

УДК 656.02

## Определение потенциала полицентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта

Л. А. Лосин<sup>1, 2</sup>, Н. А. Калюжный<sup>1</sup>

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

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

**Для цитирования:** Лосин Л. А., Калюжный Н. А. Определение потенциала полицентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 47–59. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-47-59

### Аннотация

**Цель:** Определить возможности применения методов транспортно-градостроительного моделирования для обоснования размещения субцентров в рамках полицентрической модели развития городов. Предложить численные критерии размещения потенциальных городских центров в зависимости от величины средних затрат времени на передвижения и разработать систему градации районов на основе данных критериев. На примере Петербургской агломерации определить значения прироста населения, остающегося в своих районах проживания, при увеличении средних затрат времени на передвижения. Отранжировать исследуемые районы по уровню эффективности организации на их основе субцентров. **Методы:** Математическое моделирование, методы обработки больших объемов данных, методы геоинформационного анализа. **Результаты:** Проанализированы применяемые в современных транспортных моделях методики расчета матриц межрайонных корреспонденций. Предложена гипотеза определения уровня самодостаточности городских районов, на основе которых целесообразна организация субцентров. Разработаны численные критерии размещения потенциальных городских центров в зависимости от величины средних затрат времени на передвижения, и предложена система градации районов на основе данных критериев. Проведена апробация решения задачи определения целесообразности организации субцентров на примере Петербургской агломерации. Сформулированы выводы о возможности использования методов математического моделирования для обоснования размещения субцентров в городах и агломерациях на основе предложенных численных критериев. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут служить основой для расширения круга задач, решаемых на основе методов транспортно-градостроительного моделирования. Разработанные подходы и критерии могут использоваться при разработке проектных решений в составе стратегий и концепций территориального развития городов в части обоснования возможности организации полицентрической модели.

**Ключевые слова:** Транспортное моделирование, агломерация, полицентрическая модель, матрица корреспонденций, транспортный спрос, максимизация энтропии.

## Введение

Планирование развития современных городов и формируемых ими систем расселения на основе принципов полицентризма является признанной во многих странах моделью. Согласно [1] под полицентрической системой расселения понимается система расселения, имеющая два и более сопоставимых многофункциональных центра. Как указывают авторы [2], специфическая черта полицентричного города, полицентричной системы расселения и городской агломерации — наличие на их территории нескольких центров притяжения разнообразных и значимых потоков и видов деятельности. Эффективность полицентрической модели организации городской территории определяется, в частности, тем, что таким образом обеспечивается минимизация городских передвижений за счет формирования относительно «самодостаточных» районов, внутри которых обеспечивается замкнутый цикл ежедневных передвижений населения. Ключевым вопросом при обосновании возможности организации полицентрической структуры в городах и агломерациях является выделение таких территорий, на базе которых реализация модели полицентрической структуры становится наиболее эффективной.

В опубликованной ранее работе [3] была выдвинута и подтверждена на основе методов математического моделирования гипотеза существования «скрытых» субцентров, т. е. не совсем явных пространств городов (агломераций), обладающих признаками самодостаточности. Поскольку город исторически обычно развивается в соответствии с закономерностями моноцентрической модели, его градостроительное и социально-экономическое развитие, характерное для современного этапа, приводит к постепенной, но не во всем явной естественной полицентрализации городской структуры. Таким образом, при изучении потенциала полицентрического развития города

можно не дифференцировать территорию на основе каких-либо факторов, а попытаться обнаружить уже сложившиеся в той или иной мере или формирующиеся потенциальные городские (в сравнении с главным городским центром) субцентры.

## Методы исследования и информационная база

Описываемое в статье исследование посвящено определению возможностей организации относительно «самодостаточных» районов в крупных и крупнейших городах на основе применения методов транспортного моделирования. Расчеты в рамках описываемых исследований выполнены на базе информационно-программного комплекса (ИПК) Citraf<sup>1</sup>, позволяющего решать ряд задач на основе транспортно-градостроительного моделирования. Описание возможностей и теоретических основ данного комплекса представлено в публикациях [4–7]. В основе данного комплекса лежит классическая четырехступенчатая транспортная модель [8], при этом в рамках описываемого исследования использовались только первые два этапа: генерация поездок и распределение поездок между зонами (транспортными районами). Результат этих расчетных процедур — матрицы межрайонных корреспонденций, элементы которых содержат численные показатели количества участников передвижений между каждой парой транспортных районов, включая внутрирайонные передвижения (диагональные элементы матрицы). Межрайонные корреспонденции в городах — это реализуемые населением передвижения по различным целям

<sup>1</sup> Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс для прогнозирования потоков пассажиров и транспорта в городах Citraf / Заявитель и правообладатель Федоров В. П. (RU). № 2018611770. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ — 06.02.2018.

(трудовым, деловым, учебным, культурно-бытовым и т. д.) между пунктами отправления и прибытия, агрегируемыми в модели в структуру расчетных транспортных районов [9].

