. Центральный пояс с наиболее интенсивными локальными транспортными связями и наивысшими значениями входящих объемов пассажиропотока совпадает с третьим, частично вторым топологическими ярусами сети линий метрополитена, располагающимися в ее геометрическом центре, частично подтверждая взаимозависимость интенсивности пассажиропотока от положения относительно центра сети.
6. Факторы времени на разных масштабах проявляются по-разному: в выходные дни наблюдаются наиболее резкие территориальные сдвиги распределения пассажиропотоков по сравнению с будними днями, сезонные сдвиги – локальны.

Таким образом, поставленная во введении **цель работы** достигнута: установлены следующие особенности пространственной структуры пассажиропотоков московского метрополитена, а также характер ее изменчивости-устойчивости:

1. Пространственно-временная организация базовых параметров Московского метрополитена **имеет выраженный центр-периферийный характер**: максимальная концентрация входящих потоков характерна для центральных станций второго и третьего топологического ярусов, а также крупных транспортных хабов, тяготеющих к окраинной части. Внутри и вблизи этих двух групп станций (узлов) складываются системы высоконапряженных направлений.

2. Интенсивность пассажиропотоков между станциями метрополитена подчиняется устойчивой *обратной экспоненциальной зависимости* от протяженности кратчайшего маршрута, обусловленной доминированием одной или нескольких станций во внутренней структуре пассажиропотоков. Характер такой зависимости определяется пространственным положением станции отправления в пределах ядра Московской городской агломерации. Наибольшая зависимость наблюдается в юго-западном и северо-западном секторах.
3. Иерархическая структура станций метрополитена представляет собой *древовидный граф* с несколькими *автономными компонентами*. Крупнейший компонент замыкается на центральные станции (узлы) и анизотропно развит преимущественно в восточной части ядра агломерации. В юго-западном и северо-западном секторах выделяются меньшие, но очень устойчивые во времени компоненты; в остальных секторах устойчивость автономных компонентом значительно ниже.
4. Пространственная структура пассажиропотоков представляет собой иерархическую систему поясов. *Центральный пояс* характеризует зону конвергенции пассажиропотоков в пределах всей агломерации, *срединный пояс* – зону высокой турбулентности пассажиропотоков, *пояс локальных субцентров* – зону конвергенции в локальном масштабе, *пояс периферии* – зону преимущественной дивергенции. Пояса асимметричны относительно центра сети линий и ядра агломерации и представлены *в двух инвариантах*: с четко выраженным поясом субцентров и дискретными границами либо с размытым поясом субцентров и континуальным переходом от периферии к центру.
5. Для пространственно-временной структуры пассажиропотоков характерны как *циклические*, так и *эволюционные* процессы. К первым, наиболее характерным для недельных колебаний, и проявляющихся анизотропно, относятся *рост-падение центрo-периферийного контраста*, *формирование-деградация локальных субцентров*, *поляризация-сглаживание структуры пассажиропотока станций по территориальному признаку*. У вторых наиболее заметны *усиление гравитационного потенциала ряда узлов в окраинной части* и *локальное перераспределение пассажиропотока вследствие усложнения топологической структуры сети*.

За рамками исследования остались несколько важных тем, изучение которых может еще больше приблизить нас к пониманию пространственно-временных закономерностей формирования и изменения пассажиропотоков:

- определение границ зон обслуживания (хинтерландов) станций Московского метрополитена и более подробное изучение их функционального наполнения;
- исследование флуктуации параметров пассажиропотока в рамках низко дискретных временных интервалов (по месяцам, неделям и дням);
- изучение индивидуальных корреспонденций пассажиров по обезличенным данным. Это позволит валидировать разработанную в ходе проведенного исследования методику расчета матриц корреспонденций, а также уточнить характер поездок по сети линий метрополитена пассажиров тех или иных станций;
- оценка влияния ввода в эксплуатацию системы МЦД на параметры пассажиропотока метрополитена для расширения границ понимания функционирования транспортной системы Московской агломерации.

