

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»**

Ростислав К.В., Радченко Д.М., Пономарев Ю.Ю.

**Разработка методологии построения имитационной
пространственной модели российской экономики**

Москва 2020

Аннотация. В соответствии с Указом Президента РФ №204 от 7 мая 2018 года на основе стратегии пространственного развития Российской Федерации должны быть разработан комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры. При этом в настоящее время в России в недостаточной мере проработано научно-методическое обоснование целеполагания основных стратегических документов, определяющих пространственное развитие Российской Федерации. Формирование перспективных целей и задач пространственного развития зачастую формируется на основе отдельных ситуативных территориальных потребностей, а научно-обоснованный подход к анализу сценариев пространственного развития экономики и последствий их реализации при изменении экономических условий в рамках отдельных субъектов РФ и в России в целом в российской практике развит достаточно слабо.

Ростислав К.В., младший научный сотрудник лаборатории инфраструктурных и пространственных исследований ИОРИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ;

Радченко Д.М., младший научный сотрудник лаборатории инфраструктурных и пространственных исследований ИОРИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ;

Пономарев Ю.Ю., заведующий научно-исследовательской лабораторией инфраструктурных и пространственных исследований ИОРИ Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ.

Данная работа подготовлена на основе материалов научно-исследовательской работы, выполненной в соответствии с Государственным заданием РАНХиГС при Президенте Российской Федерации на 2019 год.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ и систематизация существующих теоретических и эмпирических подходов к построению имитационных пространственных моделей.....	5
1.1 Анализ подходов к имитационному моделированию.....	5
1.2 Подходы к агентно-ориентированному моделированию пространственных процессов	8
2 Анализ и систематизация основных параметров, факторов и эффектов пространственного развития экономик.....	14
2.1 Центростремительные силы, их источники.....	14
2.2 Центробежные силы.....	18
2.3 Закономерности на макроуровне.....	19
3 Разработка имитационной пространственной модели российской экономики.....	21
3.1 Разработка подхода к построению имитационной пространственной модели российской экономики.....	21
3.2 Разработка подхода к проведению сценарного анализа с помощью имитационной пространственной модели.....	46
3.3 Описание базы данных и формирование набора сценариев для проведения анализа с помощью имитационной пространственной модели.....	47
3.4 Результаты построения имитационной пространственной модели.....	60
3.5 Результаты сценарного анализа пространственного развития российской экономики на примере пилотных территорий.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	68

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России в недостаточной мере проработано научно-методическое обоснование целеполагания основных стратегических документов, определяющих пространственное развитие Российской Федерации. Формирование перспективных целей и задач пространственного развития зачастую формируется на основе отдельных ситуативных территориальных потребностей, а научно-обоснованный подход к анализу сценариев пространственного развития экономики и последствий их реализации при изменении экономических условий в рамках отдельных субъектов РФ и в России в целом в российской практике развит достаточно слабо.

Поэтому основной целью настоящей работы является разработка методологии построения имитационной пространственной модели российской экономики, разработка методики сценарного анализа пространственного развития российской экономики с помощью имитационной пространственной модели.

В первом разделе проведены анализ и систематизация существующих теоретических и эмпирических подходов к построению имитационных пространственных моделей. Во втором разделе систематизируются и обобщаются основные параметры, факторы и эффекты пространственного развития экономик. В третьем разделе представлено описание прототипа подхода к построению имитационной пространственной модели российской экономики.

1 Анализ и систематизация существующих теоретических и эмпирических подходов к построению имитационных пространственных моделей

1.1 Анализ подходов к имитационному моделированию

Математические модели в целом и симуляционные в частности, отличаются от физических моделей, хотя в иных случаях математические модели составляют основу моделей физических.

Симуляционные модели основываются на компьютерных алгоритмах. Эти алгоритмы исполняются итеративно и так заново оценивают состояние системы по известным правилам на каждом шагу временной шкалы. Самый распространенный вид симуляционных моделей — модели системной динамики. Модели системной динамики осуществляют с помощью компьютерных алгоритмов математические модели из систем дифференциальных (или разностных) уравнений.

Пространственную симуляцию от других видов симуляционного моделирования отличает прежде всего географическая привязка единиц — предметов исследований и, при более строгом толковании «явно пространственного» свойства модели, зависимость динамики этих единиц от состояния их соседей. Прочие свойства пространственных симуляционных моделей производны, а потому и понятие, и виды пространственных симуляционных моделей можно рассматривать с точки зрения симуляционных моделей вообще.

В моделировании сложных пространственных явлений широкое распространение получило агентное моделирование. Пример такого подхода — рассмотренная модель сегрегации Шеллинга. Более сложные модели работают с представлением реального пространства, например, с пространством городского расселения какой-либо страны или континента, а также учитывают разные типы агентов — каждый со свойственными именно ему правилами поведения. Агентные модели, которые включают несколько типов агентов, называют многоагентными.

Один из наиболее успешных и продолжительных образцов в области агентного пространственного моделирования — это проект SIMPOP. Описание первой модели SIMPOP вышло еще в 1996 г. Авторы этой модели заявляют, что это было первое применение многоагентных моделей в географии[CITATION Pum \l 1033].

Первая модель SIMPOP симулировала динамику сети городов на очень большом отрезке времени: переход от аграрного расселения с однородными, равномерно рассеянными деревнями к иерархической системе городов.

Есть два широких объяснительных подхода к возникновению городов:

- 1 деревни накапливали избытки и развивали центральные функции; города выросли из местных рынков, которые обменивали избытки в небольших районах;
- 2 города возникали благодаря дальним торговым связям, так что могли обходиться без поддержки местного земледелия.

С точки зрения авторов первой модели SIMPOP именно второй подход согласен с наблюдаемой иерархией в распространении инноваций между городами. Рост городов ограничивается соперничеством с другими городами за рынки и присвоение богатства других мест.

Общий принцип модели таков: каждое место (агент модели) согласно его природным ресурсам, функциям и расположению создает богатство, различия же в накопленном богатстве вместе с обменом богатством изменяют систему расселения. Накопление богатства влияет на рост населения: способность места умножать число его жителей зависит от богатства места; рост населения — случайная функция богатства. Иными словами, миграции как таковые не моделируются, но в модели отражается изменение баланса людности, вызванное теми же механизмами, которые, как предполагается, руководят направлением и интенсивностью миграций (различия в богатстве городов).

Обмен информацией в модели представлен тем, что соседние потребители получают информацию о доступном производстве, а торговые центры узнают о существующем спросе. Со временем (пороговые значения на шкале времени задаются исследователями заранее) возникают новации, новые экономические функции, места получают большие производственные возможности и большую ценность. При этом обмен информацией происходит согласно положению мест в иерархической системе поселений.

Пространство модели — решетка из 236 шестиугольников площадью примерно 50 кв. км (можно сказать, что пространственные агентные модели выросли из клеточных автоматов). Людность поселений бралась из нормального распределения с произвольно выбранным средним и дисперсией. Так как у симуляции не было точного соответствия в реальности, а цель симуляции — эвристическая, то и калибровки как этапа моделирования не было.

Агенты модели — это поселения. Различия между агентами связаны с их функциями. Всего модель предусматривает сельскохозяйственную, четыре разных по уровню коммерческие функции, две административные и две промышленные (добывающая и обрабатывающая промышленность). Возникновение функции связано с пересечением поселением тех или иных пороговых значений. Все поселения начинают с одной сельскохозяйственной функцией. Если у поселения появляются другие функции, оно превращается в город. Каждой функции отвечает

доля занятого в соответственных отраслях населения, причем у функционально разных отраслей различается производительность.

Рост доли населения, связанной с той или иной функцией, зависит от того, приносит ли эта функция доход: удовлетворяет местный спрос (первостепенная задача) или спрос в других поселениях. Спрос на товары отраслей разных функций определяется как произведение людности поселения на выбранное исследователем значение параметра специфической для функции склонности к потреблению (чем выше уровень иерархии отрасли, тем параметр меньше).

Возможности продажи в другие поселения ограничивают расходы на перевозку: цена товара растет с каждой дополнительной клеткой расстояния, причем наличие гор и рек влияет на выбор оптимального маршрута. Более того, у разных видов деятельности разный предельный радиус охвата: он выше у функций более высокого уровня иерархии. Наконец, у сельскохозяйственных товаров цена при перевозке растет быстрее, чем у товаров отраслей других функций.

Наличие в городе той или иной функции определяет его уровень иерархии. Чем он выше, тем больше среднее и дисперсия скорости роста (из нормального распределения).

Шаг временной шкалы модели — 10 лет. Всего симуляция охватывала отрезок в 2000 лет. Первые полторы тысячи лет в симуляции нет промышленных функций: на 1500 году происходит промышленная революция, которая преобразует систему расселения. Без этого экзогенного изменения технологии эволюция системы расселения прекращается. Также после 1800 г. начинает действовать новое правило, которое изменяет параметры роста поселений так, чтобы новая динамика отражала интенсификацию миграции из сёл в города.

Разработчики ранней модели SIMPOP выяснили, что для обеспечения устойчивого роста на большом отрезке времени недостаточно лишь различий в среде, т. е., например, больших сельскохозяйственных ресурсов: необходимо вводить взаимодействие (торговлю) поселений.

Современный этап в развитии агентных моделей систем городов ознаменовал выход в 2006 г. описания новой основы SIMPOP — SIMPOP2 [CITATION Bre03 \l 1033]. Перемены стали возможными благодаря росту доступных вычислительных мощностей. Если первая модель SIMPOP из-за вычислительных ограничений не могла работать с более чем 400 агентами, то модели на основе SIMPOP2 стали включать тысячи поселений [CITATION Pum \l 1033], благодаря чему были предложены симуляции реальных систем расселения: Европы и США, Китая и Индии, Южной Африки, Советского Союза и современной России [CITATION The19 \l 1033]. Более того, перед симуляцией начали ставить не только эвристические цели, но и

цели прогноза. Такой была мотивация для разработки модели развития сети расселения Европы до 2050 г. — SIMPOP EuroSim. В этой европейской модели сталкивались противоположные сценарии развития Европы: с жесткими или открытыми границами, с интенсивным притоком мигрантов или с упадком из-за стареющего населения [CITATION Eur191 \l 1033].

Новостью второго поколения моделей SIMPOP стало и более тонкое понятие пространственных связей между городами. Их в базовой модели 3 типа: гравитационные, территориальные и сетевые.

В новых моделях изменилось также само пространство симуляции. Так как начальное состояние в моделях описывалось реальными наблюдениями, SIMPOP2 работает не с клеточным пространством, а с географическим, в котором положение точек описывают координаты, а их людность — реальные оценки, а не генератор случайных чисел.

1.2 Подходы к агентно-ориентированному моделированию пространственных процессов

В последние годы агентно-ориентированные модели все чаще используются для анализа сложных процессов формирования и развития городской среды. Они позволяют отслеживать на микроуровне различные силы, действующие на конкретного агента или субъекта системы, например, человека, домохозяйство, фирму или правительство.

К преимуществам агентно-ориентированных моделей можно отнести также и то, что они, в отличие от традиционных моделей, не страдают от недостатка теоретической базы, допуская при этом значительную гибкость моделирования за счет проверяемых теоретических предпосылок и широких возможностей калибровки. Использование агентов позволяет применять поведенческие модели для более реалистичного представления поведения субъектов в изучаемой среде и, кроме того, можно моделировать агентов как продвинутые когнитивные единицы, демонстрирующие активное поведение, участвующие в долгосрочном планировании и познающие окружающую среду. Еще одним преимуществом использования агентов является то, что на различных уровнях могут быть смоделированы эффекты обратной связи.

1.2.1 Šech и др.

Модель, представленная в работе Šech и др. 2013 г. [CITATION Šec \l 1033] включает в себя 4 типа автономных агентов: Потребители (С), Производство (F), Добывающие фирмы (M), Транспорт (Т). Банковская сфера и государство не моделируются.

Потребители приобретают объем товаров, зависящий от уровня их благосостояния, который, в свою очередь, зависит от наличия работы и уровня квалификации (чем он выше, тем быстрее происходит накопление капитала). Потребитель постоянно делает выбор между

инвестициями в повышение квалификации и текущим потреблением. Функция потребления включает в себя комбинацию потребляемых товаров и скорость их потребления. В модели рассматриваются три вида товаров: товары первой необходимости, обычные и предметы роскоши. Комбинации потребляемых товаров формируют модель потребления, которую можно использовать для разделения потребителей на три категории: потребители с низким, средним и высоким доходом.

Производители преобразуют материалы в конечный товар или промежуточный продукт. Помимо труда и капитала производственная функция также зависит от уровня технологического развития фирмы и квалификации сотрудников:

Добывающие фирмы отвечают за преобразование ресурсов в сырье. Стоимость добычи определяется функцией потребления, в которую включены расходы на энергию и технологии, необходимые для добычи. Каждый добывающий агент поставляет на рынок только один тип сырья.

Транспортные агенты выступают посредниками между добывающими и производственными фирмами. Расходы на транспортировку зависят от расстояния. К перевозке принимается объем сырья не меньший, чем вместимость транспорта, а излишки сырья, доставленные, но не использованные производственной фирмой, хранятся на ее складе.

Для репрезентации общества используется понятие колонии, или города. В него входят все агенты, кроме добывающих фирм, которые расположены неподалеку от месторождений и мест добычи. У города есть две основных характеристики: его местоположение и численность населения. Города конкурируют между собой за доступные ресурсы, предоставляемые добывающими фирмами. Благополучие города складывается из благополучия проживающих в нем агентов. Ввиду различной численности городов, вычисляется уровень богатства на душу населения.

Базовая модель виртуальной экономики разработана на платформе моделирования NetLogo на языке Java. С помощью этой модели можно изучать конкурентное поведение при управлении ресурсами, динамику уровня жизни и т.д.

1.2.2 Tsekeris и др.

В исследовании Tsekeris [CITATION Tse11 \l 1033] предложена концепция мультирегиональной агентной модели выбора местоположения домохозяйств и фирм с эндогенными транспортными издержками, основанной на принципах новой экономической географии.

Модель состоит из нескольких производственных секторов, городов (регионов) внутри страны, транспортной инфраструктуры и 4 типов агентов: домохозяйств, фирм, муниципальных властей и центрального правительства. Присутствуют как внутрирегиональные, так и межрегиональные товарные и трудовые потоки.

Фирма (Ф) может осуществлять поставки продукции на рынки сбыта (РС) в другие регионы по трем сценариям: находясь в одном регионе, обеспечивать его и экспортировать в остальные, открыть филиалы в других регионах и осуществлять поставки напрямую, либо переехать в другой регион. Учитывая наличие транспортных издержек, стоимость земли, затраты на рабочую силу и сырье, агломерационные эффекты, а также специфику рынков (размер рынка и объем спроса), которые дифференцированы по регионам, в зависимости от ситуации каждая фирма будет подбирать оптимальный для нее сценарий.

Все производство делится на 4 сектора: сельское хозяйство, промышленность, высокотехнологичное производство и производство промежуточных товаров. Они отличаются капиталоемкостью и трудоемкостью, уровнем производительности труда и отдачей от масштаба. Промежуточные товары потребляются только промышленностью и высокотехнологичным сектором.

Домохозяйства также стремятся повысить свое благосостояние (и полезность), выбирая один из 4 сценариев поведения: работать (Р) в регионе проживания (Д), работать в соседнем регионе, переехать в регион работы (со сменой работы или без).

На тот или иной выбор домохозяйств оказывает влияние величина транспортных издержек, уровень цен в регионах, стоимость аренды, уровень зарплат и налогов. Функция выбора места жительства домохозяйства h , проживающего в регионе i и работающего в j может быть сформулирована по формуле (1):

$$H_{i,j} = (1 - \tau_h) W - \left(\frac{\eta_h N_h}{H_h} \right) \left(r_0^h + \frac{R_h}{2} g_0^h \right) - C_{ij}^h - \frac{g_0^h d_{ij}}{s}, \quad (1)$$

где τ_h - ставка налога на прибыль,

η_h - средняя площадь земельного участка,

N_h - общее число домохозяйств,

H_h - площадь всего доступной земли жилого назначения,

r_0^h - стоимость аренды жилья,

R_h - радиус городской жилой зоны,

g_0^h - транспортные расходы (€/км),

C_{ij}^c - оптимальные издержки на дорогу между городами $i-j$ с учетом загруженности дорог и платных участков,

d_{ij} - расстояние между городами $i-j$,

$s \in (0.1)$ - speed of adjustment.

Предполагается, что первоначальная концентрация промышленности в регионе может породить усиливающиеся промышленные и городские агломерационные процессы. Изменяющаяся динамика обратной связи между транспортными издержками и пространственным распределением экономической активности может потребовать политического вмешательства, чтобы обеспечить равномерное перераспределение между регионами. В этом случае органы местного самоуправления могут использовать различные инструменты (например, налоговые льготы) для привлечения большего числа фирм для увеличения налоговой базы, тогда как центральное правительство будет применять налоговую политику и инфраструктурные инвестиции для создания эффективной и сбалансированной системы.

Агломерационные эффекты для фирм встроены в производственную функцию (2):

$$q = g(Q, D) f(K, L, M) \quad (2)$$

где $g(Q, D) = \frac{\alpha Q^3}{\exp\left[\beta \frac{Q}{D}\right] - 1}$ - агломерационная функция,

$Q = \sum_{i=1}^n q_i$ - общий объем выпуска отдельного сектора экономики в регионе,

D - плотность фирм данного сектора в регионе.

При определенных параметрах функция $g(Q, D)$ приобретает сигмоидную форму, т.о. иллюстрируя предположение о том, что чем сильнее агломерационные эффекты, тем выше концентрация промышленности (измеряемая общим объемом выпуска) и плотность фирм. Однако это также отражает предположение о повышенных издержках при высоком уровне развития агломерации.

Транспортные расходы включены как в функции выбора местоположения домохозяйств (для поездок на работу) и фирм (для распределения товаров), так и в инвестиционные решения центрального правительства.

1.2.3 Комплексная агентно-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы (CABMUD)

В работе 2013 г. Фаттаховым представлена комплексная агентно-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы (CABMUD) и на ее основе сделан прогноз основных социально-экономических показателей развития города на период до 2025 г. [CITATION Фат13 \l 1049].

Ядро модели составляют пять блоков: 2 типа агентов (жители и фирмы) и 3 типа окружения (районы города, дорожная инфраструктура и общественный транспорт).

Районы города дифференцированы в соответствии с различными условиями для бизнеса и проживания: «вместимостью» жителей, уровнем комфортности проживания (от 0 до 1), максимальным количеством компаний и численностью работников, пропускной способностью дорог. К примеру, в городе может быть расположен некомфортный для жизни район с большим количеством крупных предприятий, плохой экологией и дешевой рентой, и, наоборот, «деловой» район с дорогим проживанием, комфортной обстановкой и большим числом малых фирм.

Если люди чувствуют себя некомфортно (например, из-за больших расходов на проживание или низкой зарплаты), они могут поменять работу внутри своего района или переехать из одного района в другой. При выборе нового района учитывается время поездки на работу (зависит от динамически изменяющейся загруженности дорог), ее стоимость, а также арендная плата в новом районе. Люди перемещаются из дома на работу и обратно на общественном транспорте или на личных автомобилях, причем с увеличением загруженности дорог может понижаться уровень комфорта в отдельных районах.

Соответственно, вслед за динамикой населения изменяются и параметры компаний: численность сотрудников и уровень заработной платы, динамика которых определяет компанию как растущую или (не)стабильную.

Основные параметры жителей и фирм приведены в таблице .

Таблица 1 – Параметры агентов модели CABMUD

Агенты-жители	Агенты-фирмы
---------------	--------------

1 возраст, 2 денежный баланс, 3 размер ежемесячного дохода, 4 район проживания, 5 район работы, 6 время начала рабочего дня, 7 размер ежемесячных транспортных расходов, 8 наличие или отсутствие личного транспортного средства	1 район фактического размещения, 2 денежный баланс, 3 штат сотрудников, 4 фонд заработной платы, 5 число свободных вакансий на предприятии, 6 максимальное число рабочих мест
---	--

Примечание – источник: составлено авторами на основе исследования

Фаттахова[CITATION Фат13 \l 1049].

Агент-житель постоянно находится в одном из двух состояний: «Доволен» или «Недоволен». Переход между данными состояниями зависит от уровня дохода агента: если он ниже пороговой отметки, агент переходит в состояние «Недоволен», и наоборот. В зависимости от того, в каком состоянии в данный момент находится агент, ему доступен различный набор действий.

Внутри состояния «Недоволен» вложено два подсостояния: «Нейтральное» и «Недовольство», переход между которыми также обусловлен пороговым значением уровня дохода агента, при этом «Недовольство» символизирует крайнюю степень бедности, и только в этом состоянии агент может принять решение о продаже автомобиля с целью перехода на общественный транспорт и снижения ежемесячных транспортных издержек. В обоих подсостояниях агент может либо сменить работу, либо переехать в другой район, либо осуществить одновременно оба этих действия. При этом набор условий (требований агента, предъявляемых к новому месту жительства), при которых переезд будет осуществлен, различен для разных возрастных групп.

Масштаб модели CABMUD – 1:1000. Для калибровки модели использованы такие показатели, как: численность населения, среднедушевые денежные доходы, ВРП (валовый и на душу населения), число предприятий, уровень безработицы и т.д. С учетом масштаба в модели задействованы более 1100 фирм, более 10500 жителей, 90 основных дорог города (образующих дорожный граф) и 186 станций метро. Модель протестирована на данных 2004-2009 гг. По результатам построения модели авторами был составлен прогноз основных показателей развития города

Также дополнительно был проведен анализ загруженности автомобильных дорог в городе и протестирован ряд способов ее снижения. Согласно полученным результатам, «единовременное увеличение стоимости бензина на 8 руб./литр, или на 30–35%, снижает загруженность дорог с 8 до 5 баллов». В качестве альтернативы был рассмотрена такая мера, как повышение платы за парковку в центре города.