Подход, при котором в рамках научных исследований или проектных работ используется только часть расчетных процедур, входящих в четырехэтапную схему моделирования, широко известен в практике транспортно-градостроительного планирования. На этапе становления современных транспортных моделей, когда возможности моделирования были существенно ограничены мощностью вычислительной техники того времени, применение части процедур было во многом обусловлено необходимостью экономии вычислительных ресурсов. В современной же практике моделирования такой подход оправдан в случае, когда для анализа функционирования транспортной системы бывает достаточным использование промежуточных результатов, в частности матриц корреспонденций. На основе этой информации возможно получение общих представлений о функционировании транспортной системы города (агломерации): анализ матриц позволяет оценить мощность и направление основных транспортных связей и их конфигурацию, из которых складывается основной транспортный каркас города, влияющий в том числе на структуру пространственной организации города в целом [10]. Обоснование целесообразности использования упрощенных вычислительных процедур при решении некоторых транспортно-градостроительных задач встречается в ряде публикаций: в частности, по мнению известных специалистов в области урбанистики А. Э. Гутнова и В. Л. Глазычева, «использование очень сложных математических моделей неэффективно — слишком велики при этом затраты времени и средств на подготовительные работы, так что традиционное проектирование при всех своих слабостях оказывалось в выигрышном

положении. Напротив, относительно простые имитационные или оценочные модели, и прежде всего транспортной доступности территорий, интенсивности их использования в жизни города, стали реальным и весьма эффективным, но вспомогательным средством при сопоставлении вариантов, формируемых более или менее традиционно» [11].

В качестве исходной информационной базы для моделирования в рамках данного эксперимента используются данные о транспортной сети Петербургской агломерации (транспортный граф сети городского пассажирского транспорта, включающий элементы улично-дорожной сети и сети внеуличного транспорта) и свойства территории (система транспортного районирования), а также численные параметры, характеризующие поведение участников передвижения. Необходимость использования в модели транспортного графа, несмотря на то что решение задачи ограничивается определением матриц передвижений, обусловлено тем, что расчет матрицы осуществляется сетевым способом, при котором затраты времени на передвижения между транспортными районами рассчитываются с учетом скоростных возможностей и ограничений сети [12].

В рамках эксперимента использовалась модель, построенная в пределах Петербургской агломерации: транспортный граф содержит 2751 элемент, в том числе 693 элемента соответствуют сети внеуличного транспорта — метрополитена и пригородной железной дороги, включая графические элементы, описывающие пересадочные узлы [13]. Система транспортного районирования включает 353 района, в том числе внешние районы-«кордоны» [14]. В качестве расчетного периода для моделирования используется утренний среднемаксимальный час [15]. Такой подход позволяет производить расчет на один из двух периодов максимальных пассажиропотоков в течение дня и одновременно нивелиро-

вать «волну», при которой период максимальной загрузки сети в утренние часы «перемещается» от периферии к центру города.

К настоящему времени в практике транспортно-градостроительного моделирования известно много методик расчетов матриц межрайонных корреспонденций. В целом все эти методы могут быть разделены на несколько классов [16]:

1. Экстраполяционные методы (модели общего фактора роста).

2. Реляционные методы (методы восстановления матриц по данным потокораспределения).

3. Вероятностные методы.

Наиболее универсальными для решения задач транспортно-градостроительного планирования являются вероятностные методы; их применение имеет широкое распространение в современных комплексах транспортного моделирования. Безусловным преимуществом таких методов является возможность проведения расчетов на перспективные периоды с учетом изменений в структуре расселения и размещения объектов тяготения. Наиболее распространенными моделями данного класса являются гравитационная и энтропийная. Энтропийная модель, реализованная в том числе на базе ИПК Citraf, основана на вероятностном описании поведения участников передвижения [17]. Именно такой подход в наибольшей степени соответствует задачам описываемого эксперимента, в котором оценивается вероятность поведения жителей города в зависимости от задаваемых внешних условий.

Как было сказано выше, наиболее распространенным методом расчета межрайонных корреспонденций является «энтропийный» подход [18]. Решение задачи максимизации энтропии распределения транспортного спроса может быть интерпретировано как наиболее вероятное среди всех возможных распределений, которые возникают в процессе реализации массового поведения,  $j$ , с учетом задаваемых предпочтений и ограниче-

ний. Решение данной задачи, интерпретируемое некоторыми авторами как «дележ в стесненных условиях», приводит к формулировке принципа максимума взвешенной энтропии [19]. При этом в данном исследовании в качестве критерия при расчете матрицы корреспонденций выступают только затраты времени на передвижения, хотя на выбор участников передвижения оказывают также влияние финансовые затраты, уровень надежности и т. д. [20].

В ИПК Citraf матрица корреспонденций в соответствии с «энтропийным» подходом формируется при решении задачи максимизации энтропии, взвешенной относительно исходного предпочтения [21]:

$$\sum_{i,j} x_{ij} \ln \left( \frac{y_{ij}}{x_{ij}} \right) \Rightarrow \max \quad (1)$$

$$\sum_j x_{ij} = P_i, i = 1, \dots, nr \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ij} = Q_j, j = 1, \dots, nr \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0,$$

где  $i, j$  — транспортные районы;

$x_{ij}$  — элементы искомым матриц корреспонденций;

$\sum_{i,j} x_{ij} \ln \left( \frac{y_{ij}}{x_{ij}} \right)$  — «взвешенная» энтропия распределения;

$P_i$  — объем отправок из района  $i$ ;

$Q_j$  — объем прибытий в район  $j$ .

Предполагается, что сумма отправок равна сумме прибытий:  $\sum P_i = \sum Q_j$ .

