

ИМИТАЦИОННАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ ГОРОДОВ

К. В. РОСТИСЛАВ
Ю. Ю. ПОНОМАРЕВ
Д. М. РАДЧЕНКО

В работе представлена имитационная пространственная модель, охватывающая 237 крупных и малых городов в 76 субъектах РФ. Модель описывает динамику численности населения и количества предприятий в городах, а также позволяет строить среднесрочные прогнозы с высокой степенью точности. В работе проверены гипотезы о влиянии на междугородную миграцию и другие социально-экономические процессы, определяющие различия между городами в средней заработной плате, качестве городской среды и других факторах, а также рассмотрены примеры применения модели для оценки социально-экономических эффектов от строительства скоростных дорог (на примере дороги Сочи – Туапсе) и последствий закрытия градообразующих предприятий в нескольких моногородах.

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы государственного задания РАНХиГС при Президенте Российской Федерации.

Ключевые слова: имитационная модель, миграции, города, моногорода, инфраструктурные проекты.
JEL: C63, R12, R23, R32.

Введение

В настоящее время в России научно-методическое обоснование целеполагания основных стратегических документов, определяющих пространственное развитие Российской Федерации, требует усиления. Цели и задачи пространственного развития зачастую формируются на основе ситуативных территориальных потребностей, а научно обоснованный подход к анализу сценариев пространственного развития экономики и последствий их реализации при изменении экономических условий в отдельных субъектах РФ и в России в целом в отечественной практике развит слабее, чем в США и странах ЕС.

Построенная авторами имитационная пространственная модель развития российских городов и методика сценарного анализа пространственного развития, проводимого с ее помощью, направлены на смягчение данной ситуации и могут рассматриваться как шаг в направлении создания более взвешенного и научно обоснованного подхода к формированию пространственной политики на базе

оценки социально-экономических эффектов от планируемых мероприятий на микроуровне.

Подходы к имитационному моделированию

При моделировании социально-экономических систем применяется пять основных классов моделей:

- эконометрические модели;
- модели общего экономического равновесия;
- имитационное моделирование;
- нейросетевое моделирование;
- гибридные модели.

Эконометрические модели подходят для исследования стабильных и слабо динамичных систем и позволяют изучать количественные и качественные взаимосвязи между элементами системы. Эти модели применяются в статистических методах исследования, однако они не дают возможности выявлять причинно-следственные связи и поэтому не могут выступать самодостаточным методом моделирования. Вместе с тем их применение способно повысить

Ростислав Кирилл Владимирович, научный сотрудник РАНХиГС при Президенте Российской Федерации (Москва), e-mail: rostislav-ku@ranepa.ru; Пономарев Юрий Юрьевич, заведующий лабораторией инфраструктурных и пространственных исследований РАНХиГС при Президенте Российской Федерации; старший научный сотрудник Института экономической политики имени Е.Т. Гайдара, канд. экон. наук (Москва), e-mail: ponomarev@ranepa.ru; Радченко Дарья Максимовна, научный сотрудник РАНХиГС при Президенте Российской Федерации (Москва), e-mail: radchenko-dm@ranepa.ru

точность других классов моделей в процессе калибровки или расчета параметров.

Модели общего экономического равновесия — широко распространенный инструмент моделирования макропроцессов, описывающий поведение всех действующих в системе агентов/рынков; как правило, он представляет собой сложную систему уравнений, решением которой является общее экономическое равновесие системы. Модели общего экономического равновесия используются для оценки влияния изменения в одном секторе экономики на все остальные.

Имитационное моделирование — логико-математический способ моделирования систем и процессов; он представляет собой набор правил, определяющих переход системы от текущего состояния к последующему в следующий период времени (итерацию модели). Имитационный подход наиболее эффективен в ситуациях, когда необходимо проанализировать большое число факторов и возможных сценариев развития. Отдельным преимуществом данного класса моделей является возможность постепенного повышения детализации моделируемых подсистем до достижения динамики, схожей с исходной системой, что позволяет достичь баланса между упрощением и реалистичностью с минимальным количеством затраченных ресурсов.

Нейросетевое моделирование — метод моделирования, применяемый для исследования слабо формализуемых систем или процессов, а также используемый при неполных или искаженных данных. Как и эконометрические методы, нейросетевое моделирование дает возможность повысить точность других методов моделирования, однако на его основе нельзя построить исчерпывающую модель исходной системы, поскольку данный метод функционирует в качестве «черного ящика», не позволяющего выявить причинно-следственные связи между взаимодействующими элементами системы.

Гибридные модели — моделирование, при котором совмещаются подходы и модели из

разных классов для увеличения точности итоговой модели.

Имитационное моделирование часто используется для пространственных исследований ввиду его преимуществ в работе с большим количеством возможных подсистем. В рамках имитационного моделирования, в свою очередь, выделяют три подхода:

- дискретно-событийное моделирование;
- системную динамику;
- агент-ориентированное (агентное) моделирование.

Дискретно-событийное моделирование, как правило, применяется для моделирования производственных процессов и малоприспособно для описания сложных социально-экономических систем, поскольку в нем вместо непрерывного или дискретного времени рассматриваются отдельные события моделируемой системы.

Системная динамика — метод моделирования, при котором для объекта исследования строятся причинные связи влияния одних параметров на другие, а затем на основе полученных взаимовлияний симулируется модель. Данный метод подходит для имитирования макроуровней, показателей с высокой степенью агрегации.