1.2.4 Транспортная агентно-ориентированная модель Москвы

Более подробно проблема загруженности транспортной инфраструктуры раскрыта в работе Макарова и др. 2009 г. [CITATION Mak091 \l 1049], в которой представлена транспортная агентно-ориентированная модель Москвы, также реализованная в среде AnyLogic.

Модель позволяет проводить комплексную оценку транспортной системы города за счет следующих механизмов:

- Строительство новых радиальных и кольцевых магистралей;
- Организация новых жилых зон, либо строительство объектов-аттракторов трафика (например, крупных торговых центров);
- Краткосрочные перекрытия или ликвидация элементов дорожной сети;
- Ввод новых видов платы за передвижение по городу (платные магистрали, плата за въезд в центр города и т.п.).

В модели представлены три типа агентов:

- Индивид, стремящийся попасть из пункта А в пункт Б;
- Автомобиль, в среднем перевозящий 2 индивидов;
- Общественный транспорт вместимостью 150 чел.

Скорость транспортных средств зависит от загруженности дороги и в случае, когда транспортных средств слишком много, могут возникать заторы. Чаще всего это происходит на наиболее загруженных перекрестках, потому что транспортные средства обязаны соблюдать минимальную дистанцию.

Для оценки интенсивности потоков между районами города используется традиционная гравитационная модель.

Для построения матрицы перемещений между 9 административными округами Москвы необходимы следующие данные:

- максимальный объем выезжающих из района – численность экономически активного населения,
- количество рабочих мест в районе,
- издержки на перемещение, выраженные в км.

Вероятность выбора личного автомобиля в пользу общественного транспорта получена из эмпирического распределения зависимости выбора автомобиля от доли расходов на него в общем объеме расходов индивида. В исследовании авторы

рассматривают 2 сценария развития транспортной системы Москвы: строительство новой кольцевой магистрали и взимание квазиалого за пользование личным транспортом и оценивают потенциальные положительные эффекты от данных мер.

Первый сценарий подразумевает строительство дополнительной кольцевой магистрали между МКАД и ТТК. Однако даже при фиксированном на уровне 2007 года количестве автомобилей данная мера не способствует снижению нагрузки на инфраструктуру – средний уровень пробок остается равен 5 баллам из 10 возможных (как в базовом варианте).

В базовом виде средняя доля расходов на личный транспорт в общем объеме расходов индивида составляет 0.1. В сценарии с взиманием квазиалого эта доля искусственно поднимается до 0.7, в результате чего пробки в городе исчезают полностью, поскольку подавляющая часть индивидов решает перейти на использование общественного транспорта.

2 Анализ и систематизация основных параметров, факторов и эффектов пространственного развития экономик

2.1 Центростремительные силы, их источники

Центростремительные силы — это прежде всего положительный эффект масштаба, причем как внешний, так и внутренний. Внутренний положительный эффект масштаба объясняет, почему возникли заводские поселки, но внутренний эффект сам по себе не отвечает на вопрос, что создало большие многоотраслевые города с множеством производителей в каждой отрасли. Для крупных городов и других сложных форм сосредоточения важнее внешние выгоды. Применительно к городским агломерациям такие выгоды объединяет понятие агломерационного эффекта. Денежные внешние выгоды возникают тогда, когда от выпуска и затрат других производителей положительно зависит прибыль предприятия, а если от других производителей положительно зависит выпуск предприятия, то перед нами технологические внешние выгоды.

Между внутренними и внешними выгодами сосредоточения нет пропасти. Новая экономическая география выводит денежные внешние выгоды из положительного внутреннего эффекта масштаба, транспортных издержек и предпочтения потребителями большего разнообразия товаров (англ. love-of-variety effect). Намного сложнее вывести с помощью экономической модели технологические внешние выгоды.

2.1.1 Информационные экстерналии и «обмен знаниями»

Денежные внешние выгоды исключают совершенную конкуренцию, так как иначе невозможно представить ценовой механизм, через который денежные внешние выгоды работают. Иное дело технологические внешние выгоды: они допускают совершенную

конкуренцию, так как размер отдельного предприятия не важен. Самый яркий пример — общение между производителями, их работниками, обмен знаниями или идеями, их переток.

Эдвард Глейзер, Хеди Каллаль, Хосе Шейнкман и Андрей Шлейфер выделили три подхода к тому, как и при каких условиях происходит переток знаний:

1 Маршалла — Эрроу — Ромера (MAR, выгоды локализации). Обмен знаниями происходит между предприятиями из одной отрасли, и местная монополия более благоприятствует этому, чем чистая конкуренция производителей, так как позволяет интернализировать внешние выгоды (пример — Кремниевая долина);

2 Портера. Обмен знаниями тоже происходит между предприятиями одной отрасли, но предпочтительнее местная конкуренция, благодаря которой производители быстрее подражают друг другу и создают свои новинки (кластеры производителей керамики и золотых украшений в Италии);

3 Джейкобс (выгоды урбанизации). Обмен знаниями происходит между предприятиями разных отраслей, в отрасль новинки приходят извне, так что внешние выгоды тем больше, чем более разнообразный у города отраслевой состав, и способствует обмену знаниями местная конкуренция (в Сан-Франциско лизинг придумали не в банковской отрасли, его изобрело одно из пищевкусовых предприятий города, когда не смогло найти средства для оплаты нужной этому предприятию техники) [CITATION Gla92 \l 1033].

Переток знаний — это внешние выгоды от человеческого капитала. Их можно рассматривать и в целом, не смотря на связь с отраслевым составом. Особенно это полезно, когда предмет оценки — географическая единица, а не отрасль.

Джеймс Раух по данным в разрезе SMSA США показал, что рост среднего уровня образования, а именно разница в среднем числе лет учения в один год, повышает общую производительность города почти на 3 %. С большей образованностью связаны также более высокие зарплаты и бóльшая рента [CITATION Rau93 \l 1033].

Дарон Аджемоглу и Джошуа Энгрист, однако, не нашли достаточных свидетельств внешних выгод от человеческого капитала, то есть тех выгод, которые не присваивает частное лицо — носитель капитала [CITATION Ace00 \l 1033]. Позднее Энрико Моретти всё же показал, что при прочих равных в тех городах, где больше выпускников колледжа, зарплаты выше [CITATION Mor04 \l 1033]. В другой работе Э. Моретти показал, что общая производительность быстрее росла у промышленных предприятий в городах, в которых быстрее росла доля выпускников колледжа.

2.1.2 Эффекты от развития транспортной инфраструктуры

На самом деле некоторые виды общественного капитала, то есть инфраструктуры, всё же создают внешние выгоды. Согласно Bougheas и др., транспорт и услуги связи создают внешние выгоды, так как уменьшают постоянные издержки в производстве новых видов промежуточных товаров, способствуют разделению труда и специализации. Однако исследователи отмечают, что связь между экономическим ростом и инфраструктурой не монотонная [CITATION Bou00 \l 1033].

С теоретической точки зрения разные инфраструктурные расходы могут объяснять, почему одни страны или их части росли быстрее, чем другие. Итог разной скорости роста — неравное распределение хозяйства, его сосредоточение.

Отдельный источник внешних выгод или издержек инфраструктуры — ее сетевой эффект. Чем больше сеть, то есть чем больше у нее пользователей (сейчас и в будущем), тем больше выгода отдельного пользователя сети. Кроме таких прямых выгод сеть может давать и косвенные преимущества: пользователи какой-либо сети выигрывают, если число пользователей такой сети растет, среди прочего и потому, что большее число пользователей сети способствует разработке для нее лучшего оборудования, программного обеспечения и т. д. [CITATION Kle08 \l 1033]

В 2014 г. Бом и Лигтхарт провели метаанализ накопленных за 25 лет (1983–2008 гг.) оценок влияния на производительность частного сектора общественного капитала (англ. public capital) за вычетом военной инфраструктуры. Согласно Бому и Лигтхарт, средняя оценка эластичности выпуска в частном секторе по общественному капиталу — 0.082 (после поправки на возможное смещение оценок из-за избирательной публикации результатов). Иными словами, удвоение общественного капитала повышает выпуск в частном секторе почти на 25 % [CITATION Bom13 \l 1033]. Наконец, вложения в строительство автомобильных дорог прибыльнее расходов на другие виды транспортной инфраструктуры [CITATION Mel131 \l 1033].

2.1.3 Иные виды экстерналий транспортной инфраструктуры

Кроме внешних эффектов человеческого капитала и инфраструктуры есть и другие причины сосредоточения хозяйственной жизни. Первым, кто упорядочил эти причины, считают Альфреда Маршалла. Он назвал три источника выгод, важность которых сохраняется и в наше время:

- 1 «рынок для квалифицированного труда» способствует тому, что умелый работник находит себе работу, а производителю легче подобрать нужного ему работника (англ. labour market pooling);
- 2 экономия сырья и пр. благодаря близости вспомогательных производств и, стало быть, меньшим транспортным издержкам (англ. input sharing);

З быстрое распространение и совершенствование изобретений благодаря сосредоточению работников надлежащей квалификации и одной профессии (один из видов перетока знаний) [CITATION Mar83 \l 1049].

Из-за выгод, описанных Маршаллом, предприятия разных отраслей сосредоточиваются в одном месте. Стало быть, то, в какой мере сосредоточение предприятий предсказывают разные меры их сходства, отражает удельный вес разных видов внешних выгод. Исходя из этого принципа главный источник внешних выгод, по оценкам Г. Эллисона и Э. Глейзера, это близость предприятий одной производственной цепочки. При этом другие виды внешних выгод тоже значимы (хуже всего размещение разных производств в одном месте объясняет сходство с точки зрения обмена знаниями, но и показатель такой близости по обмену знаниями был самый несовершенный). Примечательно, что, согласно Г. Эллисону и Э. Глейзеру, общие естественные преимущества — условия первой природы, по выражению Уильяма Кронона [CITATION Cro07 \l 1033],— важнее, чем любой отдельный источник маршаллианских выгод, хотя такие выгоды как целое всё же перевешивают [CITATION Ell10 \l 1033].

Выводы Г. Эллисона и Э. Глейзера были общими для промышленного производства в целом. Дьодато и др. показали, что разные выгоды сосредоточения для разных отраслей важны в разной степени [CITATION Dio18 \l 1033]. Предприятия сферы услуг больше выигрывают от рынка труда, в то время как промышленное производство — от близости поставщиков и покупателей.

Как показал Вернон Хендерсон, производительность зависит от степени сосредоточения горожан в главном городе: для любого размера государства и уровня его развития есть оптимальная степень сосредоточения, которая согласует выгоды, например, от накопления знаний, и издержки, например на поддержание уровня жизни в переполненном мегаполисе; чем больше государство и выше уровень его развития, тем меньше оптимальный размер главного города. Примечательно, что, по оценке В. Хендерсона, на рост производительности не влияет урбанизация сама по себе [CITATION Hen \l 1033].

2.2 Центробежные силы

У сосредоточения есть издержки. Более того, те же силы, которые на какой-то ступени способствуют производительности фирм или удовольствию потребителя, после некоторой черты действуют в другую сторону. Яркий пример — дорожная сеть или переполнение неделимых благ (чрезмерная на них нагрузка). Центробежные силы чаще всего показывают на примере слишком большого города. В этом случае речь идет о потере

времени в пробках, высокой земельной ренте или арендной плате, худшем из-за загрязнения качестве среды.

Fujita выделил 3 вида внешних издержек, которые возникают из взаимодействия самих домохозяйств [CITATION Thi \l 1033]:

1 издержки скученности — бóльшая плотность даже однородных домашних хозяйств ухудшает качество среды из-за шума, мусора и преступности, а также из-за меньшего количества открытых пространств и худшей озелененности;

2 расовые или этнические внешние издержки, источник которых — предрассудки о какой-либо расе (неграх) или каком-либо этносе (например, цыганах или евреях);

3 дорожные заторы, связанные с ежедневными поездками на работу — по меньшей мере после какой-то черты новые участники дорожного движения увеличивают время поездки для других.

О важности издержек заторов свидетельствуют и прикладные работы. Так, Лауренс Брурзма и Юстин Ван Дейк с помощью отраслевых региональных данных показали, что бóльшая часть замедления роста совокупной факторной производительности в Нидерландах связана с пробками, отрицательное влияние которых перевешивает в стране выгоды агломерации [CITATION Bro07 \l 1033].

Близкая к издержкам транспортных заторов центробежная сила — действие естественных констант пространственной самоорганизации населения, в отечественной литературе известные как константы Гольца. Эти константы — предельное время, в течение которого люди в силу естественных причин могут перемещаться (с известной частотой): 1.5 часа для жителя города, 3 часа для жителя городской агломерации (в сутки).

2.3 Закономерности на макроуровне

Поведение отдельных лиц и предприятий ведет к самопроизвольному порядку на макроуровне. Этот порядок описывает принцип иерархии в сети городов, распределение городов по степенному закону (правило Ципфа, правило «ранг — размер»), правило «число — средний размер», закон роста городов Жибра.

2.3.1 Закон Ципфа

В распределении городов примечательно то, что если на графике по оси ординат отложить логарифм рангов городов (их номера в порядке убывания людности), а по оси абсцисс — логарифм их людности, то точки выстроятся в линию с угловым коэффициентом -1 согласно формуле (3).

$$\begin{aligned}
 P(\tilde{S} > S) &= a/S^\xi, \\
 p(S) &= \xi a S^{-\xi-1}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где $P(\tilde{S} > S)$ — вероятность того, что размер \tilde{S} города больше S ;
 показатель степени ξ — единица,

a — константа,

$p(S)$ — плотность вероятности для людности S [CITATION Gab04 \l 1033]¹.

С этой точки зрения правило Ципфа — частный случай распределения Парето.

Андрей Важенин указал на то, что правило Ципфа лучше всего описывает распределение размера городов в странах с долей горожан около 50 % [CITATION Важ99 \l 1049]. В странах с меньшей долей показатель степени меньше единицы, с большей долей — больше единицы. Нарушение правила Ципфа часто возникает из-за самого главного города страны: такой город обычно больше, чем предсказывает правило Ципфа, в малых по площади странах и меньше — в крупных. В крупнейших странах, таких как Россия или Китай, правило Ципфа надо применять не ко всем городам страны сразу, а для отдельных систем расселения внутри этих стран [CITATION Важ10 \l 1049].

2.3.2 Исследование Томойа Мори, Кодзи Никишими, Тони Смита

Томойа Мори, Кодзи Никишими и Тони Смит указали на т. н. правило «число — средний размер»: есть сильная отрицательная логарифмически-линейная связь между числом и средним размером городов, в которых есть данная отрасль. Т. Мори, К. Никишими и Т. Смит подтвердили этот принцип японскими данными для 1980–1981 и 1999–2000 гг. — правило не перестало действовать несмотря на сдвиги в размещении производства в Японии. Исследователи также заметили, что размещение отраслей в стране следует принципу иерархии В. Кристаллера: отрасли, которые есть в городах данного размера, также есть во всех городах более высокого ранга. Более того, если для городов страны действует принцип иерархии, то правило число — средний размер по существу то же, что и правило Ципфа (однако правило число — средний размер невозможно для систем городов с показателем степени больше единицы в их распределении по Ципфу) [CITATION Мор08 \l 1033]. В. Сюй показал, что правило число — средний размер работает и в США. При этом если Т. Мори и др. получили угловой коэффициент 0.7, то В. Сюй для Соединенных Штатов получил 0.75 [CITATION Hsu12 \l 1033].

2.3.3 Закон Жибра

¹ Ксавье Габе и Иоаннис Иоаннидес различают вероятностное правило Ципфа и детерминистическое правило «ранг — размер», но на деле эти термины часто используют как заменители.

С правилом Ципфа в частности и распределением Парето в целом связана закономерность распределения скорости роста городов — закон Жибра². Согласно этому закону, рост города не зависит от его начального размера. При этом закон не исключает, что на скорость роста города влияет, например, динамика ее главных отраслей: смысл в том, что поправку на один только размер города не сообщает дополнительную информацию о самом росте [CITATION Gab99 \l 1033]. В строгой формулировке (4)-(5) у скорости роста городов общие среднее и дисперсия:

$$S_t - S_{t-1} = \epsilon_t S_{t-1}, \quad (4)$$

$$S_t = (1 + \epsilon_t) S_{t-1} = S_0 (1 + \epsilon_1)(1 + \epsilon_2) \dots (1 + \epsilon_t), \quad (5)$$

где S_t — размер города во время t ,

S_{t-1} — размер города в предшествующий момент времени $t-1$;

ϵ_t — случайная величина со средним m и дисперсией σ^2 .

Если шаг времени мал и, следовательно, ϵ_t мал, то, по формулам (6)-(7),

$$\ln(1 + \epsilon_t) \approx \epsilon_t, \quad (6)$$

$$\ln S_t \approx \ln S_0 + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_t. \quad (7)$$

Таким образом, закон Жибра при $t \rightarrow \infty$, когда $\ln S_0$ делается пренебрежимо малым сравнительно с $\ln S_t$, ведет к логарифмически-нормальному распределению размера городов [CITATION Sut97 \l 1033]. Для крупнейших городов распределение по правилу Ципфа или закону Жибра выглядит почти одинаково, а потому стохастический процесс роста по меньшей мере больших городов естественно ведет к распределению их размеров по правилу Ципфа.

С теоретической точки зрения развитие транспортной сети, если только оно оптимально с точки зрения издержек, представляет компромисс между большей общей длиной ребер графа и большей прямой связью между разными узлами. Издержки времени в пути меньше, если из одного места в другое есть прямая дорога. С другой стороны, содержание дорог требует расходов, которые тем больше, чем длиннее вся сеть дорог. Gastner и Newman на примерах показали, что реальные сети очень близки к оптимальному компромиссу [CITATION Gas061 \l 1033].

² Сам Робер Жибра описывал не людность городов, а количество работников французских промышленных предприятий.

3 Разработка имитационной пространственной модели российской экономики

3.1 Разработка подхода к построению имитационной пространственной модели российской экономики

Имитационная пространственная модель российской экономики разработана в программной среде R и структурно состоит из 4 элементов: государства, городов, фирм и индивидов (см. рисунок).

Технически взаимодействие между элементами реализовано с помощью 5 классов посредством ряда механизмов (описаны в подразделах 3.1.1-3.1.2). В конечном итоге модель позволяет описывать существующее распределение домохозяйств и компаний в пространстве российских городов, а также строить соответствующие прогнозы на краткий и среднесрочный период.

Класс «государство» (Main). Государство является элементом высшего порядка³ внутри которого функционируют все остальные элементы. Роль государства в модели состоит в сборе налогов и их последующем перераспределении. Следует отметить, что в текущей версии модели рассматривается упрощенная структура налогообложения (рассмотрены не все типы налогов, представленные в РФ).

С фирм взимается налог на прибыль, из которого осуществляется субсидирование убыточных градообразующих и крупных предприятий (т.е. таких, на которых занято более 20% жителей города). Основными параметрами данного класса являются: ставка налога на прибыль.

Класс «город» (Zone). В городах проживают индивиды и располагаются фирмы. Индивидуальными особенностями города обусловлена ставка арендной платы (как жилой, так и коммерческой), величина маятниковых транспортных издержек жителей (на дорогу от дома до работы) и уровень комфорта городской среды. Также от размера города зависит скорость появления новых фирм и уровень индексации заработных плат. Основными параметрами данного класса являются: название города, расположение (географические координаты), величина жилой и коммерческой аренды, уровень комфорта (качество городской среды), уровень цен (MPOT), численность жителей и фирм, средние маятниковые транспортные издержки.

Класс «фирма» (Enterprise). В модели представлены 2 типа фирм⁴: крупные (свыше 250 чел.) и все остальные (менее 250 чел.). Такое деление необходимо для реализации возможности переезда крупных фирм (процесс подробно описан далее). ИП отдельно не моделируются и входят в группу «все остальные». В зависимости от величины прибыли в каждый временной период, определяемой стохастическим процессом, фирма может

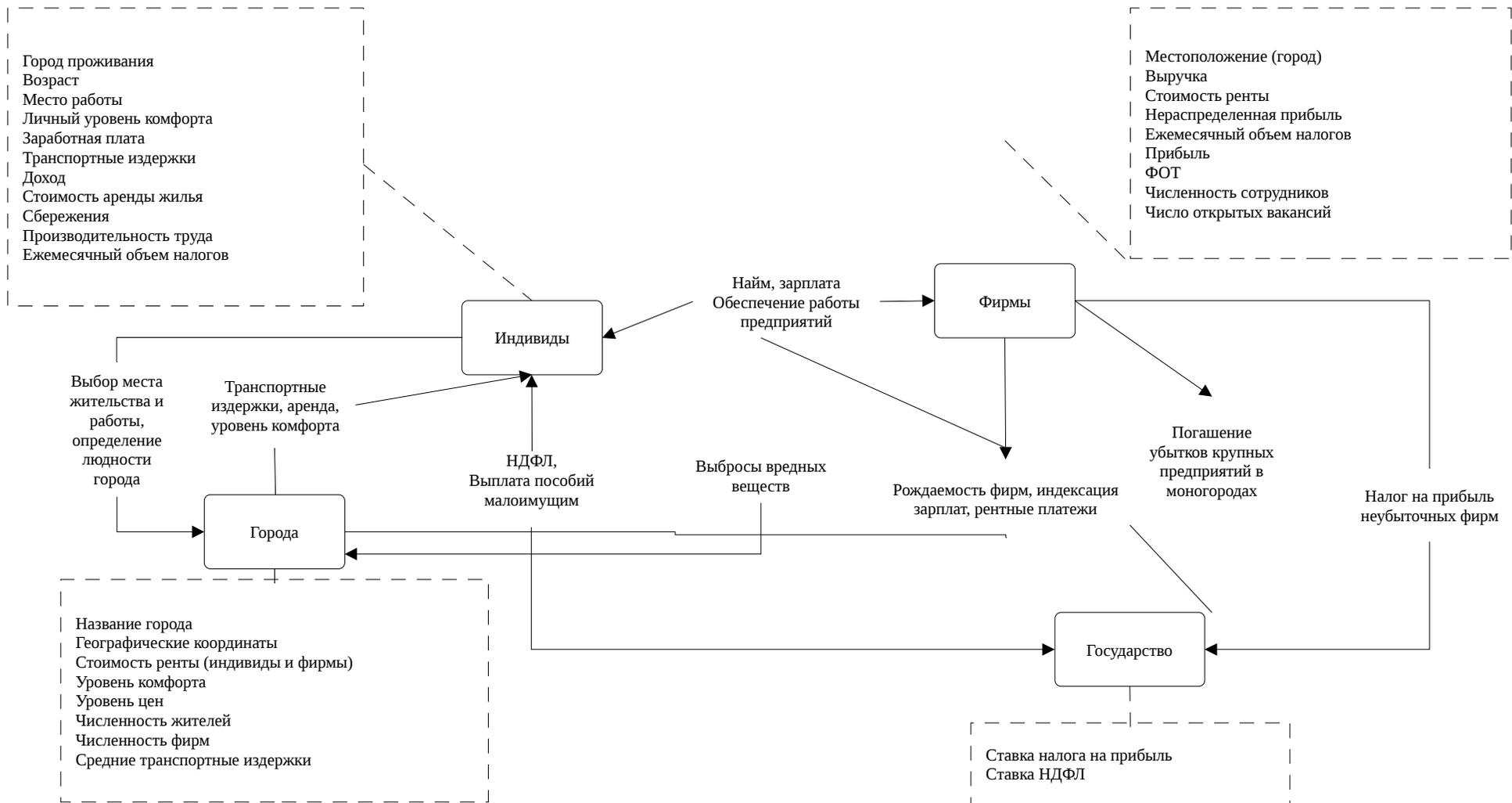
³ Технически все остальные классы агентов вложены в класс «государство».