Значения  $y_{ij}$  показывают вероятности реализации корреспонденций между районами  $i$  и  $j$  на основе известных закономерностей рассе-

ления жителей города по отношению к местам их работы, сформулированных в форме «закона трудового тяготения»: «трудящиеся по мере удаления от места работы расселяются во все меньших количествах, следуя кривой убывающей прогрессии» [22]. Такой характер взаимного расположения мест отправления и прибытия ежедневных трудовых передвижений продиктован естественным стремлением жителей городов минимизировать затраты времени на передвижения, воспринимаемые как непродуктивные. В практике транспортного моделирования убывание вероятности совершения корреспонденции с увеличением затрат времени на передвижения описывается функцией тяготения, имеющей вид:  $\exp(-\gamma t)$ , где  $\gamma > 0$  — «параметр расселения», который может быть откалиброван по данным средних показателей затрат времени для всей системы передвижений. Таким образом:

$$y_{ij} = \exp(-\gamma t_{ij}),$$

где  $t_{ij}$  — затраты времени на передвижение из района  $i$  в район  $j$ .

### **Определение потенциала полицентричности территории (на примере Санкт-Петербурга)**

В рамках проведенного эксперимента на базе ИПК Citraf построена модель ранжирования территории города в целях выявления районов с наибольшим потенциалом полицентричности. Для решения этой задачи проведены расчеты матриц передвижений на городском пассажирском транспорте между транспортными районами. Была выдвинута следующая гипотеза: чем больше наблюдается увеличение объема внутрирайонных корреспонденций при снижении среднего времени передвижения по городу, тем более самодостаточным является район. Иными словами, чем больше прирост внутрирайонных корреспонден-

ций при снижении среднего времени, тем больше людей могут позволить себе оставаться в своем районе, т. е. тем больше потенциал полицентричности внутри данного района. Потенциал полицентричности в рамках данной гипотезы связан с уровнем взаимной сбалансированности мест проживания населения и мест приложения труда при обеспечении приемлемых затрат времени на трудовые корреспонденции, осуществляемые внутри районов проживания.

Для учета всей системы ежедневных трудовых передвижений в качестве внешней границы системы районирования принята граница Петербургской агломерации, но ранжирование территорий по потенциалу полицентричности производилось для собственно «городских» территорий без учета пригородной зоны, т. е. для ядра агломерации [23]. Именно в ядре агломерации наименее выраженным остается потенциал полицентричности, так как застройка этой территории является более однородной по сравнению с поясами ближних и дальних пригородов.

В рамках эксперимента предлагается следующая последовательность действий:

1. Разбиение территории ядра Петербургской агломерации на районы исследования, ограниченные естественными и искусственными преградами (водотоками, магистральными железнодорожными линиями и т. д.); центральная часть Санкт-Петербурга, включающая в себя Василеостровский, Петроградский, Центральный и Адмиралтейский (севернее Обводного канала) районы, исключена из рассмотрения. Выбранный подход к разбиению территории позволяет выделить относительно изолированные территории внутри рассматриваемой территории, на базе которых могут быть организованы субцентры (рис. 1).

2. Задание некоторого шага средних затрат времени, для каждого из которых произведен расчет матриц межрайонных передвижений. В рамках

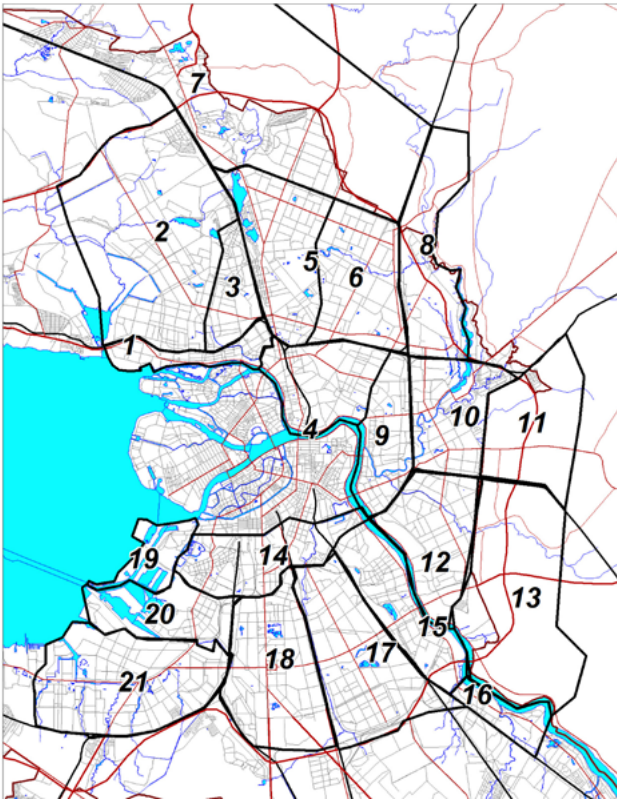


Рис. 1. Разбиение территории ядра Петербургской агломерации на районы исследования

Таблица 1. Последовательность параметров расчетных шагов

Шаг	Параметр функции тяготения $\gamma$	Среднее время, мин	Средняя дальность, км	Средняя скорость сообщения, км/ч
1	0,04	62,86	17,33	16,66
2	0,05	55,89	14,96	16,18
3	0,06	50,50	13,14	15,72
4	0,07	46,22	11,74	15,30
5	0,08	42,80	10,65	14,99
6	0,09	40,00	9,78	14,73
7	0,10	37,63	9,08	14,52

