

АЛЕКСЕЙ КАВЕРИН, ЮРИЙ АРПИШКИН,
ИВАН ГРЕБЕНЩИКОВ, ЛЮБОВЬ МЕДВЕДЕВА,
ГЛЕБ РОМАНОВ

ПОЛИЦЕНТР:

МОДЕЛЬ РАЗМЕЩЕНИЯ МЕСТ ТРУДА, ПРОЖИВАНИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЯ

Каверин Алексей Ростиславович, главный специалист сектора градостроительного моделирования ГАУ «Институт Генплана Москвы»; Российская Федерация, 125047, Москва, 2-я Брестская ул., д. 2/14.

E-mail: kaverin.ar.51@gmail.com

Арпишкин Юрий Петрович, главный специалист сектора градостроительного моделирования ГАУ «Институт Генплана Москвы»; Российская Федерация, 125047, Москва, 2-я Брестская ул., д. 2/14.

E-mail: yuarpishkin@genplanmos.ru

Гребенщиков Иван Владимирович, ведущий специалист сектора градостроительного моделирования ГАУ «Институт Генплана Москвы»; Российская Федерация, 125047, Москва, 2-я Брестская ул., д. 2/14.

E-mail: ivg810@mail.ru

Медведева Любовь Вячеславовна, ведущий специалист сектора градостроительного моделирования ГАУ «Институт Генплана Москвы»; Российская Федерация, 125047, Москва, 2-я Брестская ул., д. 2/14.

E-mail: yunde@mail.ru

Романов Глеб Григорьевич, специалист сектора градостроительного моделирования ГАУ «Институт Генплана Москвы»; Российская Федерация, 125047, Москва, 2-я Брестская ул., д. 2/14.

E-mail: romanovgleb@gmail.com

Статья посвящена модели, оптимизирующей размещение основных городских функций на территории Москвы по критериям их взаимной транспортной доступности. Рассматриваются результаты экспериментов по моделированию, проведенному в 2018–2019 годах. Демонстрируется, что прогнозные варианты развития города, генерируемые в процессе оптимизации, способствуют, во-первых, решению транспортной проблемы города (показано на примере вычислительных экспериментов по утреннему часу пик для нескольких десятков вариантов прогноза), во-вторых, созданию условий для развития полицентричности города за счет увеличения посещаемости сложившихся и возникающих периферийных (как правило) центров обслуживания (обосновано на уровне принципов и элементов алгоритма оптимизации). При анализе прогнозной динамики, построенной на основе генерируемых вариантов развития Москвы и еще двух городов, выявлены признаки приближающихся моментов перехода от фазы территориального роста к фазе структурной реорганизации и обратно. Закономерность таких переходов обоснована А.Э. Гутновым в рамках общей теории городского развития.

Ключевые слова: моделирование городов; пространственный анализ; нормативно-поведенческие модели; оптимальность

Цитирование: Каверин А.Р., Арпишкин Ю.П., Гребенщиков И.В., Медведева Л.В., Романов Г.Г. (2019) ПОЛИЦЕНТР: модель размещения мест труда, проживания и обслуживания // Городские исследования и практики. Т. 4. № 4. С. 42–69. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp44201942-69>

Введение

В 2017 году мы начали разработку методики, *связывающей* отдельные аспекты решения транспортной проблемы Москвы с оптимизацией размещения основных городских функций и созданием условий для *развития полицентричности* города. Наша разработка продолжает исследования А.Э. Гутнова [Гутнов, 1980; 1984; 1985], приведшие его к принципу цикличности развития градостроительной системы (ГС) с чередованием фаз *территориальный рост — структурная реорганизация*. Ключевой инструмент разрабатываемой методики — модель ПОЛИЦЕНТР [Каверин, Заблудовский, 2003]. В статье обсуждаются результаты тестовых расчетов, которые были проведены в 2018–2019 годах по этой модели и, на наш взгляд, подтвердили успешность первых этапов разработки методики.

Предварительная постановка задачи

Начиная с 1917 года было утверждено четыре генплана Москвы: в 1935, 1971, 1999 и 2010 годах. Важной общей чертой этих проектов была попытка *сократить дисбаланс «центр — периферия»* в размещении мест приложения труда, проживания и обслуживания населения, чтобы улучшить их взаимную транспортную доступность. Поэтому проекты предполагали развитие полицентричной системы обслуживания и создание иных мест приложения труда (МПТ) за пределами исторического центра города. То есть дисбаланс «центр — периферия» признавался многими поколениями разработчиков генеральных планов столицы.

Однако, по оценкам специалистов Института Генплана Москвы, представителей городской власти, экспертного сообщества, в центре города и по сей день переизбыток МПТ и мест обслуживания при недостатке населения, а на периферии — обратная ситуация. Это подтверждается *перегруженностью* транспортных связей, реализующих центростремительные поездки утром и центробежные — вечером. Пока такая перегруженность сохраняется, *актуален вопрос*: насколько можно решить эту социально-транспортную проблему путем развития *полицентричности* города? Другими словами, меняя размещение основных городских функций, а не только принимая меры по развитию транспортных связей и узлов. Исследованию этого вопроса и посвящена данная статья. *Развитие полицентричности* здесь понимается как создание и (или) усиление периферийных (как правило) центров тяготения населения. Речь о *тяготении*, которое реализуется через культурно-бытовые поездки. В центрах, особенно периферийных, для улучшения их доступности и повышения посещаемости, объекты обслуживания должны совмещаться (как правило) с иными рабочими местами и с местами проживания людей, либо такие места должны быть неподалеку от центров. Например, согласно методике выявления пространственной структуры полицентричного города, принятой в неравномерно-районированной модели (НРМ) А.А. Высоковского, индикаторами центров являются объекты обслуживания. Но таким объектам нужен клиент [Котов и др., 2016]¹, и не важно², *проживает он или работает* поблизости. Увеличив рядом с любым центром или в нем самом (не важно) численность населения и (или) рабочих мест, мы тем самым усилим этот центр за счет роста *потока клиентов и финансового потока*. Такой принцип размещения объектов трех городских функций помимо улучшения доступности и повышения посещаемости центров улучшает и ряд качеств городской среды, например функциональное разнообразие, особенно на периферии.

Наше определение развития полицентричности соответствует тому, как в НРМ *понимаются факторы*, влияющие на эволюцию центров, их «успешность и устойчивость». Однако в отличие от НРМ мы не выявляем центры, а пытаемся обеспечить их клиентами. Поэтому меняем акценты в трактовке термина «полицентричность». В статье термин отнесен не к пространственной структуре — как в НРМ, где обслуживание является «главной краской» в изучаемом «слежке города», — а к *функционально-пространственной* структуре (ФПС), где три функции

1 В приведенной публикации показана важная роль потока клиентов в функционировании «центров притяжения», выявляемых при анализе территориального распределения объектов обслуживания. Сами центры рассматриваются как элементы, формирующие пространственную структуру города. Мы ссылаемся именно на эту работу, так как она посвящена Москве и использованию НРМ, которую считаем наиболее надежным, обоснованным инструментом выявления «центров притяжения (активности)».

2 Не важно — для исследования, которому посвящена статья.

«выступают на равных»³. Оптимизируя их размещение и создавая тем самым условия для развития полицентричности Москвы, мы хотим выявить, в какой степени это будет способствовать решению социально-транспортной проблемы, признаком которой — перегруженность транспортных связей, реализующих центростремительные поездки утром и центробежные — вечером.

Схема исследования

Чтобы выявить это, мы будем проводить экспериментальные расчеты, то есть *генерировать варианты* изменений в размещении МПТ, мест проживания и обслуживания населения. Затем для каждого варианта мы оценим *остроту*⁴ обозначенной проблемы с помощью транспортной модели города, которая используется здесь по своему основному назначению. Другие способы оценки (натурные измерения, обследования) отпадают, поскольку проверяемые варианты не существуют в реальности. Для применения данной схемы нужен еще один инструмент — генератор вариантов⁵. Требования к вариантам:

1. это должны быть варианты прогноза ФПС Москвы⁶, которые могут или могли бы реализоваться при некоторых условиях, *теоретически выполнимых*;
2. у нас должны быть основания полагать, что генерируемые варианты *развивают полицентричность ФПС* (см. сноску 3) и в этом смысле оптимальны.

Первое требование (в данном исследовании — по Москве) выполняется путем использования двух базовых прогнозов, основанных на учете утвержденной градостроительной документации⁷. Но при генерировании вариантов базовые прогнозы минимально изменяются путем оптимизации размещения трех городских функций⁸ с помощью модели ПОЛИЦЕНТР. Генерируемые варианты прогноза — результат такой оптимизации.

О выполнении второго требования расскажем подробнее. Модель ПОЛИЦЕНТР разрабатывается, совершенствуется и используется в Институте Генплана Москвы с 1983 года. Все предыдущие версии модели (до 2014 года) создавались для оптимизации размещения *центров обслуживания* (подробнее см. раздел 8). Эти версии модели находили для развиваемых центров такие места и параметры, что доступность обслуживания улучшалась для людей, наиболее заинтересованных в улучшении, то есть находящихся в наихудших условиях по доступности обслуживания. Такие люди, в силу их заинтересованности, обеспечат развиваемым центрам максимальную посещаемость. Эта возможность ПОЛИЦЕНТРа обеспечивалась во всех его версиях системой критериев оптимальности, которая многократно верифицировалась начиная с 1984 года (о гарантиях оптимальности см. также разделы 2–4). На роль генератора вариантов могут претендовать и другие модели⁹, но данная статья посвящена модели ПОЛИЦЕНТР, так как в 2017 году авторы статьи начали разработку *новой версии* методического, математического, алгоритмического и программного обеспечения

-
- 3 Говоря о полицентричности ФПС, мы обязуемся изменять размещение населения и МПТ так, чтобы это создавало оптимальные условия (по наличию клиентов) для развития полицентричности системы обслуживания.
 - 4 Оценка остроты этой проблемы (для Москвы) включает 5–6 показателей для центростремительных поездок и 3–4 показателя — для поездок разнонаправленных. Оценка позволяет выявлять состояния города, в которых развитие полицентричности может, например, приводить к обострению транспортной проблемы. В этом случае применительно к таким состояниям появляется аргумент против развития полицентричности (подробнее см. разделы 6 и 7).
 - 5 Здесь в этой роли проверяется модель ПОЛИЦЕНТР.
 - 6 Исследовались и другие города, из числа которых в статью включены материалы по Казани и Севастополю.
 - 7 Подробнее о базовых прогнозах см. разделы 6 и 7.
 - 8 Варианты, сгенерированные для Москвы на основе первого базового прогноза, рассматриваются в разделе 6; на основе второго — в разделе 7.
 - 9 Подробный обзор моделей, решающих похожие проблемы, не входит в задачу данной статьи. Для сравнения нашего подхода с другими рекомендуем статью [Гостев, 2018], где анализируются динамические структурно-функциональные модели города, укладываемые в рамки общей теории эволюционного городского развития, основы которой сформулированы А.Э. Гутновым [Гутнов, 1984]. В статье М.В. Гостева показано также, что в качестве операционных моделей, учитывающих эволюционную динамику ГС, позднее были разработаны НРМ А.А. Высоковского и территориально-коммуникационная модель ГС О.А. Баевского [Баевский, 2001; 2016]. Поэтому модели А.Э. Гутнова, А.А. Высоковского и О.А. Баевского мы упоминаем чаще других моделей.

этой модели. Новая версия ориентирована на исследование вопроса, сформулированного нами выше. Речь идет об изучении специфичного ресурса¹⁰ Московской агломерации. Он словно скрыт в вариантах¹¹ развития полицентричности ФПС Москвы, но только в тех вариантах, реализация которых будет способствовать решению социально-транспортной проблемы. Введем термин *ресурс ОРП* (ресурс оптимального развития полицентричности) — способность ФПС города в процессе эволюции изменяться, создавая оптимальные условия для развития полицентричности, одновременно способствуя решению социально-транспортной проблемы.

Уточнение задачи

Теоретически реализация предложенной схемы исследования может иметь разные исходы, два из которых находятся на противоположных краях «спектра» возможностей. О положительном исходе можно будет говорить, если генерируемые варианты прогноза, развивая полицентричность города, дадут заметные улучшения в решении социально-транспортной проблемы. Это будет означать не только то, что у города есть ресурс ОРП, но и то, что модель ПОЛИЦЕНТР способна генерировать соответствующие варианты. То есть можно будет утверждать, что у нас имеются основные элементы методики, ориентированной на исследование этого ресурса в будущем. Если же мы не получим улучшений, то будем констатировать исчерпанность ресурса ОРП в городе¹² и (или) то, что генератор вариантов *не справляется* со своей задачей.

Приведенное выше краткое описание схемы нашего исследования и комментариев к возможным исходам экспериментов расширяют тему статьи. Мы не только проверяем наличие ресурса ОРП в Москве. Проверяется также и модель ПОЛИЦЕНТР в качестве генератора вариантов прогноза для разрабатываемой методики. Схема данного исследования — *«прототип» такой методики*.

Результаты экспериментальных расчетов позволяют продемонстрировать в разделах 6 и 7, что Москва¹³ обладает ресурсом ОРП, а модель ПОЛИЦЕНТР способна генерировать соответствующие варианты. Положительность исхода экспериментов — факт очень важный для разрабатываемой методики. Поэтому его доказательству в статье уделено основное место. Хотя данный факт доказан только для тех городов и тех их состояний, что участвовали в экспериментальных расчетах, количество анализируемых состояний (несколько десятков вариантов прогноза) и скрупулезность многокритериального анализа (сравнение вариантов по 8–11 критериям, отражающим остроту социально-транспортной проблемы каждого варианта)¹⁴ должны убедить читателя в корректности наших выводов.