⁴ В соответствии с п. 2 ст. 4 ФЗ N 209 «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации»[СITAТIОН Кон071 \l 1049]

находиться в одном из двух состояний: растущем (прибыль неотрицательная) или падающем (прибыль меньше нуля).

В состоянии роста (при положительной прибыли) фирма ежегодно повышает заработную плату своим сотрудникам, ежемесячно открывает вакансии (если позволяет величина нераспределенной прибыли), а также может переехать (переместить свой офис и основные средства на другое место пребывания). Предполагается, что осуществлять переезд могут только крупные фирмы, не являющиеся градообразующими. На принятие решения о переезде влияет соотношение уровней коммерческой арендной платы в текущем и прочих городах, а также готовность топ-менеджмента⁵ компании сменить место жительства.

⁵ Два верхних дециля сотрудников по уровню заработной платы.



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 1 – Основные характеристики и взаимодействие агентов в модели

Если динамика прибыли фирмы становится отрицательной, она переходит в состояние «Падение», где стремится сократить свои издержки за счет увольнения случайных сотрудников до тех пор, пока ее прибыль вновь не станет положительной. Однако, если фирма – градообразующее или очень крупное предприятие, то ей на помощь придет государство, которое из собранных на предшествующих этапах налогов покрывает ее убытки (либо часть убытков, если налоговой базы недостаточно). Основными параметрами данного класса являются: местоположение (город), объем выручки (в текущем и предыдущем периоде), стоимость аренды, объем нераспределенной прибыли, ежемесячный объем уплачиваемых налогов, объем прибыли, фонд оплаты труда, численность сотрудников, число открытых вакансий.

Класс «индивид» (Person). Агенты-жители в модели обозначаются как $\omega \in \Omega$, где Ω – вся популяция жителей. Все агенты в модели живут по отдельности и не образуют семей, домохозяйства и родственные отношения не моделируются.

Каждый агент живет в городе Θ_R и работает в городе Θ_F (если он не безработный). Города проживания и работы могут различаться, что приводит к возникновению маятниковой трудовой миграции.

Агент-индивид стремится максимизировать свой доход путем поиска нового места жительства и нового места работы.

Предполагается, что полезность отдельного агента u_ω , проживающего в городе $i \in \Theta_i$ может быть представлена следующим образом (следуя логике Allen, Arkolakis (2014)[CITATION All15 \l 1049]):

$$u_\omega = u_i * h_{i\omega}^{1-\beta} * Q_{i\omega}^\beta \quad (8)$$

где u_i – amenities города i (совокупность ненаблюдаемых характеристик окружающей среды и других аспектов, характеризующих «полезность» от проживания в локации i),

$h_{i\omega}$ – расходы на проживание и транспорт,

$Q_{i\omega}$ – потребление товаров.

Поскольку производственная часть экономики (включая банковский сектор) не моделируется, в соответствии с моделью жизненного цикла, потребление индивида зависит только от его уровня дохода (заработной платы) и принимается за случайную долю от заработной платы индивида $salary$, распределенную по равномерному закону с параметрами $R(0.1 salary, 0.5 salary)$.

Оптимизационная задача агента-жителя с бюджетным ограничением будет сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned} \max_{j \in \Theta_F, h_i(\omega), Q_{i\omega}} \quad & u_i * h_{i\omega}^{1-\beta} * Q_{i\omega}^\beta \\ \text{st} \quad & \sum_{k \in \Theta_F} p_{ki} q_{ki\omega} + r_{Ri} h_{i\omega} \leq e_{j\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

где r_{Ri} – арендная плата за единицу жилья,

p_{ki} – цена товара k ,

$q_{ki\omega}$ – объем потребления, в упрощенном варианте

$$\sum_{k \in \Theta_F} p_{ki} q_{ki\omega} = R(0.1 \text{ salary}, 0.5 \text{ salary}) .$$

В (текущей версии прототипа) модели представлены только городские жители. Ежемесячно индивид получает заработную плату $salary$ и платит налоги (если он не безработный), оплачивает аренду жилья⁶, транспортные расходы и некоторую дополнительную случайную величину $Q_{i\omega}$ (10-50% заработной платы), символизирующую расходы на питание, досуг и прочее, оставшиеся же средства переходят в сбережения.

Заработная плата $salary$ – случайная величина, распределенная по нормальному усеченному закону и зависящая от возраста индивида и, как следствие, уровня производительности:

$$salary = N(w_{\Omega_F}, 10\,000, MPOT, 30\,MPOT) * salary_{coef}(age) \quad (10)$$

Производительность труда отдельного агента рассчитывается следующим образом: на основании данных Росстата о среднем уровне заработной платы для разных возрастных групп за соответствующий год рассчитываются их отклонения от средней заработной платы по всем возрастам. Это отклонение по смыслу является средней возрастной мерой производительности $salary_{coef}$. Каждый агент-индивид в модели появляется с некоторым отклонением производительности $prdc_{diff}$ от среднего уровня, для которого использовано усеченное нормальное распределение $(0, 0.1)$ с границами ± 0.3 .

⁶ В прототипе модели не представлен рынок жилья и собственности, поэтому предполагается, что все индивиды арендуют жилье.

$$salar y_{coef}(age) = \frac{\text{среднерос.з/n}}{\text{з/n от возраста}} \quad (11)$$

$$prdc_{diff} = N(0, 0.1, -0.3, 0.3)$$

Отсюда выводится мера производительности для отдельного работника $salar y_{coefindv}$.

$$salar y_{coefindv} = salar y_{coef}(age) + prdc_{diff} \quad (12)$$

У каждой вакансии существуют минимальные требования производительности — это значение, которое принимает функция распределения зарплат в городе, где открыта вакансия, при данной ставке вакансии.

Общий доход агента в месяц $e_j(\omega)$ составляет $\frac{salary}{(1-k)}$, где k — доля прочих доходов в структуре доходов населения (в среднем за период с 2014 по 2018 г. по России - 0.3).

В зависимости от уровня финансового благосостояния индивид постоянно находится в одном из трех состояний: «богатый», «средний класс» или «бедный». Основное отличие бедных индивидов от всех остальных состоит в том, что они пребывают в так называемой «ловушке бедности» и не могут позволить себе переезд в другой город, в связи с чем поле доступных опций повышения благосостояния для них ограничено.

При принятии решения о переезде индивид оценивает модифицированную функцию полезности (8) Allen, Arkolakis [CITATION All15 \l 1033] для каждого города и сравнивает ее с текущей полезностью. При переезде индивид увольняется со старого места работы и начинает поиск подходящей вакансии на новом месте. Также индивид может начать искать работу не в связи с переездом, а в результате сокращения. Поиск работы не происходит мгновенно: предполагается, что индивиду нужно некоторое число шагов модели (месяцев) на поиск и отбор привлекательных вакансий, посещение собеседований, кроме того, в зависимости от финансового положения имеющийся объем сбережений позволяет покрывать обязательные ежемесячные расходы, в результате чего богатый человек может потратить на поиск идеальной вакансии больше времени, чем представитель среднего класса.

С возрастом индивидов растет их производительность труда как следствие приобретаемого опыта. По достижении с определенной возрастной границы он выбывает из модели.

При появлении в модели, индивиду назначается личный уровень комфорта (прокси для amenities) как случайное число из нормального распределения вокруг уровня комфорта города проживания u_i в качестве среднего.

Для упрощения в прототипе модели предполагается, что каждый агент перемещается в пространстве на личном транспорте, и его ежедневные транспортные издержки рассчитываются как потери заработной платы в зависимости от времени в пути.

Основными параметрами данного класса являются: город проживания, возраст, место работы, личный уровень комфорта, заработная плата, транспортные издержки, доход, стоимость аренды жилья, сбережения, производительность труда, ежемесячный объем налогов.

Далее будут более рассмотрены основные механизмы, определяющие взаимодействие агентов между собой и с окружающей средой.

3.1.1 Механизмы поведения агентов-индивидов

1. Миграция между городами

В прототипе модели не представлена внешняя миграция, только внутренняя. Динамика миграции населения между городами позволяет оценить влияние экономических и долгосрочных демографических шоков на перераспределение населения в пространстве, позволяет выявить наличие/отсутствие агломерационных процессов вблизи крупных городов.

В работе Devisch [CITATION Dev09 \l 1033] при принятии решения о выборе места жительства индивид проводит оценку долгосрочной полезности каждого из трех действий: переезда внутри своего города U^m , переезда в другой город U^e , обновления жилища (увеличение числа комнат, строительство гаража, капитальный ремонт и т.п.) U^r , сравнивая (и выбирая максимум из них) результаты между собой и полезностью при отсутствии каких-либо действий (т.е. проживание на старом месте) U^0 :

$$\max(U^{m,t} - \Delta^{m,t}, U^{e,t} - \Delta^{e,t}, U^{r,t} - \Delta^{r,t}, U^{0,t}), \quad (1)$$

3)

где t – период оценивания.

Кроме того, каждое действие обладает инерционностью: если в какой-то период времени индивид принял определенное решение, то в следующий раз принятие этого же решения будет крайне маловероятно. Для этого в модель введен лаг переезда – временной отрезок, в течение которого индивид не может повторно менять место жительства.

В работе Hsieh и Moretti [CITATION Hsi17 \l 1049] косвенная полезность⁷ работающего индивида задается следующим образом:

$$V = \frac{W_i Z_i}{P_i^\beta}, \quad (1)$$

где P_i – стоимость аренды в городе i ,

β – доля расходов на проживание,

W_i – уровень номинальной заработной платы в городе,

Z_i – величина объема местных удобств (amenities).

При этом предполагается, что и жилой фонд, и земля, на которой располагаются предприятия, принадлежат не присутствующему в модели внешнему арендодателю, так что в данном случае доход работника составляет только его заработная плата.

В модели Tsekeris [CITATION Tse11 \l 1049] функция выбора места жительства домохозяйства h , проживающего в регионе i и работающего в j сформулирована как:

$$H_{i,j} = (1 - \tau_h) W - \left(\frac{\eta_h N_h}{H_h} \right) \left(r_0^h + \frac{R_h}{2} g_0^h \right) - C_{ij}^c - \frac{g_0^h d_{ij}}{s}, \quad (1)$$

чистая заработная плата
транспортные расходы

стоимость
адаптационные расходы

издержки⁸
проживания

где τ_h – ставка налога на прибыль,

η_h – средняя площадь земельного участка,

N_h – общее число домохозяйств,

H_h – площадь всего доступной земли жилого назначения,

r_0^h – стоимость аренды жилья,

R_h – радиус городской жилой зоны,

g_0^h – транспортные расходы (€/км),

C_{ij}^c – оптимальные издержки на дорогу между городами $i-j$ с учетом

загруженности дорог и платных участков,

⁷ Косвенная функция полезности показывает зависимость полезности от цен товаров и величины бюджета [CITATION Bor17 \l 1049].

⁸ adjustment costs

d_{ij} – расстояние между городами $i-j$,

$s \in (0,1)$ – speed of adjustment.

При принятии решения о переезде индивид оценивает функцию полезности каждого города (включая текущий) с аналогичными аргументами. В случае, если полезность текущего города окажется наивысшей, переезд не произойдет.

2. Влияние характеристик городов на динамику населения.

Роль городских удобств в определении склонностей индивидов к переезду является одним из ключевых вопросов урбанизационного развития. Использование данного механизма в модели позволяет исследовать влияние городских удобств на динамику и скорость межгородской миграции. Ряд эмпирических исследований показывает, что расширение доступа к городским удобствам и их качественное улучшение повышают желание индивидов оставаться в местах своего проживания.

В работе Hsieh и Moretti 2017 г. [CITATION Hsi17 \l 1049] стоимость жилья в городе P_i подвержена влиянию численности населения в этом городе, что задается следующим соотношением:

$$P_i = \dot{P}_i L_i^{\gamma_i}, \quad (1)$$

6)

где γ_i - эластичность предложения на рынке жилья по числу работающих людей в городе i .

L_i – спрос на рабочую силу,

\dot{P}_i – доля стоимости жилья, не зависящая от изменения уровня занятости.

В силу того, что предложение жилья ограничено сверху, рост численности населения в городе будет приводить к росту заработных плат, спроса и цен на жилье. В конечном счете город будет нести потери в виде упущенного прироста выпуска и СФП, поскольку высокопроизводительные кадры не будут иметь возможность приехать в город и приобрести (или арендовать) жилье.

Взаимосвязь численности населения города и уровня удобств (amenities) в работе Desmet и др. [CITATION Des15 \l 1049] представлена схожим образом:

$$a_{tr} = \dot{a}_r \dot{L}_{tr}^{-\lambda}, \quad (1)$$

7)

где \dot{a}_r – экзогенно заданная положительная функция,

\dot{L}_r – плотность населения в городе r в период времени t ,

λ – фиксированный параметр, который может быть как положительным, так и отрицательным.

То есть в случае положительности параметра рост численности (плотности) населения будет оказывать негативное влияние на уровень «удобств» проживания в городе, что характеризует стандартную гипотезу о наличии негативных экстерналий в случае «перегрузки» общественных благ.

Albouy и Stuart использовали в работе 2014 года [CITATION Alb14 \l 1033] неоклассическую модель общего равновесия Rosen и Roback для объяснения вариации плотности населения на основе трех основных типов городских удобств: качества жизни и производительности в сфере производства торгуемых и неторгуемых товаров.

В прототипе модели для отображения влияния характеристик города на изменение численности населения использованы два показателя: показатель зависимости уровня доходов от численности населения, который получен из оценки простой регрессии средней зарплаты по логарифму численности, и показатель зависимости арендной платы за жилье (получен аналогичным образом из оценивания простой регрессии средней величины арендной платы по логарифму численности). Для оценки связи между доходами и людностью города использовались данные «Мультистат» за 2012–2013 гг. Для оценки связи людности города со средней арендной платой за жилье брались данные «Домофонда».

3. Характер и динамика маятниковой миграции

Регулярные перемещения индивидов между населенными пунктами, связанные с трудовой деятельностью, приводят к перераспределению трудовых ресурсов на локальных и региональных рынках труда. С помощью данного механизма предполагается провести анализ факторов, влияющих на трудовую маятниковую миграцию.

В работе Шитовой [CITATION Шит16 \l 1049] с опорой на исследования Mills [CITATION Mil72 \l 1033] и Simpson и Veen [CITATION Sim92 \l 1033] отмечается, что основными факторами, определяющими динамику маятниковой миграции⁹, являются стоимость проживания, уровень заработной платы, и транспортные издержки.

В стандартной урбанистической модели транспортные издержки на ежедневные поездки в другой город компенсированы более низкой стоимостью проживания:

$$\frac{dC}{dR} = \frac{-dA}{dR}, \quad (18)$$

⁹ На примере Москвы и Московской области.

где R – расстояние между городами,

$\frac{dC}{dR}$ и $\frac{dA}{dR}$ – градиенты издержек на транспорт и проживание соответственно.

Однако в данной модели неявно предполагается, что уровень оплаты труда не зависит от местоположения фирмы, что не соответствует действительности.

4. Поиск работы, динамика доходов населения

Поскольку доходы населения зависят не только от квалификации самого работника, но и конкретного места проживания, в поисках более высокооплачиваемой должности человек может принимать решение о поиске работы в другом городе (расположенном как в зоне маятниковой миграции, так и вне ее), однако это приведет к росту транспортных издержек. Введение данного механизма в модель позволяет идентифицировать специфические условия и соотношение «выгоды/затраты на перемещение», при которых будет происходить маятниковая и обычная миграция.

Согласно работе Roback 1982 г.[CITATION Rob82 \l 1033], индивид стремится максимизировать полезность от потребляемых благ с учетом бюджетного ограничения в следующей форме:

$$\begin{aligned} \max U(x, l^c, s) & & (1) \\ w + I = x + l^c r & & (9) \end{aligned}$$

где x – объем потребления составного блага,

l^c – площадь занимаемой земли (жилища),

s – объем удобств (amenities),

w – заработная плата,

I – доходы от прочей (нетрудовой) деятельности,

r – стоимость аренды.

В работе Roback ссылается на исследования Polinsky и Rubinfeld[CITATION Pol77 \l 1033], которые занимались стоимостной оценкой таких составных частей удобств, как загрязнение. Кроме того, оценки используются в качестве весовых коэффициентов при расчете рейтинга качества жизни (например, у Rosen[CITATION Ros79 \l 1049]).

Соответственно, варьирование уровня заработной и арендной платы позволяет максимизировать полезности во всех рассматриваемых городах. В противном случае у некоторых работников появляется стимул для переезда или смены работы.

В работе Glaeser и Mare [CITATION Gla01 \l 1033] отмечается, что средний уровень заработной платы в городах с численностью населения свыше 1 млн чел. в среднем на 36% выше, чем в остальных. Combes и др. [CITATION Com08 \l 1033] для Франции показали, что уровень заработной платы в Париже на 15% выше, чем в прочих крупных городах страны, и на 60% выше, чем в сельской местности. Di Addario и Patacchini в 2008 [CITATION DiA08 \l 1033] показали для Италии, что дополнительные 100 тыс. чел. обеспечивают прирост уровня средней заработной платы в городе на 0.1%.

В России в крупных городах (с населением свыше 500 тыс. чел.) среднемесячная заработная плата по сравнению со всей страной выше в среднем на 25%, а превышение заработных плат в крупных городах над прочими региональными (кроме городов Тюменской области и Ненецкого автономного округа в силу отраслевой специфики регионов) составляет от 12 до 68% [CITATION Сел11 \l 1049].

Neuegmann и др. в работе 2010 года [CITATION Neu10 \l 1033] делают акцент на том, что на уровень заработной платы также влияет ненаблюдаемая мотивация индивида. Города могут привлекать высокомотивированные производительные кадры, если те, в свою очередь, ожидают более высокое вознаграждение или если они отдают предпочтение типичным городским удобствам. В этом случае это приведет к эндогенному перераспределению работников. Если данный эффект не принимать во внимание, то наблюдаемые различия в уровне заработной платы между городами и сельскими районами могут быть неверно истолкованы как чистые эффекты производительности.

Кроме того, городская надбавка к заработной плате различна для разных категорий работников. В работе 2001 года [CITATION Gla01 \l 1049] Glaeser и Mare показали, что для коренных жителей городов она составляет около 17%, а для приезжих – около 8% в первый год и около 12% в последующие 5 лет (по сравнению с уровнем заработной платы в сельской местности). Подразумевается резкое повышение производительности труда при переезде, однако его недостаточно для того, чтобы приезжий мог мгновенно догнать коренного жителя по уровню заработной платы. Кроме того, авторы отдельно отмечают, что в случае переезда из города обратно в сельскую местность городская надбавка к заработной плате полностью не пропадает [CITATION Gla01 \l 1049].

5. Рынок жилья

Данный механизм позволяет проводить оценку уровня ввода и высвобождения жилья в городе на основе данных о перемещении индивидов и более реалистично моделировать рынок недвижимости, поскольку по данным Национального агентства финансовых исследований только 10% населения страны арендуют жилье [CITATION Наз19 \l 1049].

В модели Allen и Arkolakis [CITATION All15 \l 1033] весь жилой и коммерческий фонд сдается в аренду. Рента распределяется в виде дополнительного дохода пропорционально заработной плате между всеми агентами в городе. Аналогичным образом организован рынок жилья и в работе Desmet и др. [CITATION Des15 \l 1033]:

$$Income = w_{tr} + \frac{R_{tr}}{\dot{L}_{tr}}, \quad (2)$$

где w_{tr} – уровень заработной платы в городе g в период времени t ,

R_{tr} – сумма всех арендных плат в городе,

\dot{L}_{tr} – численность населения.

Таким образом, итоговый доход агента составляют его заработная плата и часть совокупной ренты.

В базовой версии имитационной модели весь жилой и коммерческий фонд сдается в аренду аналогично модели Allen и Arkolakis, однако структура доходов населения формируется согласно статистическим данным на уровне регионов [CITATION ЕМИ18 \l 1049], поэтому по примеру Hsieh и Moretti [CITATION Hsi17 \l 1049] предполагается, что и жилой фонд, и земля, на которой располагаются предприятия, принадлежат не присутствующему в модели внешнему арендодателю.