данного эксперимента среднее время передвижения по трудовым целям в пределах агломерации с каждым шагом равномерно уменьшается с 62,86 до 37,63 минуты. Среднее время выражается дробными значениями, так как в рамках «энтропийной» модели среднее время задается не напрямую, а рассчитывается на основе зада-

Таблица 2. Результаты расчетов объемов внутрирайонных корреспонденций (шаги 1, 7)

Район исследования	Внутрирайонные корреспонденции, тыс. пасс. в час		Прирост остающихся в своих районах исследования
	шаг 1	шаг 7	
1	0,72	3,13	4,35
2	4,27	12,88	3,02
3	0,33	1,26	3,82
4	2,91	8,35	2,87
5	3,45	9,46	2,74
6	4,25	11,98	2,82
7	2,80	9,08	3,24
8	0,68	3,33	4,90
9	1,01	3,41	3,38
10	2,05	7,35	3,59
11	0,07	0,30	4,29
12	4,91	15,35	3,13
13	1,80	7,61	4,23
14	3,95	9,40	2,38
15	1,97	7,50	3,81
16	0,26	1,97	7,58
17	3,41	11,93	3,50
18	4,80	14,41	3,00
19	0,07	0,46	6,57
20	0,65	2,54	3,91
21	6,00	15,00	2,50

ваемого параметра функции тяготения  $\gamma$  (1–3). Последовательность изменения параметров расчетных шагов представлена в табл. 1.

3. Расчет матриц межрайонных корреспонденций на городском пассажирском транспорте для каждого расчетного шага с выделением объема внутрирайонных передвижений. Важно, что исследуемые в рамках эксперимента районы (районы исследования) не тождественны расчетным транспортным районам, используемым в модели, но районы исследования включают в себя целое число расчетных транспортных районов. Результаты расчетов сведены в табл. 2 и представлены на рис. 2. Картограмма распределения параметров изменения объемов внутрирайонных корреспонденций позволяет отранжировать все районы по потенциалу полицентричности (рис. 3).

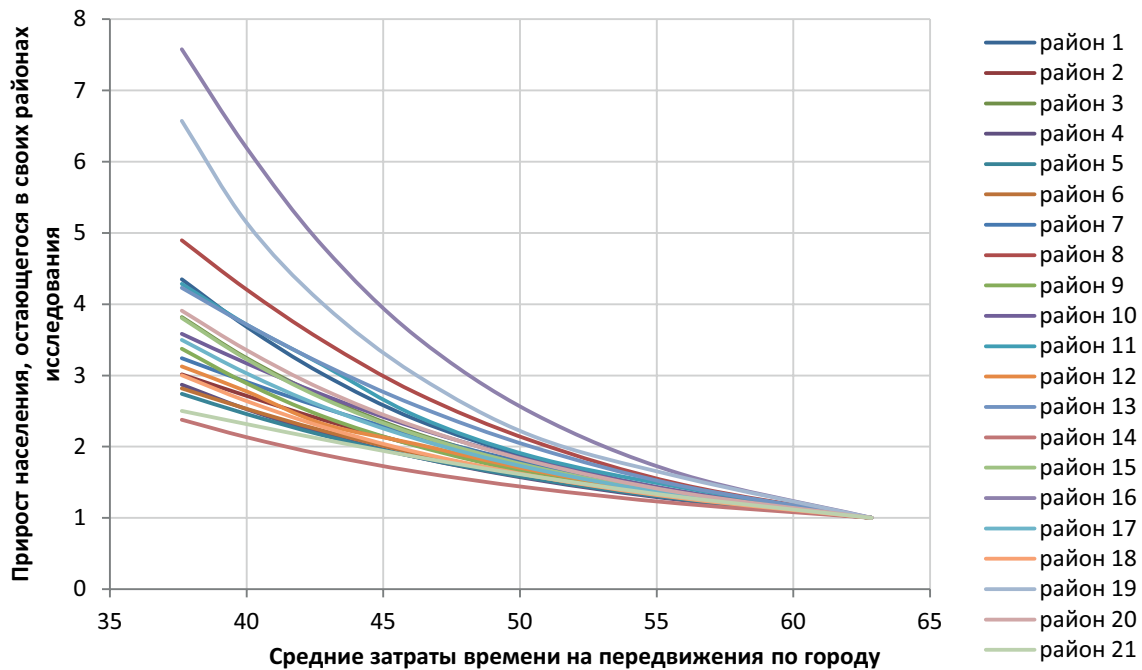


Рис. 2. Зависимость прироста населения, остающегося в своих районах исследования, от средних затрат времени на передвижения

Прирост остающихся в своих районах можно представить как:

$$\Delta N = \frac{N_7}{N_1}, \tag{4}$$

где  $\Delta N$  — прирост жителей, остающихся в своих районах, чел.;

$N_7$  — значение внутрирайонной корреспонденции на шаге 7, чел.;

$N_1$  — значение внутрирайонной корреспонденции на шаге 1, чел.