## Литература

1. Авдеев В.С. Распределение пассажиропотока на примере транспортной системы Московского метрополитена // Этносоциум и межнациональная культура. – 2020. – №. 9. – С. 32-44.
2. Бернштейн-Коган С.В. Очерки географии транспорта: учебное пособие для вузов / М.: Гос. изд-во, 1930. – 348 с.
3. Браде И., Махрова А.Г., Нефёдова Т.Г., Трейвиш А.И. Особенности субурбанизации в Московской агломерации // Изв. РАН. 2013. № 2. С. 19—29.
4. Бугроменко В.Н. Транспорт в территориальных системах. – М.: Наука, 1987.
5. Бунге В. Теоретическая география. — М.: Прогресс, 1967. — 280 с.
6. Вавилина Н.Д., Шпигунова Ю. М. Джентрификация в России как социальный процесс и социальная проблема // Развитие территорий. – 2024. – №. 1 (35). – С. 37-49.
7. Васильева Е.В. «Теле-всего» и гибридная офисная модель-новые мировые тренды после пандемии COVID-19 // Управление. – 2021. – Т. 9. – №. 3. – С. 125-136.
8. Вендина О.И., Панин А.Н., Тикуннов В.С. Социальное пространство Москвы: особенности и структура // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – №. 6. – С. 3-17.
9. Гейл Я. Города для людей — М.: Издательство «Альпина Паблишер», 2013. — 256 с.
10. Гольц Г.А. Транспорт и расселение. - М.: Наука, 1981. – 248 с.
11. Горкин А.П. Социально-экономическая география: понятия и термины. Словарь-справочник / отв. ред. Горкин А.П. – Смоленск: Ойкумена, 2013. – 328 с.
12. Евин И.А., Соловьев А.А., Чернобровкин Д.А. Московский метрополитен как безмасштабная сеть // Информатизация и связь. – 2013. – №. 6. – С. 76-80.
13. Каверина Н. А., Гретченко А. И., Гретченко А. А. Современное развитие креативных индустрий в России (опыт столицы и регионов) // Промышленность: экономика, управление, технологии. – 2019. – №. 1 (75). – С. 58-64.
14. 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: материалы XXVII Международной (тридцатой Екатеринбургской) науч.-практ. конференции (19–20 июня 2021 г.) / науч. ред. С. А. Ваксман. – Екатеринбург: АМБ, 2021. – С. 259-269.

15. Киселев И. В. Иерархическая структура пассажиропотока Московского метрополитена // Региональные исследования. – 2024. – №. 4 (86). – С. 74-83.
16. Киселёв И. В. Территориальные сдвиги топологической структуры и пассажиропотока московского метрополитена после ввода Большой Кольцевой линии // Псковский регионологический журнал. – 2025а. – Т. 21. – №. 1. – С. 180-199.
17. Киселев И. В. Пространственные закономерности многолетней динамики пассажиропотока станций Московского метрополитена // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2025b. – Т. 89. – №. 3. – С. 383-393.
18. Костина И.А., Макаренко К.С., Матвеев В.В. Особенности перехода на удаленную работу в связи с пандемией и её перспективы после снятия ограничительных мер // Здоровье—основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2020. – Т. 15. – №. 3. – С. 1439-1443.
19. Кокорин Д.В. Использование модели " Узел-Место" на примере станций Московского метрополитена // Псковский регионологический журнал. – 2023. – Т. 19. – №. 1. – С. 129-145.
20. Кузнецов Н.П. Анализ пассажиропотока в городском транспорте // Транспортное дело. – 1988. – № 3. – С. 45-50.
21. Кулешова Ю.Л. Динамика состояния и развития региональных перевозок // Транспортное дело России. – 2020. – №. 3. – С. 29-34.
22. Куричев Н.К., Куричева Е.К. Пространственная структура жилищного строительства в Московской агломерации: радиально-секторальная дифференциация // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2020. – Т. 65. – №. 1. – С. 74-95.
23. Иванов В.В., Осетров Е.С. Прогнозирование суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене // Письма в ЭЧАЯ. – 2018. – Т. 15. – №. 1. – С. 107-120.
24. Ларин О.Н. Организация пассажирских перевозок: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 104 с.
25. Лебедев А.А. Теория и практика организации пассажирских перевозок. – М.: Транспорт, 2000. – 320 с.
26. Маергойз И.М. Территориальная структура хозяйства. — Новосибирск: Наука, 1986. — 324 с.