Особенности исследования

Главные особенности вытекают из необходимости использовать *транспортную модель* как инструмент оценки генерируемых вариантов с точки зрения решения социально-транспортной проблемы. Важна тождественность структур данных, описывающих ФПС города в модели ПОЛИЦЕНТР и в транспортной модели. Выделим два признака тождественности.

Во-первых, в обеих моделях должно совпадать районирование территории города. Применительно к нашему исследованию это означает невозможность выделять центры тяго-

¹⁰ Данный ресурс складывается из возможностей изменять ФПС на территориях, допускающих изменение застройки, а также из возможностей транспортной сети по перевозке пассажиров в условиях перераспределения потоков, происходящего из-за упомянутых изменений ФПС города.

¹¹ Мы говорим, что ресурс скрыт в вариантах, так как проверить его наличие можем, только генерируя варианты прогноза и оценивая применительно к ним остроту социально-транспортной проблемы. Об элементах модели ПОЛИЦЕНТР, значимых в исследовании ресурса, см. разделы 1–5. О признаках наличия и исчерпаемости ресурса см. разделы 6 и 7.

¹² Наличие ресурса ОРП — важное условие для осуществления фазы структурной реорганизации в развитии ГС (по А.Э. Гутнову), а усиление полицентризма системы центров обслуживания — часть процесса развития, характерная для этой фазы.

¹³ По Казани и Севастополю — аналогичный результат.

¹⁴ Сравнение по В. Парето с учетом соображений, изложенных в разделах 6 и 7.

тения населения с характерной для НРМ степенью территориальной дифференциации¹⁵. Причина — расчетные районы транспортной модели Московской агломерации в несколько раз крупнее, чем «ячейки стандартизированной сетки», использованной для Москвы в рамках НРМ.

Во-вторых, в этих моделях должна совпадать структура показателей, отражающих численность населения и число рабочих мест (в объектах обслуживания и иных объектах) в каждом расчетном районе, то есть должны совпадать характеристики каждого района как элемента ФПС города. Вошедшие в статью расчеты по транспортной модели касались только утреннего часа пик, когда культурно-бытовые связи составляют малую долю всех поездок. Поэтому поездки населения (в том числе клиентов) к местам обслуживания и дислокация соответствующих объектов *учитывались, но на самом грубом уровне* — в гипотезе, что количество рабочих мест, пропускная способность объектов обслуживания и частота их посещения клиентами в каждом районе *пропорциональны друг другу*. Кроме того, учитывались общие для всех пассажиров параметры формул транспортной модели. Грубость расчета не позволяет различать в генерируемых вариантах прогноза культурно-бытовые и трудовые поездки и вести их раздельный анализ. Впрочем, ввиду темы статьи такой анализ не является критически необходимым (особенно на ранних этапах разработки методики), поскольку поездки обоих видов — это нагрузка *на одни и те же магистрали*. Гипотеза о пропорциональности применительно к рабочим местам действует так. Увеличивая или уменьшая в процессе оптимизации число МПТ в каком-то районе, мы тем самым увеличиваем или уменьшаем число клиентов и рабочих мест в объектах обслуживания, МПТ в иных объектах этого района. Учитывая такую пропорциональность, в дальнейшем (если не указано иное) термины «число рабочих мест» и «число МПТ» будут означать одно и то же, а именно *количество мест приложения труда плюс обслуживания населения*.

Мы надеемся, что на следующих стадиях разработки нашей методики помимо возможности оптимизировать в каждом районе соотношение «число МПТ — численность населения» появится возможность выделять в МПТ места обслуживания и иные объекты, а также раздельно оптимизировать и анализировать их.

1. Взаимодействие с транспортной моделью

Модель ПОЛИЦЕНТР работает во взаимодействии с четырехстадийной транспортной макро-моделью. Вместе они образуют конструкцию, являющуюся нормативно-поведенческой моделью¹⁶ размещения МПТ и населения (рис. 1). Конструкция имеет два компонента:

- 1) *поведенческий* — транспортная модель способна достигать равновесного состояния, тем самым воспроизводя наиболее вероятное поведение людей при поездках¹⁷;
- 2) *нормативный* компонент — модель ПОЛИЦЕНТР, в которую заложены критерии оптимальности и возможность менять условия достижения равновесия в поведенческом компоненте; именно эта возможность позволяет в процессе оптимизации учитывать те изменения, которые будут происходить в работе транспортной сети вследствие моделируемых изменений в размещении населения и рабочих мест.

¹⁵ Это одна из причин, по которой в данном исследовании мы не выделяем центры тяготения населения.

¹⁶ В отечественной урбанистике первая нормативно-поведенческая модель была разработана, по-видимому, в ЦНИИП градостроительства [Лившиц, 1979].

¹⁷ Задача транспортной модели решается при заданном территориальном распределении (размещении) населения и рабочих мест, при заданной конфигурации транспортной сети и заданных ее характеристиках, с помощью которых описываются возможности проезда пассажиров по всем ее участкам с определенными скоростями. Задаются также поведенческие характеристики пассажиров, с некоторой вероятностью совершающих поездки на разных видах транспорта с разными целями и затратами на поездку.



Рис. 1. Схема итерационного взаимодействия транспортной модели и модели ПОЛИЦЕНТР

Источник: данные авторов.

В свою очередь, модель ПОЛИЦЕНТР передает транспортной модели следующие результаты своей работы:

5) данные об изменении численности населения и числа рабочих мест в каждом районе, полученные в результате оптимизации (см. разделы 3 и 4).

Эти количественные изменения *оптимальны*, так как вычисляются по оптимизирующим формулам, полученным согласно *методологии математического анализа*; эта методология применяется к компонентам критерия оптимальности путем их дифференцирования и расчета координат градиента, указывающего направление оптимального развития в пространстве моделируемых изменений численности населения и числа рабочих мест в каждом районе. Точки этого пространства соответствуют различным состояниям ФПС города.

Обмен данными происходит итерационно (рис. 1). Одна итерация — один запуск транспортной модели плюс основанные на ее результатах расчеты изменений (указанных в п. 5) по модели ПОЛИЦЕНТР. При оптимизации делается несколько итераций, каждая из которых незначительно меняет ФПС. Состояние города, исходное для первой итерации, упомянуто в п. 3. Затем для каждой следующей итерации исходное состояние берется по результатам оптимизации на предыдущей итерации. Результат, полученный на каждой итерации, рассматривается как один из генерируемых вариантов прогноза.

3. Оптимизирующая часть модели ПОЛИЦЕНТР. Оценка на уровне каждого расчетного района города

Критерий оптимальности состоит из следующих показателей *по каждому району*, отражающих условия транспортной доступности рабочих мест для населения:

Нормативный компонент этой конструкции, модель ПОЛИЦЕНТР, рассматривается более подробно, так как именно эту модель (а не транспортную) мы разрабатываем. Помимо данных, нужных для оценки генерируемых вариантов по остроте социально-транспортной проблемы, поведенческий компонент готовит данные, необходимые для работы модели ПОЛИЦЕНТР при создании таких вариантов в процессе оптимизации.

2. Обмен данными (на примере модели Московской агломерации)

При взаимодействии с транспортной моделью Москвы и Московской области модель ПОЛИЦЕНТР использует следующие результаты работы этой транспортной модели:

1) для каждой пары расчетных районов модели (выезд-въезд) — величина корреспонденции (имеется около 2000 районов, то есть около 4 млн пар)¹⁸;

2) время поездки из одного района в другой — также для каждой пары районов с учетом замедления движения на перегруженных элементах транспортной сети.

Помимо этих данных в модели ПОЛИЦЕНТР используется следующая информация:

3) данные о численности населения и числе рабочих мест в каждом районе в исходном для моделирования состоянии города (для Москвы — один из двух базовых прогнозов, см. введение, а также разделы 6 и 7);

4) ограничения, накладываемые на моделируемые изменения населения и рабочих мест в каждом районе (см. раздел 5).

¹⁸ Величина корреспонденции из района А в район В — количество пассажиров, перемещающихся в утренний час пик из района А в район В.

- 1) связность с населением, то есть сумма численностей населения районов, из которых можно доехать в данный район за комфортное время, ограниченное, например, 45 минутами¹⁹;
- 2) связность с местами приложения труда (связность МПТ), то есть сумма численностей рабочих мест в районах, в которые можно доехать из данного района за такое же время;
- 3) прямая обеспеченность, то есть обеспеченность населения района рабочими местами, доступными для него с комфортным временем поездки. Это приходится на одного среднестатистического жителя данного района число рабочих мест, доступных для него с комфортным временем поездки *с учетом населения других районов*, из которых с таким же временем доступны хотя бы некоторые из тех же рабочих мест, поскольку пропорциональная населению часть таких мест должна приходиться и на жителей указанных «других районов»;
- 4) обратная обеспеченность, то есть обеспеченность рабочих мест населением, для которого эти места доступны с таким же временем (подробный комментарий опускаем в силу его «симметричности» комментарию к прямой обеспеченности²⁰).

Очевидно, население любого расчетного района *заинтересовано в повышении* связности данного района с местами приложения труда (связности МПТ, см. п. 2) и прямой обеспеченности (п. 3), так как чем выше величина такой связности и обеспеченности, тем больше возможности выбора мест работы и обслуживания в пределах комфортного времени поездки для населения данного района и тем большее число людей, выезжающих из данного района для посещения соответствующих объектов, совершат поездку в пределах комфортного времени.

По той же причине для более успешного функционирования мест приложения труда и обслуживания в любом районе выгодно повышение связности данного района с населением (п. 1) и обратной обеспеченности (п. 4).

4. Оптимизирующая часть модели ПОЛИЦЕНТР. Оценка на уровне города в целом

При формировании критерия оптимальности²¹ используются следующие распределения по показателям транспортной доступности:

1. распределение населения по значениям связности МПТ;
2. распределение рабочих мест по значениям связности с населением;
3. распределение населения по значениям прямой обеспеченности;
4. распределение рабочих мест по значениям обратной обеспеченности.

Каждое распределение, будучи отображенным в виде гистограммы, показывает, *в каких условиях* (по связности МПТ, связности с населением и т.д.) *и сколько людей находится*. В случае распределения рабочих мест (п. 2 и 4) речь тоже идет о людях, но людях, работающих на этих местах или там же обслуживаемых. Особенностью модели ПОЛИЦЕНТР являются критерии оптимальности. Они ориентированы на улучшение транспортной доступности рабочих мест для людей, *находящихся в плохих условиях* по одному из показателей доступности из списка. В худших условиях находится население, соответствующее «левым» интервалам на гистограммах распределений 1 и 3 (рис. 2)²², и рабочие места в тех же интервалах гистограмм распределений 2 и 4.

Улучшение каждого из перечисленных распределений оценивается критерием оптимизации через среднее значение (например, через среднюю связность) и стандартное отклонение связности, обеспеченности.

¹⁹ Впервые этот метод оценки условий доступности (см. также п. 2) был предложен в 1966 году Б. Харрисом (Harris B.) [Harris, 1966], в некоторых русскоязычных публикациях – Б. Гаррис.

²⁰ В формуле расчета обеспеченности, как и в п. 3, использованы элементы алгоритма Г.В. Шелейховского, применяемого начиная с 1930-х годов при балансировке корреспонденций в транспортных моделях.

²¹ В разделе 3 мы сформировали наиболее детальные компоненты критерия, оценивающие каждый отдельно взятый район. Здесь мы продолжим формировать критерий, укрупняя детальные оценки из раздела 3 и получая на этой основе агрегированные показатели доступности на уровне города.

²² На рис. 2 принципы оценки распределений 1–4 рассматриваются на примере распределения 1. Для остальных трех распределений принципы те же.

Принципы оценки для компонентов критерия оптимизации:

- если среднее значение больше (красная точка правее: *рис. 2А, 2В*), то распределение лучше, так как меньше населения и рабочих мест находится в худших условиях;
- *стандартное отклонение меньше* (голубая стрелка короче: *рис. 2С, 2D*) — *распределение лучше* по аналогичной причине²³.

Благодаря такому набору компонентов критерия оптимальности модель ПОЛИЦЕНТР эффективно управляет распределением населения и рабочих мест по величине показателей транспортной доступности (двух связностей и двух обеспеченностей). Именно поэтому моделируемые изменения численности населения и рабочих мест в каждом районе *улучшают* доступность МПТ для людей, *нуждающихся* в улучшении больше других, а потому *максимизируют посещаемость* развиваемых объектов обслуживания, создавая тем самым *условия для развития полицентричности* города. Причем упомянутые изменения численности (как показано во введении и разделах 2 и 3) являются *оптимальными* в плане создания таких условий.

Согласно *основной гипотезе*, максимизация средних значений и минимизация стандартных отклонений для четырех перечисленных выше распределений устойчиво приводит к улучшению работы транспорта, в том числе к сокращению населением затрат времени на поездки. Некоторые результаты вычислительных экспериментов по проверке этой гипотезы приводятся в разделах 6 и 7.

Подтверждение гипотезы будет означать, что участвовавшие в расчетах варианты прогноза имеют ресурс ОРП, а модель ПОЛИЦЕНТР *справляется с ролью* генератора вариантов.