Получившийся показатель прироста населения, остающегося в своих районах исследования, при изменении средних затрат времени  $\Delta N$  можно интерпретировать как коэффициент полицентричности. Данный коэффициент является определяющим численным критерием при анализе транспортной доступности территории. Он показывает, насколько район исследования нуждается в улучшении транспортной обеспеченности и связности, а также насколько целесо-

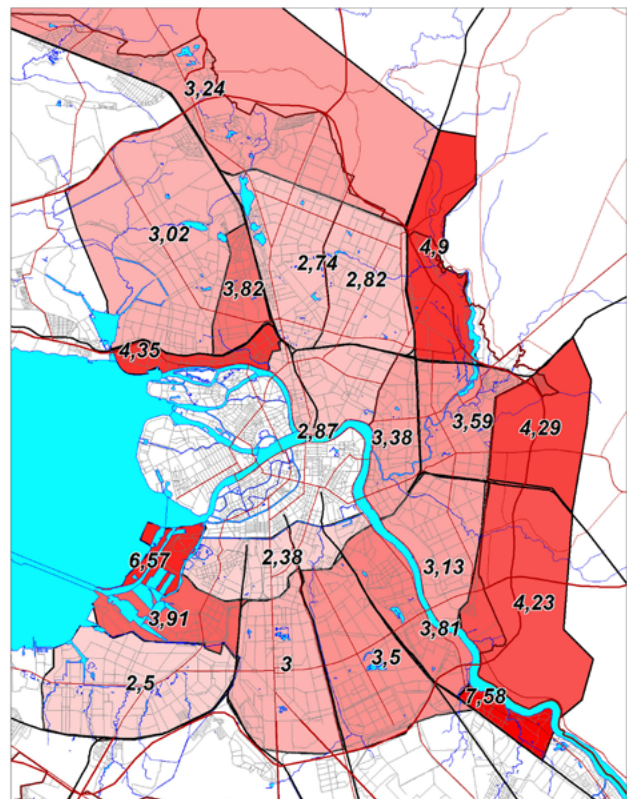


Рис. 3. Картограмма распределения районов исследования в зависимости от коэффициентов полицентричности

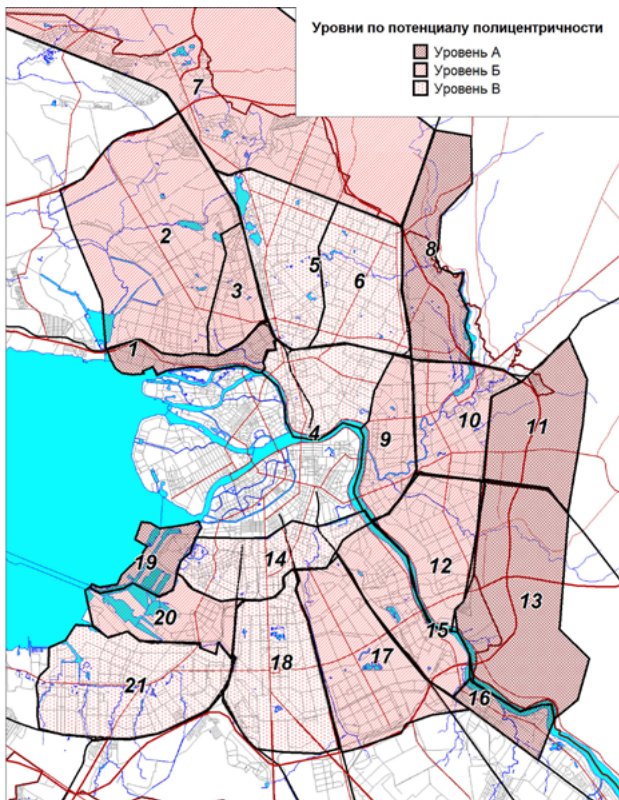


Рис. 4. Ранжирование районов исследования по потенциалу полицентричности

образно дальнейшее развитие района на основе организации внутри него субцентров, в том числе транспортно-пересадочных узлов. Таким образом, чем выше коэффициент полицентричности, тем более «самодостаточным» является район исследования.

На основе найденных значений коэффициента полицентричности предлагается следующая градация районов исследования по уровням (рис. 4):

– Уровень А. Прирост остающегося населения (коэффициент полицентричности) свыше 4 (районы: 1, 8, 11, 13, 16, 19). Районы обладают отчетливыми признаками полицентричности: на базе данных районов целесообразна организация субцентров.

– Уровень Б. Значение коэффициента полицентричности находится в диапазоне от 3 до 4 (районы: 2, 3, 7, 9, 10, 12, 15, 17, 20). Организация субцентров на базе данных районов возможна при выявлении дополнительных факторов, вли-

яющих на взаиморасположение территорий расселения и размещения рабочих мест.

– Уровень В. Значение коэффициента полицентричности менее 3 (районы: 4, 5, 6, 14, 18, 21). Потенциал полицентричности в данных районах недостаточен для организации субцентров.

Необходимо заметить, что территории, соотнесенные с уровнем А, являются главным образом периферийными и характеризуются низким уровнем транспортного обслуживания (исключение: район № 1). Территории, соотнесенные с уровнями Б и В, обладают в основном достаточным уровнем транспортного обслуживания. В то же время анализ картограммы ранжирования территорий не позволяет выделить четкий критерий отнесения районов к тому или иному уровню в соответствии с их положением в планировочной структуре города.

## Выводы

1. Разработаны численные критерии определения потенциальных городских центров (субцентров) на основе анализа эластичности внутрирайонных корреспонденций в зависимости от величины средних затрат времени на передвижения.

2. Определены значения прироста населения, остающегося в своих районах исследования, для территории ядра Петербургской агломерации.