6. Влияние людности городов на возможность переезда

Механизм позволяет установить естественное ограничение на максимальный размер городов для того, чтобы исключить случаи, при которых население нереалистично концентрируется в небольшом числе крупнейших городов страны.

Согласно Duranton и Puga [CITATION Dur13 \l 1033], в стандартной моноцентрической модели города строительная индустрия может застраивать любое количество земли по цене R , определяемой ее наилучшим альтернативным использованием, поскольку предложение эластично. Кроме того, могут перестраиваться и уплотняться уже застроенные области и районы, тем самым увеличивая или уменьшая плотность застройки. При наступлении положительных шоков (например, производительности труда) возрастает средняя заработная плата, что делает город еще более привлекательным, в результате чего его население растет.

Для размещения новоприбывшего населения необходимо построить новое жилье, за которым следует повсеместное повышение цен на землю и жилье, чтобы превзойти выгоду от альтернативных способов использования земли, например, сельского хозяйства.

В действительности же предложение земли не является полностью эластичным. Оно ограничено как с точки зрения географии, так и с точки зрения норм землепользования. В качестве примера можно рассмотреть случай, когда предложение земли совершенно неэластично (например, город окружен горами). Положительный шок производительности все еще будет увеличивать заработную плату и делать город более привлекательным. Тем не менее, при неэластичном предложении земли единственный способ разместить растущее население - увеличение плотности. По сравнению со случаем эластичного предложения земли арендная плата за землю будет увеличиваться равномерно по всему городу, что будет в значительной степени сдерживать рост населения.

В действительности аналогом естественного ограничения границ города являются нормы землепользования, за счет ужесточения и смягчения которых можно регулировать скорость роста города и цены на жилье. Иными словами, в растущих городах будет ожидать значительный прирост населения при мягких ограничениях и значительный рост заработной платы и цен на жилье при жестких.

7. Влияние изменений транспортной инфраструктуры на распределение населения в пространстве

Состояние транспортной сети и высокая стоимость поездок способны в значительной степени ограничивать рост маятниковых и перманентных перемещений индивидов [CITATION Мои04 \l 1049]. Для оценки степени влияния улучшения транспортной инфраструктуры на динамику перераспределения населения необходимо ввести в модель соответствующий механизм.

Модель моноцентрического города подтверждает, что развитие инфраструктуры способствует росту численности населения в городе [CITATION Dur13 \l 1049]. Рассмотрим локальное улучшение транспортной сферы, которое снижает транспортные издержки τ в одном конкретном городе в большой городской системе. Из уравнения (21) следует, что сокращение затрат на проезд увеличивает население этого города на величину эластичности:

$$v(c(\underline{R} + \tau N), w) = \dot{v}, \tag{2}$$

1)

где v – полезность индивида¹⁰,

$c(\underline{R} + \tau N)$ – стоимость строительства единицы жилья в центре города,

\underline{R} – величина ренты при альтернативном использовании земли застройщиком,

¹⁰ Более подробно см. исследование Duranton и Puga [CITATION Dur13 \l 1049].

τ – транспортные издержки,

N – численность населения,

w – заработная плата.

В работе Waddell[CITATION Wad00 \l 1033] можно встретить такой термин, как «доступность» той или иной области. Доступность считается нормальным благом, как и другие положительные характеристики города проживания. Поэтому ожидается, что индивид ценит доступ к местам работы и досуга среди многих других характеристик, которые он учитывает при выборе места жительства. При этом не все индивиды ценят доступность одинаково: например, пенсионеры будут менее заинтересованы в высокой доступности рабочих мест. Доступность рассчитывается следующим образом:

$$Access_i = \sum_j A_j \exp(\beta L_{ij}), \quad (2)$$

где A_j – объем предоставляемых услуг в области j ,

β – параметр масштабирования (используется для повышения/понижения ценности более доступных мест назначения, позволяя таким образом варьировать масштаб доступности),

L_{ij} – расстояние от i до j .

3.1.2 Механизмы поведения фирм

1. Естественное перераспределение компаний в пространстве

Согласно поведенческой теории фирм, размер фирмы является одним из ключевых факторов, влияющих на возможность ее переезда, потому что транспортные издержки и организационные проблемы, связанные с перемещением, для крупных фирм весьма значительны[CITATION Van00 \l 1033].

В исследовании 2004 г. Brouwer и др.[CITATION Bro04 \l 1049] выдвигают ряд гипотез о склонности крупных (с численностью сотрудников более 200 чел.) и малых фирм к переезду:

1 Мобильность фирм снижается по мере их роста. Мелкие фирмы более расположены к переездам, поскольку они менее требовательны к занимаемым площадям и чаще всего проводят серию небольших корректировок своего местоположения (переезд в соседнее помещение или на соседнюю улицу), в то время как крупные фирмы переезжают основательно и очень редко. Кроме того, мелкие фирмы чаще страдают от реконструкций и перепланировок. Дополнительным аргументом служит также то, что крупным фирмам значительно

проще расширять уже имеющиеся площади, нежели полностью перемещать производство.

2 Мобильность фирм снижается с возрастом. Согласно теории размещения производства, с возрастом фирмы становятся более тесно связаны с окружающей средой, они сильнее прочих вовлечены в долгосрочные установившиеся взаимоотношения с партнерами, укреплению которых чаще всего способствует пространственная близость.

3 Фирмы, обслуживающие более крупные рынки, более мобильны. Неоклассическая теория выделяет местоположение рынка, на котором оперирует фирма, в качестве ключевого фактора при принятии решения о переезде. Фирмы, которые в большей степени ориентированы на экспорт и обладают значительно более широкими пространственными связями с клиентами, более мобильны.

4 Рост (как и падение), слияния, поглощения и т.п. стимулируют переезд фирм. Фирмам, которые находятся в стадии роста или падения необходимо искать новые пути развития. Поглощения и слияния же являются альтернативами непосредственному переезду, поскольку они обеспечивают более быстрый и менее рискованный рост.

Pellenbarg и др. [CITATION Pel02 \l 1033] в качестве основной внутренней причины переезда фирм выделяют нехватку пространства для физического расширения на текущем месте, которая становится тем сильнее, чем крупнее и старше фирма. В качестве внешних – ограниченную доступность фирмы для клиентов и поставщиков, устаревание основных фондов, экологические проблемы, ограниченное предложение рабочей силы и высокие издержки на размещение (арендная плата, коммунальные услуги и т.д.).

Решение о перемещении деятельности может быть замоделировано с помощью логистической модели (1), связывающей вероятность переезда фирмы с набором объясняющих переменных x_i [CITATION Oli15 \l 56] . Вероятность переезда в таком случае (1 для переезда, 0 в противном случае) может быть представлена функцией вида:

$$F(\beta x_i) = \frac{\exp \beta x_i}{1 + \exp \beta x_i}, \quad (23)$$

где β – вектор коэффициентов при объясняющих переменных.

2. Агломерационные эффекты (более производительные фирмы в крупных городах)

Теория агломерационных эффектов основана на предпосылке, что стремление к пространственной концентрации обусловлено наличием положительных внешних

эффектов, которые возникают в результате «уплотнения» экономической деятельности и которые способствуют повышению эффективности фирм [CITATION Gra05 \l 1049], соответственно, фирмы и работники в среднем более производительны в крупных городах [CITATION Com10 \l 1033]. Оценки величины этого эффекта варьируются: в различных источниках отмечается увеличение производительности от 2 до 7% при удвоении размера города (для городов с различной изначальной численностью) в зависимости от сектора и особенностей процедуры оценки (см., например, исследование Rosenthal и Strange [CITATION Ros04 \l 1033], обзоры Graham [CITATION Gra05 \l 1033], Melo и др. [CITATION Mel09 \l 1033]).

В частности, в исследовании Melo и др. [CITATION Mel09 \l 1033] был проведен мета-анализ 32 работ, включающих в себя оценки более 700 эластичностей за период с 1965 по 2002 гг. (в большинстве случаев для производственного сектора). Агломерационные эффекты значительно сильнее выражены для сферы услуг по сравнению с производством (выше в среднем на 8 п.п.), а эластичность заработной платы в среднем меньше эластичности производительности труда.

В России агломерационные эффекты оказываются сильнее, чем в западных странах: при удвоении размера города производительность фирм возрастает на 8-10% [CITATION Гор17 \l 1049].

3. Влияние изменений транспортной инфраструктуры на распределение предприятий в пространстве

Данный механизм используется для оценки влияния изменения транспортной инфраструктуры на склонность переезда фирм, в результате чего происходит в том числе и перераспределение населения в пространстве. С его помощью также можно проводить анализ эффективности конкретных инфраструктурных проектов.

Согласно данным опросов Cushman & Wakefield, среди ключевых факторов при принятии решения о переезде для фирм далеко не последнее место занимают транспортные связи с другими городами и странами.

На основе данных опросов предпринимателей о привлекательности отдельных городов для расположения в них фирм Bruinsma и Rietveld [CITATION Bru97 \l 1033] оценили вклад отдельных характеристик 67 городов (в том числе их включенности в транспортную сеть) в их совокупную привлекательность для бизнеса¹¹:

¹¹ Предпринимателям был задан следующий вопрос «Если бы (независимо от причин) вашей фирме было бы необходимо переехать, как бы вы оценили следующие города по шкале от 1 до 5?», где 1 - «фирма точно не переехала бы», а 5 - «фирма однозначно переехала бы». Итоговый показатель пересчитывался от 0 до 100.

$$y_n = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1n} + \alpha_2 x_{2n} + \alpha_3 x_{3n} + \alpha_4 x_{4n} + \alpha_5 x_{5n} + \alpha_6 x_{6n}, \quad (2)$$

4)

где y_n – привлекательность города для переезда фирмы,
 x_{1n} – степень центральности (доступности) города n ¹²,
 x_{2n} – численность населения,
 x_{3n} – уровень безработицы,
 x_{4n} – стоимость м² коммерческой площади,
 x_{5n} – величина субсидирования процентной ставки на реализацию новых инвестиционных проектов,
 x_{6n} – уровень преступности в городе¹³.

Влияние местоположения города в дорожной сети на оценку городов как мест расположения фирм значительно: увеличение на 1 п. степени центральности означает увеличение привлекательности города на 0.51 п. из 100 (рост численности населения города на 100 000 жителей предполагает увеличение данного показателя на 3.9 п.).

4. Негативные экологические эффекты со стороны компаний

Поскольку экология входит в набор городских удобств (amenities), ее улучшение или ухудшение оказывает непосредственное воздействие на склонность индивидов к смене места жительства. С помощью данного механизма можно оценить вклад экологического загрязнения в динамику численности населения, в частности в крупных промышленных городах.

Помимо экономических потерь, загрязнение экологии оказывает непропорциональное воздействие на малообеспеченные слои населения. Бедные с большей вероятностью будут жить и работать в загрязненной среде, поскольку они в меньшей степени способны избежать негативного воздействия (например, сменив место жительства)[CITATION The16 \l 1049].

Общий тезис подтверждается в работе Chen и др.[CITATION Che17 \l 1033]: увеличение уровня загрязнения воздуха на определенной территории на 10% приводит к сокращению населения за счет чистой эмиграции примерно на 2.8%. При этом среди выезжающих в основном оказываются люди с высшим образованием в начале их

12 Показатель рассчитывается из гравитационной модели $y_i = \frac{P_i}{r_i^c} + \sum_{j \neq i} \frac{P_j}{R_{ij}}$, где P_i – численность населения города i , r_i^c – среднее время в пути внутри города, R_{ij} – время в пути до города j . Время в пути рассчитывается только по сети автомобильных дорог.

13 Исследование проводилось на основе данных о фирмах, расположенных в Дании.

профессиональной карьеры, что в итоге приводит к существенным изменениям в социально-демографическом составе населения и рабочей силы в стране. Для оценки степени влияния загрязнения воздуха на миграцию населения использовалась следующая модель¹⁴:

$$M_{ct} = \beta_0 + \beta_1 P_{ct} + f(W_{ct}) + \gamma_c + \sigma_t + \epsilon_{ct} \quad (2)$$

$$P_{ct} = \alpha_0 + \alpha_1 T I_{ct} + f(W_{ct}) + \gamma_c + \sigma_t + \mu_{ct} \quad (5)$$

где M_{ct} – чистая эмиграция из города c в период t ,

P_{ct} – усредненная за 5 лет концентрация частиц PM2.5,

$T I_{ct}$ – усредненная степень температурной инверсии (разница температур на поверхности и над землей),

W_{ct} – вектор погодных условий,

γ_c – фиксированные эффекты на регион,

σ_t – фиксированные эффекты на временной период.

Авторы отмечают, что 10% снижение уровня частиц PM2.5 приводит к росту населения на 1.7 чел./100 чел.

Соответственно, урон, наносимый здоровью людей, оказывает длительное воздействие в том числе и на уровень производительности в городе, совокупный выпуск, вместе с тем снижается качество городских удобств.

Однако не только уровень загрязнения влияет на численность населения в городе, но и наоборот. В зависимости от типа рассматриваемого вещества, эластичность уровня загрязнения по численности населения составляет 0.26-0.46 [CITATION Cra02 \l 1033].

3.1.3 Технические параметры имитационной пространственной модели

Для проработки описанных выше механизмов и связей была протестирована более простая версия модели, рассчитанная только для 5 городов с искусственной численностью населения и рядом упрощений. Затем после выявления и исправления неточностей построения была сформирована расширенная модель, включающая в себя 237 городов¹⁵. В таблице приведены основные параметры модели для определения начального состояния. Начальное состояние – нулевой шаг модели, на котором агентам присваиваются все

¹⁴ В модели рассматривается 5 временных периодов: 1996-2000 гг., 2001-2005 гг., 2006-2010 гг.

¹⁵ Выбор городов обусловлен доступностью необходимых статистических данных. Значительно сокращает объем выборки такой показатель, как «стоимость жилой арендной платы», поскольку ни прямо, ни косвенно на уровне городов не рассчитывается официальными источниками (например, Росстатом).

необходимые характеристики и прописываются функциональные взаимосвязи для дальнейшего продвижения по модели.

Таблица 2 – Начальные параметры модели

Название параметра	Значение в тестовой модели	Значение в расширенной модели
Набор случайных чисел для генерации прогонов ¹⁶ , шт.	20	15–20
Стартовая численность индивидов в модели	2 500	Размер случайной выборки с заданной вероятностью — масштабом модели, принята за 1 к 1000, из численности населения в возрасте от 20 до 70 лет выбранных городов на 1 января 2014 год
Стартовое число фирм в модели	Рассчитывается из соотношения 50 человек - 1 фирма, то есть всего фирм 50	Получается исходя из распределения заданного числа занятых жителей города по выборке с повторениями фирм, зарегистрированных в городе, из данных бухгалтерской отчетности, с тем чтобы совокупной выручки фирм было достаточно для оплаты труда работников и связанных с их числом прочих расходов.
Минимальный и максимальный возраст индивидов	20 и 69. То есть жители появляются в модели в возрасте 20 лет и выбывают из нее, когда им исполняется 70	
Разброс (стандартное отклонение) доходов индивидов (ставок вакансий)	Усеченное нормальное распределение (измеряется в тысячах руб.) Среднее значение берется из реальных показателей зарплат с поправкой на долю зарплат в доходах для тестовой модели и из данных о денежных доходах на одного занятого — для расширенной модели, минимум — уровень цен в городе, который изначально равен фактическим данным о прожиточном минимуме в субъекте Федерации	
Доля зарплаты индивидов в их доходах	Принята за 2/3 на основе данных Росстата [СИТАЦИОН Дол17 \1 1049]. В БДМО Росстата есть дробная статистика о зарплатах - показатель «Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников крупных, средних предприятий и некоммерческих организаций»), но нет информации о доходах, отсюда поправка — мы полагаем, что в модели заработная плата является единственным источником дохода индивидов.	Не требуется.
Стандартное отклонение потребительских расходов индивидов	Усеченное нормальное распределение (измеряется в тысячах руб.). Среднее полагается равным 60% дохода, устанавливается верхняя граница на эти расходы	
Параметры выручки и размер новых фирм	Усеченное нормальное распределение. Среднее и стандартное отклонение принимались за 2 000 (в тысячах), минимум выручки у новой фирмы 30 (в тысячах) ¹⁷	Размеры фирм из фактических данных по городам как случайная выборка с повторением.
Параметры изменения выручки	Нормальное распределение с параметрами (0, 0.05). Эти значения следует воспринимать как параметры множителя выручки на шаге $t - 1$, так как выручка на шаге t равна сумме логарифма выручки $t - 1$ и сгенерированной из нормального распределения с указанными параметрами случайной величины	
Ставка налога на прибыль	20%	

16 Построенная модель является стохастической, поэтому важную роль играет формирование набора случайных чисел для генерации прогонов, отличающихся для различных вариантов выборки случайных чисел из распределений. В данном случае набор случайных чисел означает количество уникальных прогонов модели.

17 Прикладные работы указывают на распределение размера фирм по степенному закону, но попытки следовать такому распределению демонстрировали неудачный разброс: создается множество мелких фирм и, возможно (не всегда), одна очень крупная. По всей вероятности, в тестовой модели это происходит из-за малого стартового числа фирм.

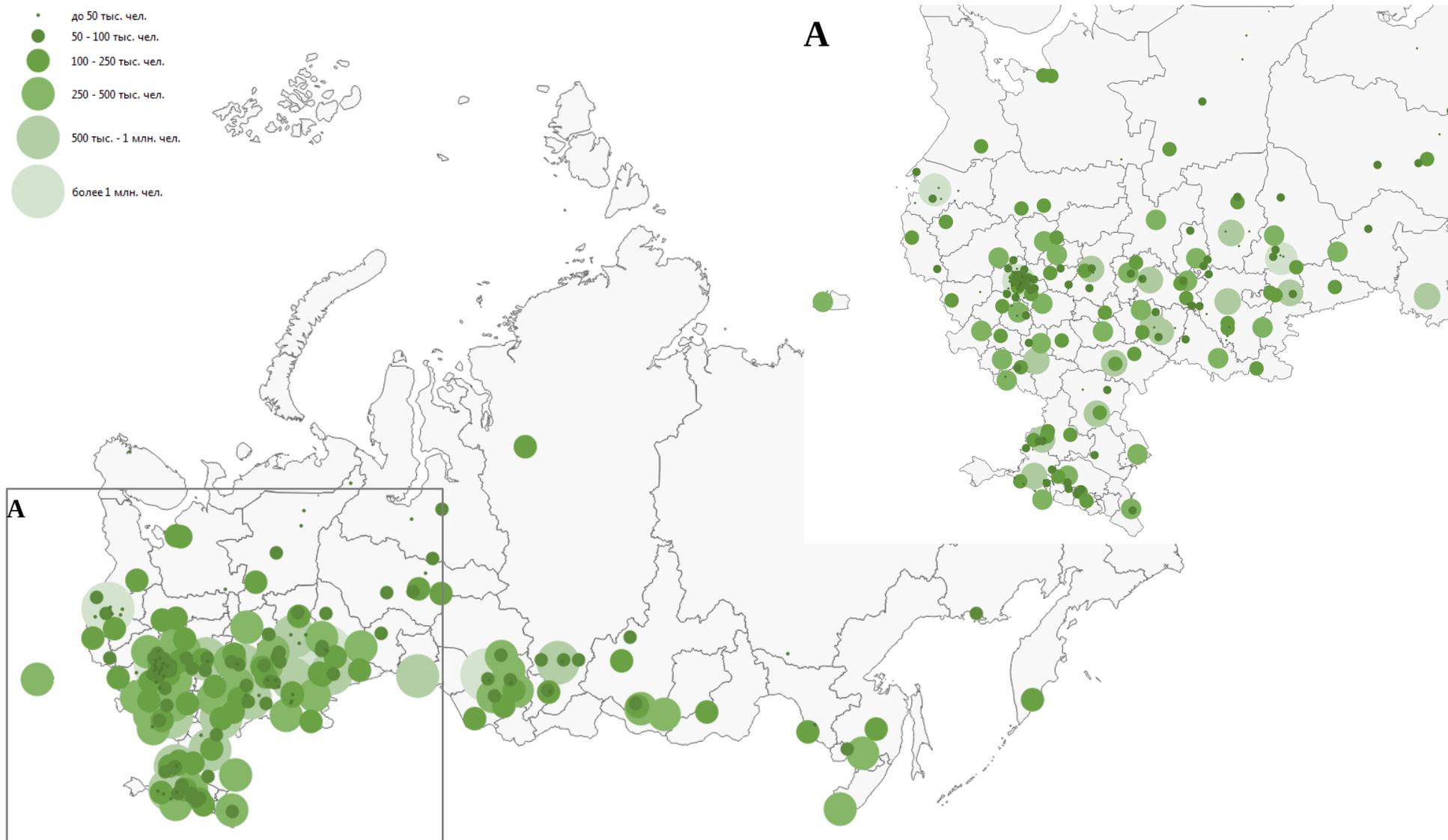
Название параметра	Значение в тестовой модели	Значение в расширенной модели
Минимальная доля численности работников одной фирмы в совокупной занятости в городе, чтобы фирма могла считаться градообразующим предприятием (с особым поведением в модели)	0.2 (согласно п.2 критериев отнесения муниципальных образований Российской Федерации к монопрофильным (моногородам) постановления Правительства Российской Федерации от 29 июля 2014 г. N 709[CITATION Пос141 \l 1049])	
Срок, в течение которого фирма существует без работников	5 месяцев ¹⁸	
Параметры, которые определяют отнесение индивидов к категории «богатых»	Превышение располагаемого дохода (за вычетом расходов на поездки и арендной платы) над уровнем цен в 2 раза и равенство сбережений уровню цен; за уровень цен изначально принимается ставка на душу населения прожиточного минимума в субъекте, далее она меняется вслед за изменением численности населения в городе	
Срок, на который должны быть деньги на оплату жилья в новом месте у человека, решившегося на переезд	1 месяц	
Срок, в течение которого человек не рассматривает переезд в новое место	3 месяца	
Максимальное пороговое значение времени в пути для поездок индивидов на работу без смены места жительства	150 мин. в одном направлении	
Функция распределения «рождаемости» фирм в городах	Биномиальное распределение $B(0.1, n)$, где n — число фирм в городе ¹⁹	
Максимальная доля сотрудников, которые фирма готова сократить за раз (в месяц)	0.5	
Срок «жизни» (действительности) вакансии	2 месяца	
Показатель степени, который отражает зависимость дохода от людности города	2.25, получен из оценки простой регрессии средней зарплаты по логарифму людности по данным «Мультистата» за 2012–2013 гг.[CITATION Эко13 \l 1049]	
Показатель степени, который отражает зависимость арендной платы (за жилье) от людности города	Оценки простой регрессии средней величины арендной платы по логарифму людности по данным сайта domofond.ru за 2014 г.[CITATION Про14 \l 1033]	
Общее число итераций модели	48 месяцев, начало — произвольный день 4 января 2019 г. Шаг модели — 1 календарный месяц.	Начало – 01.01.2014 Шаг модели — 1 календарный месяц. Общее число шагов — 48

Примечание - источник: составлено авторами.