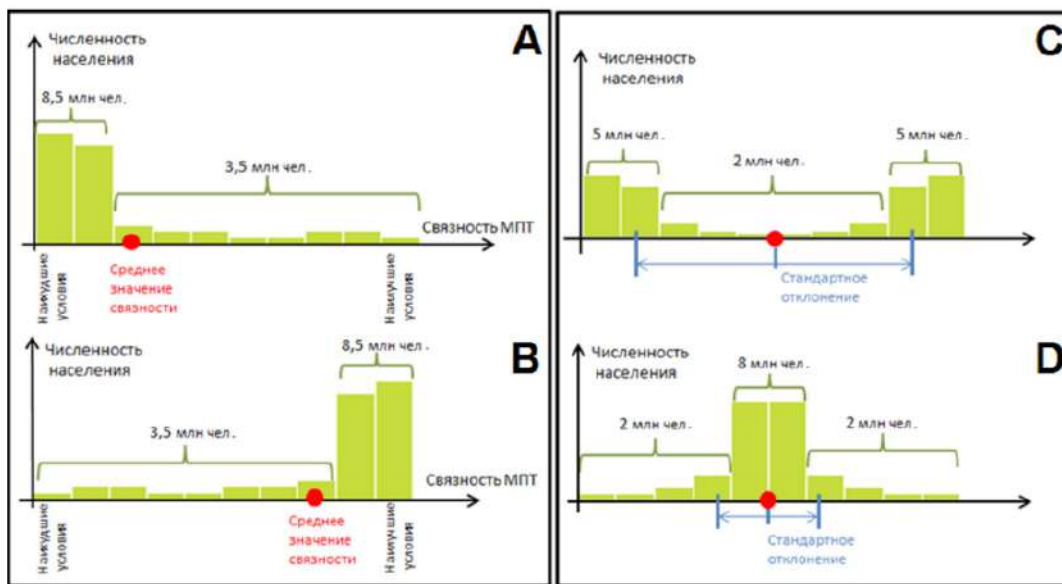


Рис. 2. Принципы оценки распределений

Источник: данные авторов.

5. Часть модели ПОЛИЦЕНТР, отвечающая за реалистичность моделируемых изменений

Реалистичность результатов моделирования обеспечивается за счет учета ограничений, накладываемых на моделируемые изменения численности населения и рабочих мест в каждом расчетном районе²⁴.

²³ Параметры гистограмм (*рис. 2*) специально подобраны для удобства объяснения этих принципов. Так, на *рис. 2А, 2В* средние значения различаются, а стандартные отклонения одинаковы. На *рис. 2С, 2D* — наоборот.

²⁴ Ограничениями описывается наличие резервов (в части возможностей сноса, строительства, реконструкции и перепрофилирования застройки), позволяющих изменять размещение населения и МПТ. Если такие резервы в достаточном количестве расположены в выгодных по доступности местах, то оптимизация выявит ресурс ОРП с большей вероятностью.

Имеет смысл учитывать ограничения следующих типов.

Первый тип. Ограничения для районов, где есть площадки с определенными границами, допускающие изменение застройки, причем одни из них предназначены преимущественно для размещения жилья, а другие — для рабочих мест. Если каким-то из площадок в результате оптимизации позволено оказаться не полностью застроенными, то в таких районах могут быть заданы ограничивающие параметры:

- минимальная и максимальная численность населения;
- аналогичные параметры для численности рабочих мест.

Подчеркнем: этот тип ограничений предполагает, что в любом районе оптимизируемые изменения численности населения и числа рабочих мест *независимы* друг от друга. То есть какой бы ни оказалась в результате моделирования численность населения в районе — минимальной, максимальной или любой другой в промежутке между ними, — независимо от этого количество рабочих мест в том же районе может оказаться как минимальным, так и максимальным или любым другим в промежутке между ними.

Второй тип. Если есть возможность передвигать границу, разделяющую две смежные площадки (преимущественно жилого и нежилого назначения), то территории жилой застройки смогут увеличиваться за счет нежилых территорий, и наоборот. Тогда ограничивающим параметром для района может стать *суммарная плотность застройки* (жилой плюс нежилой). Причем так, что даже при максимальной плотности есть возможность, скажем, увеличить население района за счет сокращения рабочих мест, но не снижая плотность застройки. Или, наоборот, увеличить количество рабочих мест за счет снижения численности населения. Этот тип ограничений предполагает *зависимость* друг от друга оптимизируемых изменений населения и рабочих мест. Зависимость проявляется в любом районе при достижении в нем максимально допустимой плотности застройки.

Третий тип. В случаях, когда нет возможности подготовить данные по ограничениям достаточно корректно, можно *имитировать действие ограничений*, например, следующим образом:

- выделяются районы, в которых возможно изменение (положительное или отрицательное)²⁵ численности населения и (или) рабочих мест;
- вычисленный в каждом районе по оптимизирующим формулам, прирост (+/-) населения завьшается по абсолютной величине в районах, где велика исходная численность населения, и занижается там, где эта численность мала, в предположении, что в районах, где, например, много жилья, велика вероятность больших объемов сноса, нового строительства жилого фонда, а значит, велика вероятность больших изменений численности населения. Аналогичный принцип, имитирующий влияние ограничений на величину прироста, используется и для рабочих мест.

Имитация ограничений целесообразна в двух случаях. При долгосрочном прогнозировании, когда увеличивается неопределенность будущего, или при пилотном характере исследования, в том числе при экспериментальном использовании модели.

6. Вычислительные эксперименты

При разработке данной версии модели ПОЛИЦЕНТР (как генератора вариантов для методики, указанной во введении) проводились вычислительные эксперименты для решения двух задач.

1) Для проверки основной гипотезы (см. раздел 4). Если гипотеза подтверждается для какой-то итерации или для группы итераций, последовательно выполненных с помощью модели ПОЛИЦЕНТР, то состояния города, участвовавшие в итерациях, имеют исследуемый ресурс, а модель ПОЛИЦЕНТР способна генерировать соответствующие варианты.

2) С целью исследования роли ограничений в процессе моделирования, анализа влияния их «жесткости» на исчерпаемость и наличие ресурса ОРП.

Результаты экспериментов приводятся в четырех подразделах. Подразделы 6.1–6.3 посвящены экспериментам на основе данных по Москве и Московской области. Подраздел 6.4 —

²⁵ Изменение, положительное или отрицательное, — это увеличение или уменьшение числа населения и (или) рабочих мест. Ниже будет использоваться также термин «прирост (+/-)» или «прирост».

по Казани и Севастополю. Эксперименты, связанные с Москвой, выполнены с большей основательностью. Здесь результаты анализа подтверждены более подробной статистикой.

Рассматриваемые в данном разделе эксперименты основаны на имитации действия ограничений (см. раздел 5, «третий тип»). Это простейший способ варьирования ограничений с целью получения статистики.

В подразделах 6.1–6.3 исходное распределение населения и МПТ Москвы по расчетным районам взято согласно базовому прогнозу, основанному на утвержденных (до 2014 года) проектах планировки, разрешениях на строительство, ГПЗУ и т.д.

6.1. Условные обозначения, используемые при описании результатов вычислительных экспериментов по Москве и Московской области

1) Терминами, приведенными на рис. 3, описываются оценки затрат времени на поездки: средние продолжительности поездок, сгруппированных по направлениям и зонам, в том числе:

- средние величины времени *центростремительных* поездок между следующими зонами отправления-прибытия (выезда-въезда): Obl-Cen, Tin-Cen, Obl-Bub, Tin-Bub, Bub-Cen (модель улучшает прежде всего именно эти величины времени как наиболее критичные, иногда за счет ухудшения остальных показателей времени);
- средние величины времени *разнонаправленных* поездок: Agl-Agl, Mos-Mos, Bub-Bub (их нужно контролировать, чтобы баланс улучшений/ухудшений не менялся к худшему).

2) Моделируемые изменения численности населения и числа рабочих мест в каждом районе обозначаются во всех вычислительных экспериментах одинаково, в том числе:

- по населению — «прирост Popul»;
- по МПТ — «прирост Work» в каждом расчетном районе, вычисленный при моделировании в течение одной или нескольких итераций (например, прирост «Popul_6_0» — разность между численностью населения в характеризуемом районе на 6-й итерации и той же численностью в «нулевом» состоянии города, то есть перед 1-й итерацией).



Рис. 3. Условные обозначения

Источник: данные авторов.

6.2. Результаты вычислительных экспериментов по Москве и Московской области (основной вариант ограничений)

По основному варианту были разрешены изменения численности населения и числа рабочих мест только в расчетных районах зоны BUB (периферийные округа старой Москвы). Было выполнено 6 итераций, это 6 вариантов прогноза. Некоторые результаты расчетов показаны на рисунках:

- Рис. 4: прирост численности населения (рис. 4A, 4B) и рабочих мест (рис. 4C, 4D), в том числе прирост на первых двух итерациях (рис. 4A и 4C) и на всех шести итерациях суммарно (рис. 4B, 4D).

Рис. 5: динамика величины критерия оптимизации (ось X на всех графиках) и нескольких средних величин времени выезда-въезда центростремительных поездок (ось Y) — на каждом графике какое-то одно среднее время. Выделенные и пронумерованные на всех графиках точки (0, 1...6) обозначают семь состояний города: 0 — состояние, исходное при моделировании, 1–6 — варианты прогноза, полученные при помощи расчета на итерациях с номерами 1–6 соответственно.

- Рис. 6: динамика величины критерия оптимизации и трех средних времен разнонаправленных поездок. Смысл координатных осей и цифр на графике тот же, что на рис. 5.

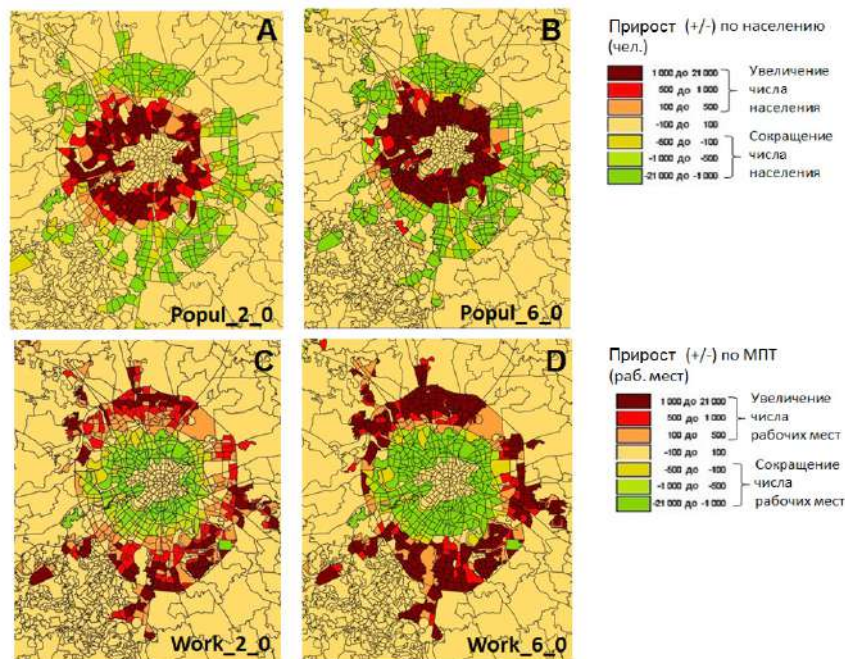


Рис. 4. Прирост (+/-) населения и рабочих мест с учетом ограничений по основному варианту

Источник: данные авторов.

Комментарии к графикам на рис. 5 и 6.

1) По мере выполнения итераций величина критерия убывает, что означает устойчивое расширение возможностей комфортного выбора МПТ и мест обслуживания населения. В основном данное улучшение касается людей, нуждающихся в нем больше других. Это способствует максимизации посещаемости развиваемых (на периферии) объектов обслуживания, создавая тем самым оптимальные условия развития полицентричности.

2) На всех графиках исходное состояние города имеет среднее время больше (хуже), чем на 6-й итерации. То есть при оптимизации наблюдается общая тенденция улучшения (сокращения) всех контролируемых величин времени. Это подтверждает основную гипотезу, свидетельствуя о наличии ресурса ОРП у соответствующих состояний города, а также об эффективной работе модели ПОЛИЦЕНТР как генератора вариантов.

3) Однако есть итерации, на которых некоторые значения времени ухудшаются. Для величин времени центростремительных поездок это три исключительных случая. Время Tin-Cen увеличивается на 3-й итерации, а время Obl-Cen — на 4-й и 6-й итерациях. Вдобавок все три показателя времени разнонаправленных поездок увеличиваются на тех же 4-й и 6-й итерациях. Это еще шесть случаев. Ухудшения можно интерпретировать как признаки исчерпаемости ресурса ОРП.

4) Чтобы получить представление о статистике подтверждений основной гипотезы, можно условно считать начальной точкой оптимизации не только точку 0, но также и любую другую точку, кроме точки 6. В качестве конечной точки может выбираться любая, чей номер больше, чем у выбранной начальной точки. Каждая пара точек условного начала и окончания оптимизации будет характеризоваться либо улучшением (подтверждением гипотезы), либо ухудшением среднего времени.

5) Согласно статистике, полученной на графиках, доля случаев, в которых основная гипотеза подтверждается, составила 96,2% для центростремительных и 77,8% для разнонаправленных поездок. То есть алгоритм в первую очередь улучшает показатели времени центростремительных поездок (как самые критичные), иногда за счет ухудшения менее критичных значений времени.

6) В динамике признаков исчерпаемости ресурса ОРП заметны негативные тенденции. Так, по мере выполнения итераций:

- величина критерия оптимизации улучшается все меньше и меньше;
- учащаются случаи ухудшения значений времени поездки;
- показатели времени разнонаправленных поездок на трех последних итерациях (рис. 6) вышли на плато пилообразной кривой с амплитудой примерно 0,1 минуты и едва заметной тенденцией к ухудшению времени Agl-Agl.

Возможно, наши итерации уже близко подошли к тому состоянию города, в котором ресурс ОРП будет исчерпан не только для разнонаправленных, но и для центростремительных поездок.