27. Махрова А.Г., Татаринцева А.А. Развитие процессов джентрификации и реконструкция городской среды центра Москвы в постсоветский период // Региональные исследования. – 2006. – №. 3. – С. 28-42.
28. Махрова А.Г. Нефедова Т.Г. Трейвиш А.И. Пространственные тенденции социально-экономического развития Московской агломерации // Территория и планирование. – 2012. – № 4 (40). – С. 18–34.
29. Мишулина О.А. Статистический анализ и обработка временных рядов. – М.: МИФИ, 2004.
30. Медведь О.А. Анализ структуры пригородных пассажиропотоков в Санкт-Петербургском железнодорожном узле // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – №. 1. – С. 7-17.
31. Полян П.М. Методика выделения и анализа опорного каркаса расселения. М.: Академия наук СССР, Ин-т географии. – 1988. – Т. 1. – С. 108-124.
32. Полян П.М. Территориальные структуры – урбанизация – расселение. Теоретические подходы и методы изучения. – М.: Новый Хронограф, 2014. – 782 с.
33. Поматилов Ф.С., Намиот Д.Е. Об анализе пассажиропотоков Московского метрополитена // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15. – №. 2.
34. Рябов Г.М. Организация и управление пассажирскими перевозками – М.: Транспорт, 1984. – 256 с.
35. Самбуров К.В. Пространственная иерархия пассажирских железнодорожных узлов и пунктов России. // Дисс... канд. геогр. наук. – М.: Ин-т географии РАН. – 2023. – 360 с.
36. Смирнов И.В. Управление пассажиропотоком в городском транспорте: дис. ... канд. экон. наук. – М.: 1995. – 150 с.
37. Смирнов И.С., Степанов П.С. Расовый состав пассажиров и пространственная структура пассажиропотоков Вашингтонского метрополитена // География в школе. – 2014. – №. 3. – С. 14-19.
38. Сомов Э.В. Геоинформационное картографирование обеспеченности населения общественным транспортом на примере г Москвы. // Дисс... канд. геогр. наук – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова. – 2015. – 126 с.
39. Гархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей: методы анализа топологических закономерностей. – М.: Институт географии АН СССР, 1989. – 221 с.
40. Хаггет П. География: синтез современных знаний. — М., Прогресс, 1979. — 684 с.

41. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. — М.: Наука, 1978. — 256 с.
42. Шитова Ю.Ю. Методика мониторинга мобильности маятниковых трудовых мигрантов в Подмоскowie // *Население и экономика* – 2022. – № 6 (1). – С. 1-13.
43. Шупер В.А. Релятивистская теория центральных мест и расселение в постиндустриальную эпоху // *География мирового развития*. — 2010. — № 2. — С. 177-194.
44. Шупер В.А., Эм П.П. Расширение Москвы: альтернатива с точки зрения теории центральных мест // *Региональные исследования*. – 2012. – №. 4. – С. 97-107.
45. Barber G. Courses in transport geography // *Transportation Geography*. – 1984. – Vol. 15. – P. 6-14.
46. Bagchi M., White P. R. The potential of public transport smart card data // *Transport Policy*. – 2005. – Vol. 12. – №. 5. – P. 464–474.
47. Briand A. S. et al. Analyzing year-to-year changes in public transport passenger behaviour using smart card data // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2017. – Vol. 79. – P. 274-289.
48. Chakirov A., Erath A. Use of public transport smart card fare payment data for travel behaviour analysis in Singapore // *Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung*. – 2011. – Vol. 729.
49. 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.
50. Cats O., Wang Q., Zhao Y. Identification and classification of public transport activity centres in Stockholm using passenger flows data // *Journal of Transport Geography*. – 2015. – Vol. 48. – P. 10-22.
51. Cheng L. et al. Analysis of passenger group behaviour and its impact on passenger flow using an agent-based model // *2014 4th International Conference on Simulation And Modeling Methodologies, Technologies And Applications (SIMULTECH)*. – IEEE, 2014. – P. 733-738.
52. Chopra S.S. et al. A network-based framework for assessing infrastructure resilience: a case study of the London metro system // *Journal of The Royal Society Interface*. – 2016. – Vol. 13. – №. 118. – P. 20160113.
53. Chowell G. Scaling laws for the movement of people between locations in a large city / G. Chowell J. M., Hyman S., Eubank C., Castillo-Chavez C. // *Los Alamos Unclassified Report LA-UR-02-6658*. – 2005.
54. Christaller W. *Die zentralen Orte in Süddeutschland*. — Jena: Gustav Fischer, 1933.