3. Введено понятие коэффициента полицентричности, определяемого как прирост населения, остающегося в своих районах исследования, при изменении средних затрат времени передвижения по городу.

4. Разработана градация районов по потенциалу полицентричности на основе значения коэффициента полицентричности.

## Список источников

1. Якимов М. Р. Транспортное планирование: терминологический словарь / М. Р. Якимов. — М.: Агентство РАДАР, 2022. — 86 с.



2. Москва: курс на полицентричность. Оценка эффектов градостроительных проектов на полицентрическое развитие Москвы. — М.: НИУ ВШЭ, 2016. — 36 с.
3. Калужный Н. А. Выявление потенциальных городских центров на основе моделирования пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) / Н. А. Калужный, Л. А. Лосин, В. В. Солодилов // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2024. — № 2(77). — С. 144–155.
4. Мягков В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования (под ред. Б. Л. Овсевича) / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров. — Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1989. — 145 с.
5. Лосин Л. А. Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач / Л. А. Лосин // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. — Минск: БНТУ, 2017. — С. 88–95.
6. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. Сборник трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. — СПб.: Нестор-История, 2015. — 84 с.
7. Мягков В. Н. 55 лет лаборатории математического моделирования функционально-пространственного развития городов Ленинградского отделения ЦЭМИ — ЭМИ РАН — ИПРЭ РАН / В. Н. Мягков, Л. А. Лосин, Н. В. Булычева // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2024. — № 1(76). — С. 116–125.
8. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Использование программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения (согласованы Минтрансом России 13.07.2017).
9. Булычева Н. В. Методы восстановления матриц межрайонных корреспонденций / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Региональная экономика и развитие территорий: сборник научных статей. — ФГБУН «Институт проблем региональной экономики», НИУ ВШЭ-СПб, 2018. — Т. 1(12). — С. 192–200.
10. Свердлин Л. И. Транспортные обоснования композиции генерального плана города / Л. И. Свердлин // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XI международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: АМБ, 2005. — С. 40–43.
11. Гутнов А. Э. Мир архитектуры. Лицо города / А. Э. Гутнов, В. Л. Глазычев. — М.: Молодая гвардия, 1990. — 350 с.
12. Булычева Н. В. Возможности досетевого подхода в транспортном планировании (на примере г. Перми) / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов / Под научной редакцией д.э.н. С. В. Кузнецова. — ИПРЭ РАН. — СПб.: ГУАП, 2021. Вып. 49. — С. 4–11.
13. Лисененков А. И. Формирование расчетного графа на основе анализа транспортной системы городской агломерации / А. И. Лисененков, Л. А. Лосин // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов / Под научной редакцией д.э.н. С. В. Кузнецова. — ИПРЭ РАН. — СПб.: ГУАП, 2019. — Вып. 45. — С. 49–53.
14. Капский Д. В. Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 частях / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. — Минск: БНТУ, 2019. — Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. — 94 с.
15. Булычева Н. В. Исследование влияния параметров транспортной модели на результаты расчетов пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) / Н. В. Булычева, Д. В. Капский, Л. А. Лосин // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2023. — Т. 59. — № 3. — С. 253–264.
16. Селиверстов Я. А. Методы и модели построения матриц транспортных корреспонденций / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов // Научно-технические ведомости

Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2015. — № 2–3(217–222). — С. 49–70.

17. Шестеров Е. А. Актуальность научного наследия М. С. Фишелясона для решения задач транспортного планирования / Е. А. Шестеров, Н. А. Калюжный, Л. А. Лосин // Вестник гражданских инженеров. — СПбГАСУ, 2020. — Вып. 2(79). — С. 45–50.

18. Питтель Б. Г. Одна простейшая вероятностная модель коллективного поведения / Б. Г. Питтель // Проблемы передачи информации — 1967. — Т. 3. — Вып. 3. — С. 37–52.

19. Математические методы в управлении городскими транспортными системами (отв. ред. О. Г. Фаянс). — Л.: Наука, 1979. — 152 с.

20. Лисененков А. И. Транспортные тарифы и их влияние на предпочтения участников движения при выборе пути / А. И. Лисененков // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2022. — № 3(70). — С. 142–148.

21. Булычева Н. В. Моделирование матриц межрайонных грузовых корреспонденций на основе данных комплексного обследования передвижений на городской улично-дорожной сети / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Региональная экономика и развитие территорий / Под

ред. Л. П. Совершаевой. — СПб.: ГУАП, 2020. — Вып. 1(14). — С. 240–247.

22. Лосин Л. А. Исследования пространственных закономерностей городского расселения / Л. А. Лосин // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Брест, 26–28 октября 2023 г.: в 2 ч. — Брест: БрГУ, 2023. — Ч. 1. — С. 17–21.

23. Лосин Л. А. Административно-территориальные преобразования и формирование локальных центров расселения на территории Санкт-Петербургской городской агломерации / Л. А. Лосин, В. В. Солодилов, Г. П. Ляпунова // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2020. — № 2–3(61–62). — С. 33–46.