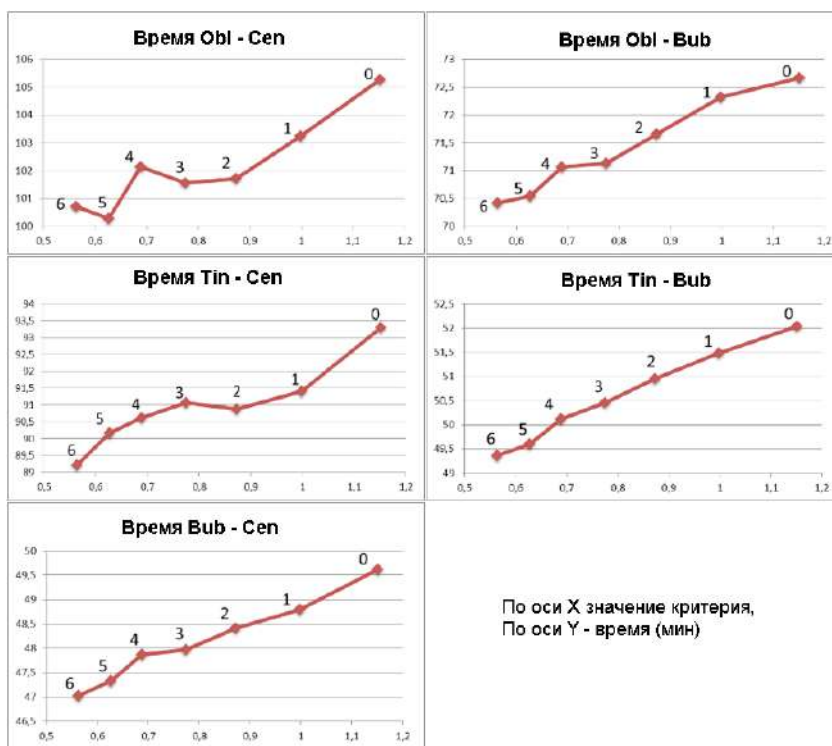


Рис. 5. Изменения средних значений времени выезда-въезда (центростремительные поездки)

Источник: данные авторов.

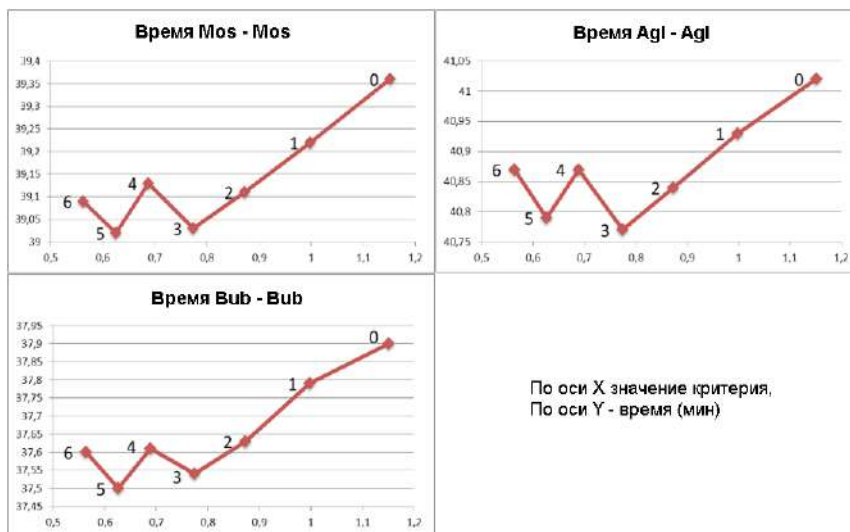


Рис. 6. Изменения средних значений времени выезда-въезда (разнонаправленные поездки)

Источник: данные авторов.

6.3. Результаты вычислительных экспериментов по Москве и Московской области (6 дополнительных вариантов ограничений)

В экспериментах по дополнительным вариантам использовалось то же исходное состояние города, что и для основного варианта ограничений. Варианты различаются только ограничениями, которые заданы следующим образом. В каждой из указанных ниже трех пар дополнительных вариантов зона BUB разделена на две сопоставимые по площади части (на две «половины»):

- в паре Inside-Outside — внутренняя и внешняя части зоны BUB; эту пару частей можно также назвать срединная и периферийная зоны старой Москвы;
- в паре Left-Right — западная и восточная части;
- в паре Cross1-Cross2 — часть, состоящая из периферийных округов старой Москвы с четными и нечетными номерами административных округов.

При этом в каждом из шести дополнительных вариантов были разрешены изменения численности населения и рабочих мест только в какой-то одной из указанных половин зоны BUB. Для каждого варианта было выполнено по две итерации. Некоторые результаты расчетов показаны на рис. 7–10.

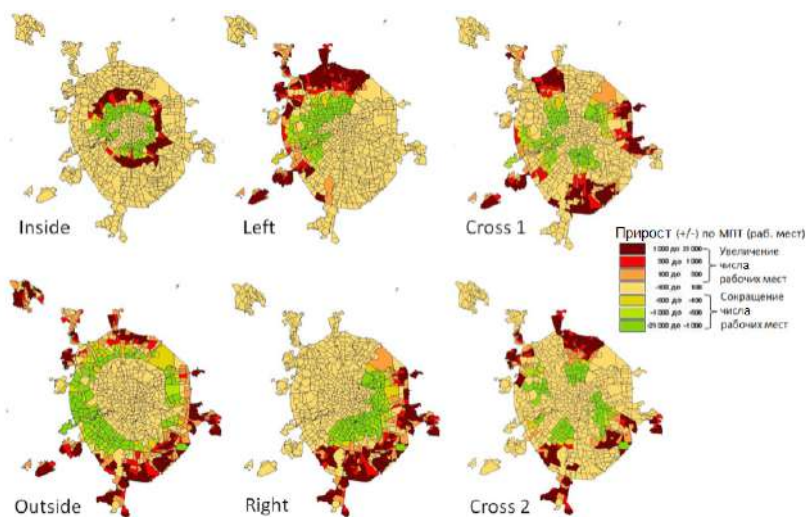


Рис. 7. Прирост по местам приложения труда (дополнительные варианты)

Источник: данные авторов.

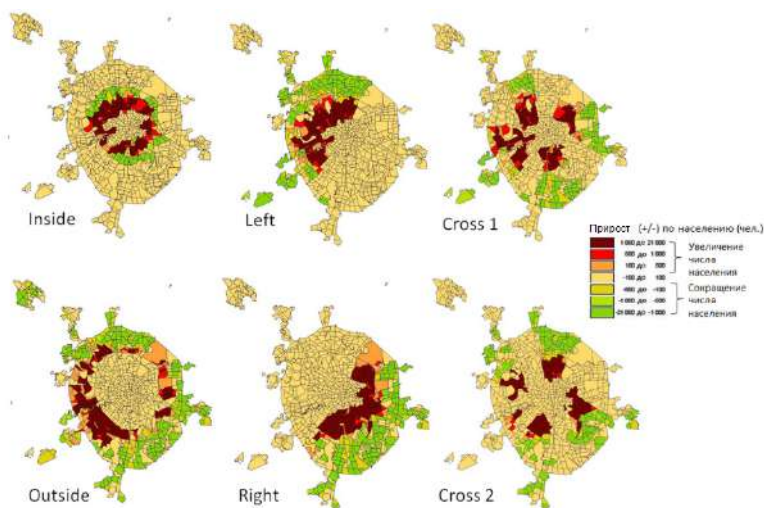


Рис. 8. Прирост по населению (дополнительные варианты)

Источник: данные авторов.

Комментарии к графикам на *рис. 9 и 10*.

1) На трех парах дополнительных вариантов ограничений подтверждаются следующие выводы, сформулированные в комментариях к основному варианту ограничений:

- устойчивое убывание значений критерия по мере выполнения итераций; ограничения стали жестче, но генератор вариантов максимизирует посещаемость развиваемых объектов обслуживания почти так же успешно, как при основном варианте ограничений; косвенное подтверждение тому — величина критерия в конце второй итерации для большинства дополнительных вариантов близка к основному варианту; только у двух вариантов (Inside и Outside) убывание критерия хотя и устойчивое, но заметно меньше;
- общая тенденция улучшения всех контролируемых показателей времени (с редкими ухудшениями некоторых показателей на некоторых итерациях); основная гипотеза снова подтверждается.

2) По сравнению с основным вариантом ограничений любой из шести дополнительных вариантов сдерживает возможность оптимизации существенно сильнее. Поэтому ухудшение некоторых средних показателей времени начинает проявляться уже на первых двух итерациях (в отличие от основного варианта, по которому до третьей итерации ухудшений не было). То есть признаки исчерпаемости ресурса ОРП здесь проявляются раньше.

3) Согласно полученной статистике, доля случаев, в которых основная гипотеза подтверждается, составила 96,7% для центростремительных поездок и 79,6% для разнонаправленных поездок.

4) Эти количественные оценки (доли) почти совпадают с аналогичными оценками, приведенными в подразделе 6.2. Однако корректно они могут сравниваться только с первыми двумя итерациями основного варианта, на которых доля случаев подтверждения гипотезы составляет 100%.

5) Среди дополнительных вариантов наименьшая устойчивость и предсказуемость результатов моделирования проявляется в паре Inside-Outside. То есть ужесточение или ослабление ограничений на периферии старой Москвы при обратной тенденции в срединной зоне города может влиять на эффективность результатов моделирования и на исчерпаемость ресурса ОРП существенно сильнее, чем варьирование ограничений тенденциозно по секторам²⁶ территории города.

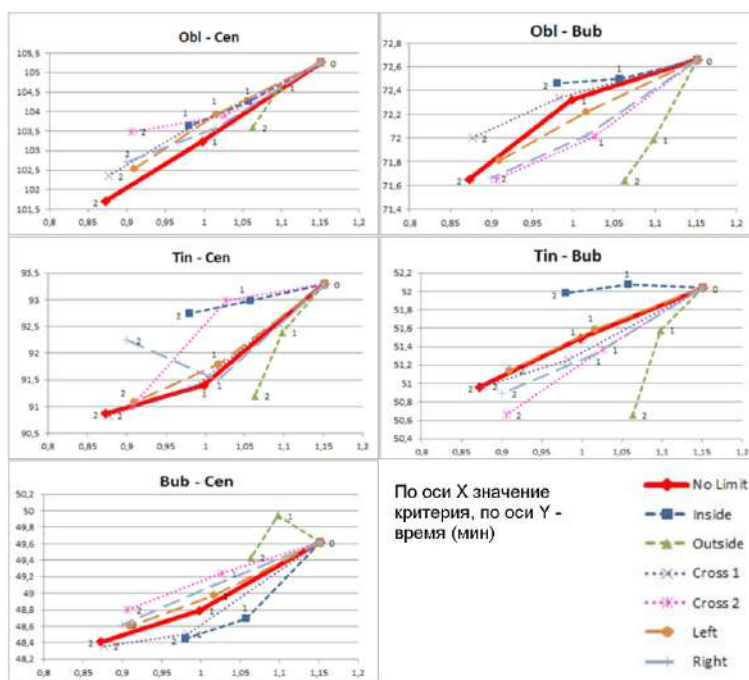


Рис. 9. Изменения средних значений времени выезда-въезда с учетом ограничений по дополнительным вариантам (центростремительные поездки)

Источник: данные авторов.

Примечание. Для сравнения приводится фрагмент графика (первые две итерации) по основному варианту ограничений (No Limit).

²⁶ Мы говорим о варьировании по секторам, так как, исключая варианты ограничений Inside и Outside, опирающиеся на «кольцевое» разбиение зоны BUB, каждый из остальных вариантов определяется набором административных округов, в которых разрешены изменения. То есть варианты ограничений Left, Right, Cross1 и Cross2 опираются на «секторное» разбиение зоны BUB.

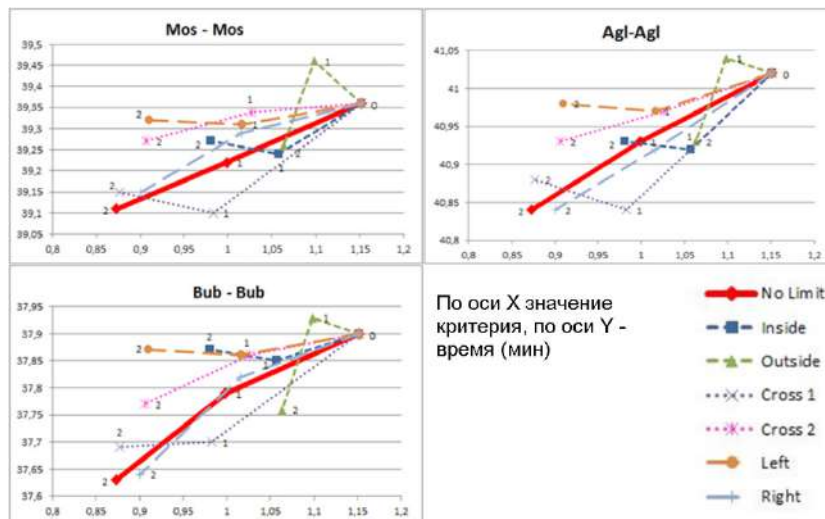


Рис. 10. Изменения средних значений времени выезда-въезда с учетом ограничений по дополнительным вариантам (разнонаправленные поездки)

Источник: данные авторов.

6.4. Результаты вычислительных экспериментов по Казани и Севастополю

В экспериментах по Казани и Севастополю изменения численности населения и рабочих мест были разрешены во всех расчетных районах. Действие ограничений имитировалось так же, как указано в «третьем типе» раздела 5. По каждому городу было проведено по шесть итераций. Некоторые результаты расчетов показаны на рис. 11–15.