Агентное моделирование направлено на изучение децентрализованных систем, исследование динамики поведения системы, определяемой функционированием множества индивидуальных агентов, действующих по своим локальным правилам поведения. Этот подход симулирует систему «снизу вверх», рассматривая влияние поведения, взаимодействия агентов на микроуровне на итоговый результат работы всей системы. Таким образом, в имитационных моделях агент-ориентированного подхода одну из парадигм представляет собой явление самоорганизации — возникновение сложной общей динамики системы из простых связей, лежащих в основе имитации.

Специфика пространственных моделей заключается в учете пространственной привяз-

ки. Выделяют как явно пространственные модели, для которых важно соседство, так и пространственные модели, в которых имеется пространственное деление, но не в явном виде. Так, в явно пространственных моделях влияние на динамику определенного места оказывают непосредственные места-соседи, и, как правило, чем ближе места-соседи расположены к исходному месту, тем сильнее их влияние на него. В не явно пространственных моделях влияние на определенное место может оказывать общая динамика системы, а не непосредственные соседи.

Таким образом, явно пространственные модели лучше всего симулируются на основе агент-ориентированного подхода, который позволяет учитывать сложность пространственных взаимодействий, локальные особенности среды и поведения агентов.

В последние годы агент-ориентированные модели все чаще используются для анализа сложных динамических процессов, в том числе для формирования и развития городской среды [8–11; 13]. Особенность имитационных моделей с агентами состоит в том, что они позволяют анализировать динамику макропоказателей за счет агрегации результатов действий и решений неоднородных и зачастую очень дробных субъектов — отдельных лиц и предприятий. Это дает возможность учитывать достаточно детализированные и специфические характеристики как самих субъектов (например, половозрастную структуру населения или производительность предприятий), так и внешних для них условий (наличие социальной или транспортной инфраструктуры, качество городской среды и др.). Одно и то же событие, например строительство дороги, в агентной модели может приводить к разным последствиям в зависимости от локальных условий (характеристик окружающих территорий и др.), при этом эффект не определяется для системы глобально и исходя из оценок прошлых наблюдений.

К преимуществам агент-ориентированных моделей можно отнести также и то, что они, в

отличие от традиционных моделей, не зависят от недостатка теоретической базы, допуская при этом значительную гибкость моделирования за счет проверяемых теоретических предпосылок и широких возможностей калибровки. При агентном подходе применяются поведенческие модели, с тем чтобы реалистичнее представлять поведение субъектов и моделировать агентов как продвинутые когнитивные единицы, участвующие в долгосрочном планировании и познающие окружающую среду.

Еще одним преимуществом агентных моделей является то, что на различных уровнях агрегации (как на микро-, так и на макро-) могут моделироваться эффекты обратной связи, т.е. эффекты взаимного влияния различных факторов друг на друга. Так, Дессенбер и др. с помощью региональной агентной модели для 27 стран Евросоюза показали, как накопление навыков и опыта и их распределение в экономике влияют на скорость технологических изменений, динамику занятости и заработной платы [9]. Позднее на базе этой модели было проведено большое количество исследований по разным темам: влиянию различных факторов на деловые циклы (см., например, [14; 17]), выявлению факторов смещения банковской политики в сторону «зеленых инвестиций» [16], образованию пузырей на рынке недвижимости [10] и т.д.

Эттема и др. использовали многоагентную модель для прогнозирования процессов урбанизации в масштабе агломерации [11]. Моделированию социально-экономического развития Москвы посвящены исследования [4] и [13].

Тсекерис и др. предложили концепцию основанной на принципах новой экономической географии мультирегиональной агентной модели выбора местоположения домохозяйствами и фирмами с эндогенными транспортными издержками [18]. На ее основе авторы провели симуляцию развития населения в Советском Союзе и постсоветских странах.

Структура имитационной пространственной модели

Разработанная¹ авторами имитационная пространственная модель базируется на идеях, схожих с предложенными Тсекерисом и др. [18], однако основное отличие модели данных авторов от нашей состоит прежде всего в меньшей детализации – мы переходим от моделирования на уровне городов в целом как отдельных субъектов (агентов) к моделированию поведения отдельных лиц и предприятий. Кроме того, в нашей модели учитывается реальная конфигурация дорожных связей между городами, по которой вычисляются расстояния и оцениваются транспортные издержки [8], а также рассматривается ряд других механизмов, которые позволяют проводить более обоснованное моделирование.

Построенная нами имитационная модель описывает распределение населения и компаний по 237 крупным и средним российским городам из 76 субъектов Федерации, а также позволяет строить прогнозы этого распределения на кратко- и среднесрочный периоды. Отправная точка (стартовый период) модели – январь 2014 г., шаг (минимальный рассматриваемый промежуток времени в модели) – один месяц.

В модели представлены четыре класса агентов: государство, города, фирмы и индивиды. Непосредственно активными, т.е. действующими на основе решения своих оптимизационных задач, среди этих классов агентов являются только фирмы и индивиды, в то время как государство и города задают условия, в которых фирмы и индивиды принимают решения.

Так, государство лишь собирает налоги и использует их, чтобы поддерживать убыточные, но градообразующие предприятия.