Дата поступления: 04.11.2024

Решение о публикации: 04.01.2025

#### Контактная информация:

ЛОСИН Леонид Андреевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией; nipigrad@yandex.ru

КАЛЮЖНЫЙ Николай Анатольевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; nicholaskalyuzhny@gmail.com

## Identifying Polycentric Urban Area Potential Based on Mathematical Modelling of Passenger Public Transport Systems

L. A. Losin<sup>1,2</sup>, N. A. Kalyuzhny<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, 38, Serpuhovskaya ul., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Losin L. A., Kalyuzhny N. A. Identifying Polycentric Urban Area Potential Based on Mathematical Modelling of Passenger Public Transport Systems // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 47–59. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-47-59

### Summary

**Purpose:** To identify the potential application of transport and urban planning modelling methods to rationalize sub-centre locations within a polycentric model of urban development. To present numeric criteria for

the potential urban centre locations depending on the average travel time as well as to develop a district grading system based on these criteria. To estimate the population growth rate in the city residential districts with increasing average travel time on the example of St. Petersburg agglomeration. To rank the investigated residential districts in terms of their sub-centre organizational efficiency. **Methods:** Mathematical modelling, large volume data processing methods, geo-information analysis methods. **Results:** The methods used in modern transport models for calculating zone-to-zone matrices have been analyzed. A hypothesis is proposed to determine the level of urban areas' self-sufficiency for creating sub-centres within them. Numerical criteria for the potential urban centre placement depending on the average travel time have been developed, and a district ranking system based on these criteria is proposed. The solution of the problem of determining the feasibility of sub-centres within a city has been tested on the example of St. Petersburg agglomeration. The conclusions on the possibility of using mathematical modelling methods to justify the sub-centre placement in cities and agglomerations based on the proposed numerical criteria are formulated. **Practical significance:** The results obtained can be used for expanding the range of project solutions applying methods of transport and urban planning modelling. The developed approaches and criteria can be used in the design solutions as part of city area development strategies and concepts in terms of substantiating the possibility of organizing a polycentric model.

**Keywords:** Transport modelling, agglomeration, polycentric model, zone-to-zone matrices, transport demand, entropy maximization.

## References

1. Yakimov M. R. *Transportnoe planirovanie: terminologicheski slovar* [Transport planning: a terminological dictionary]. Moscow: Agentstvo Radar Publ., 2022, 86 p. (In Russian)
2. *Moskva: kurs na policentrichnost. Ocenka effektiv gradostroitelnykh proektov na policentricheskoe razvitiye Moskvy* [Moscow: a course on polycentricity. Assessment of the effects of urban development projects on the polycentric development of Moscow]. Moscow: HSE Publ., 2016, 36 p. (In Russian)
3. Kalyuzny N. A., Losin L. A., Solodilov V. V. *Vyyavlenie potencialnykh gorodskikh centrov na osnove modelirovaniya passazhiropotokov (na primere Sankt-Peterburga)* [Identification of potential urban centers based on passenger traffic modeling (on the example of St. Petersburg)]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2024, Iss. 2(77), pp. 144–155. (In Russian)
4. Myagkov V. N., Palchikov N. S., Fyodorov V. P. *Matematicheskoe obespechenie gradostroitel'nogo proektirovaniya (pod red. B.L. Ovsievicha)* [Mathematical support of urban planning (under general editorship of B.L. Ovsievich)]. L.: Nauka, Leningradskoe otdeleniye Publ., 1989, 145 p. (In Russian)
5. Losin L. A. *Peterburgskiy opyt postroeniya informacionno-programmnogo kompleksa dlya resheniya transportno-gradostroitelnykh zadach* [Designing of software complex for the solving of transport and urban problems in St. Petersburg]. *Sotsialno-ekonomicheskie problemy razvitiya i funkcionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ih vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Minsk: BNTU Publ., 2017, pp.88–95. (In Russian).
6. *Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informacionnye tehnologii* [Economic and mathematical research: mathematical models and information technologies]. *Sbornik trudov Sankt-Peterburgskogo ekonomiko-matematicheskogo instituta RAN. № 9. Matematicheskie modeli v issledovanii processov razvitiya gorodskoy sredy* [Proceedings of the St. Petersburg Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences. № 9. Mathematical models in the study of urban environment development processes]. St. Petersburg: Nestor-istoriya Publ., 2015, 84 p. (In Russian)
7. Myagkov V. N., Losin L. A., Bulycheva N. V. *55 let laboratorii matematicheskogo modelirovaniya funktsional'no-prostranstvennogo razvitiya gorodov Leningradskogo otdeleniya TsEMI — EMI RAN — IPRE RAN* [55 years of the Laboratory of Mathematical Modeling of Functional and Spatial Development of Cities of the Leningrad Branch of

CEMI — EMI RAS — IPRE RAS]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development]. 2024, Iss. 1(76), pp. 116–125. (In Russian)

8. *Metodicheskie rekomendacii po razrabotke i realizacii meropriyatiy po organizacii dorozhnogo dvizheniya. Ispolzovanie programmnykh produktov matematicheskogo modelirovaniya transportnykh potokov pri ocenke effektivnosti proektnykh resheniy v sfere organizacii dorozhnogo dvizheniya* [Methodological recommendations for the development and implementation of measures for the organization of traffic. The use of software products for mathematical modeling of traffic flows in evaluating the effectiveness of design solutions in the field of traffic management]. Ministry of Transport, 13.07.2017 (In Russian)

9. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Metody vosstanovleniya matrits mezhrayonnykh korrespondentsiy* [Methods for restoring interdistrict correspondence matrices]. *Regional'naya ekonomika i razvitie territoriy: sbornik nauchnykh statey* [Regional economy and development of territories: collection of scientific articles]. FGBUN "Institut problem regional'noy ekonomiki", NIU VShE-SPb, 2018, vol. 1(12), pp. 192–200. (In Russian)