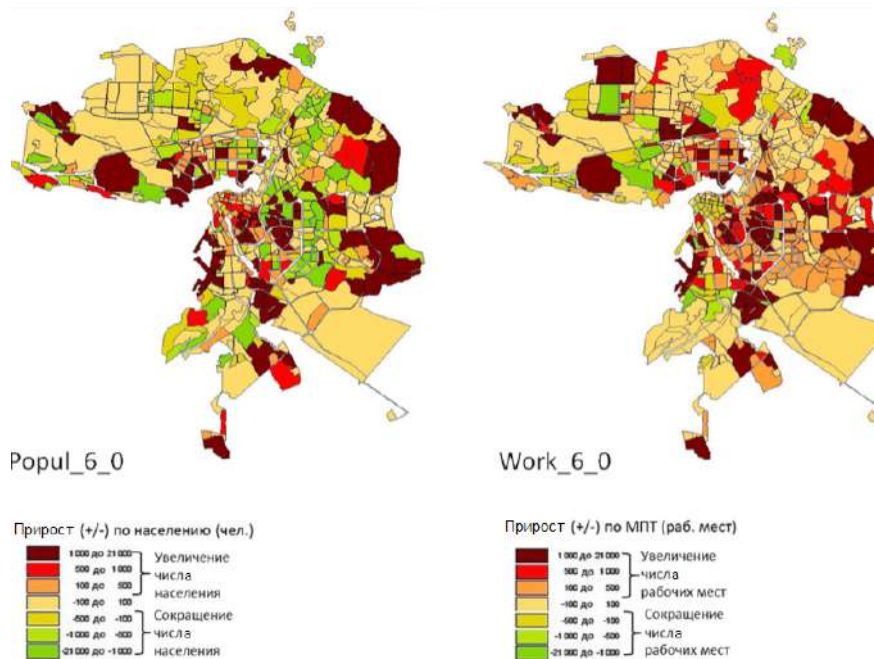


Рис. 11. Казань. Прирост по населению и МПТ

Источник: данные авторов.

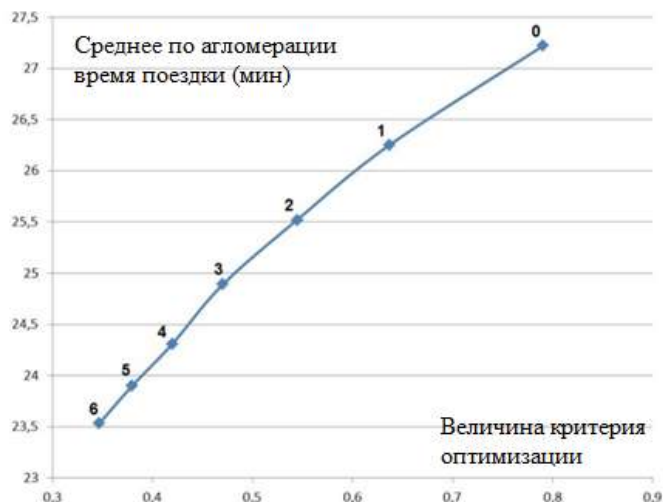


Рис. 12. Казань. Изменение среднего времени поездок (ось Y) в зависимости от величины критерия (ось X)

Источник: данные авторов.

Комментарии к графикам на рис. 12 и 14.

1) На всех выполненных для Казани итерациях величина критерия оптимизации убывает так же, как и среднее время поездки. Это устойчивое улучшение. Доля случаев, подтверждающих основную гипотезу, составляет 100%. Признаков исчерпаемости ресурса ОРП нет (кроме «постепенного замедления» процесса улучшений обоих показателей).

2) На графике по Севастополю, как и в приведенных выше результатах по Москве и Казани, видна общая тенденция убывания (улучшения) одновременно и величины критерия оптимизации, и величины среднего времени поездки. Однако критерий не улучшается на четвертой итерации²⁷, а среднее время — на первой. Результаты обеих итераций можно считать признаками исчерпаемости ресурса ОРП. Доля случаев, подтверждающих основную гипотезу, составляет 90,5%.

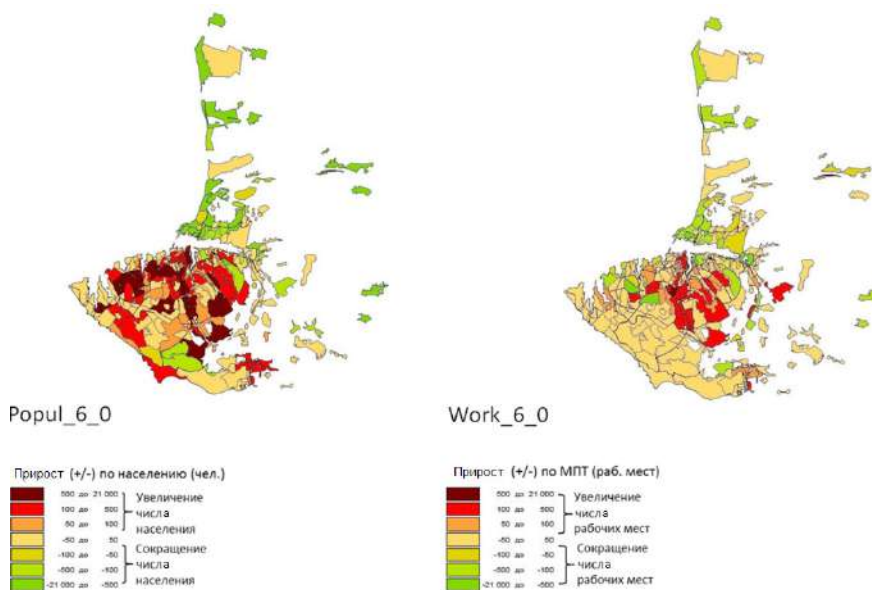


Рис. 13. Севастополь. Прирост по населению и МПТ

Источник: данные авторов.

²⁷ Это первый случай, когда на какой-либо итерации алгоритм не может улучшить значение критерия.

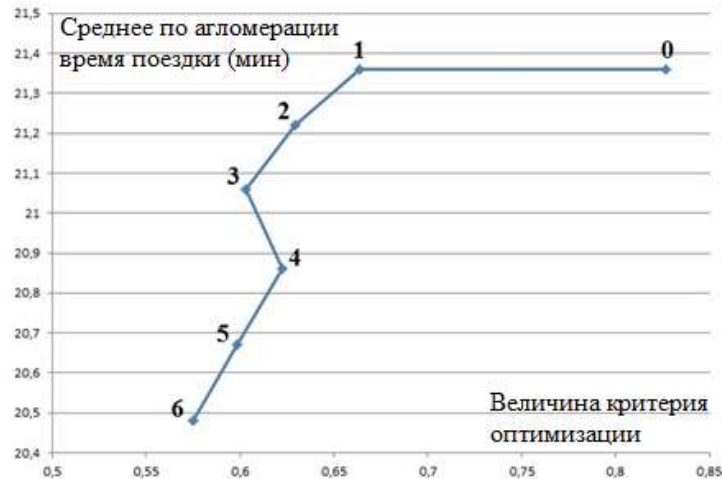


Рис. 14. Севастополь. Изменения среднего времени поездок (ось Y) в зависимости от величины критерия (ось X)

Источник: данные авторов.

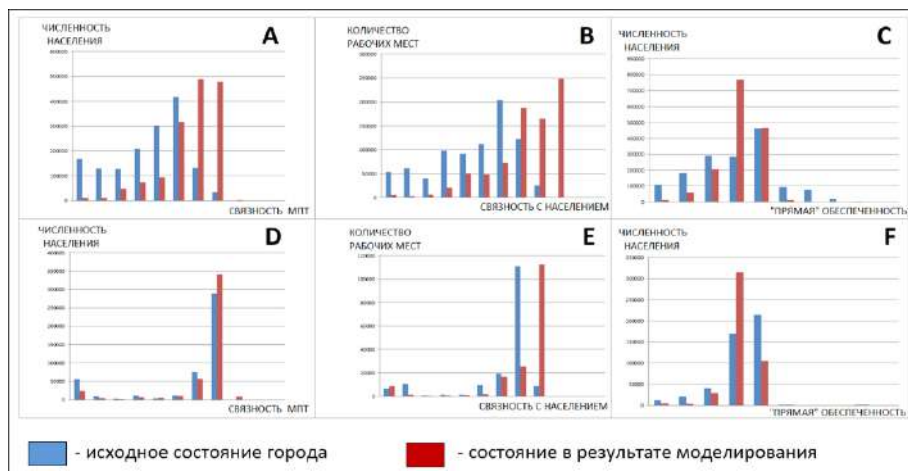


Рис. 15. Распределение населения и рабочих мест (МПП) по значениям связности и обеспеченности

Источник: данные авторов.

Примечание.

- A) Распределение населения по значениям связности МПП (Казань)
- B) Распределение рабочих мест по значениям связности с населением (Казань)
- C) Распределение населения по значениям прямой обеспеченности (Казань)
- D) Распределение населения по значениям связности МПП (Севастополь)
- E) Распределение рабочих мест по значениям связности с населением (Севастополь)
- F) Распределение населения по значениям прямой обеспеченности (Севастополь).

Комментарии к гистограммам на рис. 15.

1) Гистограммы распределения населения и рабочих мест по значениям связности и обеспеченности показывают, в каких условиях сколько людей находится. Оценка условий транспортной доступности (две связности и прямая обеспеченность) — ось X. По оси Y — число рабочих мест или численность населения, попадающего в каждую градацию условий доступности.

2) Улучшение условий проявляется, например, в том, что левые столбцы гистограмм (плохие условия доступности) в результате моделирования уменьшаются²⁸, так как население и рабочие места перемещаются из них в столбцы, находящиеся на гистограмме правее, где усло-

²⁸ На рис. 15 все шесть графиков (A–F) отображают два состояния города. Для этого каждый столбец любой гистограммы показан парой примыкающих друг к другу прямоугольников: «голубой» — исходное состояние

вия доступности лучше, тогда эти столбцы растут. Частично это происходит за счет того, что в процессе оптимизации население и МПТ «переселяются» из районов с низкими связностями и обеспеченностями в районы с высокими значениями этих показателей. Но это только часть процесса, поскольку благодаря такому «переселению» у многих районов изменяются значения связностей и обеспеченностей. Если эти значения увеличиваются, то соответствующие районы «переходят» из левых столбцов в правые вместе со своим населением и рабочими местами, *не участвовавшими в упомянутом «переселении».*

3) На гистограммах связности с МПТ и с населением (*рис. 15A, 15B, 15D, 15E*) увеличиваются только правые столбцы (лучшие условия доступности), это явное улучшение среднего значения обеих связностей при почти полном исчезновении людей и рабочих мест, находившихся в худших условиях по связности. На гистограммах обеспеченности (*рис. 15C, 15F*) заметно явное улучшение стандартного отклонения — увеличение численности населения происходит в столбцах, расположенных в срединной части графика, а самые правые столбцы (лучшие условия) уменьшаются вместе с левыми (плохие условия). То есть *для части населения, имевшего лучшие условия обеспеченности, эти условия ухудшаются, но не критично, и лишь приближаются к среднестатистическим.* Действует следующий механизм. Пусть максимальные значения прямой обеспеченности (правые столбцы) географически локализованы преимущественно в центральной зоне города. Тогда там же (примерно в тех же районах) локализованы минимальные значения обратной обеспеченности, при которой на одно рабочее место в обслуживании приходится меньше всего клиентов, способных прибыть к месту обслуживания за комфортное время. Чтобы улучшить посещаемость соответствующих объектов, нужно увеличить их обратную обеспеченность. Одновременно в центральной зоне города будет снижаться прямая обеспеченность. То есть изменение в правой части гистограммы — снижение (до средних значений) величины прямой обеспеченности для людей, обеспеченных обслуживанием лучше других, *увеличит посещаемость обслуживаемых объектов в центральных районах города*²⁹. В свою очередь, позитивные изменения в левой части гистограмм прямой обеспеченности для людей, нуждающихся в улучшении больше других, *максимизируют, как указывалось выше, посещаемость объектов обслуживания, развиваемых на периферии.*

4) Указанные улучшения распределений населения и рабочих мест по значениям связности и обеспеченности приводят к сокращению значений времени поездки населения. Например, для Казани среднее время улучшается почти на 4 минуты, а общие затраты времени населения на поездки в будний день сокращаются на 140 000 человеко-часов.

7. Тестовый расчет по Москве на реалистичных ограничениях по каждому району

В разделе 5 предложены типы ограничений, накладываемых на моделируемые изменения численности населения и рабочих мест в каждом расчетном районе. Это три типа (порядок перечисления соответствует порядку в разделе 5):

1) Ограничение, при котором приросты (+/-) по населению и по рабочим местам в любом районе *не зависят друг от друга*, но каждый из них должен находиться в заданном интервале значений от минимума до максимума. Данный тип задействован в настоящем разделе.

2) *Зависимые ограничения*, когда население и рабочие места могут вытеснять друг друга из района при достижении максимальной плотности застройки. Алгоритм учета таких ограничений разрабатывается.

3) Основанная на простейшей вероятностной гипотезе *имитация действия ограничений.* Данный тип задействован в разделе 6.

столбца, «красный» — результат моделирования. Если «голубой» выше «красного», то столбец уменьшается. Если наоборот — растет.

29 Улучшения распределений на *рис. 15* существенны и очень заметны на графиках. Но нужно сказать, что изменения, происходящие с аналогичными гистограммами в результате моделирования на других данных, не всегда бывают столь же бесспорно позитивны. Так, на данных по Москве одновременное улучшение всех четырех распределений часто оказывается невозможным. По-видимому, это связано с жесткостью ограничений, накладываемых на моделируемые изменения в районах исторического центра города. Очевидно, это является признаком исчерпаемости ресурса ОРП.