Город – это место, в котором живут и/или работают индивиды, возникают, хозяйствуют и закрываются фирмы. Для индивидов и фирм города задают следующие условия:

- общее число жителей (индивидов, по возрастам) и предприятий (фирм);
- ставку аренды жилья (индивиды в модели лишь снимают жилье – ср. с условно исчисленной платой за проживание в собственном жилище в системе национальных счетов);
- уровень издержек нетрудовых факторов производства на одного работника (недвижимость и другие виды основного капитала фирмы в модели только арендуют – ср. с затратами пользователя в системе национальных счетов; пропорция трудовых и нетрудовых издержек постоянна для предприятий одного города);
- ожидаемый средний уровень заработной платы (в начальном состоянии модели – средняя зарплата согласно оценкам Росстата);
- уровень цен на потребительские товары (прожиточный минимум для трудоспособного населения);
- уровень бедности;
- затраты времени на поездку по городу и на поездки в другие города (на автомобиле);
- качество городской среды (безопасность, озеленение, разнообразие городских пространств и прочие наблюдаемые и ненаблюдаемые характеристики, которые могут быть обобщены термином *amenities* в англоязычных источниках, например в [6];
- рождаемость фирм.

При этом изменение условий (характеристик) города – это и причина, и следствие решений индивидов и фирм. Так, миграционный приток увеличивает людность городов, из-за чего растут уровень цен на потребительские товары и ставки заработной платы. Предприятия, с одной стороны, получают преимущество от большего рынка труда, что приводит к увеличению их рождаемости (что эквивалентно все большему относительному сосредоточению предприятий в городе), а с другой – они больше платят за труд. Кроме того, из-за

¹ На программном уровне модель реализована в среде R. URL: <http://noo1.ranepa.ru/files/ImitationModel/code.docx>; <https://www.ranepa.ru/images/intel-sob/sv2020610161.pdf>

затрат времени на поездки растут издержки упущенных возможностей, так что в какой-то точке дальнейшее сосредоточение предприятий может стать избыточным, миграции сменят направление и, например, начнется рост пригородов. Исключением из этой логики являются следующие показатели: уровень нетрудовых издержек на одного работника предприятия, уровень цен на потребительские товары и качество городской среды – в модели они принимались постоянными.

Рассмотрим более детально основные активные классы агентов.

Начнем с поведения *фирм*. На каждом шаге модели фирмы подсчитывают прибыль и принимают решение: расширяться ли, открывая вакансии и нанимая новых работников, или сокращать штат (не более чем наполовину за шаг), чтобы уменьшить издержки и получить прибыль. Без работников предприятие не может действовать, поэтому оно закрывается, если сократило штат и не смогло заполнить открытые ранее вакансии. Создавая вакансии, предприятие руководствуется текущей ожидаемой средней заработной платой в городе; ставка вакансии – случайная величина с усеченным (не меньше прожиточного минимума, но не больше 30 таких минимумов) нормальным распределением.

Издержки фирм определяются числом их работников: каждый работник получает заработную плату, а нетрудовые издержки пропорциональны числу работников, причем города различаются в этой пропорции. Пропорция для фирм одного города в модели постоянна и устанавливалась посредством калибровки параметров на основе данных сплошного наблюдения за деятельностью субъектов МСП за 2015 г. Для этого мы брали отношение среднесписочной численности работников к сумме стоимости аренды машин и площадей, а также расходов на сырье, топливо, энергию и пр. [3].

Начальное распределение выручки фирм города взято из открытой финансовой и бухгалтерской отчетности организаций (данные Росстата). Изменение выручки фирм в модели

происходит согласно закону Жибра, который ведет к обычно наблюдаемому логарифмически нормальному распределению размеров фирм (их распределение описывают также степенным законом, но на практике отличить его от логарифмически нормального распределения сложно, поэтому итоговое приближение удовлетворительное) [7]:

$$\frac{R_{it}}{R_{i,t-1}} = \varepsilon_t,$$

где R_{it} – выручка фирмы i на шаге t ; $R_{i,t-1}$ – выручка фирмы i на шаге, предшествующем t ; ε_t – прирост выручки, заданный случайной величиной из усеченного (чтобы исключить бесконечно большой прирост) нормального распределения; математическое ожидание (0 в модели) и дисперсия случайной величины (0,5) не зависят от объема выручки.

Особым образом моделировалось положение градообразующих предприятий, на которых работает не менее 20% занятых в городе. Если в каком-то периоде выручка градообразующих предприятий меньше их издержек, государство покрывает разницу, чтобы сохранить занятость в городе. Напротив, прибыльные фирмы уплачивают государству налог с прибыли.

Перераспределение фирм между городами происходит за счет различий в рождаемости (и смертности) предприятий между городами. Чем выше рождаемость предприятий, тем большие преимущества получают крупные города с многочисленными фирмами: чем больше в городе производителей, тем устойчивее местная экономическая система к случайным шокам.

В конечном счете изменения в географии производства зависят от того, могут ли предприятия найти работников, т.е. главный двигатель модели – это поведение *индивидов*.

В качестве каждого отдельного агента-индивида в модели рассматривается группа в размере 1000 человек в возрасте от 20 до 69 лет. Такое масштабирование принято для обеспечения возможности реализации программных

вычислений модели за конечное разумное время за счет упрощения вычислений, однако при этом масштабирование усложняет воспроизведение моделью структуры населения. Так, если население города составляет 50 тыс. человек, то в модели в нем лишь 50 индивидов, и если в действительности доля безработных или людей в возрасте 26 лет составляет 1%, то в модели потребовалось бы присвоить такой признак условной «половине» индивида. Другой пример – 1%-ный естественный прирост населения.

Чтобы исключить такие сложности, мы присваивали населению признаки с помощью биномиального распределения, где вероятность – это доля или прирост, как в приведенных примерах, а количество повторений – численность соответствующей группы индивидов в модели. Из-за масштабирования и применения распределений (иначе нельзя описать поведение отдельных людей, поскольку в статистике такой дробности не существует) для каждого набора параметров модель запускалась 15 раз с разным начальным значением (для генерации разных значений тех же случайных величин), после чего предсказания моделей усреднялись.