55. Du B. et al. Detecting pickpocket suspects from large-scale public transit records // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2018. – Vol. 31. – №. 3. – P. 465-478.
56. Du Z., Yang B., Liu J. Understanding the spatial and temporal activity patterns of subway mobility flows // Preprint arXiv:1702.02456. – 2017.
57. Glaeser E. L. Infrastructure and Urban Form // National Bureau of Economic Research, 2020. – № 28287.
58. Haggett P., Chorley R.J. Network analysis in geography. – London, 1969.
59. Hanson S. The Geography of Urban Transportation. – New York: The Guilford Press, 1986. – 424 P.
60. Harvey D. The urban process under capitalism: a framework for analysis // International Journal of Urban and Regional Research. – 1978. – T. 2. – №. 1-3. – P. 101-131.
61. Hasan S. et al. Spatiotemporal patterns of urban human mobility // Journal of Statistical Physics. – 2013. – Vol. 151. – P. 304-318.
62. Hettner A. Der gegenwärtige Stand des Verkehrsgeographie // Geographische Zeitschrift. – 1894. – Bd. 3. – S. 626.
63. Kim K. et al. An analysis on movement patterns between zones using smart card data in subway networks // International Journal of Geographical Information Science. – 2014. – Vol. 28. – №. 9. – P. 1781-1801.
64. Kohl J.G. Der Verkehr und die Ansiedelungen der Menschen in ihrer Abhängigkeit von der Gestaltung der Erdoberfläche – Dresden: Arnold, 1841. – 602 S.
65. Lalanne L. Essai d'une theorie des reseaux de chemin de fer, fondee sur l'observation des faits et sur les lois primordiales qui president au groupements des populations // Comptes Rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des Sciences. – 1863. – Vol.57. – № 4. – P. 206-210.
66. Lee K. et al. Statistical analysis of the Metropolitan Seoul Subway System: Network structure and passenger flows // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2008. – T. 387. – №. 24. – P. 6231-6234.
67. Li D. et al. Estimating a transit passenger trip origin-destination matrix using automatic fare collection system // Database Systems for Advanced Applications: 16<sup>th</sup> International Conference, DASFAA 2011, International Workshops: GDB, SIM3, FlashDB, SNSMW, DaMEN, DQIS, Hong Kong, China, April 22-25, 2011. Proceedings 16. – Berlin-Heidelberg: Springer, 2011. – P. 502-513.

68. Liu L., Biderman A., Ratti C. Urban mobility landscape: Real time monitoring of urban mobility patterns // Proceedings of the 11th international conference on computers in urban planning and urban management. – Hong Kong: Citeseer, 2009. – P. 1-16.
69. Luo D., Cats O., van Lint H. Can Passenger Flow be Explained by Network Topology in Public Transport? // Caspt 2018: 14th Conference on Advanced Systems in Public Transport and TransitData 2018. – 2018. – P. 67.
70. Mitroshin P. A. et al. GIS-monitoring of Regional Transport Network Traffic as a Method to Study Commuting: Moscow Region Case // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1828. – №. 1. – P. 012073.]
71. Nekraplonna M., Namiot D. Metro correspondence matrix analysis // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Vol. 7. – №. 7. – P. 68-80.
72. Nekraplonna M., Namiot D. The Analysis of Trajectories in Moscow Subway // DAMDID/RCDL (Supplementary Proceedings). – 2021. – P. 134-146.
73. Mohamed K. et al. Understanding passenger patterns in public transit through smart card and socioeconomic data // UrbComp, (Seattle, WA, USA). – 2014.
74. Reed W. E. Indirect connectivity and hierarchies of urban dominance // Annals of the Association of American Geographers. – 1970. – Vol. 60. – No 4. – P. 770-785.
75. Soh H. et al. Weighted complex network analysis of travel routes on the Singapore public transportation system // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2010. – Vol. 389. – №. 24. – P. 5852-5863.
76. Stewart J. Q. An inverse distance variation for certain social influences // Science. – 1941. – Vol. 93. – №. 2404. – P. 89-90.
77. Sun X., Wandelt S., Zanin M. Worldwide air transportation networks: a matter of scale and fractality? // Transportmetrica A: Transport Science. 2017. – T. 13. – №. 7. – P. 607-630.
78. Taaffe E.J. The urban hierarchy: An air passenger definition // Economic geography. – 1962. – Vol. 38. – № 1. – P. 1-14.
79. Trepanier M., Chapleau R. Destination estimation from public transport smartcard data // IFAC Proceedings Volumes. – 2006. – Vol. 39. – №. 3. – P. 393-398.
80. Wang Z. et al. Unraveling the hierarchy of public transport networks //2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2020. P. 1-6.
81. Xia F. et al. Ranking station importance with human mobility patterns using subway network datasets // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. – 2019. – Vol. 21. – №. 7. – P. 2840-2852.