7.1. Исходные данные

Чтобы проверить наличие ресурса ОРП города и испытать модель ПОЛИЦЕНТР в роли генератора вариантов на более реалистичных, чем в разделе 6, ограничениях, в составе работ по мониторингу реализации Генерального плана Москвы были подготовлены данные об ограничениях в каждом районе. Источник информации — утвержденные в установленном порядке Правила землепользования и застройки города Москвы (ПЗЗ). Подготовленная информация — это ограничения первого типа (см. п. 1 в начале данного раздела и раздел 5), параметры которых вычислены в предположении о безусловном выполнении градостроительных регламентов, установленных для территориальных зон в составе ПЗЗ по состоянию на январь 2019 года.

Если же ориентировать расчет на изменение ПЗЗ, например, в части видов разрешенного использования или границ территориальных зон³⁰, то здесь нужна система ограничений второго типа. Это одно из направлений развития методики и модели ПОЛИЦЕНТР.

По исходной информации данный расчет отличается от экспериментов из раздела 6 не только учитываемыми ограничениями. Отличается и исходное для моделирования распределение населения и рабочих мест по расчетным районам. Например, исходная численность населения в каждом районе рассчитана как полусумма существующей и максимальной (согласно ПЗЗ) численностей населения в том же районе. Количество мест приложения труда — тоже полусумма существующего и максимального (по ПЗЗ) количества рабочих мест³¹.

Рассчитанное таким способом исходное для моделирования состояние города может рассматриваться как прогноз негативных тенденций развития, проявляющихся, например, на территории ТиНАО, где численность населения по данному негативному варианту прогноза растет быстрее, а количество мест приложения труда — медленнее, чем планировалось³². И теперь то состояние города, которое *может получиться* в результате негативной тенденции, мы хотим улучшить с помощью модели ПОЛИЦЕНТР, не нарушая при этом градостроительные регламенты, установленные в ПЗЗ.

Касательно ограничений важно, что в рамках экспериментов из раздела 6 не допускались изменения численности населения и рабочих мест на территории ЦАО и ТиНАО. В данном же расчете это ограничение снято. Изменения запрещены только там, где это противоречит регламентам ПЗЗ.

7.2. Результаты тестового расчета с ограничениями из ПЗЗ «после реализации негативного прогноза»

На указанных исходных данных было выполнено шесть итераций. Графики, показывающие динамику изменения средних значений времени поездки и величин критерия оптимизации по мере выполнения итераций, приводятся на *рис. 16–18*. Обозначения те же, что в разделе 6.

30 Речь идет о разработке таких изменений в ПЗЗ, которые заставят субъектов градостроительной деятельности, выполняя требования регламентов ПЗЗ, тем самым улучшать для населения транспортную доступность мест приложения труда и обслуживания.

31 Полусуммы взяты исходя из предположения, что регламенты ПЗЗ, «пересчитанные» в максимально возможные приросты численности населения и числа МПТ, в какой-то момент одновременно во всех районах будут исчерпаны примерно на 50%.

32 По А.Э. Гутнову, этот негативный сценарий развития ТиНАО соответствует фазе «территориального роста» в процессе эволюционного развития ГС, характеризуемого циклическим чередованием двух фаз *рост* — *реорганизация*.

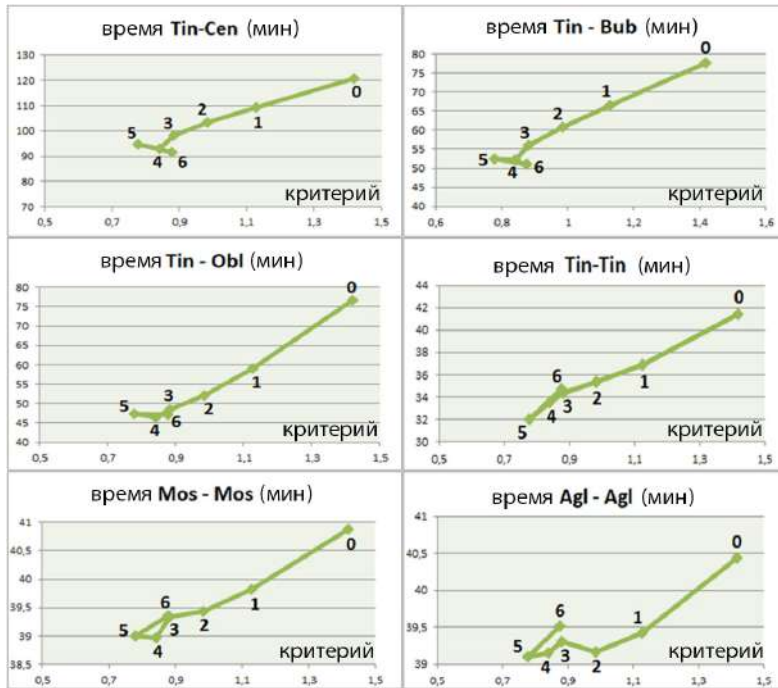


Рис. 16. Группа 1 (устойчивое улучшение)

Источник: данные авторов.

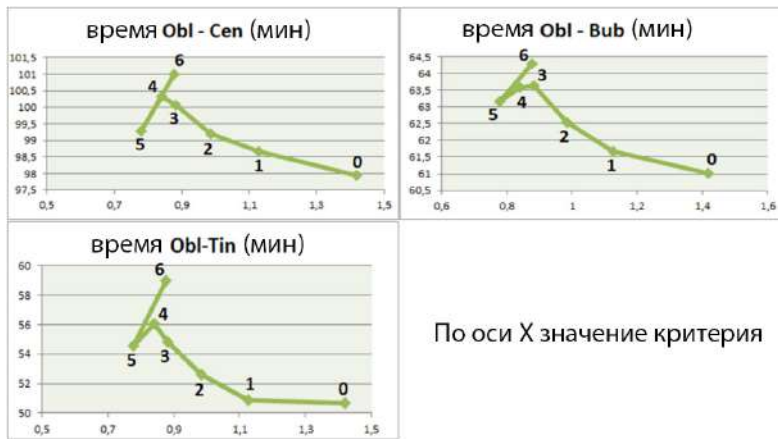


Рис. 17. Группа 2 (устойчивое ухудшение)

Источник: данные авторов.

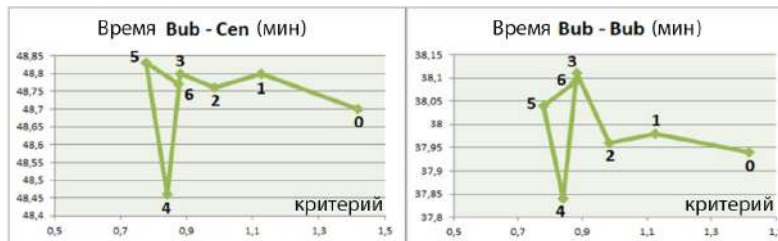


Рис. 18. Группа 3 (ухудшение с коротким, но явным улучшением на четвертой итерации)

Источник: данные авторов.

Комментарии к графикам на *рис. 16–18*.

1) Состав контролируемых показателей времени расширен по сравнению с разделом 6 за счет времени поездок, в которых ТиНАО является пунктом отправления или прибытия. Значимость этой территории повысилась, так как в разделе 6 территория ТиНАО оставалась слабо освоенной и потому не являлась значимой по количеству поездок.

2) По сравнению с экспериментами из раздела 6 здесь от итерации к итерации наблюдается более противоречивая динамика контролируемых показателей времени. С одной стороны, некоторые из них показывают скорее устойчивое ухудшение, чем улучшение (соответствующую группировку графиков см. на *рис. 16–18*), так что суммарная доля случаев, подтверждающих основную гипотезу, близка к 50%. Это гораздо хуже, чем в разделе 6. С другой стороны, например, время Tin-Cen уменьшается с двух часов до полутора, тогда как в разделе 6 все улучшения — в пределах 5 минут.

Для оценки столь противоречивых результатов моделирования необходимо *изучить и учесть значимость* тех улучшений, что дает первая группа показателей времени (*рис. 16*), и тех ухудшений, что дают вторая и третья группы (*рис. 17, 18*). Об этом — пункты 3 и 4.

3) Чем больше время поездки, тем оно критичнее, так как совершающие долгую поездку люди в большей степени нуждаются в улучшении ситуации. В приведенной таблице (*табл. 1*) контролируемые значения времени расположены по убыванию времени поездки в исходном состоянии города, то есть *по убыванию степени критичности*.

В трех столбцах в правой половине таблицы показано *изменение времени* поездок:

- за первые 4 итерации (суммарно — столбец 0–4);
- за первые 5 итераций (столбец 0–5);
- за все 6 итераций (столбец 0–6).

Изменение вычисляется как разность времени поездки в исходном состоянии города и времени, достигнутого в конце одной из последних итераций: четвертой, пятой или шестой. При разности больше нуля происходит сокращение, то есть улучшение времени поездки. Рассчитанные так же отрицательные числа означают ухудшение (увеличение) времени. Столбцы 0–4 и 0–5 включены в таблицу, так как для многих графиков либо после четвертой, либо после пятой итерации время оказывается лучше, чем после шестой итерации.

Можно ли считать скомпенсированными за счет улучшений, показанных на *рис. 16*, те ухудшения, что отображены на *рис. 17 и 18*? Сформулируем аргументы *в пользу ответа «да»*.

Таблица 1. Анализ изменения времени поездок в результате моделирования

	Направление поездки (выезд-выезд) для контролируемых показателей времени	Время поездки в исходном для модели состоянии города, мин.	Изменение времени поездки для следующих пар состояний города (начальное-конечное), мин.		
			0 - 4	0 - 5	0 - 6
1	Tin-Cen	120,85	27,9	26,02	29,21
2	Obl-Cen	97,95	-2,39	-1,33	-3,06
3	Tin-Bub	77,8	25,47	25,34	26,62
4	Tin-Obl	76,71	30,16	29,45	29,49
5	Obl-Bub	61,01	-2,58	-2,16	-3,28
6	Obl-Tin	50,7	-5,38	-3,89	-8,29
7	Bub-Cen	48,7	0,24	-0,13	-0,07
8	Tin-Tin	41,44	7,89	9,49	6,72
9	Mos-Mos	40,87	1,9	1,87	1,51
10	Agl-Agl	40,44	1,29	1,34	0,92
11	Bub-Bub	37,94	0,1	-0,1	-0,15

 - центростремительные поездки	 - ухудшение времени (изменение < 0)
 - разнонаправленные поездки	 - стабилизация (изменение = 0)
 - центробежные поездки	

Источник: данные авторов.

Во-первых, сравним попарно шесть самых критичных показателей времени (*табл. 1*, строки 1–6). В случае времени Tin-Cen (самое критичное из улучшающихся) и времени Obl-Cen (самое критичное из ухудшающихся), улучшение первого из них в минутах примерно в 10 раз больше, чем ухудшение второго в столбце 0–4, примерно в 20 раз больше в столбце 0–5 и снова примерно в 10 раз в столбце 0–6. Очевидно, в этой паре ухудшение менее критичного времени *компенсируется* в 10–20 раз более существенным улучшением более критичного времени. Так же сравним следующую по критичности пару показателей времени Tin-Bub (оно улучшается) и Obl-Bub (ухудшается). Здесь улучшение первого времени в 8–12 раз больше, чем ухудшение второго. Наконец, в последней паре времен Tin-Obl (улучшается) и Obl-Tin (ухудшается) улучшение примерно в 3,5–7,5 раза больше, чем ухудшение, притом что критичность самих этих значений времени меньше, чем критичность в двух предыдущих парах. Так что снижение степени скомпенсированности (с 10–20 и 8–12 раз до 3,5–7,5 раза) не должно нас смущать. То есть во всех трех парах ухудшение менее

критичного времени безусловно *компенсируется* более существенным улучшением более критичного времени.

Во-вторых, как указывалось выше, оценить скомпенсированность ухудшений и улучшений времени поездки можно, контролируя средние значения времени *разнонаправленных* поездок. В *табл. 1* они находятся в строках 8–11. Время Tin-Tin улучшается на 6–10 минут, Mos-Mos — на 1,5–2 минуты, Agl-Agl — примерно на 1 минуту, а изменения времени Vub-Vub находятся в интервале от 9-секундного ухудшения до 6-секундного улучшения. Другими словами, все показатели времени разнонаправленных поездок, кроме времени Vub-Vub, улучшаются в несколько раз сильнее по сравнению с улучшениями аналогичных показателей времени в разделе 6, где ни одно из таких времен не улучшалось более чем на 0,5 минуты. В свою очередь, наименее критичное время Vub-Vub, по сути, не изменяется — так же, как и самое некритичное из центростремительных поездок время Vub-Cen. То есть в последних 5 строках *табл. 1*, как и в первых 6 строках, «плохое» *полностью компенсируется* «хорошим».

Таким образом, несмотря на выявленную в п. 2 противоречивость результатов тестового расчета, более детальный, чем в разделе 6, анализ этих результатов показал, что участвовавшие в расчете варианты развития Москвы *имеют ресурс ОРП*, а модель ПОЛИЦЕНТР *справляется с ролью* генератора соответствующих вариантов прогноза. Это подтверждено сопоставлением многих улучшений и ухудшений контролируемых показателей времени поездки, так как улучшения оказались в разы более значимыми по сравнению с ухудшениями.

Метод анализа, подтверждающий сформулированную в разделе 4 основную гипотезу, отличается от использованного в разделе 6 метода, что связано с упомянутой противоречивостью. Когда доля случаев, подтверждающих основную гипотезу, близка к 50%, такая статистика не позволяет подтвердить или опровергнуть гипотезу. Но величина этой доли, безусловно, *указывает на исчерпаемость* ресурса ОРП.

8. О прошлом и будущем рассматриваемой модели

Исследования коммуникативности города с помощью показателя связности и других количественных характеристик, построенных по аналогичным принципам, начались в Институте Генплана Москвы в середине 1970-х годов. Основоположителем этих исследований стал А.Э. Гутнов, возглавивший тогда один из научных отделов института.