Естественное изменение численности населения в модели описывается простой сменной поколений, для чего используются оценки Росстата для структуры населения по всем возрастам: поколение, которому исполняется 20 лет, входит в модель, а поколение, которому исполняется 70 лет, из модели выбывает. Так как шаг в модели – месяц, а не год, индивидам случайным образом (на основе равномерного распределения) присваивается месяц рождения. В этом смысле естественная точность, по которой можно судить о качестве построенной имитационной модели, – это сопоставление с точностью предсказаний простой модели смены поколений без дополнительных надстроек.

Ценность индивида как возможного работника для предприятия (производительность), следуя идеям [5] и [12], в модели зависит от

возраста индивида и его личных качеств (особенностей). Связь между возрастом и производительностью мы полагали пропорциональной отклонению доходов по возрастным группам от средних доходов для населения в целом согласно оценкам Росстата. Что касается личных особенностей, то они моделировались случайной величиной с усеченным (чтобы исключить отрицательные или экстремально большие значения) нормальным распределением (со средним 0, дисперсией 0,1, нижняя и верхняя границы приняты за -0,3 и +0,3 соответственно). В итоге производительность индивида в возрасте j (ценность как работника) определяется выражением: [(средние по стране доходы в возрасте j) : (средние по стране доходы для всех возрастов)] + (случайная величина, отражающая личные особенности).

Эта мера ценности индивида как работника используется, во-первых, чтобы задать начальное распределение доходов индивидов (полагаются равными произведению средней по городу зарплаты и этого личного множителя, но не меньше прожиточного минимума) и издержек предприятий, а во-вторых, чтобы описать конкуренцию за наиболее доходные вакансии, так как чем выше ставка, тем выше и требования к работникам (выраженные в минимальном требуемом коэффициенте ценности индивида как работника). Такая конкуренция определяет динамику безработицы в ходе работы имитационной модели, но в начальном состоянии распределение индивидов на занятых и безработных случайно (главное условие – это правильная доля безработных, как в оценках Росстата). Из двух кандидатов, подходящих по требованиям, вакансию занимает тот, чей показатель ценности выше. Борьба за вакансии продолжается до тех пор, пока не будут исчерпаны либо вакансии, либо претенденты.

Такая борьба протекает локально, но границы местного рынка труда могут быть шире, чем только один город: построенная имитационная модель успешно воспроизводит маятниковые миграции. Подбор параметра, который определяет максимально возможные

затраты времени на поездку на работу в другой город, — задача калибровки. Издержки на поездку — часть расходов индивида: они оцениваются как доход, который мог бы получить индивид, если бы вместо потерь времени на поездку работал то же время.

Средние затраты времени на поездку по городу мы оценили как средние затраты времени между всеми парами 100 случайных точек на улично-дорожной сети города. Для оценивания затрат мы использовали геометрию OpenStreetMap (OSM) и API Open Source Routing Machine (OSRM). Оценки времени — для поездки на легковом автомобиле. Теми же средствами (OSM и API OSRM) мы оценили время поездки между центрами всех городов модели.

Другие статьи расходов индивида — на оплату жилья и покупку потребительских товаров. Плата за жилье у всех жителей города одинакова, но потребительские расходы — случайная величина: их задает усеченное (расходы не могут быть ниже прожиточного минимума или превышать доходы) нормальное распределение (ожидание — половина дохода, дисперсия — 3 тыс. руб.).

В рамках каждого шага модели индивиды решают задачу по максимизации своего ожидаемого достатка, исходя из возможностей переезда в другой город (или неизменности местоположения). Для переезда должны *одновременно* выполняться следующие условия:

- 1) новый город обещает более высокий реальный уровень доходов (за счет более дешевого жилья, меньших транспортных расходов и более дешевых потребительских товаров);
- 2) у индивида достаточно средств для оплаты переезда и съема жилья в первый месяц (ход модели) — люди, которым не хватает средств даже на покупку минимального набора потребительских товаров или у которых нет достаточных для переезда сбережений, попадают в ловушку бедности и не могут улучшить свое положение с помощью миграции;

- 3) в новом городе ниже уровень бедности — индивиды избегают городов с неблагоприятной обстановкой (это поправка для средней зарплаты, которая плохо измеряет ожидаемый доход, если в городе много безработных);
- 4) городская среда в новом городе комфортнее (лучше благоустройство, выше безопасность и пр.).

Если решение о переезде принимает безработный или если речь идет о переезде в город за пределами изохроны маятниковой миграции, то первое условие переезда из приведенного выше перечня определяется исходя из ожидаемого уровня доходов, т.е. средней зарплаты в новом городе. Если же переезд не требует увольнения (например, при переезде в пригороды — субурбанизации), то индивид рассматривает возможность экономии за счет более дешевого жилья и более низких потребительских цен, но с учетом возросших издержек на поездки на работу и обратно.

Указанному набору условий для переезда могут удовлетворять несколько городов. В таком случае индивид отдает предпочтение переезду в ближайшие города в пределах изохроны маятниковых миграций. В остальном выбор между возможными для переезда городами случайный (в противном случае в модели происходили бы массовые разовые миграции лишь в самые привлекательные города, в то время как в действительности миграционный обмен происходит между городами разных типов; кроме того, случайность отражает применяемое в других исследованиях (например, в [6]) идиосинкразическое отклонение, связанное с личным предпочтением того или иного места).