82. Xu Q., Mao B. H., Bai Y. Network structure of subway passenger flows // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. – 2016. – Т. 2016. – №. 3. – P. 033404.
83. Yong N. et al. Uncovering stable and occasional human mobility patterns: A case study of the Beijing subway // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2018. – Vol. 492. – P. 28-38.
84. Zhang Q. et al. A two-layer modelling framework for predicting passenger flow on trains: A case study of London underground trains // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2021. – Vol. 151. – P. 119-139.
85. Zhang Y., Li N. [Retracted] Analysis of Passenger Flow Characteristics of Urban Rail Transit Based on Spatial Data Dynamic Analysis Technology // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2022. – Vol. 2022. – №. 1. – P. 1601169.
86. 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.
87. Правительство Москвы. Постановление от 6 сентября 2011 года N 413-ПП "О формировании транспортно-пересадочных узлов в городе Москве" (с изменениями на 29 июня 2021 года).
88. Домклик. ЖК на месте промзон: как в Москве развивают территории бывших заводов? [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.domclick.ru/nedvizhimost/post/zhk-na-meste-promzon-kak-v-moskve-razvivayut-territorii-byvshih-zavodov> (дата обращения: 01.06.2024)
89. Метро — Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы [Электронный ресурс]. URL: [https://stroi.mos.ru/moskovskiie-tsientral-nyie-diametry-stroi\\_mos#:~:text=%D0%9E%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5,%C2%AB%D0%90%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%E2%80%93%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D0%B9%C2%BB](https://stroi.mos.ru/moskovskiie-tsientral-nyie-diametry-stroi_mos#:~:text=%D0%9E%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5,%C2%AB%D0%90%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%E2%80%93%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D0%B9%C2%BB). (дата обращения: 01.02.2024).
90. Строй. Москва. Официальный сайт. Метрополитен [Электронный ресурс]. URL: <https://www.m24.ru/articles/transport/21112017/151602> (дата обращения: 01.02.2024).
91. Транспорт Москвы. В Москве запустили новые маршруты автобусов [Электронный ресурс]. URL: [https://t.mos.ru/mostrans/all\\_news/108187](https://t.mos.ru/mostrans/all_news/108187) (дата обращения: 10.10.2023).

92. Участок метро «Автозаводская» — «Орехово» закроют с 12 ноября на шесть месяцев. Официальный сайт Мэра Москвы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru/news/item/114942073/> (дата обращения: 01.06.2024).
93. Moscow GlobalCity Mobility [Электронный ресурс]. URL: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4331\\_Deloitte-City-Mobility-Index/Moscow\\_GlobalCityMobility\\_WEB.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4331_Deloitte-City-Mobility-Index/Moscow_GlobalCityMobility_WEB.pdf) (дата обращения: 15.09.2023).
94. Urban Rail Transit Statistics and Analytics Report 2023] (PDF). 中国城市轨道交通协会 (in Chinese) [Электронный ресурс]. URL: <https://oss.camet.org.cn/u/cms/www/202403/28125736mgzp.pdf> (дата обращения: 02.02.2024).

## Приложение

### Приложение 1. Соответствие названий станций метрополитена и названий пересадочных узлов, для которых были рассчитаны параметры пассажиропотока.

Название станции метрополитена	Название пересадочного узла, в составе которого находится станция метрополитена
Авиамоторная (Калининская линия)	Авиамоторная
Авиамоторная (Большая Кольцевая линия)	Авиамоторная
Автозаводская	Автозаводская
Автозаводская (Московское Центральное кольцо)	Автозаводская
Академическая	Академическая
Александровский сад	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая
Арбатская (Арбатско-Покровская линия)	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая
Библиотека имени Ленина	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая
Боровицкая	Александровский сад/Арбатская (АПЛ)/Библиотека имени Ленина/Боровицкая
Алексеевская	Алексеевская
Алма-Атинская	Алма-Атинская
Алтуфьево	Алтуфьево
Аминьевская	Аминьевская
Андроновка	Андроновка
Аннино	Аннино
Арбатская (Филевская линия)	Арбатская (ФЛ)
Аэропорт	Аэропорт
Аэропорт Внуково	Аэропорт Внуково
Бульвар Адмирала Ушакова	Бульвар Адмирала Ушакова
Бабушкинская	Бабушкинская
Багратионовская	Багратионовская
Балтийская	Балтийская (МЦК)/Войковская
Войковская	Балтийская (МЦК)/Войковская
Баррикадная	Баррикадная/Краснопресненская
Краснопресненская	Баррикадная/Краснопресненская
Бауманская	Бауманская
Беговая	Беговая