Первые публикации, посвященные связности и этим исследованиям, по-видимому, относятся к 1979 году³³. Именно эти исследования коммуникативности города позволили коллективу отдела Гутнова (совместно со специалистами ВНИИСИ АН СССР)³⁴ создать несколько моделей города, основанных на связности и похожих показателях.

Среди таких моделей необходимо назвать модель Гутнова КАРКАС — ТКАНЬ [Гутнов, 1980; 1984; 1985]³⁵, Территориально-коммуникационную модель градостроительной системы О.А. Баевского [Баевский, 2001; 2016; Гостев, 2018], а также модель ПОЛИЦЕНТР, для которой в *табл. 2* приводится краткая характеристика всех публикаций. В них содержится описание всех предыдущих версий модели. Основное внимание в таблице уделено *особенностям* этих версий, отличающим их друг от друга и от других моделей, а также *проблемам использования* модели, побудившим авторов к разработке новых версий.

33 [Гутнов, Каверин, Лапшев, 1979; Каверин, Лапшев, 1979; Бутусов и др., 1979]. Авторы этих трех публикаций в то время были сотрудниками отдела под руководством Гутнова. Сам термин «связность» был предложен А.Э. Гутновым и П.И. Лапшевым. Благодаря работам первого, имевшим большой резонанс, термин вошел в урбанистику, но за пределами гутновского отдела применялся как синоним «коммуникативности» для обозначения направления исследований.

34 Специалисты Всесоюзного научно-исследовательского института системных исследований Академии Наук СССР (ныне — Институт системного анализа РАН) участвовали в упомянутых исследованиях под началом Ю.С. Попкова и Б.Л. Шмульяна (ВНИИСИ), создавая инструментарий математического, алгоритмического и программного обеспечения работ по договору о научно-техническом сотрудничестве с Институтом Генплана Москвы.

35 В рамках модели ведется анализ распределения территорий по значениям «структурно-функционального потенциала», предложенного Гутновым. Исследуется эволюционная динамика характеристик этого распределения. Главная задача модели — диагностирование смены фаз *территориальный рост — структурная реорганизация* в циклическом развитии градостроительной системы (ГС), в том числе прогноз моментов времени перехода ГС в очередную фазу.

Комментарии к материалам раздела.

1) Что касается особенностей модели ПОЛИЦЕНТР, необходимо подчеркнуть, что начиная с 1980-х годов мы не знаем других моделей, где стандартное отклонение характеристик доступности МПТ для населения использовалось бы как критерий (или компонент критерия) оптимальности.

2) Авторам статьи только в 2018 году представилась возможность исследовать наличие ресурса полицентричности, описанного во введении, для решения в Москве социально-транспортной проблемы, упомянутой там же. Данная статья — первая на эту тему. В предыдущих версиях модели ПОЛИЦЕНТР (до 2017 года) это было невозможно по причинам, приведенным в табл. 2 (см. проблемы использования версий 1–3). Например, прогноз остроты транспортной ситуации не получался из-за проблем 1 и 3, а примененное в разделах 6 и 7 варьирование ограничений не получалось из-за трудоемкости подготовки данных (проблемы 2 и 3).

3) По результатам анализа ресурса ОРП в разделах 6 и 7 авторы статьи надеются, что предложенная во введении схема исследования может быть доработана так, что позволит вести интересовавшее Гутнова диагностирование смены фаз циклического развития города, то есть позволит прогнозировать моменты времени, когда такая смена должна происходить. Очевидно, для этого потребуются применение упомянутых здесь моделей Гутнова и Баевского вместе с моделью ПОЛИЦЕНТР и транспортной моделью. Возможно, также потребуются какая-то модификация модели А.А. Высоковского.

Таблица 2. Все публикации по модели ПОЛИЦЕНТР (1983–2004 годы) и ее версиям (1983–2014 годы)

Публикации	Особенности соответствующих версий модели	Проблемы использования версий
[Каверин, 1983]	Здесь применительно к естественной и оптимизации размещения населения и МПТ с учетом их взаимной доступности сформулированы критерии оптимальности, способные управлять распределением населения по величине связности и ориентировать оптимизацию на улучшение наилучших (для населения) условий доступности МПТ. Для примера приводятся элементы математического обеспечения: критерий оптимальности — средняя связность с МПТ в обслуживании и стандартное отклонение; оптимизирующие формулы, обеспечивающие выбор районов, таких что при размещении в них центра обслуживания (то есть прихода МПТ) средняя связность и стандартное отклонение не ухудшатся. Обобщенный тем самым подход к оптимизации размещения ориентирует процесс на решение полицентричности в городах, на решение социально-транспортной проблемы. До этого во всех подобных моделях в качестве критерия оптимальности традиционно фиксировалось среднее (или суммарное) по городу значение одной из характеристик доступности. Например: - средние (или суммарные) затраты населения на передвижения [Лившиц, 1979]; в таких моделях, помимо времени на поездку, учитываются и другие компоненты критерия оптимизации, но здесь важно, что доступность отражается в них именно средней или суммарной величиной; - средняя (или суммарная) величина потенциала [Шарыпов, Панам, 1980; Лоури, 1984]; потенциал района (не путать со структурно-функциональным потенциалом, по А.Э. Гутнову) — характеристика, аналогичная связности; например, связность с населением соответствует потенциалу той же раскладки, в котором, подобно связности, — сумма умноженных на коэффициент численности населения районов, но зависимость коэффициента от времени — на поездку в характеризующий район не дихотомическая (Ферди в сумму или нет — как у связности), а гладкая, убывающая; - средняя связность [Баевский, 2001; 2006; Гутнов, 1980; 1984; 1985; Гастов, 2018]. Не все упомянутые здесь модели заявлены их авторами как оптимизирующие среднюю (или суммарную) величину какой-то характеристики доступности. Но мы, зная алгоритм, утверждаем: в них именно такой критерий оптимальности.	Данная версия не была реализована в виде компьютерной программы, но предложенный здесь подход к проблеме оптимальности был применен в компьютеризированных версиях модели ПОЛИЦЕНТР, указанных ниже в данной таблице.
[Габай, Каверин, Шмульман, 1984]	Здесь, помимо элементов математического обеспечения, взятого из предыдущей публикации и работающего со связностями, предложен алгоритм расчета обеспеченности населения района объемами обслуживания, доступными для него с равномерным временем поездки. На основе таких обеспеченностей, вычисленных для всех районов, сформулированы критерии оптимальности, анализ которых указан в предыдущей публикации, включая стандартное отклонение. Предложены соответствующие оптимизирующие формулы.	1) Транспортная модель, учитывающая замедление движения на перегруженных участках сети, была разработана для Москвы только во второй половине 90-х годов XX века. До этого в транспортные расчеты скорости движения на всех участках сети приводился эффект заботы. При работе по существующему положению скорости машины брать по натурным обследованиям. Но для расчетов по вариантам долгосрочного развития города это проверяется в прелюдии к короткой оценке вариантов на острую транспортную проблему. 2) В 1984 году подготовлены данные для модели была очень трудоемкая. Например, картотека Мосгор БТИ описывала менее половины фонда застройки города. Электронный баз градостроительных данных и компьютерной графики не существовало. Поэтому ограничения на моделирование изменений населения и рабочих мест в каждом районе готовились вручную — с опорой на экспертные знания специалистов-градостроителей. То есть до начала моделирования проектировщики заглянули данными об ограничениях таблицу по всем районам Москвы притом что времени на проектирование и (тем более) на моделирование <i>essoba</i> (!) катастрофически не хватало.
[Dubov, Kaverin, Liankova, 1984]	Здесь система критериев модели ПОЛИЦЕНТР использована при построении нормативно-поведенческой модели, позволяющей оптимизировать размещения рабочих мест в сфере обслуживания с учетом их транспортной доступности.	3) Указанная в столбце "Особенности... версий модели" схема организации диалога компьютерной была реализована на рубеже XX и XXI веков. По проблеме 2 — эта версия сэкономила время работы проектировщика в несколько раз благодаря двум преимуществам: - экспертные знания о возможности увеличить в каком-то районе численность рабочих мест в обслуживании — проектировщику нужно было применить не ко всем районам города (как в прошлых версиях), а только к рекомендуемым районам. Это, например, 1/4 от общего количества расчетных районов Москвы. - указанные значения применялись непосредственно при создании варианта развития города, то есть в рамках привнесения для градостроителя деятельности. Однако продолжительность процесса создания варианта многократно увеличилась по сравнению с предыдущими версиями, формировавшими вариант алгоритмически. Это отличие данной версии не позволяло использовать ее в рамках итеративно-поведенческой схемы итерационно-взаимодействия с транспортной моделью. Хотя к тому времени Институт Гипллана уже имел транспортную модель, учитывающую замедление движения на перегруженных участках сети, ценный проект этого процесса зачастую не давал возможности даже обзорно оценить вычисленные планы затрат времени населения на передвижения для вновь сформированных (на модели ПОЛИЦЕНТР) вариантов развития города.
[Каверин, Заблудовский, 2003; Каверин, 2004]	Описанная здесь версия разрабатывалась и использовалась в Институте в 1988–2014 годах, в том числе в проектах генеральных планов Москвы 1999 и 2030 годов. <i>Ловко для разработки версии — проблема, указанная здесь (параграф под номером 2. Идея ее решения: экспорт-градостроитель (проектировщик), вместе с программой подготовки таблицы ограничений, учитывает свои представления о них при формировании вариантов развития Москвы в долговременном и компьютерном. Сопоставляющая программа была разработана уже в 1988 году, но полноценные ее версии могли возникнуть только в эпоху Windows, когда появилась возможность реализовать следующую схему диалога. Компьютер показывает на карте рекомендуемые районы, такие что, если произвольно распределить по ним заданное количество новых рабочих мест в обслуживании, то критерий оптимальности достигнет своих наилучших (или даже лучших) значений, выбранных проектировщиком на предыдущих этапах диалога. Проектировщик распределяет по рекомендуемым районам упомянутые рабочие места, указывая мышью на карте нужные районы с учетом своих представлений об ограничениях. Каждый клик мыши увеличивает численность рабочих мест в нужном районе на 1/200 (например) часть от распределенного количества. Тем самым формируется вариант развития города. Удобный интерфейс предусматривает и для выбора желательных значений критериев.</i>	

Источник: данные авторов.

Заключение

Анализ результатов экспериментальных расчетов, проведенных с помощью модели ПОЛИЦЕНТР и транспортной модели на данных по Москве и Московской области, показал:

1) Оптимизируя размещение в Москве мест приложения труда, проживания и обслуживания населения по критериям их взаимной транспортной доступности, можно *способствовать* решению проблемы перегруженности транспортных связей, реализующих центростремительные поездки утром и центробежные — вечером, одновременно создавая условия для развития полицентричности города за счет увеличения посещаемости сложившихся и возникающих периферийных центров обслуживания. Возникновение таких центров в процессе моделиро-

вания не контролируется, но зато есть определенные гарантии *оптимальности* создаваемых для этого условий.

2) Прогнозные состояния города, задействованные в расчетах, обладают ресурсом, необходимым для решения проблемы, сформулированной в п. 1³⁶. Этот ресурс складывается из возможности изменять функционально-пространственную структуру города с учетом прогнозных оценок по наличию:

- территориальных резервов (сноса, строительства, реконструкции и перепрофилирования фонда застройки), оцениваемых в модели *при помощи ограничений*, накладываемых на изменения численности населения и числа рабочих мест в каждом расчетном районе;
- возможностей транспортной сети осуществлять перевозки пассажиров в условиях перераспределения потоков, происходящего в связи с моделируемыми изменениями функционально-пространственной структуры города.

3) Наличие ресурса, описанного в п. 2³⁷, может быть рассмотрено в контексте общей теории городского развития А.Э. Гутнова, в которой обосновывается принцип цикличности в эволюционном развитии градостроительных систем (ГС). Согласно теории, в *моменты появления* ресурса ОРП (очевидно) ГС *должна переходить* от фазы территориального роста к фазе структурной реорганизации. В свою очередь, *моменты исчерпания* ресурса ОРП, по-видимому, должны совпадать с *обратным переходом*³⁸. С этой точки зрения отмечавшиеся в нашем исследовании признаки исчерпаемости искомого ресурса можно интерпретировать как «симптомы» приближения такого *обратного (!) перехода*. Прогнозирование моментов времени, когда фазы развития ГС должны сменять друг друга, — одно из направлений продолжения данного исследования.

4) Проведенный анализ результатов экспериментальных расчетов по Москве, Казани и Севастополю *показал*: модель ПОЛИЦЕНТР как генератор прогнозируемых вариантов развития города для разрабатываемой методики исследования ресурса ОРП, справляется с этой ролью. С помощью модели удается устойчиво улучшать характеристики работы транспортной сети, одновременно создавая условия для развития полицентричности города. Это было продемонстрировано на десятках вариантов прогноза. Однако по ходу изложения результатов анализа были намечены некоторые направления совершенствования модели, в том числе:

- улучшение методов моделирования и учета культурно-бытовых поездок населения;
- разработка алгоритма учета «зависимых» ограничений, накладываемых на моделируемые изменения численности населения и числа рабочих мест в каждом расчетном районе модели.