Миграции и естественное движение населения изменяют свойства городов: от прироста числа жителей зависит ожидаемая средняя зарплата в городе и уровень цен на жилье. Пусть \tilde{W}_{kt} — ожидаемая средняя зарплата в городе k во время t ; P_{kt} и $P_{k,t+1}$ — число жителей в городе k на шаге t и на следующем за ним шаге $t+1$ соответственно; α — параметр, который определяет зависимость изменения

ожидаемой зарплаты в городе от изменения числа его жителей. В модели ожидание зарплаты $\tilde{W}_{k,t+1}$ в городе k на следующем за t шаге $t + 1$ устанавливается следующим образом:

$$\tilde{W}_{k,t+1} = \tilde{W}_{kt} + \frac{P_{k,t+1} - P_{kt}}{P_{kt}} \alpha.$$

Аналогично описывается зависимость для уровня цен на жилье. Подбор параметров был задачей калибровки.

Описание базы данных

Для задания начального состояния модели и ее калибровки был сформирован набор показателей, представленный в табл. 1.

Географический охват модели ограничили прежде всего сведения о стоимости жилья. Из-за недостаточности данных выпали города Севастополь и Якутск, города Сахалинской области, Республики Крым и ряда кавказских республик.

Таблица 1
Показатели, задающие начальное состояние в имитационной модели

Показатель	Источник
Численность постоянного населения	Бюллетень Росстата «Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям»
Численность городского населения по возрастам	База данных «Показатели муниципальных образований» в разрезе субъектов Российской Федерации, Росстат, 2019 г.
Размер денежных доходов населения	
Уровень безработицы по методологии МОТ в возрасте 15-72 лет	ЕМИСС
Структура численности постоянного населения по возрастным группам	
Величина прожиточного минимума	
Плата за арендуемые помещения юридических лиц (для юридических лиц, в разрезе субъектов Федерации)	
Расходы на сырье, топливо, энергию и пр., аренду машин и площадей (для юридических лиц, в разрезе субъектов Федерации)	Сплошное наблюдение за деятельностью субъектов малого и среднего предпринимательства, Росстат, 2015 г.
Число замещенных рабочих мест (для юридических лиц, в разрезе субъектов Федерации)	
Цена аренды жилья по городам с декабря 2013 г. по сентябрь 2019 г.	Сайт «Домофонд»
Средняя начисленная заработная плата по обследованным видам экономической деятельности по возрастным группам	Росстат
Выручка по отдельным организациям	Бухгалтерская отчетность организаций в открытых данных Росстата
Адреса организаций	Портал «За честный бизнес»
Дорожная сеть, здания, границы городов	OpenStreetMap
Затраты времени и расстояние между городами	
Затраты времени на поездку между заданными точками в городе	OpenStreetMap, API Open Source Routing Machine
Оценки качества городской среды	Индекс дом.рф

Источник: составлено авторами.

Результаты калибровки модели и базовый сценарий

Для калибровки параметров модели рассматривался базовый сценарий — такое развитие событий в модели, при котором после определения начального состояния не происходит каких-либо внешних шоков. Калибровка параметров проводилась с помощью генетического алгоритма, реализованного в пакете *rgenoud* для R [15], в котором в качестве целевой функции рассматривалась минимизация ошибки предсказания числа жителей по городам. Для калибровки использовались 2014–2017 гг. Результаты были усреднены по данным 15 прогнозов для 237 городов в течение 49 модельных шагов (месяцев). Полученные в итоге оптимальные значения параметров модели, а также интервал возможных значений представлены в табл. 2.

Анализ показывает, что построенный с использованием полученных по результатам калибровки значений параметров с помощью имитационной пространственной модели прогноз численности жителей в российских городах с 1 января 2014 г. по 1 января 2018 г. ощутимо точнее, чем прогноз на основе модели перекрывающих поколений, как по абсолютной, так и по среднеквадратичной ошибке: 5,50 против 5,55 и 11,9 против 12,4 (все значения — в тысячах человек) соответственно.

Внутривыборочный прогноз в 2014–2018 гг. показывает, что наибольший абсолютный прирост людности среди нестоличных городов наблюдался в Уфе, Махачкале, Казани, Омске и Красноярске. Доля бедных индивидов (с расходами на потребительские товары ниже прожиточного минимума) в городах в течение рассматриваемого периода была стабильной (около 5%), однако есть несколько городов, где она значительно превышала этот уровень, причем в основном это крупные города (Москва, Санкт-Петербург, Сочи, Хабаровск и т.д.). Это связано с тем, что в модели доля бедных индивидов в городе косвенно зависит от уровня арендной платы за жилье, а он повышается с ростом численности населения.

Основные потоки исходящей миграции сосредоточены в городах с людностью до 500 тыс. человек. Индивиды не стремятся переехать в самые крупные города — основные входящие потоки наблюдаются только в городах с численностью населения 100–500 тыс. человек. Таким образом, модель с течением времени демонстрирует снижение численности наименьших городов и перераспределение населения между городами с числом жителей до 500 тыс., что в целом соответствует действительности [1].

Полученные результаты по динамике миграции совпадают с основными трендами,

Таблица 2
Калибровочные параметры модели

Показатель	Содержательная интерпретация	Интервал возможных значений	Значение по результатам калибровки
Рождаемость фирм	Доля новых фирм (открытых за год) в общем числе уже действовавших в городе фирм	(0, 2)	0,1
Изохрона маятниковых миграций	Каково максимально возможное время поездки на работу в другой город	(45, 240)	150 мин
Зависимость ожидаемой зарплаты в городе от изменения числа его жителей	Насколько увеличится ожидаемая зарплата в городе (ориентир для открытия вакансий фирмами и для решений индивидов о переезде) при увеличении числа его жителей на 1%	(-3000, +10 000)	2500 руб.
Зависимость цен на жилье в городе от изменения числа его жителей	Насколько увеличится цена жилья в городе (ориентир для решений индивидов о переезде) при увеличении числа его жителей на 1%	(-3000, +10 000)	1700 руб.