Белокаменная	Белокаменная
Беломорская	Беломорская
Белорусская (Замоскворецкая линия)	Белорусская
Белорусская (Кольцевая линия)	Белорусская
Беляево	Беляево
Бибирево	Бибирево
Битцевский парк	Битцевский парк/Новоясеневская
Новоясеневская	Битцевский парк/Новоясеневская
Борисово	Борисово
Боровское шоссе	Боровское шоссе
Ботанический сад	Ботанический сад
Ботанический сад (Московское Центральное кольцо)	Ботанический сад
Братиславская	Братиславская
Бульвар Дмитрия Донского	Бульвар Дмитрия Донского
Бульвар Рокоссовского	Бульвар Рокоссовского
Бульвар Рокоссовского (Московское Центральное кольцо)	Бульвар Рокоссовского
Бунинская аллея	Бунинская аллея
Бутырская	Бутырская
Варшавская	Варшавская
ВДНХ	ВДНХ
Верхние Котлы	Верхние Котлы (МЦК)/Нагатинская
Нагатинская	Верхние Котлы (МЦК)/Нагатинская
Верхние Лихоборы	Верхние Лихоборы
Владыкино	Владыкино
Владыкино (Московское Центральное кольцо)	Владыкино
Водный Стадион	Водный Стадион
Волгоградский проспект	Волгоградский проспект/Угрешская
Угрешская	Волгоградский проспект/Угрешская
Волжская	Волжская
Волоколамская	Волоколамская
Воробьёвы горы	Воробьёвы горы
Воронцовская	Воронцовская/Калужская
Калужская	Воронцовская/Калужская
Выхино	Выхино
Генерала Тюленева	Генерала Тюленева
Говорово	Говорово
Давыдково	Давыдково

Деловой центр (Большая Кольцевая линия)	Деловой центр
Деловой центр (Солнцевская линия)	Деловой центр
Деловой центр (Филевская линия)	Деловой центр
Динамо	Динамо/Петровский парк
Петровский парк	Динамо/Петровский парк
Дмитровская	Дмитровская
Добрынинская	Добрынинская/Серпуховская
Серпуховская	Добрынинская/Серпуховская
Домодедовская	Домодедовская
Достоевская	Достоевская
Дубровка	Дубровка
Дубровка (Московское Центральное кольцо)	Дубровка
Жулебино	Жулебино
ЗИЛ	ЗИЛ
Зорге	Октябрьское поле/Зорге
Октябрьское поле	Октябрьское поле/Зорге
Зюзино	Зюзино
Зябликово	Зябликово/Красногвардейская
Красногвардейская	Зябликово/Красногвардейская
Измайлово (Московское Центральное кольцо)	Партизанская/Измайлово
Партизанская	Партизанская/Измайлово
Измайловская	Измайловская
Кантемировская	Кантемировская
Каховская	Каховская/Севастопольская
Севастопольская	Каховская/Севастопольская
Каширская	Каширская
Киевская (Арбатско-Покровская линия)	Киевская
Киевская (Кольцевая линия)	Киевская
Киевская (Филевская линия)	Киевская
Китай-город	Китай-город
Кленовый бульвар	Кленовый бульвар
Кожуховская	Кожуховская
Коломенская	Коломенская
Комсомольская (Сокольническая линия)	Комсомольская
Комсомольская (Кольцевая линия)	Комсомольская
Коньково	Коньково
Коптево	Коптево