В расширенную модель включены 237 городов (от миллионников до самых небольших), расположенных в 76 субъектах Российской Федерации (см. рисунок).
Временной период моделирования – с января 2014 г. по январь 2018.

¹⁸ Общий регламент предписывает прохождение ряда этапов, общая длительность которых, согласно устоявшейся практике, составляет около 6 месяцев[CITATION Сро19 \l 1049].

¹⁹ Используется дискретное распределение, а не простой множитель, так как из-за округления при следовании второму подходу в городах с малым числом фирм новые не будут появляться.



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 2 – Города, включенные в расширенную модель

Последовательность действий на каждом шаге строго зафиксирована: сначала обновляется информация о фирмах (динамика прибыли, создание и ликвидация, сокращение штата и т.д.), затем информация о жителях (сокращение и поиск работы, смерть и рождение, переезд). На основе полученной информации обновляется общая статистика по городам и в целом по модели, после чего начинается следующий шаг – до тех пор, пока не будет достигнут последний. Более подробно принципы работы модели в рамках одного модельного шага описан в таблице .

Таблица 3 – Поэтапное описание действий в рамках одного модельного шага

№	Название этапа	Описание
1	Обновление текущей даты	К текущей дате прибавляется один календарный месяц
2	Ликвидация фирм без сотрудников	В случае, если численность сотрудников фирмы нулевая в течение 0-4 месяцев и ее нераспределенная прибыль ≤ 0 , то время простоя без работников увеличивается на 1 месяц. Если численность сотрудников фирмы нулевая в течение 5 месяцев (критическое значение), то фирма ликвидируется и исключается из таблицы фирм.
3	Определение расходов фирм на шаге $t - 1$	Для каждой фирмы происходит обновление численности сотрудников и рассчитывается фонд оплаты труда как сумма их заработных плат; также обновляются расходы фирмы на аренду, при этом используется ставка арендной платы, полученной на прошлом шаге. Обновляется статус фирмы (является ли она градообразующей). Обновляется выручка согласно указанному ранее подходу (см. таблицу), а для фирм, в которых нет сотрудников, устанавливается нулевой объем выручки ²⁰ . Прибыль до налогообложения рассчитывается с использованием ставки налога на прибыль (если прибыль до налогообложения не положительна, то налог не взимается). Таким образом, получена чистая прибыль (убыток), которая для убыточных градообразующих предприятий обращается в ноль за счет механизма субсидирования государством градообразующих предприятий ²¹ . Происходит переоценка нераспределенной прибыли (сбережений фирм) по формуле «сбережения + чистая прибыль (убыток)».
4	Создание новых фирм	В каждом городе фирмы возникают в соответствии с правилами, указанными в таблице . Из описанного выше усеченного нормального распределения берется начальный объем выручки фирмы, прибыль приравнивается к выручке, сбережения полагаются нулевыми, параметр времени без работников — 0 мес.
5	Закрытие старых вакансий	Вакансии закрываются как невостребованные в случае, если с момента их открытия прошло больше соответствующего критического значения (2 мес.).

²⁰ Предполагается, что в каждом периоде фирма реализует произведенную продукцию в полном объеме и без работников не может генерировать выпуск.

²¹ При этом как таковой «счет государства» в модели отсутствует и предполагается бесконечным.

№	Название этапа	Описание
6	Открытие новых вакансий	Фирмы не открывают новых вакансий, пока не найдут работников по старым или пока старые вакансии не утратят актуальность. Вакансии могут быть открыты только в фирмах с положительными прибылью и уровнем сбережений (нераспределенной прибыли). Уровень оплаты труда для вакансии генерируется из усеченного нормального распределения, задаваемого формулой (10). Максимальное число новых вакансий ограничено пороговым значением, которое определяется как частное от деления прибыли после уплаты налога на сумму мат. ожидания зарплаты в городе и коммерческой ставки арендной платы (при этом учитывается удорожание арендной платы после потенциального увеличения штата) ²² . Если число открытых вакансий превышает пороговое значение, фирма последовательно отказывается от одной случайной вакансии до тех пор, пока сумма ставок всех вакансий не станет приемлемой. Для каждой вакансии определяется квантиль ставки ее зарплаты ²³ , присваивается дата, все вакансии (новые и старые) объединяются в один пул.
7	Оптимизация расходов фирм за счет сокращения штата	В начале происходит идентификация сотрудников со сбережениями меньше нуля, они собираются в коллекцию, далее из нее исключаются те сотрудники, которым на следующем шаге моделирования исполнится 70 лет (таким образом не учитываются те, кто и так покинет модель по причине достижения максимального возраста пребывания в ней). Из оставшихся в коллекции работников случайно формируется очередь на увольнение (вероятность быть уволенным одинакова для всех сотрудников и не зависит от уровня заработной платы). Затем рассчитывается величина фонда оплаты труда для каждого набора остающихся сотрудников (исходя из порядка на увольнение), при этом общее число уволенных не может превышать критическое значение (50% штата). Также для каждого набора рассчитывается величина будущих арендных платежей. В итоге исключаются все неприбыльные варианты, из оставшихся выбирается наиболее прибыльный. Фирмы, которые не могут выйти в зону положительной чистой прибыли не превышая ограничение на долю единовременно увольняемых сотрудников, закрывают месяц с отрицательным балансом; убыточные фирмы, в которых на момент начала процедуры оптимизации расходов был всего один работник, увольняют его. В таблице атрибутов у уволенных работников устанавливается нулевой доход, нулевые расходы, вычеркивается указание на место и город работы.
8	Старение людей	Увеличивается возраст на 1 шаг модели. Индивиды, которым исполнилось 70 лет, удаляются из модели, а также обновляется коэффициент заработной платы $salar y_{coef}$ в формуле (11) и их производительность с учетом нового возраста.
9	Рождение людей	Интенсивность появления новых индивидов в модели задается аналогично интенсивности появления фирм – через биномиальное распределение, только в качестве вероятности используется уровень рождаемости в городе (в тестовой модели) или реальные данные о численности жителей в возрасте 19, 18 и т. д. до 0 лет. Новым индивидам присваивается минимальный модельный возраст, исходя из которого рассчитывается возрастной коэффициент зарплаты $salar y_{coef}$ по формуле (11). Квантиль итогового коэффициента принимается за уровень производительности. У появившегося человека нулевой уровень заработной платы (т.к. он только выходит на рынок труда), сбережений, расходов на поездки (т.к. он безработный), потребительские расходы находятся на уровне прожиточного минимума.

²² Из-за случайной генерации ставок вакансий фирма может как превысить величину текущей прибыли (т.е. сумма расходов с учетом доп. рентных платежей окажется выше), так и не полностью ее израсходовать. Второе приемлемо и дополнительно не корректируется.

²³ Это необходимо, чтобы учесть разные коэффициенты производительности у работников и, соответственно, разные требования соответствия вакансиям.

№	Название этапа	Описание
1 0	Люди принимают решение о переезде	Для начала необходимо определить статус человека («бедный», «богатый», «средний класс»), поскольку предполагается, что бедные не имеют финансовой возможности переезжать. Также не переезжают те индивиды, которые недавно уже меняли свое место жительства. Сперва индивид рассматривает возможность переезда без смены места работы, т.е. в границах маятниковой миграции (границы зоны маятниковой миграции приведены в таблице). Происходит сравнение ожидаемых (средних) зарплат, расходов на ежедневные поездки и фиксированных издержек на переезд ²⁴ . В случае, если совокупные расходы по итогам сравнения окажутся ниже в другом городе, индивидом будет принято решение переехать, в результате чего он понесет указанные выше фиксированные издержки на переезд. У переехавших индивидов изменяются расходы на аренду жилья и уровень цен (при переезде в другой субъект). Если в зоне маятниковой миграции индивид не нашел более привлекательного места жительства, он рассматривает варианты за ее пределами (подобный переезд предполагает смену места работы). Принятие решения о переезде происходит по тем же правилам, что и для переезда в зону маятниковой миграции ²⁵ . Дополнительно у переехавших на большее расстояние индивидов изменяется ожидание зарплаты (средний уровень в новом городе) и указание на место и город работы (становится временно безработным), обнуляется заработная плата.
11	Люди ищут работу	Каждому безработному, исходя из того, в каком городе он проживает, ставятся в соответствие возможные города с открытыми вакансиями (по границе зоны маятниковой миграции). Из пула всех вакансий удаляются те, у которых требования к производительности труда слишком высоки для соискателя. Затем начинается этап борьбы за вакансии начиная с наиболее высокооплачиваемой, при этом если на одну вакансию претендует несколько соискателей, ее получит индивид с наибольшей производительностью. Столкновения между соискателями продолжаются до тех пор, пока не закончатся вакансии или все безработные не будут трудоустроены. Замещенные вакансии удаляются из таблицы вакансий, в таблице с атрибутами жителей происходит обновление (изменяется фирма и город работы, доход, расходы на поездки у вновь устроившихся). Аналогичным образом обновляются данные по фирмам: их штат и фонд оплаты труда.
1 2	Подготовка к следующему шагу обновление таблиц городов	На данном этапе происходит обновление следующих параметров: численность населения, доля бедных, средние расходы на ежедневные поездки, ожидание заработной и арендной платы. Вносятся изменения в таблицу атрибутов людей по обновленным данным таблицы городов, по городам пересчитывается уровень безработицы. Из таблицы фирм для каждого города выводится число предприятий, совокупная численность сотрудников, число градообразующих предприятий, валовый городской продукт (сумма выручек фирм). Из таблицы вакансий по городам суммируется общее число вакансий. Все изменения заносятся в таблицу учета по городам для разбора и визуализации модели после завершения всех прогонов.
1	Начало нового шага	Цикл повторяется для заданного на старте числа шагов (месяцев). По завершении прогона с одним начальным случайным числом, процесс повторяется для других случайных чисел.

Примечание – источник: составлено авторами.

3.2 Разработка подхода к проведению сценарного анализа с помощью имитационной пространственной модели

Сценарий 1, «Базовый». Предполагает выполнение модели с заданными ранее начальными параметрами, без каких-либо шоков в процессе моделирования. Однако даже в этом случае возможна проверка причин, обуславливающих миграции. Так, проверке подлежит гипотеза о важности качества городской среды в определении мест притяжения

²⁴ Рассчитываются по аналогии со стоимостью ежедневных поездок; для безработных минутная ставка заработной платы высчитывается из уровня средней заработной платы по городу, для занятых — по уровню фактической заработной платы.

²⁵ Дополнительно рассматривались более сложные сценарии переезда, а именно накладывались ограничения на объем сбережений (индивид должен иметь возможность арендовать жилье в период поиска работы), долю бедных жителей и качество городской среды (исключался переезд в более «депрессивные» города). Учет всех этих условий в тестовой модели, однако, был настолько запретительным, что миграционный поток становился нулевым, в результате чего сценарии переезда были упрощены.

мигрантов. Представляет исследовательский интерес также анализ зависимости поведения системы расселения от параметров, связывающих различия в стоимости жилья или доходах, связанные с разной людностью городов, разными их внешними выгодами и издержками.

Сценарий 2, «Повышение транспортной связанности городов». Сценарий предполагает реконструкцию автомобильной дороги между городами Сочи и Туапсе (входит в проект строительства новой скоростной дороги А147 «Джубга-Сочи»). Данный участок пути — весьма медленный. По нашим оценкам средняя скорость движения на этом участке около 42 км/ч. Ускорить сообщение между Сочи и Туапсе могла бы скоростная автомагистраль Сочи — Джубга (119 км) или ее более экономный вариант Сочи — Туапсе (80.5 км). Расчетная скорость движения по такой трассе составляла бы 120 км/ч. Завершение строительства дороги запланировано на 2037 г. Однако так как о необходимости строительства дороги заявления звучат не первый год (начало реконструкции планировалось на 2019 г.[СІТАТІОН Пра192 \ 1049]), можно включить предполагаемое строительство как событие в имитационную модель. Благодаря тому, что Сочи с точки зрения транспортной сети дорог находится в условном тупике, можно пересчитать ожидаемое время движения не только между Сочи и Туапсе, но и между Сочи и другими городами. Для этого было рассчитано новое время в пути как отношение длины новой дорожной связи (80.5 км) и ожидаемой скорости движения (120 км / ч), а после посчитана разность оценок времени поездки между Сочи и другими городами и нынешнего времени поездки между Сочи и Туапсе. Полученное значение затем увеличивалось на ожидаемое после строительства скоростной дороги. Ожидается, что вслед за изменением времени в пути снижаются также фиксированные издержки на переезд и, в случае попадания городов в зону маятниковой миграции, индивиды получают возможность искать работу в соседнем городе без смены места жительства.

Сценарий 3, «Закрытие градообразующего предприятия». Особенность устройства российской системы городского расселения — множество моногородов, жизнь которых зависит от устойчивости работы градообразующего предприятия. Даже без указания отраслевой специфики возможно рассмотрение сценария, в котором в каком-либо городе закрывается градообразующее предприятие. Исследовательский интерес представляет адаптация (особенно ее скорость) системы расселения к такому шоку. Для сценария, разрабатываемого на реальных данных, из перечня моногородов, утвержденного распоряжением правительства РФ от 29 июля 2014 года № 1398-р, были отобраны 6 городов: Кумертау (Республика Башкортостан), Черногорск (Республика Хакасия) и Каспийск (Республика Дагестан) — моногорода с наиболее сложным социально-экономическим положением, а также Алексин (Тульская область), Димитровград (Ульяновская область) и

Златоуст (Челябинская область). Отбор этих городов связан прежде всего с устойчивостью существования в них градообразующего предприятия в базовом сценарии. Ожидается, что в результате закрытия градообразующего предприятия в краткосрочном периоде возрастет безработица и доля населения за чертой бедности, однако эффект быстро угаснет, т.к. малоимущие жители в короткие сроки смогут найти себе новую работу, поскольку предложение вакансий превышает спрос. Предприятия²⁶ закрываются в 2015 г.

3.3 Описание базы данных и формирование набора сценариев для проведения анализа с помощью имитационной пространственной модели

3.3 Описание базы данных и формирование набора сценариев для проведения анализа с помощью имитационной пространственной модели

Для задания начального состояния модели и ее калибровки были собраны такие показатели:

- из статистического бюллетеня «Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям» за 2012–2019 гг. — численность постоянного населения на 1 января года [CITATION Чис19 \l 1049];

- из базы данных показателей муниципальных образований (БД ПМО) муниципальных районов, городских округов, в частности городских округов с внутригородским делением, межселенных территорий, городских и сельских поселений, внутригородских районов, внутригородских территорий городов федерального значения, а также муниципальных образований субъекта Российской Федерации в целом [CITATION Баз19 \l 1049]:

- 1 общий коэффициент рождаемости и смертности в промилле в каждый год отрезка 2006–2018 гг. для муниципальных образований всех субъектов Российской Федерации, за исключением города федерального значения Севастополя;

- 2 среднемесячная зарплата работников организаций (без субъектов малого предпринимательства, для Самарской области — оперативные данные) в рублях по видам деятельности ОКВЭД в каждый год отрезка 2006–2016 гг. (то есть до введения ОКВЭД-2 с 2017 г.) для муниципальных образований всех субъектов Федерации, за исключением республик Ингушетия и Мордовия, а также города федерального значения Севастополя;

- 3 численность городского населения по полу и возрасту на 1 января текущего года (человек) за каждый год отрезка 2006–2018 гг. для муниципальных образований всех

²⁶ В каждом городе закрывается по одной фирме. Если в городе несколько фирм, выбирается случайная.

субъектов Федерации, за исключением Республики Ингушетия и городов федерального значения Москвы, Санкт-Петербурга и Севастополя;

4 миграционный прирост (число человек) (с 2011 г. показатель учитывает и мигрантов временной регистрации²⁷) за каждый год отрезка 2006–2018 гг. для муниципальных образований всех субъектов Федерации, за исключением городов федерального значения Москвы, Санкт-Петербурга и Севастополя, а также Забайкальского края и Республики Хакасия;

- из Единой межведомственной информационно-статистической системы для субъектов Российской Федерации [CITATION Еди19 \l 1049]:

1 размер денежных доходов населения²⁸ в тысячах рублей за каждый год с 2013 г. по 2017 г.;

2 среднегодовая численность занятых в экономике (расчеты на основе интеграции данных) за каждый год отрезка с 2012 г. по 2018 г. с делением по видам экономической деятельности (без корректировки на смену ОКВЭД);

3 коэффициент рождаемости организаций в промилле за каждый год с 2005 г. по 2018 г. с делением по видам экономической деятельности (без корректировки на смену ОКВЭД), месяцам или отрезкам с начала года;

4 уровень безработицы по методологии Международной организации труда с 2000 по 2018 гг. с делением по кварталам в возрасте 15 лет и старше и в возрасте 15–72 лет (именно уровень безработицы в возрасте 15–72 лет использовался для задания начального состояния в реализованных имитационных моделях);

5 структура численности постоянного населения на начало года на 1 января по полу и возрастным группам за каждый год 2012–2017 гг. и 2019 г.²⁹;

6 величина прожиточного минимума по группам населения и периодам за каждый год с 1992 г. по 2019 г.³⁰;

- из итоговых таблиц сплошного наблюдения за деятельностью субъектов малого и среднего предпринимательства за 2015 г. [CITATION Спл15 \l 1049]:

1 плата за арендуемые помещения юридических лиц по субъектам Российской Федерации в 2015 г. (млн рублей);

27 Пометка об этом была только на страницах базы данных показателей муниципальных образований для Республики Адыгея.

28 В ЕМИСС показатель называется «Размер и состав денежных доходов и расходов населения», однако никаких сведений о расходах и даже о составе доходов соответственная таблица не содержит.

29 2018 г. в таблице на портале ЕМИСС не был представлен.

30 В 1992–1993 гг. прожиточный минимум только для страны в целом.

- 2 расходы на сырье, топливо, энергию и пр., аренду машин и площадей;
- 3 число замещенных рабочих мест (тысяч);
- с сайта «Домофонд» — цена аренды жилья по городам с декабря 2013 г. по сентябрь 2019 г. ежемесячно [CITATION Про14 \l 1033];
- из официальной статистики Росстата — средняя начисленная заработная плата работников по обследованным видам экономической деятельности по возрастным группам;
- из массивов открытых данных Федеральной службы государственной статистики — бухгалтерская (финансовая) отчетность предприятий и организаций (различаемым по идентификационному номеру налогоплательщика) за каждый год с 2012 г. по 2017 г. [CITATION Пак19 \l 1049], а именно:
 - 1 тип отчета: 0 — социально ориентированные некоммерческие организации, 1 — малые предприятия, 2 — прочие организации, которые представляют полный отчет (такая разбивка впоследствии использовалась, чтобы проконтролировать, не слишком ли расходится распределение модельное с распределением реальным);
 - 2 выручка в отчетном году (из отчета о финансовых результатах, код строки в современном отчете — 2110);
 - 3 прибыль (убыток) до налогообложения в отчетном году (из отчета о финансовых результатах, код строки в современном отчете — 2300);
 - 4 платежи в связи с оплатой труда работников за отчетный год (из отчета о движении денежных средств, код строки — 4122);
- из открытых данных Федеральной налоговой службы — сведения о среднесписочной численности работников организаций за 2017 г. [CITATION Све19 \l 1049];
- с портала «За честный бизнес» — адреса организаций по их ИНН (только для фирм 2014 г. с ненулевой выручкой) [CITATION ЗАЧ19 \l 1049];
- из OpenStreet Maps [CITATION Оре191 \l 1033]:
 - 1 затраты времени и расстояние между городами;
 - 2 затраты времени на поездку между заданными точками в городе;
 - 3 геометрия линий дорожной сети, полигонов и точек зданий, полигонов городов;
- с портала индекс.дом.рф — оценки качества городской среды с разбивкой на подпоказатели [CITATION Инд16 \l 1049]:
 - 1 жилье и прилегающие пространства;
 - 2 уличная инфраструктура;

- 3 озелененные и водные пространства;
- 4 социально-досуговая инфраструктура и прилегающие пространства;
- 5 общественно-деловая инфраструктура и прилегающие пространства;
- 6 общегородское пространство.

Часть данных, реально примененных для построения имитационной модели, ограничились прежде всего сведениями о стоимости жилья по городам. После поправки на пропуски в других показателях оставалось 236–238 городов (236 — если учитывать сведения о качестве городской среды). Лучше всего заполнены данные по крупным городам. Из-за нехватки данных выпадают также города Республика Крым и город федерального значения Севастополь, а также Якутск, города Сахалинской области и некоторых кавказских республик.

Пропуски каких-либо субъектов Федерации или отдельных муниципальных образований в наборах, взятых из базы данных показателей муниципальных образований, связаны с тем, что в момент обращения или по соответствующим муниципальным образованиям не были доступны данные (соответствующих муниципальных образований не было в списках для выбора), или портал не возвращал таблицы по запросу, или же соответствующие разделы портала были недоступны из-за технических работ. Каждая страница, не возвратившая запрашиваемую таблицу после первого запроса, проверялась впоследствии несколько раз.