Источник: составлено авторами.

наблюдающимися в последнее время: например, стабилен приток рабочей силы в города — ядра агломераций. Примечательно, что обратный поток мигрантов практически во всех подобных случаях — незначительный или нулевой (более низкий уровень оплаты труда и повышенные транспортные издержки на периферии не компенсируются более низкой стоимостью проживания).

В целом по стране наиболее сильны маятниковые связи в зоне Московской агломерации. Значительная часть маятниковых мигрантов из данного региона направлена в центр Москвы из-за централизованности размещения рабочих мест. Также трудовые мигранты оседают в периферийных районах столицы, что сокращает время в пути и позволяет маятниковым мигрантам из отдаленных муниципалитетов Подмосковья работать в Москве [2].

Прогноз до 2024 г. показывает: в большей части городов ожидается уменьшение численности жителей в среднем на 2–3% по сравнению с 2018 г. Наибольшая убыль (на 6–7%) ожидается в Тосно и Волхове (Ленинградская область), Лобне (Московская область) и Рязани. Почти неизменно в прогнозе число жителей некоторых крупных городов: Казани, Уфы, Тюмени, Иркутска, Чебоксар и Ставрополя. Наибольший прирост населения ожидается в городах Юга России и автономных округов Тюменской области, особенно ощутимый — в Каспийске и Махачкале (+10%), Ноябрьске и Новом Уренгое (+6–7%).

Сценарный анализ

На основе построенной имитационной модели рассмотрены два модельных сценария пространственного развития: повышения связанности территорий (сценарий 1) и закрытия градообразующего предприятия в моногородах (сценарий 2).

Сценарий 1 «повышение транспортной связанности городов» в качестве модельного примера предполагает реконструкцию автомобильной дороги между Сочи и Туапсе (входит в проект скоростной дороги А147 «Джубга —

Сочи»). Средняя скорость движения на этом участке в настоящее время составляет около 42 км/ч — наименьшее значение среди всех пар городов в модели. Расчетная скорость на автомагистрали Сочи — Джубга (119 км) или на ее более экономном варианте Сочи — Туапсе (80,5 км) составила бы в результате реконструкции 120 км/ч. Ожидается, что строительство уменьшило бы время поездки между Туапсе и Сочи настолько, что стали бы возможны эти маятниковые трудовые миграции между этими городами.

Примечательно, что все больше жителей Туапсе начинает работать в Сочи, но сочинцы не едут работать в Туапсе. Прирост среднего уровня заработной платы для жителей Туапсе оказывается больше, причем у жителей Сочи уровень доходов не снижается, поскольку фактически в модели происходит размен: индивиды получают возможность найти работу, подходящую им по уровню квалификации, но с большей зарплатой. При этом в базовом сценарии жители Сочи также не работают в Туапсе (слишком велики затраты времени на регулярные поездки), а жители Туапсе предпочитают работать в Геленджике (а те, в свою очередь, в Новороссийске). Рост доходов совпадает с результатами сценария 2, т.е. доходы не связаны с повышением транспортной связанности. Тем не менее возрастает численность жителей Туапсе, работающих в другом городе, а значит, сокращение времени в пути между городами благоприятно влияет на динамику маятниковых миграций.

В сценарии 2 «закрытие градообразующего предприятия» исследовательский интерес представляет адаптация (особенно ее скорость) системы расселения к такому шоку. Для сценария были отобраны шесть моногородов: Кумертау (Республика Башкортостан), Черногогорск (Республика Хакасия) и Каспийск (Республика Дагестан) — с наиболее сложным социально-экономическим положением, а также Алексин (Тульская область), Димитровград (Ульяновская область) и Златоуст (Челябинская область). Выбор последних связан с ус-

тойчивостью существования в них градообразующего предприятия в базовом сценарии. Ожидается, что в результате закрытия градообразующего предприятия в краткосрочном периоде возрастут безработица и доля населения за чертой бедности, однако подобный эффект быстро угаснет, так как жители с низким уровнем дохода в короткие сроки вынуждены будут найти себе новую работу. Предприятия в сценарии закрываются в 2015 г.

В результате закрытия градообразующего предприятия в каждом из шести городов происходит сокращение от 16 до 45% численности населения, доля бедных при этом возрастает до 5,5 раза, 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 (необязательно в своем городе). Так, около 25% жителей Алексина находят новое место работы в Москве, в результате чего почти в три раза повышаются их средние затраты на ежедневные поездки. Этот случай также примечателен тем, что оставшиеся без работы жители Алексина в качестве нового места трудоустройства в основном выбирают Москву вместо регионального центра (г. Тула), хотя расстояние до последнего меньше в 2,5 раза (от Алексина до Тулы — 70 км, до Москвы — 180 км).

Заключение

Построенная и представленная в статье имитационная модель позволяет описывать существующее распределение домохозяйств и компаний в пространстве российских городов, а также строить соответствующие прогнозы на кратко- и среднесрочный периоды.

Как показал анализ, модель с высокой степенью точности предсказывает изменение численности жителей городов — в частности, в

рамках тестирования в 2014–2018 гг. наибольший абсолютный прирост людности среди нестолических городов наблюдался в Уфе, Махачкале, Казани, Омске и Красноярске.