Косино	Косино/Лермонтовский проспект
Лермонтовский проспект	Косино/Лермонтовский проспект
Котельники	Котельники
Красносельская	Красносельская
Красные ворота	Красные ворота
Крестьянская застава	Пролетарская/Крестьянская застава
Пролетарская	Пролетарская/Крестьянская застава
Кропоткинская	Кропоткинская
Крылатское	Крылатское
Крымская	Крымская
Кузнецкий мост	Кузнецкий мост/Лубянка
Лубянка	Кузнецкий мост/Лубянка
Кузьминки	Кузьминки
Кунцевская (Арбатско-Покровская линия)	Кунцевская
Кунцевская (Большая Кольцевая линия)	Кунцевская
Кунцевская (Филевская линия)	Кунцевская
Курская (Арбатско-Покровская линия)	Курская/Чкаловская
Курская (Кольцевая линия)	Курская/Чкаловская
Чкаловская	Курская/Чкаловская
Кутузовская (Московское Центральное кольцо)	Кутузовская
Кутузовская (Филевская линия)	Кутузовская
Ленинский проспект	Ленинский проспект/Площадь Гагарина
Площадь Гагарина	Ленинский проспект/Площадь Гагарина
Лесопарковая	Лесопарковая
Лефортово	Лефортово
Лианозово	Лианозово
Лихоборы	Лихоборы
Локомотив	Локомотив/Черкизовская
Черкизовская	Локомотив/Черкизовская
Ломоносовский проспект	Ломоносовский проспект
Лужники	Лужники/Спортивная
Спортивная	Лужники/Спортивная
Лухмановская	Лухмановская
Люблино	Люблино
Марксистская	Марксистская/Таганская
Таганская (Кольцевая линия)	Марксистская/Таганская
Таганская (Таганско-Краснопресненская линия)	Марксистская/Таганская

Марьино Роща (Большая Кольцевая линия)	Марьино Роща
Марьино Роща (Люблинско-Дмитровская)	Марьино Роща
Марьино	Марьино
Маяковская	Маяковская
Медведково	Медведково
Менделеевская	Новослободская/Менделеевская
Новослободская	Новослободская/Менделеевская
Минская	Минская
Митино	Митино
Мичуринский проспект (Большая Кольцевая линия)	Мичуринский проспект
Мичуринский проспект (Солнцевская линия)	Мичуринский проспект
Мнёвники	Мнёвники
Молодёжная	Молодёжная
Москва-Сити (Московское Центральное кольцо)	Москва-Сити
Москва-Сити (Филевская линия)	Москва-Сити
Мякинино	Мякинино
Нагатинский Затон	Нагатинский Затон
Нагорная	Нагорная
Народное Ополчение	Народное Ополчение
Нахимовский проспект	Нахимовский проспект
Некрасовка	Некрасовка
Нижегородская	Нижегородская
Нижегородская (Московское Центральное кольцо)	Нижегородская
Новаторская	Новаторская
Новогиреево	Новогиреево
Новокосино	Новокосино
Новокузнецкая	Новокузнецкая/Третьяковская
Третьяковская (Калининская линия)	Новокузнецкая/Третьяковская
Новомосковская (Коммунарка)	Новомосковская (Коммунарка)
Новопеределкино	Новопеределкино
Новохохловская	Новохохловская
Новые Черёмушки	Новые Черёмушки
Озёрная	Озёрная
Окружная	Окружная
Окружная (Московское Центральное кольцо)	Окружная
Окская	Окская

Октябрьская (Кольцевая линия)	Октябрьская
Октябрьская (Калужско-Рижская линия)	Октябрьская
Ольховая	Ольховая
Орехово	Орехово
Отрадное	Отрадное
Охотный ряд	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная
Площадь Революции	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная
Театральная	Охотный ряд/Площадь Революции/Театральная
Павелецкая (Замоскворецкая линия)	Павелецкая
Павелецкая (Кольцевая линия)	Павелецкая
Панфиловская	Панфиловская
Парк культуры (Кольцевая линия)	Парк культуры
Парк культуры (Сокольническая линия)	Парк культуры
Парк Победы (Арбатско-Покровская линия)	Парк Победы
Парк Победы (Солнцевская линия)	Парк Победы
Первомайская	Первомайская
Перово	Перово
Петровско-Разумовская (СТЛ)	Петровско-Разумовская
Петровско-Разумовская (ЛДЛ)	Петровско-Разумовская
Печатники (Большая Кольцевая линия)	Печатники
Печатники (ЛДЛ)	Печатники
Пионерская	Пионерская
Планерная	Планерная
Площадь Ильича	Площадь Ильича/Римская
Римская	Площадь Ильича/Римская
Полежаевская	Полежаевская/Хорошёво (МЦК)/Хорошёвская
Хорошёво (Московское Центральное кольцо)	Полежаевская/Хорошёво (МЦК)/Хорошёвская
Хорошёвская	Полежаевская/Хорошёво (МЦК)/Хорошёвская
Полянка	Полянка
Потапово	Потапово
Пражская	Пражская
Преображенская площадь	Преображенская площадь
Прокшино	Прокшино
Проспект Вернадского (Большая Кольцевая линия)	Проспект Вернадского
Проспект Вернадского (Сокольническая линия)	Проспект Вернадского
Проспект Мира (Кольцевая линия)	Проспект Мира