Источники

- Бабий А.В., Каверин А.Р., Шмульян Б.Л. (1984) Принципы организации диалога для формирования стратегии размещения обслуживающих центров в крупнейшем городе // Элементы диалоговой системы анализа и управления развитием города. Сборник трудов. Вып. 14. М.: ВНИИСИ. С. 49–57.
- Баевский О.А. (2001) Эволюционный подход к управлению градостроительным развитием крупнейшего города. Московский опыт // Градостроительство России XXI века: сборник научных статей РААСН. М.: Московские учебники и Картолитография.
- Баевский О.А. (2016) Территориальное планирование и проектирование на основе исследования пространственной структуры города: курс лекций. Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского.
- Бутусов А.Х., Гутнов А.Э., Каверин А.Р., Корнеева И.Е. (1979) Анализ некоторых функционально-транспортных характеристик городской территории // Географические исследования городской среды. М.: Институт географии АН СССР. С. 95–116.
- Гостев М.В. (2018) Об эвристической природе моделей эволюционного городского развития // Городские исследования и практики. Т. 3. № 1. С. 7–22.
- Гутнов А.Э. (1980) Структурно-функциональная организация и развитие градостроительных систем. Автореф. дис. на соиск. ученой степени д-ра архитектуры.

36 Возможность решения проблемы, указанной в п. 1, — признак наличия этого ресурса.

37 В статье для обозначения данного ресурса введен термин «ресурс ОРП».

38 Вероятно, упомянутые переходы (в обоих направлениях) могут происходить с задержкой относительно указанных моментов времени.

- Гутнов А.Э. (1984) Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат.
- Гутнов А.Э. (1985) Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития//Системные исследования. Методологические проблемы. М.: Наука. С. 211–232.
- Гутнов А.Э., Каверин А.Р., Лапшев П.И. (1979) Исследование транспортно-коммуникационных характеристик территории г. Москвы с использованием ЭВМ//Моделирование городских систем. Труды I школы-семинара. М.: ВНИИСИ. С. 202–210.
- Каверин А.Р. (1983) Использование ЭВМ для сравнения и оценки альтернатив стратегий территориального развития города//Управление большим городом. Тезисы докладов II всесоюзной конференции. Часть 1. Москва: НПО АСУ «Москва». С. 131–133.
- Каверин А.Р. (2004) Критерии сравнения альтернатив развития города с учетом транспортной доступности//Вопросы планировки и застройки городов: Материалы XI Международной научно-практической конференции/Ю.В. Круглов, В.С. Глухов (ред.). Пенза: ПГУАС. С.138–141.
- Каверин А.Р., Заблудовский М.И. (2003) Методика размещения центров обслуживания с учетом факторов доступности//Вопросы планировки и застройки городов: Материалы X Международной научно-практической конференции/Ю.В. Круглов, В.С. Глухов (ред.). Пенза: ПГАСА. С. 55–58.
- Каверин А.Р., Лапшев П.И. (1979) Метод использования информационного обеспечения модели размещения функциональных подсистем города для решения локальных градостроительных задач//Автоматизация управления городом. Тезисы докладов семинара. М.: ГлавНИВЦ. С 23–26.
- Котов Е.А., Гончаров Р.В., Новиков А.В., Никогосян К.С., Городничев А.В. (2016) Москва: курс на полицентричность. Оценка эффектов градостроительных проектов на полицентрическое развитие Москвы/О.А. Баевский, Г.В. Витков, Т.Е. Шварева (ред.). М.: НИУ ВШЭ.
- Лившиц В.В. (1979) Разработка математической модели и прикладных программ для проектирования системы учреждений обслуживания городского населения//Достижения и перспективы. Вып. 11. Города и системы расселения. М.: МЦНТИ, КСА при Президиуме АН СССР.
- Шмульян Б.Л., Панина И.К. (1980) Энтропийные методы моделирования городских систем. М.: ВНИИСИ.
- Dubov Yu.A., Kaverin A.R., Manukyan S.A. (1984) Normative-Behavioural Models of Service Allocation in Urban Systems//Sistemi Urbani. Napoli: Guida Editori. No. 2. P. 163–194.
- Harris B. (1966) Notes on Accessibility. Philadelphia. Univ. of Penns.
- Lowry I. (1964) A Model of Metropolis. Santa Monica. CA: RAND Corporation.

ALEKSEI KAVERIN, YURI ARPISHKIN,
IVAN GREBENSCHIKOV, LYUBOV MEDVEDEVA,
GLEB ROMANOV

POLICENTER:

A WORKPLACE, HOUSING AND PUBLIC SERVICES PLACEMENT OPTIMIZATION
MODEL

Aleksei R. Kaverin, senior specialist, Genplan Institute of Moscow; 2/14 2-ya Brestskaya str., Moscow, 125047, Russian Federation.

E-mail: kaverin.ar.51@gmail.com

Yuri P. Arpishkin, senior specialist, Genplan Institute of Moscow; 2/14 2-ya Brestskaya str., Moscow, 125047, Russian Federation.

E-mail: yuarpishkin@genplanmos.ru

Ivan V. Grebenschikov, leading specialist, Genplan Institute of Moscow; 2/14 2-ya Brestskaya str., Moscow, 125047, Russian Federation.

E-mail: ivg810@mail.ru

Lyubov V. Medvedeva, leading specialist, Genplan Institute of Moscow; 2/14 2-ya Brestskaya str., Moscow, 125047, Russian Federation.

E-mail: yunde@mail.ru

Gleb G. Romanov, specialist, Genplan Institute of Moscow; 2/14 2-ya Brestskaya str., Moscow, 125047, Russian Federation.

E-mail: romanovgleb@gmail.com

Abstract

This article is devoted to a model that optimizes the placement of the main city functions in the city of Moscow according to the criteria of these functions' mutual transport accessibility. The results of simulation experiments carried out in 2018-2019 are considered. It is shown that the options for the city's development, generated during the optimization process, contribute, firstly, to the solution transport problem of the city (shown by the example of computational experiments of the morning rush hour for several dozen prediction options), and secondly, to creating conditions for the development of the city's polycentricity by increasing the attendance of established and emerging peripheral (mostly) service centers (this is substantiated at the level of the principles and elements of the optimization algorithm). When analyzing the predictive dynamics based on the generated options of the development for Moscow and two more cities, signs of the approaching moments of transition from "territorial growth" to "structural reorganization" and vice versa were revealed. The regularity of such transitions was substantiated by Gutnov in the "general theory of urban development".

Key words: city modeling; spatial analysis; normative-behavioral models; optimality

Citation: Kaverin A., Arpishkin Y., Grebenschikov I., Medvedeva L., Romanov G. (2019) POLICENTER: A Workplace, Housing and Public Services Placement Optimization Model. *Urban Studies and Practices*, vol. 4, no 4, pp. 42–69. (in Russian) DOI: <https://doi.org/10.17323/usp44201942-69>

References

Babij A.V., Kaverin A.R., Shmul'yan B.L. (1984) Principy organizacii dialoga dlya formirovaniya strategii razmeshcheniya obsluzhivayushchih centrov v krupnejšem gorode [Principles of Dialog Organisation in Strategic Planning of Service Centers Allocation in the Largest City]. *Elementy dialogovoj sistemy analiza i upravleniya razvitiem goroda*.

Sbornik trudov. Vypusk 14 [Elements of a Dialogue System for Analyzing and Managing the Development of a City. Issue 14]. Moscow: VNIISI, pp. 49–57. (in Russian)

Baevskij O.A. (2001) Evolyucionnyj podhod k upravleniyu gradostroitel'nym razvitiem krupnejšego goroda. Moskovskij opyt [An Evolutionary Approach to Urban Development Management in a Major City. Moscow Experience]. *Gradostroitel'stvo Rossii*

- XXI veka: sbornik nauchnyh statej RAASN* [Urban Planning of Russia in the XXI Century: Collection of Academic Articles of the RAASN]. Moskva: Moskovskie uchebniki i kartolitografiya [Moscow: Moscow Textbooks and Cartolithography]. (in Russian)
- Baevskij O.A. (2016) Territorial'noe planirovanie i proektirovanie na osnove issledovaniya prostranstvennoj struktury goroda: kurs lekcij [Urban Planning and Design Based on the Study of the Spatial Structure of the City: A Course of Lectures]. Vysshaya shkola urbanistiki imeni A.A. Vysokovskogo [Vysokovsky Graduate School of Urbanism]. (in Russian)
- Butusov A.H., Gutnov A.E., Kaverin A.R., Korneeva I.E. (1979) Analiz nekotoryh funkcional'no-transportnyh karakteristik gorodskoj territorii [Analysis of Some Functional and Transport Features of the Urban Space]. *Geograficheskie issledovaniya gorodskoj sredy* [Geographic Studies of the Urban Environment. Institute of Geography of the Academy of Sciences of the USSR]. Moskva: Institut geografii AN SSSR [Moscow: Institute of Geography of the Academy of Sciences of the USSR], pp. 95–116. (in Russian)
- Dubov Yu.A., Kaverin A.R., Manukyan S.A. (1984) Normative-Behavioural Models of Service Allocation in Urban Systems. *Sistemi Urbani. Napoli: Guida Editori*, no 2, pp. 163–194.
- Gostev M. (2018) On the Heuristic Nature of Evolutionary Urban Development Models. *Urban Studies and Practices*, vol. 3, no 1, pp. 7–22 (in Russian)
- Gutnov A.E. (1980) Strukturno-funcional'naya organizaciya i razvitie gradostroitel'nyh sistem [Structural and Functional Organization and Development of Urban Planning Systems]. Avtoref. dis. na soisk. uchen. stepeni d-ra arhitektury. Moscow. (in Russian)
- Gutnov A.E. (1984) Evolyuciya gradostroitel'stva [The Evolution of Urban Development]. Moscow: Strojizdat. (in Russian)
- Gutnov A.E. (1985) Sistemnyj podhod v izuchenii goroda: osnovaniya i kontury teorii gorodskogo razvitiya [A Systematic Approach to the Study of the City: The Foundations and Contours of the Theory of Urban Development]. *Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problem* [System Studies. Methodological Issues]. Moskva: Nauka [Moscow: Nauka Publishing House], pp. 211–232. (in Russian)
- Gutnov A.E., Kaverin A.R., Lapshyov P.I. (1979) Issledovanie transportno-kommunikacionnyh karakteristik territorii g. Moskvy s ispol'zovaniem EVM [Study of the Transport and Communication Characteristics of the Territory of Moscow Using a Computer]. *Modelirovanie gorodskih sistem. Trudy I shkoly-seminara* [Modeling Urban Systems. Proceedings of the I School-Seminar]. Moscow: VNIISI, pp. 202–210. (in Russian)
- Harris B. (1966) Notes on Accessibility. Philadelphia, Univ. of Penns.
- Kaverin A.R. (1983) Ispol'zovanie EVM dlya sravneniya i ochenki al'ternativ strategij territorial'nogo razvitiya goroda [Using Computers for Comparing and Evaluating Alternatives of Strategies for the Spatial Development of a City]. *Upravlenie bol'shim gorodom. Tezisy dokladov II vsesoyuznoj konferencii. CHast' 1* [Management of a Large City. Abstracts of the II All-Union Conference. Part 1]. M.: NPO ASU «Moskva», pp. 131–133. (in Russian)
- Kaverin A.R. (2004) Kriterii sravneniya al'ternativ razvitiya goroda s uchyotom transportnoj dostupnosti [Criteria for Comparing the Alternatives of City Development Based on Transport Accessibility]. Kruglova Y.V., Gluhova V.S. (eds.) *Voprosy planirovki i zastrojki gorodov: Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Questions of Planning and Development of Cities: Materials of the XI International Scientific and Practical Conference]. Penza: PGUAS, pp. 138–141. (in Russian)
- Kaverin A.R., Zabludovskij M.I. (2003) Metodika razmeshcheniya centrov obsluzhivaniya s uchyotom faktorov dostupnosti [Methodology for the Placement of Service Centers Based on the Factors of Accessibility]. Kruglova Y.V., Gluhova V.S. (eds.) *Voprosy planirovki i zastrojki gorodov: Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Questions of Planning and Development of Cities: Materials of the XI International Scientific and Practical Conference]. Penza: PGASA, pp. 55–58. (in Russian)
- Kaverin A.R., Lapshyov P.I. (1979) Metod ispol'zovaniya informacionnogo obespecheniya modeli razmeshcheniya funkcional'nyh podsystem goroda dlya resheniya lokal'nyh gradostroitel'nyh zadach [The Method of Using Information Support of the Model of Placing Functional Subsystems of the City for Solving Local Urban Planning Issues]. *Avtomatizaciya upravleniya gorodom. Tezisy dokladov seminar* [Automatisation of City Management. Abstracts of the Seminar]. GlavNIVC. Moscow: pp. 23–26. (in Russian)
- Kotov E.A., Goncharov R.V., Novikov A.V., Nikogosyan K.S., Gorodnichev A.V. (2016) Moskva: kurs na policentrichnost'. Ocenka effektivov gradostroitel'nyh proektov na policentricheskoe razvitie Moskvy [Moscow: The Course Towards Polycentricity. Assessment of the Effects of Urban Planning Projects on the Polycentric Development of Moscow]. Moscow: HSE Publishing House. (in Russian)
- Livshic V.V. (1979) Razrabotka matematicheskoy modeli i prikladnyh programm dlya proektirovaniya sistemy uchrezhdenij obsluzhivaniya gorodskogo naseleeniya [Development of a Mathematical Model and

Applied Programs for Designing a System of Service Institutions for the Urban Population]. *Dostizheniya i perspektivy. Vyp. 11. Goroda i sistemy rasseleniya* [Achievements and Prospects., M. vol. 11. Cities and Settlement Systems]. Moskva: MCNTI, KSA pri Prezidiume AN SSSR [Moscow: ICSTI, KSA Under the Presidium of the USSR Academy of Sciences] (in Russian)

Lowry I. (1964) A Model of Metropolis. Santa Monica, CA: RAND Corporation.

Spmul'yan B.L., Panina I.K. (1980) Entropijnye metody modelirovaniya gorodskih system [Entropy Methods for Modeling Urban Systems]. Moscow: VNIISI. (in Russian)