Прогноз до 2024 г. показывает: в большей части городов ожидается уменьшение численности жителей в среднем на 2–3% по сравнению с 2018 г. Наибольшая убыль (на 6–7%) ожидается в Тосно и Волхове (Ленинградская область), Лобне (Московская область) и Рязани. Почти неизменно в прогнозе число жителей некоторых крупных городов: Казани, Уфы, Тюмени, Иркутска, Чебоксар и Ставрополя. Наибольший прирост ожидается в городах Юга России и автономных округов Тюменской области, особенно ощутимый — в Каспийске и Махачкале (+10%), Ноябрьске и Новом Уренгое (+6–7%).

Кроме того, среди ключевых элементов модели можно выделить возможности анализа:

- эффектов от реализации инфраструктурных транспортных проектов — например, направлений и ареалов маятниковых миграций. Это позволяет использовать модель для оценивания изменений в структуре регулярных трудовых поездок, наведенных ускорением или замедлением сообщения между городами. Симуляция открытия скоростного сообщения (строительство новой скоростной автодороги) между Сочи и Туапсе показала, что ускорение связи между этими городами² с 40 до 120 км/ч приводит лишь к локальным изменениям в числе маятниковых мигрантов примерно на 1 тыс. работников из каждого города³, но не отражается на общем уровне доходов жителей этих городов;
- междугородных миграций. В симуляции для 2018–2024 гг. модель, среди прочего, предсказывает отток 3 тыс. потенциальных работников в возрасте от 20 до 69 лет из Новомосковска (Тульская область);

² Рассматривалось повышение расчетной скорости движения до 120 км/ч на планируемом к реконструкции участке автомобильной дороги А147 «Джубга — Сочи» между городами Сочи и Туапсе.

³ Численность маятниковых мигрантов из Туапсе в Геленджик сокращается на 4%, при этом 3,2% всех жителей Туапсе начинают работать в Сочи (до реконструкции жители Туапсе вообще не работали в Сочи).

- эффектов от закрытия градообразующих предприятий, что особенно критично для моногородов. Так, в одном из сценариев было рассмотрено закрытие градообразующих предприятий в трех моногородах с наиболее сложным социально-экономическим положением: Кумертау (Республика Башкортостан), Черногорске (Республика Хакасия) и Каспийске (Республика Дагестан), а также в трех моногородах с рисками ухудшения социально-экономического положения: Алексине (Тульская область), Димитровграде (Ульяновская область) и Златоусте (Челябинская область) (согласно делению, утвержденному в 2014 г.). Модель предсказывает довольно быструю адаптацию экономического пространства к новым условиям за счет маятниковых миграций в соседние города – при условии наличия там вакансий. При таком сценарии, однако, благосостояние жителей моногородов падает из-за резко возросших транспортных расходов, несмотря на, возможно, более высокие заработки в других городах. Закрытие градообразующих предприятий в четырех из шести городов вызвало умеренный миграционный отток из них.
- Дальнейшее развитие имитационной пространственной модели предполагает увеличение 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 распространение модели на более широкий спектр территориальных образований. ■

Литература

1. Бирюкова Е.В. Особенности демографической ситуации в малых городах ЦЧР и их муниципальных районах // Научные ведомости БелГУ. Сер. «Естественные науки». 2017. № 11 (260). Вып. 39. С. 176–185.
2. Махрова А.Г., Бочкарев А.Н. Маятниковая миграция в Московском регионе: новые данные // Демоскоп Weekly. 2017. № 727–728. С. 1–25.
3. Сплошное наблюдение за деятельностью малого и среднего бизнеса за 2015 год / Росстат. URL: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/splosh.html
4. Фаттахов М.Р. Агентно-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы // Экономика и математические методы. 2013. Т. 49. № 2. С. 30–43.
5. Allen T. et al. Optimal City Structure // Working Paper. 2015.
6. Allen T., Arkolakis C. Trade and the Topography of the Spatial Economy // The Quarterly Journal of Economics. 2014. Vol. 129. No. 3. Pp. 1085–1140.
7. Axtell R.L. Zipf distribution of U.S. firm sizes // Science. 2001. Vol. 293. No. 5536. Pp. 1818–1820.
8. Cottineau C., Chapron P., Reuillon R. Growing Models from the Bottom Up: An Evaluation-Based Incremental Modelling Method (EBIMM) Applied to the Simulation of Systems of Cities // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2015. Vol. 18. No. 4. Pp. 1–19.
9. Deissenberg C., Hoog S. van der, Dawid H. EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy // Applied Mathematics and Computation. 2008. Vol. 204. No. 2. Pp. 541–552.
10. Erlingsson E.J. et al. Housing Market Bubbles and Business Cycles in an Agent-Based Credit Economy // Economics. 2014. Vol. 8. No. 1. Pp. 1–42.
11. Ettema D. et al. Puma: Multi-Agent Modelling of Urban Systems // Modelling Land-Use Change: Progress and Applications / ed. by Koomen E. et al. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. Pp. 237–258.
12. Graham D.J. Agglomeration, Productivity and Transport Investment // Journal of Transport Economics and Policy. 2007. Vol. 41. No. 3. Pp. 317–343.
13. Makarov V., Zhitkov V., Bakhtizin A. Moscow traffic jam is under attack of an intelligent agent-based model // Conference Proceedings – 6th Conference of the European Social Simulation Association, ESSA 2009. 2009.
14. Mazzocchetti A. et al. Securitization and business cycle: an agent-based perspective // Industrial and Corporate Change. 2018. Vol. 27. No. 6. Pp. 1091–1121.
15. Mebane Jr. W.R., Sekhon J.S. Genetic Optimization Using Derivatives: The rgenoud Package for R // J. Stat. Soft. 2011. Vol. 42. No. 11. Pp. 1–26.