Оценки времени в пути между заданными точками по данным OpenStreet Maps получены с помощью пакета `osrm` для языка R [CITATION osr19 \l 1033]. Среднее время поездки оценивалось как среднее арифметическое времени поездки между заданным числом (сотней) случайных 1) зданий или 2) точек дорожной сети населенного пункта. Опора на реальное размещение зданий и конфигурацию дорожной сети гарантирует реальность запрашиваемого маршрута.

Для расчета числа жителей городов в возрасте от 20 до 69 лет (модельные возрасты), использовались сведения о возрастном составе городского населения субъектов Российской Федерации, а равно и муниципальных образований разного уровня. Так как по такой возрастной группе Росстат не сообщает численность населения отдельно, она была рассчитана из доступных сведений по отдельным возрастам.

Полнота заполнения показателей численности постоянного населения в разрезе муниципальных образований убывает по мере роста уровней муниципального деления, то есть у муниципальных районов и городских округов заполнение лучше, чем у городских поселений и тем более сельских поселений. Так как доля жителей в возрасте от 20 до 69 лет — это относительный показатель, его можно перенести с более высокого уровня

территориальной организации на более низкий уровень. Тот же подход был использован для заполнения других относительных показателей из БД ПМО: средней зарплаты работников организаций, общего коэффициента рождаемости и общего коэффициента смертности.

Заметим, что, в то время как численность населения — это неотрицательная величина, миграционный прирост может быть отрицательным. С точки зрения анализа данных это означает, что таблицы по численности постоянного населения — это т. н. композиционные данные, для заполнения которых разработаны эффективные алгоритмы [CITATION Hro10 \l 1033 \m Vu19], в то время как подобное автоматическое заполнение таблиц по миграционному приросту несколько более сложная задача. Миграционный прирост, особенно в пределах России, — это подходящий показатель для создания целевой функции оптимизационного алгоритма. Однако, во-первых, в этом показателе слишком много пропусков, а во-вторых, даже за отрезок в несколько лет и даже для муниципальных образований уровня района или городского округа (а не отдельных населенных пунктов — частей поселений, входящих в муниципальные районы и округа) накопленный миграционный прирост (миграционная убыль) обычно находится в пределах нескольких тысяч человек. Это обстоятельство требует от модели высокого разрешения, то есть моделирования перемещения буквально каждого человека, что может быть запретительно сложным с вычислительной точки зрения и требований к объему необходимой памяти.

Для оценивания ставки нетрудовых расходов фирм в расчете на одного работника использовались данные сплошного наблюдения за деятельностью субъектов малого и среднего предпринимательства за 2015 г., так как за другие годы и для полного перечня организаций более подходящих данных найти не удалось. Искомая ставка получалась путем деления (1) расходов на сырье, топливо, энергию и пр., аренду машин и площадей на (2) число замещенных рабочих мест. При составлении таблицы непосредственно для имитационных моделей год переписи считался 2014 г.

Аналогично простым делением были найдены денежные доходы на одного занятого. Для задания начального состояния в имитационных моделях использовались именно эти региональные данные из ЕМИСС, а не более дробные сведения о расходах на оплату труда из таблиц бухгалтерской (финансовой) отчетности или данные о зарплате работников организаций из БД ПМО. Причина состоит в том, что, во-первых, в такой отчетности указываются совокупные платежи фирмы в связи с оплатой труда, а не средняя зарплата. При этом сведения о числе работников есть только для 2017 г. В принципе возможно использование 2017 г. для задания начального состояния имитационной модели с заданием ее механизма таким способом, чтобы модель двигалась не только в будущее, но и в прошлое — для целей валидации и калибровки не только по новым, но и по старым данным. Но даже в

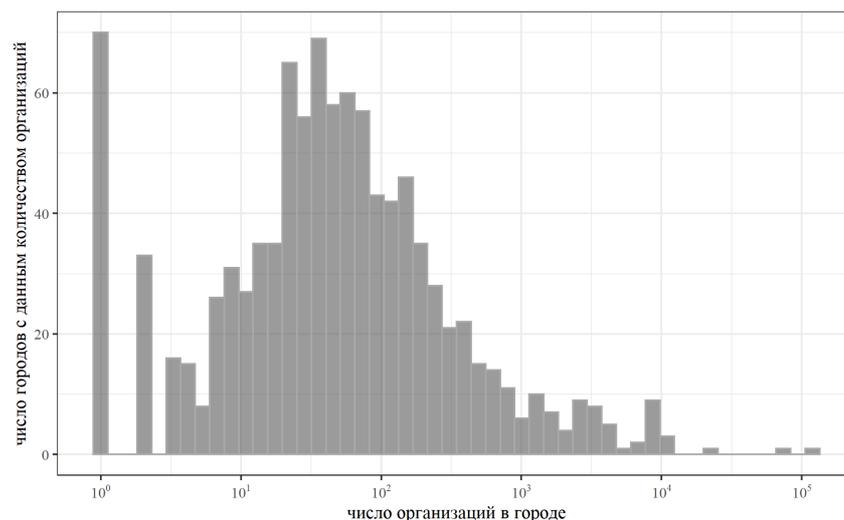
таком случае потребовалось бы знание о том, какую часть от денежных доходов составляет заработная плата. Сведения же об этом есть в лучшем случае в разрезе субъектов Федерации.

Вторая причина, по которой предпочтение было отдано региональным данным, а не данным из бухгалтерской отчетности, — это само распределение расходов на оплату труда в фирмах в городах, которые участвовали в имитационной модели. Всего за 2014 г. есть сведения об отчетности 1 052 825 организаций. У подавляющего большинства организаций, а именно у 88 %, в графе «платежи в связи с оплатой труда» указаны нули.

Из общего числа фирм, по которым были данные за 2014 г., не для всех удалось найти адреса по их ИНН. Только для 55.9 %, или 588 387 организаций из 1 052 825, через портал «За честный бизнес» удалось установить адрес. Адрес указывал на регистрацию в городе у 542 092 организаций, иными словами, у 92.1 % от фирм, для которых удалось найти адрес. В оставшейся части данных показатель платежей в связи с оплатой труда совершенно бесполезен, так как принимает единственное значение — ноль.

Также в процессе анализа первичных данных были обнаружены и другие странности. Так, минимальная выручка отрицательная. То же наблюдается и для минимальных платежей в связи с оплатой труда. Очевидно, что это просто артефакты бухгалтерского учета или ошибки. Менее очевидный артефакт — это превышение прибыли над выручкой. После устранения таких необычных случаев в пригодной для имитационного моделирования таблице с данными бухгалтерской (финансовой) отчетности остается 538 617 наблюдений. Итого из-за недостатка сведений об адресе, странностей бухгалтерского учета и ограничения моделирования городами, из исходных таблиц, открытых Росстатом для 2014 г., теряется 48.8 % данных.

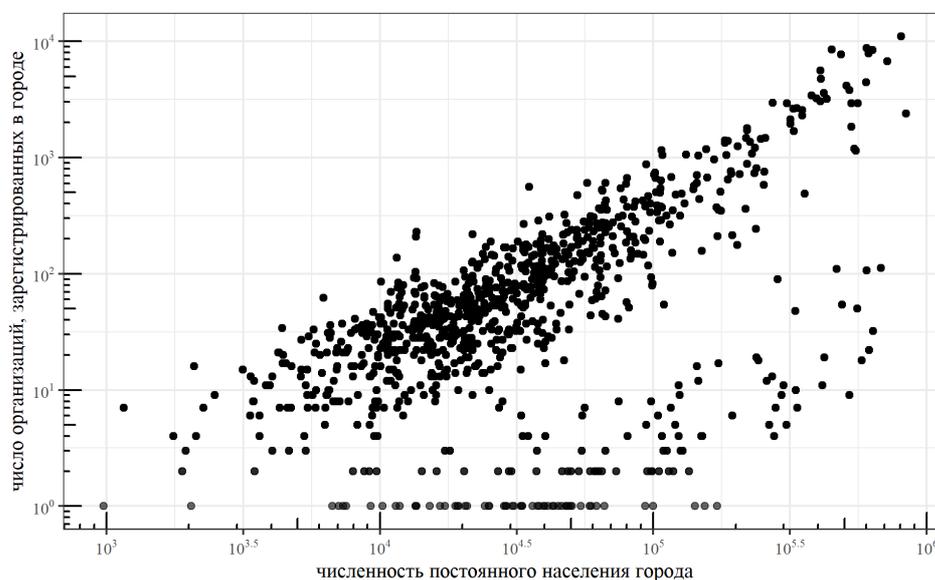
Распределение оставшихся данных по городам с точки зрения числа фирм в городе показывает рисунок : во многих городах, согласно бухгалтерской отчетности, открытой Росстатом, зарегистрирована всего одна организация либо ни одной.



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 3 — Распределение организаций по городам, в которых они зарегистрированы, в пригодной для имитационного моделирования таблице с данными бухгалтерской (финансовой) отчетности из 538 617 наблюдений

Как показывает рисунок, хотя и есть связь между численностью постоянного населения города и числом зарегистрированных в нем фирм, есть города очень разного размера, для которых число фирм в пригодном для имитационной модели наборе данных — одна или несколько.

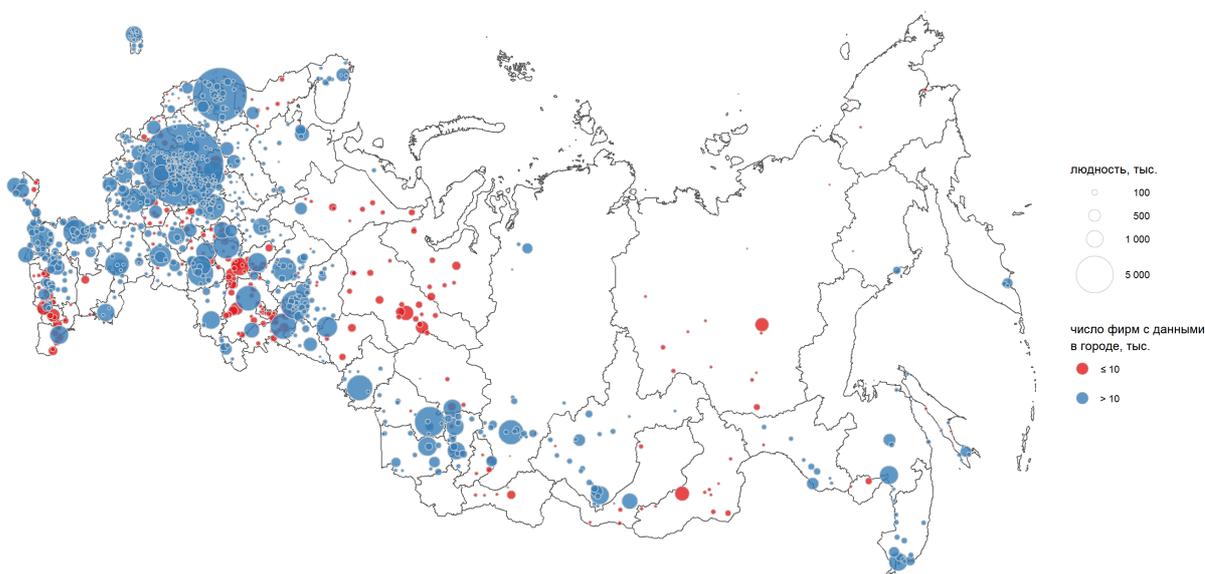


Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 4 — Зависимость наличия данных о фирмах, зарегистрированных в городе, от числа его постоянных жителей (за 2014 г.)

Для 167 городов, по которым были сведения о численности их постоянного населения, не было найдено сведений ни об одной зарегистрированной в них организации.

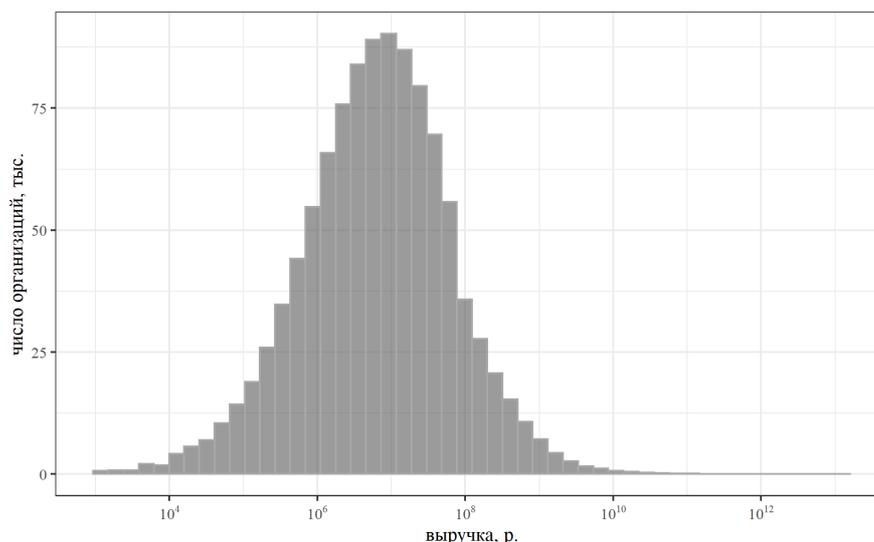
Отсутствие явной географической закономерности в неполноте данных по организациям показывает рисунок. Из него видно, как доступность сведений о фирмах растет вместе с людностью города, причем это правило в целом выполняется для любой части страны. Обесцвеченные пунсоны, указывающие на отсутствие каких-либо данных равномерно распределены по стране. Некоторое исключение представляет скопление серых пунсонов средних по людности городов в республиках Татарстан и Башкортостан, а также в Удмуртской Республике и Челябинской области. При более внимательном рассмотрении рисунка выясняются и другие географические сосредоточения пропусков. Особенно плохо для численности жителей города представлены фирмы Читы, Якутска, главных городов Ханты-Мансийского автономного округа, а также городов Чеченской Республики и Республики Северная Осетия — Алания.



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 5 — Размещение городов с особенно скудными данными по организациям

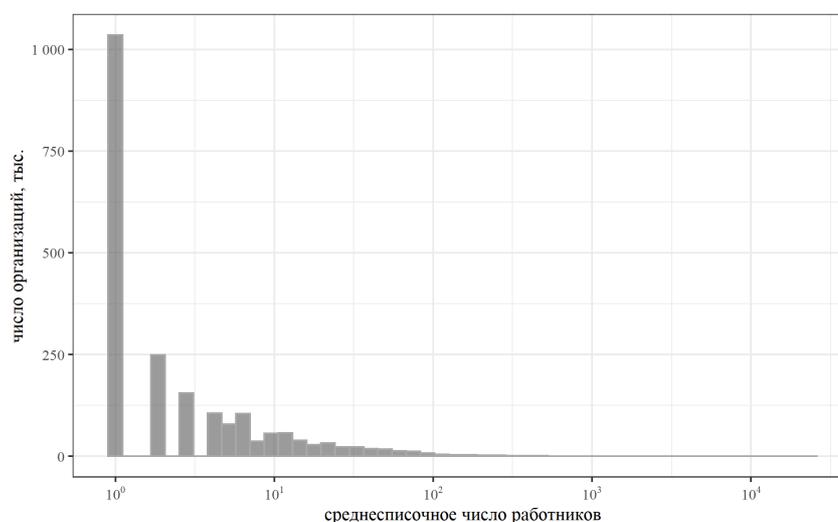
Заметим, что распределение фирм в литературе часто описывают как близкое к логарифмически-нормальному распределению или распределению по степенному закону [CITATION Axt01 \l 1033 \m Axt06]. Посылка о логарифмически нормальном (и в меньшей мере степенном) распределении размера фирм более или менее справедлива (критерий Колмогорова – Смирнова отвергает нулевую гипотезу о нормальном распределении логарифма выручки), если размер фирмы определяется ее выручкой (рисунок). Это оправдывает моделирование роста выручки российских фирм по закону Жибра.



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 6 — Распределение организаций, бухгалтерская (финансовая) отчетность которых представлена Росстатом за 2014 г.

Как следует из рисунка , для российских фирм распределение числа работников больше похоже на распределение по степенному закону, чем на логарифмически-нормальное распределение.



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 7 — Распределение по среднесписочной численности работников организаций в 2017 г., сведения о среднесписочной численности работников которых открыла ФНС

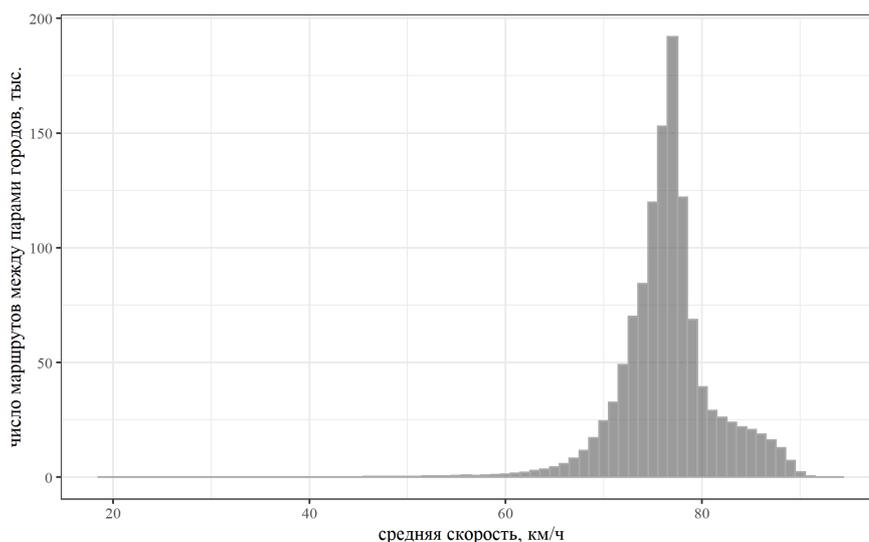
Единица наблюдения в построенных моделях — город (населенный пункт, у которого был или есть такой статус). Города определяются кодами ОКАТО. На практике, однако, по ОКАТО были классифицированы лишь таблицы в разрезе субъектов Российской Федерации, размещенные в ЕМИСС.

Из-за преобразований административно-территориального и муниципального деления у некоторых городов менялись коды классификатора, прежде всего чувствительного к вхождению, например, в муниципальный район или городской округ, ОКТМО. Поправку на

преобразование — но не объединение, создание или упразднение — муниципальных образований сделана по таблицам «Изменения в муниципальном устройстве субъектов Российской Федерации» из статистического бюллетеня «Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям», а также по другим открытым источникам.

Некоторым показателям не хватает дробности, желательной для имитационного моделирования. Пример такого показателя — распределение средней начисленной заработной платы работников по обследованным видам экономической деятельности по возрастным группам. Его дробность — это обычно 5-летние отрезки. Получить оценки отклонений зарплаты от средней, чтобы по этому судить о связи между возрастом / опытом и оценкой труда работников, можно двумя способами. Во-первых, можно использовать сглаживание, например, с помощью локальной регрессии. Во-вторых, можно добавлять случайный шум и, таким образом, не только устранять грубость оценок по многолетним возрастным группам, но и, например, моделировать неравномерность оплаты труда у людей разного возраста / опыта из-за таких факторов, как качество их образования или их талант.

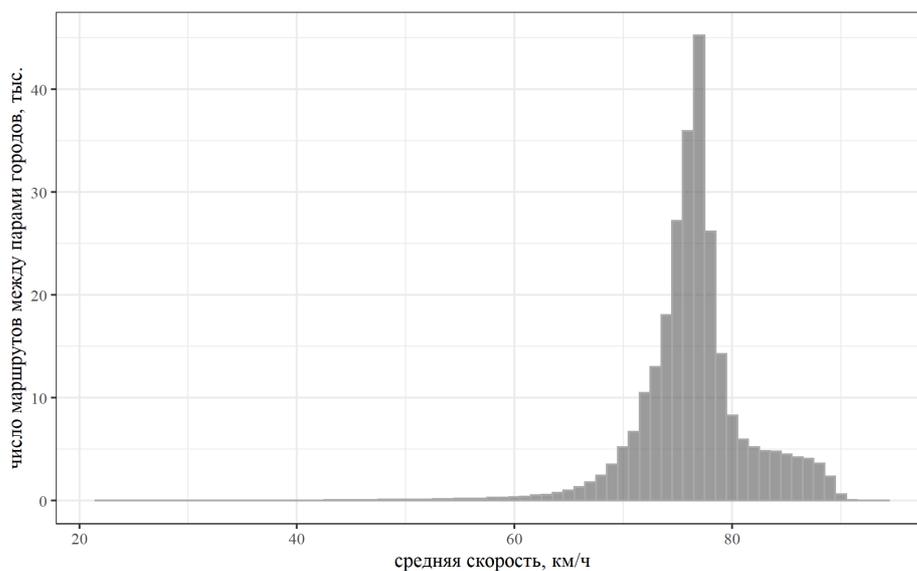
Собранные сведения о физической длине и времени поездки между различными городами позволяют оценить скорость движения между различными городами и так выявить дорожные связи, которые особенно нуждаются в ускорении. Распределение скоростей движения между всеми городами в собранной базе данных показывает рисунок . Длинный левый хвост возникает из-за городов вокруг Москвы, где движение затрудняет не только большой трафик, но и городская застройка, а также из-за городов Сахалина, автомобильная связь с которыми материка обеспечивается паромной переправой.



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 8 — Распределение скоростей движения между всеми городами в собранной базе данных

Рисунок показывает, что распределение скоростей сообщения между 246 городами, участвовавшими в имитационном моделировании, вполне представительно.