Проспект Мира (Калужско-Рижская линия)	Проспект Мира
Профсоюзная	Профсоюзная
Пушкинская	Пушкинская/Чеховская/Тверская
Тверская	Пушкинская/Чеховская/Тверская
Чеховская	Пушкинская/Чеховская/Тверская
Пыхтино	Пыхтино
Пятницкое шоссе	Пятницкое шоссе
Раменки	Раменки
Рассказовка	Рассказовка
Речной вокзал	Речной вокзал
Рижская	Рижская
Рижская (Большая Кольцевая линия)	Рижская
Ростокино	Ростокино
Румянцево	Румянцево
Рязанский проспект	Рязанский проспект
Савёловская (Большая Кольцевая линия)	Савёловская
Савёловская (СТЛ)	Савёловская
Саларьево	Саларьево
Свиблово	Свиблово
Селигерская	Селигерская
Семёновская	Семёновская
Славянский бульвар	Славянский бульвар
Смоленская (Арбатско-Покровская линия)	Смоленская (АПЛ)
Смоленская (Филевская линия)	Смоленская (ФЛ)
Сокол	Сокол
Соколиная гора	Соколиная гора
Сокольники (Большая Кольцевая линия)	Сокольники
Сокольники (Сокольническая линия)	Сокольники
Солнцево	Солнцево
Спартак	Спартак
Сретенский бульвар	Сретенский бульвар/Тургеневская/Чистые пруды
Тургеневская	Сретенский бульвар/Тургеневская/Чистые пруды
Чистые пруды	Сретенский бульвар/Тургеневская/Чистые пруды
Стахановская	Стахановская
Стрешнево (Московское Центральное кольцо)	Стрешнево (МЦК)
Строгино	Строгино

Студенческая	Студенческая
Сухаревская	Сухаревская
Сходненская	Сходненская
Текстильщики (Большая Кольцевая линия)	Текстильщики
Текстильщики (Таганско-Краснопресненская линия)	Текстильщики
Телецентр	Телецентр
Тёплый стан	Тёплый стан
Терехово	Терехово
Технопарк	Технопарк
Тимирязевская	Тимирязевская
Тропарёво	Тропарёво
Трубная	Трубная/Цветной Бульвар
Цветной Бульвар	Трубная/Цветной Бульвар
Тульская	Тульская
Тушинская	Тушинская
Тютчевская	Тютчевская
Ул. Горчакова	Ул. Горчакова
Ул. Скобелевская	Ул. Скобелевская
Улица 1905 года	Улица 1905 года
Улица Академика Янгеля	Улица Академика Янгеля
Улица Дмитриевского	Улица Дмитриевского
Университет	Университет
Физтех	Физтех
Филатов луг	Филатов луг
Филёвский парк	Филёвский парк
Фили	Фили
Фонвизинская	Фонвизинская
Фрунзенская	Фрунзенская
Ховрино	Ховрино
Царицыно	Царицыно
ЦСКА	ЦСКА
Чертановская	Чертановская
Шаболовская	Шаболовская
Шелепиха	Шелепиха
Шелепиха (Московское Центральное кольцо)	Шелепиха
Шипиловская	Шипиловская
Шоссе Энтузиастов	Шоссе Энтузиастов
Шоссе энтузиастов (Московское Центральное кольцо)	Шоссе Энтузиастов

Щёлковская	Щёлковская
Щукинская	Щукинская
Электрозаводская (Арбатско-Покровская линия)	Электрозаводская
Электрозаводская (Большая Кольцевая линия)	Электрозаводская
Юго-Восточная	Юго-Восточная
Юго-Западная	Юго-Западная
Южная	Южная
Ясенево	Ясенево
Яхромская	Яхромская