16. Raberto M. et al. From financial instability to green finance: the role of banking and credit market regulation in the Eurace model // *Journal of Evolutionary Economics*. 2019. Vol. 29. No. 1. Pp. 429–465.
17. Raberto M., Teglio A., Cincotti S. Debt, Deleveraging and Business Cycles: An Agent-Based Perspective // *Economics*. 2012. Vol. 6. No. 1. Pp. 1–49.
18. Tsekeris T., Vogiatzoglou K., Bekiros S. Multi-Regional Agent-Based Modeling of Household and Firm Location Choices with Endogenous Transport Costs. Louvain-la-Neuve: European Regional Science Association (ERSA). 2010.

References

1. Biryukova E.V. Features of the demographic situation in small towns of the Central Chernozem Region and their municipal districts // *Nauchnye Vedomosti of the Belgorod State University. Ser. Natural Sciences*. 2017. No. 11 (260). Issue 39. Pp. 176–185.
2. Makhrova A.G., Bochkarev A.N. Shuttle migration in the Moscow region: new data // *Demoskop Weekly*. 2017. No. 727–728. Pp. 1–25.
3. Stop-watch reading of small and medium-sized businesses for 2015 / Rosstat. URL: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/splosh.html
4. Fattakhov M.R. Agent-based modeling of Moscow's socio-economic development // *Economics and Mathematical Methods*. 2013. Vol. 49. No. 2. Pp. 30–43.
5. Allen T. et al. Optimal City Structure // Working Paper. 2015.
6. Allen T., Arkolokis C. Trade and the Topography of the Spatial Economy // *The Quarterly Journal of Economics*. 2014. Vol. 129. No. 3. Pp. 1085–1140.
7. Axtell R.L. Zipf distribution of U.S. firm sizes // *Science*. 2001. Vol. 293. No. 5536. Pp. 1818–1820.
8. Cottineau C., Chapron P., Reuillon R. Growing Models from the Bottom Up: An Evaluation-Based Incremental Modelling Method (EBIMM) Applied to the Simulation of Systems of Cities // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2015. Vol. 18. No. 4. Pp. 1–19.
9. Deissenberg C., Hoog S. van der, Dawid H. EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy // *Applied Mathematics and Computation*. 2008. Vol. 204. No. 2. Pp. 541–552.
10. Erlingsson E.J. et al. Housing Market Bubbles and Business Cycles in an Agent-Based Credit Economy // *Economics*. 2014. Vol. 8. No. 1. Pp. 1–42.
11. Ettema D. et al. Puma: Multi-Agent Modelling of Urban Systems // *Modelling Land-Use Change: Progress and Applications* / ed. by Koomen E. et al. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. Pp. 237–258.
12. Graham D.J. Agglomeration, Productivity and Transport Investment // *Journal of Transport Economics and Policy*. 2007. Vol. 41. No. 3. Pp. 317–343.
13. Makarov V., Zhitkov V., Bakhtizin A. Moscow traffic jam is under attack of an intelligent agent-based model // *Conference Proceedings – 6th Conference of the European Social Simulation Association, ESSA 2009*. 2009.
14. Mazzocchetti A. et al. Securitization and business cycle: an agent-based perspective // *Industrial and Corporate Change*. 2018. Vol. 27. No. 6. Pp. 1091–1121.
15. Mebane Jr. W.R., Sekhon J.S. Genetic Optimization Using Derivatives: The rgenoud Package for R // *J. Stat. Soft.* 2011. Vol. 42. No. 11. Pp. 1–26.
16. Raberto M. et al. From financial instability to green finance: the role of banking and credit market regulation in the Eurace model // *Journal of Evolutionary Economics*. 2019. Vol. 29. No. 1. Pp. 429–465.
17. Raberto M., Teglio A., Cincotti S. Debt, Deleveraging and Business Cycles: An Agent-Based Perspective // *Economics*. 2012. Vol. 6. No. 1. Pp. 1–49.
18. Tsekeris T., Vogiatzoglou K., Bekiros S. Multi-Regional Agent-Based Modeling of Household and Firm Location Choices with Endogenous Transport Costs. Louvain-la-Neuve: European Regional Science Association (ERSA). 2010.

Simulated Spatial Model of Russian Urban Development

Kirill V. Rostislav – Researcher of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Moscow, Russia). E-mail: rostislav-kv@ranepa.ru

Yury Yu. Ponomarev – Head of Center for Spatial Economics of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; Senior Researcher of the Gaidar Institute for Economic Policy, Candidate of Economic Sciences (Moscow, Russia). E-mail: ponomarev@ranepa.ru

Darya M. Radchenko – Researcher of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Moscow, Russia). E-mail: radchenko-dm@ranepa.ru

The paper presents a spatial simulation model covering 237 cities and towns in 76 subjects of the Russian Federation. The model describes the dynamics of the population and the number of enterprises in the cities, and also makes it possible to make medium-term forecasts with a high degree of accuracy. The work tested hypotheses about the impact on intercity migration and other socio-economic processes that determine the differences between the cities in average wages, the quality of urban environment and other factors, and also considered examples of the application of the model to assess the socio-economic effects of high-speed roads construction (on the example of the Sochi – Tuapse road) and the effects of the closure of city-forming enterprises in several single-industry towns.

The article was prepared in the framework of execution of state order by RANEPА.

Key words: simulation model, migration, cities, single-industry towns, infrastructure projects.

JEL-codes: C63, R12, R23, R32.