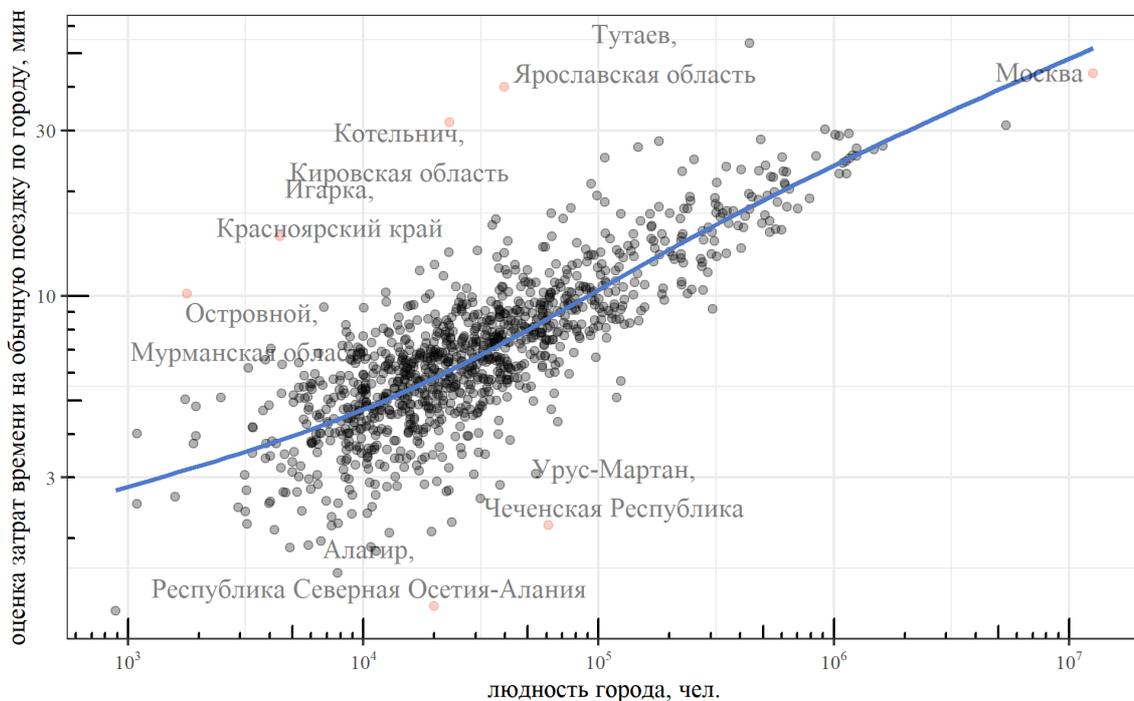
Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 9 — Распределение скоростей движения между городами, для которых строились имитационные модели

Среди всех городов издержками на поездку выделяются три города: Сочи (54 мин), Москва (44 мин) и Тутаев (Ярославская область) (40 мин). Понятно попадание Москвы в список первых по затратам времени на внутригородскую поездку на автомобиле — это крупнейший город страны, да еще и с неэффективной радиально-кольцевой структурой (с точки зрения транспортной задачи и, например, вопросов качества воздуха предпочтительнее структура в виде регулярной решетки). Что касается Сочи, то большие затраты времени связаны с тем, что город вытянут вдоль берега, а из-за особенностей горного рельефа некоторые дороги — это серпантин с крутыми поворотами, вынуждающими снижать скорость. Чрезвычайно высокий показатель в Тутаеве — следствие разделенности города Волгой: через реку в городе нет моста, так что связь лево- и правобережной частей города возможна либо через паром (с середины апреля до середины ноября), либо по льду, либо через г. Ярославль в период льдообразования и ледохода.

Как следует из рисунка Рисунок 10 после логарифмирования людность города и оценка времени поездки на автомобиле по городу выстраиваются вдоль прямой линии. Тем не менее есть города — исключения из этой закономерности. Так, кроме упомянутого Тутаева (Ярославская область), необычно велики для размера города затраты времени в городах Котельниче (Кировская область), Игарке (Красноярский край) и Островном (Мурманская область). С другой стороны, заниженные оценки времени для городов Алагира (Республика Северная Осетия — Алания) и Урус-Мартана (Чеченская Республика) могут

указывать на худшую представленность этих городов в OpenStreetMaps, откуда брались полигоны зданий в городе. Заметим, что с точки зрения простой описательной модели в Москве и Санкт-Петербурге (крайние правые точки на графике) затраты времени даже меньше, чем можно было бы ожидать исходя из одной только численности их жителей.



Примечание

1 Синяя линия — оценка обобщенной аддитивной модели для натурального логарифма оценки времени по кубическому регрессионному сплайну натурального логарифма людности. Красным цветом подкрашены точки с самой большой абсолютной ошибкой предсказания.

2 Источник: составлено авторами.

Рисунок 10 — Диаграмма рассеяния для логарифмов с основанием десять людности города и оценки времени поездки по городу

Рассмотрим региональные показатели. По показателю распределения регионов по коэффициенту рождаемости организаций (новых организаций на 1000 зарегистрированных) выделяется Республика Крым и город федерального значения Севастополь, где в 2015 г. шла регистрация организаций после вхождения территории в состав Российской Федерации. Заметим, что данные за 2017 г. отсутствуют (строго говоря, их возможно высчитывать по отдельным месяцам).

С точки зрения номинальных денежных доходов, приходящихся в среднем на одного занятого в субъекте Российской Федерации, выделяются Москва с ее областью, Ямало-Ненецкий, Ненецкий, а также Чукотский автономные округа. В 2014 и 2015 гг. выделялась

также Республика Ингушетия, однако это скорее склоняет к недоверию статистической оценке.

Номинальные различия в доходах, как известно, больше, чем реальные из-за поправки, которую вносит стоимость жизни в разных субъектах Российской Федерации. Большие номинальные доходы в Чукотском, Ненецком и Ямало-Ненецком автономных округах несколько обесценивает большой прожиточный минимум, хотя для Московской области это верно в меньшей степени. С другой стороны, по номинальным денежным доходам Республика Саха, Магаданская область и Камчатский край при таком же высоком прожиточном минимуме уступают, например, Чукотскому автономному округу по величине номинальных подушевых доходов.

Распределение по уровню безработицы повторяет то же по уровню доходов в среднем на одного занятого. Цветовую шкалу на рисунке растягивают Республика Ингушетия с аномальными 47.7 % в 2012 г., а также Чеченская Республика и Республика Тыва с 15–20 %.

3.4 Результаты построения имитационной пространственной модели

3.4.1 Калибровка модели

Для первоначальной калибровки тестовой модели были отобраны четыре статистических показателя:

- 1 коэффициент рождаемости фирм (как открытие новых фирм зависит от уже имеющегося их числа в городе), от 0 до 2 (реально зафиксированное максимальное значение — 1.992 в 2014 г. в Крыму);
- 2 параметр $salary_{pop}$, который определяет прибавку к средней зарплате от прироста людности на 1 %, от -3 до 10;
- 3 параметр $rent_{pop}$, который определяет то же самое для платы за жилье, от -3 до 10;
- 4 время поездки в одну сторону для маятниковых миграций от 45 до 240 (минут).

Начальный набор значений — 0.1, 2.25, 1.7 и 150 соответственно.

Также для ускорения расчетов был введен ряд ограничений:

- использованы только генетические алгоритмы без методов, связанных с производными,
- популяция решений для каждого поколения равна 2,
- число поколений — 10,
- критерий схождения — 0.001.

Целевая функция — средняя абсолютная ошибка (MAE). примечательно, что алгоритм не превзошел точность предсказания по изначально заданным параметрам —

0.9375887 (тысячи человек) — даже после снятия ограничений на максимальное число поколений.

Для калибровки использовался пакет rgenoud версии 5.8-3.0 для языка R [CITATION Meb11 \l 1049].

3.4.2 Результаты построения базового сценария

В среднем доля бедных индивидов в городах стабильная в течение всего рассматриваемого периода и составляет около 5%, однако есть несколько городов, где она значительно выше, причем примечательно, что в основном это крупные города (Москва, Санкт-Петербург, Сочи, Хабаровск и т.д.). Поскольку в модели доля бедных индивидов в общей численности населения города косвенно зависит от уровня арендной платы за жилье в городе, а он повышается по мере роста численности. С этим связаны высокие показатели доли бедного населения в крупных городах.

Прирост средней заработной платы в городе i , может в теории может быть спровоцирован либо повышением производительности труда «коренных» индивидов (в результате чего при поиске работы он претендует на более высокооплачиваемую должность), либо в результате переезда в город i высококвалифицированных кадров. Как можно видеть, прирост среднего уровня заработной платы в подавляющем большинстве городов практически неотличим от нуля, за исключением нескольких некрупных городов (например, Губкин, Старый Оскол, Белореченск) в отдельные моменты времени. Отсюда можно сделать вывод, что в случае этих городов данный процесс связан с повышением производительности труда проживающих в них индивидов (в частности, за счет появления новых индивидов, обладающей на старте производительностью выше средней).

Дополнительно были рассмотрены основные параметры для групп городов, распределённых в зависимости от численности населения по состоянию на январь 2014 г.:

- 1 города-миллионники,
- 2 города с численностью населения от 500 тыс. до 1 млн. чел.,
- 3 города с численностью населения от 100 до 500 тыс. чел.,
- 4 города с численностью населения менее 100 тыс. чел.

Наиболее динамично изменяется численность населения в городах с 100-500 тыс. чел. Это связано, в первую очередь, с тем, что многие из них являются центрами городских агломераций и за счет этого притягивают население из более маленьких городов. Величина ежедневных транспортных издержек в крупных городах сохраняется на одном уровне в течение всего рассматриваемого периода, в то время как в городах с численностью населения до 500 тыс. чел. она стабильно растет, что связано в первую очередь с развитием маятниковой миграции. Уровень безработицы в модели находится на аномально низком уровне. Это вызвано тем, что в модели единственный источник дохода индивидов — это заработная плата.

Стоимость проживания (арендная плата за жилье) в городах-миллионниках в среднем в 2 раза выше (32.8 тыс. руб.), чем в остальных городах, между которыми дифференциация не так сильна (от 15.5 до 17.6 тыс. руб.). Ввиду небольшого числа фирм в малых городах (до 500 тыс. чел.), в них оказывается велико число градообразующих предприятий (в среднем 0.6-0.7 против 0.3-0.08 для прочих категорий). Доля жителей за чертой бедности в городах-миллионниках в 3 раза выше (в среднем 28%), чем в городах с численностью населения от 100 до 500 тыс.чел. и в 9 раз выше, чем в малых городах до 100 тыс. Кроме того, примечательно, что основные потоки исходящей миграции сосредоточены в городах до 500 тыс. чел. и было бы логичным предположить, что индивиды стремятся переехать в более крупные города (в частности, в миллионники), однако это не так: значительные входящие потоки наблюдаются только в городах с численностью населения 100-500 тыс.чел. Таким образом, в модели с течением времени происходит опустение самых малых городов, и перераспределение населения между средними городами (до 500 тыс.), что в целом соответствует действительности[CITATION Бир17 \l 1049].

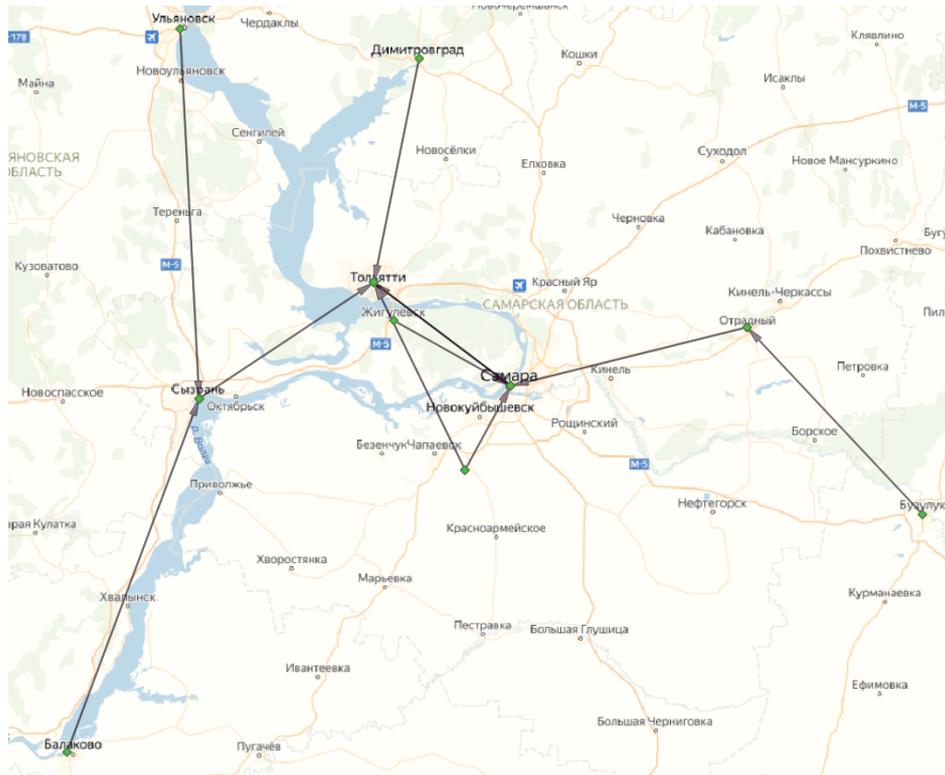
Полученные на основе расчетов данные по маятниковой миграции совпадают с основными трендами, наблюдающимися в последнее время, например, стабилен приток рабочей силы в города-ядра агломераций (см. рисунки -). При этом примечательно, что обратный поток маятниковых мигрантов практически во всех подобных случаях нулевой (более низкий уровень оплаты труда и повышенные транспортные издержки на периферии не могут быть компенсированы более низкой стоимостью проживания).



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 11 – Направления маятниковой миграции в окрестностях г. Санкт-Петербурга

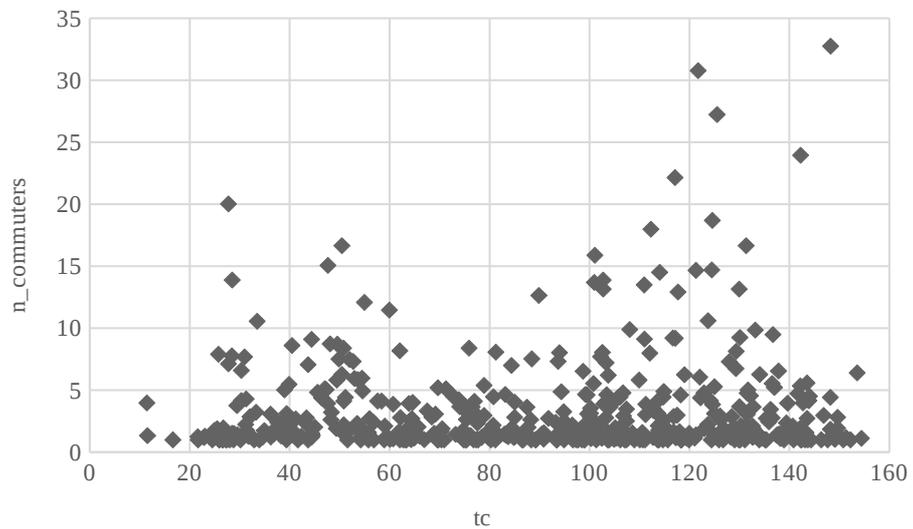
В целом по стране наиболее сильны маятниковые связи в зоне Московской агломерации. Значительная часть трудовых маятниковых мигрантов из Московской области работает в Центральном административном округе из-за централизованности размещения рабочих мест. Одновременно трудовые мигранты «оседают» в периферийных районах, что сокращает время в пути и позволяет комьютерам из более отдаленных муниципалитетов Подмосквья работать в Москве[CITATION Мах17 \l 1049].



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 12 – Направления маятниковой миграции в окрестностях г. Самара и г. Тольятти

При этом примечательно, что для пар городов с ненулевым числом маятниковых мигрантов не наблюдается зависимости их численности от среднего времени в пути между городами (см. рисунок).



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 13 – Зависимость числа маятниковых мигрантов ($n_{commuters}$) от среднего времени в пути между городами (t_c)

3.5 Результаты сценарного анализа пространственного развития российской экономики на примере пилотных территорий

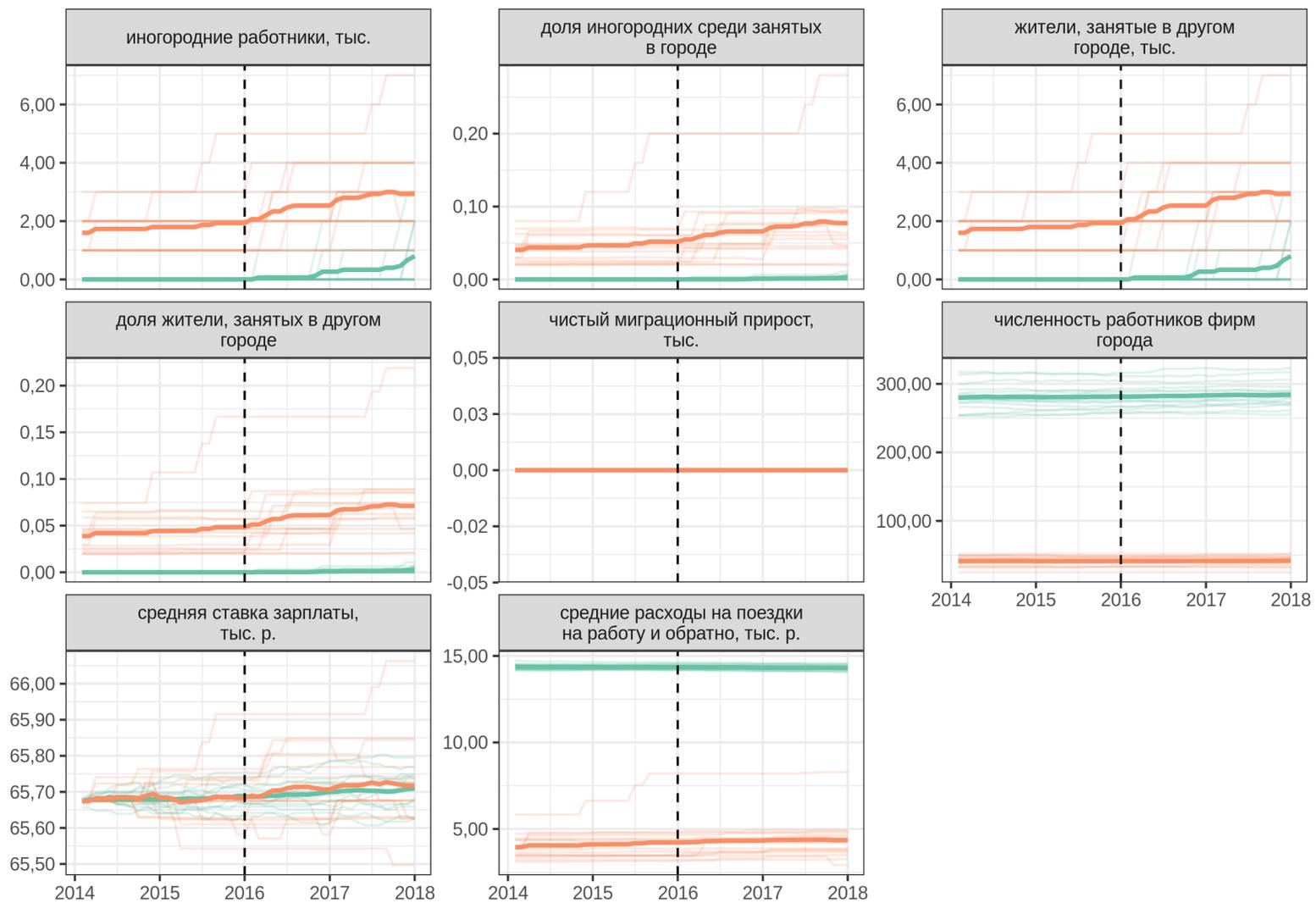
3.5.1 Результаты построения сценария 2

На рисунке приведены результаты расчетов только для двух городов, так как даже после строительства скоростной дороги ни один другой город не вошел в 150-минутную зону маятниковых поездок.

Иными словами, на переезды между этими городами и в них из других городов улучшение этой дороги не влияет, однако оно влияет на маятниковые потоки и соответствующие изменения занятости.

Примечательно, что все больше жителей Туапсе начинает работать в Сочи, а сочинцы, в свою очередь, не едут работать в Туапсе. Прирост среднего уровня заработной платы для жителей Туапсе оказывается больше, при этом для жителей Сочи уровень доходов не снижается, поскольку фактически в модели происходит обмен: индивиды получают возможность найти работу, подходящую им по уровню квалификации, но с большей зарплатой. Это следует из неизменного числа работников в городах.

При этом в базовом сценарии жители г. Сочи также не работают в г. Туапсе, а жители Туапсе предпочитают работать в г. Геленджике (а те, в свою очередь, в Новороссийске). Рост доходов совпадает с результатами сценария 2, следовательно, он не связан с повышением транспортной связанности городов. Тем не менее, в сценарии 2 по сравнению с консервативным, возрастает численность жителей г. Туапсе, работающих в другом городе, следовательно, сокращение времени в пути между городами все же благоприятно влияет на динамику маятниковых миграций.