10. Sverdlin L. I. *Transportnye obosnovaniya kompozicii generalnogo plana goroda* [Transport substantiation of the composition of the city master plan]. *Sotsialno-ekonomicheskie problem razvitiya i funkcionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ih vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Yekaterinburg, AMB Publ., 2005, pp. 40–43 (In Russian)

11. Gutnov A. E., Glazychev V. L. *Mir arhitektury. Litso goroda* [The world of architecture. The face of the city]. Moscow: Molodaya Gvardiya Publ., 1990, 350 p. (In Russian)

12. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Vozможности dosetevogo podhoda v transportnom planirovanii (na primere Permi)*. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova [The possibilities of a pre-network approach in transport planning (on the example of Perm)]. *Problemy preobrazovaniya i regulirovaniya regionalnykh sotsialno-ekonomicheskikh sistem:*

*sbornik nauchnykh trudov. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova* [Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems. Under general editorship of prof. S.V. Kuznetsov]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2021, vol. 49, pp. 4–11. (In Russian)

13. Lisenenkov A. I., Losin L. A. *Formirovanie raschetnogo grafa na osnove analiza transportnoy sistemy gorodskoy aglomeracii. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova* [Creation of a calculated graph based on the analysis of the agglomeration transport system]. *Problemy preobrazovaniya i regulirovaniya regionalnykh sotsialno-ekonomicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova* [Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems. Under general editorship of prof. S. V. Kuznetsov]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2019, pp. 49–53. (In Russian)

14. Kapski D. V., Losin L. A. *Transport v planirovke gorodov. Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie. Ch. 1: Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie* [Transport in urban planning. Transport planning: mathematical modeling. Part 1: Transport planning: mathematical modeling]. Minsk: BNTU Publ., 2019, 94 p. (In Russian)

15. Bulycheva N. V., Kapski D. V., Losin L. A. *Issledovanie vliyaniya parametrov transportnoi modeli na rezultaty raschetov passazhiropotokov (na primere Sankt-Peterburga)* [Studying the influence of transport model parameters on the results of passenger traffic calculations (on the example of St. Petersburg)]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* [Proceedings of National Academy of sciences of Belarus. Physics and Mathematics series]. 2023, vol. 59, Iss. 3, pp. 253–264. (In Russian)

16. Seliverstov Ya. A., Seliverstov S. A. *Metody i modeli postroeniya matric transportnykh korrespondentsiy* [Methods and models of the construction of transport correspondence matrix]. *Nauchno-tekhnicheskies vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnical University. Computer science. Telecom-

munications. Management]. 2015, Iss. 2–3(217–222), pp. 49–70. (In Russian)

17. Shestеров E. A., Kalyuzhny N. A., Losin L. A. Aktualnost nauchnogo naslediya M. S. Fishelsona dlya resheniya zadach transportnogo planirovaniya [The Relevance of the scientific heritage of M. S. Fishelson for solving problems of transport planning]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. SPbGASU Publ., 2020, vol. 2(79), pp. 45–50 (In Russian)

18. Pittel B. G. Odnа prosteishaya veroyatnostnaya model kollektivnogo povedeniya [One simple probabilistic model of collective behavior]. *Problemy peredachi informacii* [Problems of information transmission]. 1967, vol. 3, Iss. 3, pp. 37–52. (In Russian)

19. *Matematicheskie metody v upravlenii gorodskimi transportnymi sistemami (otv. red. O. G. Fayans)* [Mathematical methods in the management of urban transport systems (under editorship of O. G. Fayans)]. Leningrad: Nauka Publ., 1979, 152 p. (In Russian)

20. Lisenenkov A. I. Transportnye tarify i ih vliyanie na predpochteniya uchastnikov dvizheniya pri vybore puti [Transport tariffs and their impact on the preferences of road users when choosing a route]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2022, Iss. 3(70), pp. 142–148. (In Russian)

21. Bulycheva N. V., Losin L. A. Modelirovanie matric mezhrayonnykh gruzovykh korrespondenciy na jsnove danykh kompleksnogo obsledovaniya peredvizheniy na gorodskoi ulichno-dorozhnoi seti [Modeling of cargo correspondence matrices on the basis of complex survey data of the

urban road network traffic]. *Regional'naya ekonomika i razvitie territoriy* [Regional economy and territorial development]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2020, Iss. 1(14), pp. 240–247. (In Russian)

22. Losin L. A. Issledovaniya prostranstvennykh zakonov mernostei gorodskogo rasseleniya [Studies of spatial patterns of urban settlement]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovaniya transgranichnykh regionov: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of Earth sciences: studies of cross-border regions]. Brest: Brest State University Publ., 2023, part 1, pp. 17–21. (In Russian)

23. Losin L. A., Solodilov V. V., Lyapunova G. P. Administrativno-territorialnye preobrazovaniya i formirovanie lokalnykh centrov rasseleniya na territorii Sankt-Petersburgskoi gorodskoi aglomeracii [Administrative transformations and generation of settlement local centers on the territory of the St. Petersburg urban agglomeration]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2020, Iss. 2–3(61–62), pp. 33–46. (In Russian)

Received: November 04, 2025

Accepted: January 04, 2025

#### Author's information:

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

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