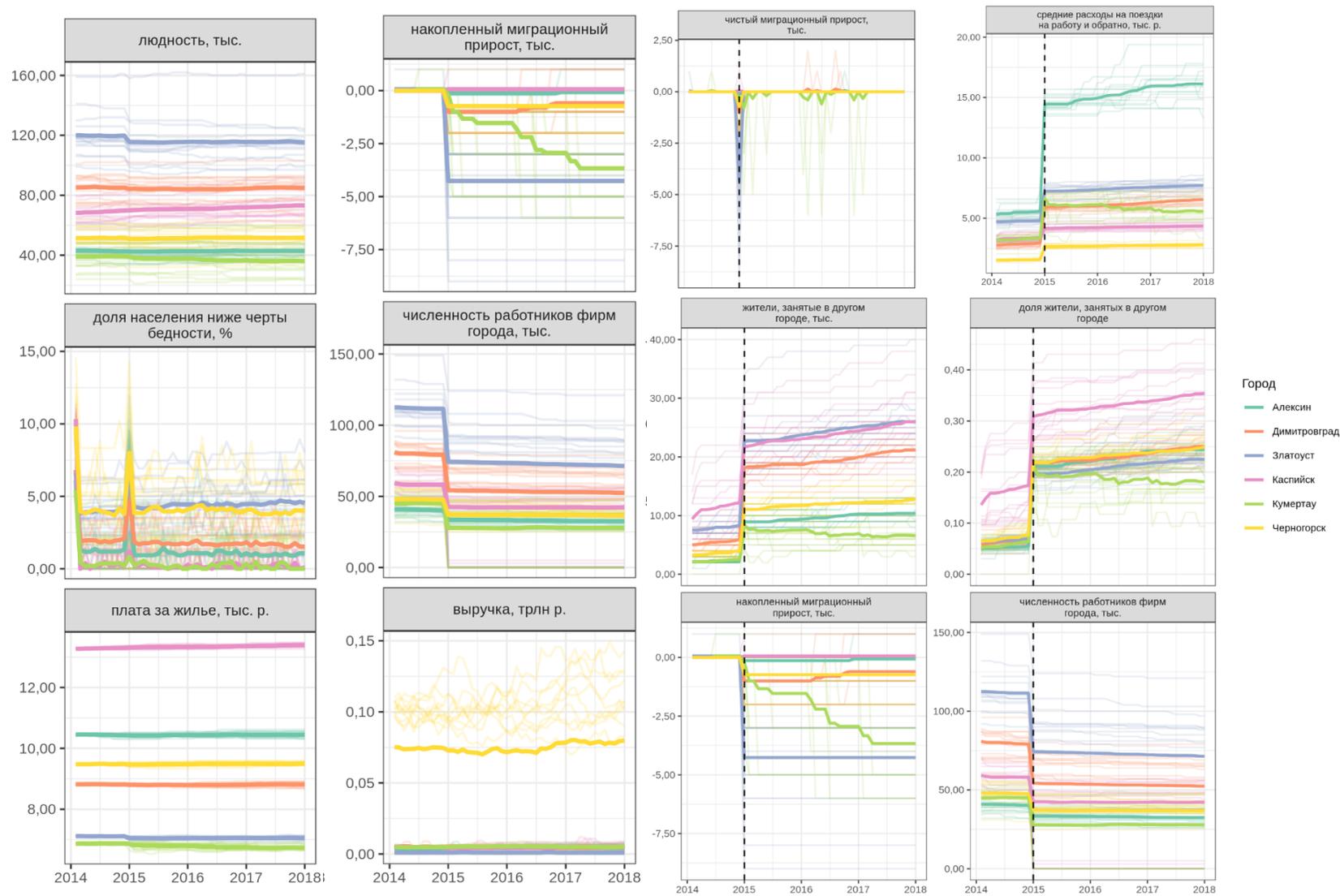


Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 14 – Результаты выполнения сценария 2 для г. Туапсе и г. Сочи

3.5.2 Результаты построения сценария 3

В результате закрытия градообразующего предприятия в каждом из шести рассмотренных городов (Алексин, Дмитровград, Златоуст, Каспийск, Кумертау, Черногорск) происходит сокращение от 16% до 45% численности населения (см. рисунок), доля бедных при этом возрастает в 0.5 – 5.5 раз, однако достаточно быстро возвращается к докризисному уровню как за счет переезда в другие города (наиболее характерно для Алексина и Кумертау), так и за счет быстрого нахождения нового места работы (не обязательно в своем городе). Так, около 25% жителей Алексина находят новое место работы в Москве, за счет чего почти в три раза повышаются средние затраты на ежедневные поездки. Этот случай также примечателен тем, что оставшиеся без работы жители Алексина в качестве нового места выбирают Москву вместо регионального центра г. Тулы, хотя расстояние до последнего меньше в 2.5 раза (от Алексина до Тулы – 70 км, до Москвы – 180).



Примечание – источник: составлено авторами.

Рисунок 15 – Результаты выполнения сценария 3 для шести моногородов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в России в недостаточной мере проработано научно-методическое обоснование целеполагания основных стратегических документов, определяющих пространственное развитие Российской Федерации. Формирование перспективных целей и задач пространственного развития зачастую формируется на основе отдельных ситуативных территориальных потребностей, а научно-обоснованный подход к анализу сценариев пространственного развития экономики и последствий их реализации при изменении экономических условий в рамках отдельных субъектов РФ и в России в целом в российской практике развит достаточно слабо.

Поэтому работа посвящена разработке методологии построения имитационной пространственной модели российской экономики, разработке методики сценарного анализа пространственного развития российской экономики с помощью имитационной пространственной модели.

В работе представлен прототип имитационной пространственной модели, охватывающий 237 крупных и малых городов в 76 субъектах РФ. В нем агенты-индивиды стремятся нетрадиционным образом максимизировать свой доход, решая задачу оптимизации места жительства. На основе прототипа было разработано несколько сценариев пространственного развития, связанных, в частности, с повышением связанности территорий, закрытием предприятий в моногородах, снижением потребительских ожиданий при переезде и т.д. Несмотря на то, что модель, находясь на ранней стадии разработки, достаточно упрощена во многих отношениях (например, в ней не представлено производство и потребление товаров и услуг), она тем не менее позволяет в общих чертах оценить эффект от конкретных мероприятий в транспортной и социальной политике.

Модель точно воспроизводит смену числа жителей. Точность предсказаний обеспечивается прежде всего тем, что модель использует сведения о возрастной структуре городского населения (соответственных субъектов Федерации). В рамках работы получено подтверждение ряду гипотез о положительном влиянии на динамику межгородской миграции уровня средней заработной платы в городе и качества городской среды.

Благодаря опоре на правдивые оценки затрат времени на поездки между городами модель воспроизводит основные направления и ареалы маятниковых миграций. Это позволяет использовать модель для оценки изменений в структуре регулярных трудовых поездок, наведенные ускорением или замедлением сообщения между городами. Симуляция открытия скоростного сообщения между Сочи и Туапсе

показала, что ускорение связи между этими городами приводит лишь к локальным изменениям в маятниковых миграциях, но не отражается на общем уровне доходов жителей этих городов.

Модель плохо описывает миграции, связанные со сменой городов как постоянного места жительства. Так, она не воспроизводит сосредоточение в Москве, Санкт-Петербурге и других крупных городах. Отчасти это связано со сравнительно малой интенсивностью внутренних миграций, которую сложно учесть при масштабировании модели

Дальнейшее развитие имитационной пространственной модели предполагает расширение набора используемых механизмов, определяющих взаимодействие агентов между собой и с окружающей средой, в частности, за счет внедрения в модель отраслевой специфики фирм, экологических изменений и рынка недвижимости. Кроме того, при наличии более полной и детальной статистики возможно расширение модели на более широкий спектр территориальных образований.

Полученные результаты в перспективе могут быть использованы в интересах Министерства экономического развития Российской Федерации, Министерства транспорта Российской Федерации для разработки конкретных направлений, мер и механизмов проведения пространственной политики в России, а также для определения степени влияния, которое могут оказывать целевые показатели, заложенные в стратегических документах развития различных областей на показатели пространственного развития, в частности, перераспределение населения между городами и регионами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pumain D. Multi-agent System Modelling for Urban Systems: The Series of SIMPOP Models. *Agent-Based Models of Geographical Systems* // 2011. pp. 721-738.
2. Bretagnolle A., Daudé E., Pumain D. 13ème Colloque Européen de Géographie Théorique et Quantitative // From theory to modelling: urban systems as complex systems. Lucca, Italie. 2003.
3. The SIMPOP Project [Электронный ресурс] URL: <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/> (дата обращения: 29.05.2019).
4. Europe 1950-2050 URL: <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/applications/eurosim> (дата обращения: 29.05.2019).
5. Čech P., Tučník P., Bureš V., Husáková M. International Conference on Knowledge Discovery and Information Retrieval and the International Conference on Knowledge Management and Information Sharing // Modelling Complexity of Economic System with Multi-Agent Systems. 2013. pp. 464-469.
6. Tsekeris T., Vogiatzoglou K., Bekiros S. European Regional Science Association conference // Multi-Regional Agent-Based Modeling of Household and Firm Location Choices with Endogenous Transport Costs. 2011.
7. Фаттахов М.Р. Агентно-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы // Экономика и математические методы. 2013. Т. 49. № 2. С. 30-43.
8. Makarov V.L., Zhitkov V.A., Bakhtizin A.R. The 6th Conference of the European Social Simulation Association // Moscow Traffic Jam Is Under Attack of an Intelligent Agent-based Model. Guildford, United Kingdom. 2009.
9. Glaeser E.L., Kallal H.D., Sheinkman J.A., Shleifer A. Growth in Cities // *Journal of Political Economy*. 1992. Vol. 100. No. 6. pp. 1126-1152.
10. Rauch J.E. Productivity Gains from Geographic Concentration of Human Capital: Evidence from the Cities // *Journal of Urban Economics*. 1993. Vol. 34. No. 3. pp. 380-400.
11. Acemoglu D., Angrist J. How Large Are Human-Capital Externalities? Evidence from Compulsory Schooling Laws // *NBER Macroeconomics Annual*. 2000. No. 15. pp. 9-59.
12. Moretti E. Estimating the social return to higher education: evidence from longitudinal and repeated cross-sectional data // *Journal of Econometrics*. 2004. Vol. 121. No. 1-2. pp. 175-212.
13. Bougeas S., Demetriades P.O., Mamuneas T.P. Infrastructure, specialization, and economic growth // *Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne d'Économie*. 2000. Vol. 33. No. 2. pp. 506-522.
14. Klemperer P. Network Goods (Theory) // *The New Palgrave Dictionary of Economics*. 2008. No. 1-4.
15. Bom P.R.D., Ligthart J.E. WHAT HAVE WE LEARNED FROM THREE DECADES OF RESEARCH ON THE PRODUCTIVITY OF PUBLIC CAPITAL? // *Journal of Economic Surveys*. 2013. Vol. 28. No. 5. pp. 889-916.
16. Melo P.C., Graham D.J., Brage-Ardao R. The productivity of transport infrastructure investment: A meta-analysis of empirical evidence // *Regional Science and Urban Economics*. 2013. Vol. 43. No. 5. pp. 695-706.
17. Маршалл А. Принципы политической экономии. Прогресс-Москва, 1983.
18. Cronon W. Nature's Metropolis: Chicago and the Great West. 2007.
19. Ellison G., Glaeser E.L., Kerr W.R. What Causes Industry Agglomeration? Evidence from Coagglomeration Patterns // *American Economic Review*. 2010. Vol. 100. No. 3. pp. 1195-1213.
20. Diodato D., Neffke F., O'Clery N. Why do industries coagglomerate? How Marshallian externalities differ by industry and have evolved over time // *Journal of Urban Economics*. 2018. No. 106. pp. 1-26.
21. Henderson, V. *Journal of Economic Growth*, 8(1), 47–71, 2003
22. Thisse, J.-F. *Geographical Economics: A Historical Perspective*. *Recherches Économiques de Louvain*, 77(2), 141, 2011
23. Broersma L., van Dijk J. The effect of congestion and agglomeration on multifactor productivity growth in Dutch regions // *Journal of Economic Geography*. 2007. Vol. 8. No. 2. pp. 181-209.
24. Gabaix X., Ioannides Y.M. Chapter 53 The evolution of city size distributions // In: *Cities and Geography*. 2004. pp. 2341-2378.
25. Важенин А.А. Устойчивость распределения городских поселений в системах расселения // *Изв. РАН Сер. геогр.* 1999. No. 1.

26. Важенин А.А. Предзаданность направлений развития расселенческих процессов в самоорганизующихся системах // География мирового развития. 2010. No. 2. pp. 195-206.
27. Mori T., Nishikimi K., Smith T.E. THE NUMBER-AVERAGE SIZE RULE: A NEW EMPIRICAL RELATIONSHIP BETWEEN INDUSTRIAL LOCATION AND CITY SIZE // *Journal of Regional Science*. 2008. Vol. 48. No. 1. pp. 165-211.
28. Hsu W.T. Central Place Theory and City Size Distribution // *The Economic Journal*. 2012. Vol. 122. No. 563. pp. 903-932.
29. Gabaix X. Zipf's Law for Cities: An Explanation // *The Quarterly Journal of Economics*. 1999. Vol. 114. No. 3. pp. 739-767.
30. J. S. Gibrat's Legacy // *Journal of Economic Literature*. 1997. Vol. 35. No. 1. pp. 40-59.
31. Gastner M.T., Newman M.E.J. Shape and efficiency in spatial distribution networks // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2006. Vol. 2006. No. 1.
32. Allen T., Arkolakis C., Li X. Optimal City Structure July 2015.
33. Devisch O., Arentze T., Timmermans H.J.P., Borgers A.W.J. An agent-based model of Residential Choice dynamics in nonstationary housing market // *Environment and Planning A*. 2009. No. 41(8). pp. 1997-2013.
34. Hsieh C.T., Moretti E. Housing constraints and spatial misallocation // NBER Working paper 21154. May 2017. pp. 1-58.
35. Desmet K., Nagy D.K., Rossi-Hansberg E. The geography of development: evaluating migration restrictions and coastal flooding // NBER Working paper 21087. April 2015. pp. 1-56.
36. Albouy D., Stuart B. Urban Population and Amenities // NBER Working Paper 19919. February 2014. pp. 1-67.
37. Шитова Ю.Ю., Шитов Ю.А. Анализ долгосрочной динамики факторов, определяющих маятниковую трудовую миграцию в Подмоскowie // *Проблемы прогнозирования*. 2016. No. 4 (157).
38. Mills E.S. *Studies in the Structure of the Urban Economy*. Baltimore: Johns Hopkins University Press. 1972.
39. Simpson W., van der Veen A. The Economics of Commuting and the Urban Labour Market // *Journal of Economic Surveys*. 1992. No. 6(1). pp. 45-62.
40. Roback J. Wages, Rents, and the Quality of Life // *Journal of Political Economy*. 1982. Vol. 90. No. 6. pp. 1257-78.
41. Polinsky A.M., Rubinfeld D.L. Property Values and the Benefits of Environmental Improvements: Theory and Measurement // *Public Economics and the Quality of Life*. 1977.
42. Rosen S. Wages-based Indexes of Urban Quality of Life // *Current Issues in Urban Economics*. 1979.
43. Glaeser E., Mare D. Cities and skills // *Journal of Labor Economics*. 2001. No. 19. pp. 316-342.
44. Combes P., Duranton G., Gobillon L. Spatial wage disparities: sorting matters // *Journal of Urban Economics*. 2008. No. 63. pp. 723-742.
45. Di Addario S., Patacchini E. Wages and the City. Evidence from Italy // *Labour Economics*. 2008. Vol. 5. No. 15. pp. 1040-1061.
46. Селиванов М.Б. Крупные города в социально-экономическом пространстве регионов России // *Контурь глобальных трансформаций: политика, экономика, право*. 2011. Vol. 4. No. 5. pp. 6-15.
47. Heuermann D., Halfdanarson B., Suedekum J. Human Capital Externalities and the Urban Wage Premium: Two Literatures and their Interrelations // *Urban Studies*. 2010. No. 47(4). pp. 749-767.
48. Названо число снимающих жилье россиян 2019. URL: https://lenta.ru/news/2019/07/16/rent_stats/ (дата обращения: 30.10.2019).
49. ЕМИСС. Структура денежных доходов по источникам формирования 2014-2018. URL: <https://fedstat.ru/indicator/31501> (дата обращения: 10.10.2019).
50. Duranton G., Puga D. *The growth of cities*, OECD, 2013.
51. Моисеенко В.М. Снижение масштабов внутренней миграции населения России: опыт оценки динамики по данным текущего учета // *Вопросы статистики*. 2004. No. 7. pp. 47-56.
52. Waddell P. A Behavioral Simulation Model for Metropolitan Policy Analysis and Planning: Residential Location and Housing Market Components of UrbanSim // *Environment and Planning B Planning and Design*. February 2000. No. 27(2). pp. 247-263.
53. Van Dijk J., Pellenbarg P.H. Firm relocation decision in the Netherlands: an ordered logit approach // *Papers in Regional Science*. 2000. No. 79. pp. 191-219.
54. Brouwer A.E., Mariotti I., van Ommeren J.N. The firm relocation decision: An empirical investigation // *The Annals of Regional Science*. 2004. No. 38. pp. 335-347.

55. Pellenbarg P.H., Van Dijk J., Van Wissen L.J.G. Firm Relocation: State of the Art and Research Prospects, University of Groningen, Research Institute SOM, Research Report 02D31, 2002.
56. Oliviera V.A.M.G. The Firm Delocalization Decision. An empirical investigation. 2015. A Work Project, presented as part of the requirements for the Award of a Masters Degree in Management from the NOVA – School of Business and Economics.
57. Graham D.J. Transport investment, agglomeration and urban productivity., Imperial College of London, 2005.
58. Combes P.P., Duranton G., Gobillon L., Puga D., Roux S. The productivity advantages of large cities: Distinguishing agglomeration from firm selection , Centre for Economic Policy Research , London, UK, Discussion Paper No. 7191 2010.
59. Rosenthal S.S., Strange W. Evidence on the nature and sources of agglomeration economies // Handbook of Regional and Urban Economics. 2004. No. 4. pp. 2119-2171.
60. Melo P.C., Graham D.J., Noland R.B. A meta-analysis of estimates of urban agglomeration economies // Regional Science and Urban Economics. 2009. No. 39.
61. Гордеев В., Магомедов Р., Михайлова Т. Агломерационные эффекты в промышленности России // Экономическое развитие России. 2017. Vol. 24. No. 8. pp. 19-20.
62. Bruinsma F.R., Rietveld P. The impact of accessibility on the valuation of cities as cessibility on the valuation of cities as, Vrije Universiteit, Amsterdam, 1997.
63. The World Bank. The Cost of Air Pollution. Strengthening the Economic Case for Action, The World Bank and Institute for Health Metrics and Evaluation, Washington, Seattle, 2016.
64. Chen S., Oliva P., Zhang P. The Effect of Air Pollution on Migration: Evidence from China, NBER Working Paper No. 24036, 2017.
65. Cramer J.C. Population Growth and Local Air Pollution: Methods, Models, and Results // Population and Development Review. 2002. No. 28. pp. 22-52.
66. Доля зарплат в доходах россиян уменьшается [Электронный ресурс] // Российская газета: [сайт]. [2017]. URL: <https://rg.ru/2017/03/08/dolia-zarplat-v-dohodah-rossii-an-snizilas.html> (дата обращения: 15.07.2019).
67. Постановление Правительства РФ от 29 июля 2014 г. N 709 2014. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102356491&intelsearch=%EE%F2+29.07.2014+%B9+709> (дата обращения: 30.10.2019).
68. Экономика городов [Электронный ресурс] // Мультистат: [сайт]. [2013]. URL: http://www.multistat.ru/?menu_id=9310004 (дата обращения: 15.06.2019).
69. Продажа и аренда по всей России [Электронный ресурс] // Domofond.ru: [сайт]. [2014]. URL: <https://www.domofond.ru/tseny-na-nedvizhimost> (дата обращения: 15.06.2019).
70. Правительство заморозило южную дорогу URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3991341> (дата обращения: 10.31.2019).
71. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. [2019]. URL: <https://www.gks.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 01.11.2019).
72. // База данных показателей муниципальных образований: [сайт]. [2019]. URL: <https://www.gks.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 01.11.2019).
73. // Единая межведомственная информационная статистическая система: [сайт]. [2019]. URL: <https://fedstat.ru/> (дата обращения: 01.11.2019).
74. // Сплошное наблюдение за деятельностью малого и среднего бизнеса за 2015 год: [сайт]. [2015]. URL: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/splosh.html (дата обращения: 1.11.2019).
75. // Пакеты данных: [сайт]. [2019]. URL: <http://old.gks.ru/opendata/dataset> (дата обращения: 01.11.2019).
76. // Сведения о среднесписочной численности работников организации: [сайт]. [2019]. URL: <https://www.nalog.ru/opendata/7707329152-sshr/> (дата обращения: 01.11.2019).
77. // ЗАЧЕСТНЫЙБИЗНЕС: [сайт]. [2019]. URL: <https://zachestnybiznes.ru/> (дата обращения: 01.11.2019).
78. // OpenStreetMap: [сайт]. [2019]. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 01.11.2019).
79. Индекс качества городской среды [Электронный ресурс] // ДОМ.РФ Индекс городов: [сайт]. [2016]. URL: <https://xn--d1achkm1a.xn--d1aqf.xn--p1ai/> (дата обращения: 15.06.2019).
80. // osrm: Interface Between R and the OpenStreetMap-Based Routing Service : R package version 3.3.2: [сайт]. [2019]. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=osrm> (дата обращения: 01.11.2019).

81. Hron K. T.M..F.P. Imputation of missing values for compositional data using classical and robust methods // Computational Statistics & Data Analysis, Vol. 54, No. 12, December 2010. pp. 3095-3107.
82. Buuren S.V. Compositional data // In: Flexible imputation of missing data / Ed. by Buuren S.V. Boca Raton: CRC Press, 2019. pp. 177-181.
83. Axtell L.R. Zipf distribution of U.S. firm sizes // Science, Vol. 5536, No. 293, 2001. pp. 1818-1820.
84. Axtell R.L. Center on Social and Economic Dynamics Working Paper // SSRN, No. 44, 2006. pp. 1-23.
85. Mebane R. Jr. S.J.S. Genetic Optimization Using Derivatives: The rgenoud Package for R // Journal of Statistical Software, Vol. 42, No. 11, 2011. pp. 1-26.
86. Бирюкова Е.В. Особенности демографической ситуации в малых городах ЦЧР и их муниципальных районах // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2017. Vol. 11. No. 260.
87. Махрова А.Г., Бочкарев А.Н. Маятниковая миграция в Московском регионе: новые данные // Демоскоп Weekly. 2017. No. 727-728. pp. 1-25.