

Научная статья
УДК 004.94:519.876.5
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-32-42

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Ольга Александровна Ковалева¹, Алина Борисовна Саплина^{2✉},
Сергей Владимирович Ковалев³, Михаил Юрьевич Сидляр⁴, Илья Сергеевич Казарин⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина, Тамбов, Россия
¹ solomina-oa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6205>
² sapab23@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0000-3197-9176>
³ sseedd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5961-7561>
⁴ m1kmikl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5908-3400>
⁵ zar7q@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5369-6986>

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена проблемами, связанными со стремительным развитием городской среды и поиском способов для их оптимального решения посредством анализа и прогнозирования различного рода ситуаций при реализации проектов модернизации городской инфраструктуры. Предложена модель, предназначенная для реализации мультиагентного подхода и анализа динамических закономерностей развития городской среды с учетом индивидуальных свойств объектов системы и правил их взаимодействия. Описаны основные допущения модели. Проведены вычислительные эксперименты по изучению динамических характеристик городской среды, предложены рекомендации по их улучшению.

Ключевые слова: мультиагентное моделирование, городская среда, имитационная модель

Для цитирования: Ковалева О. А., Саплина А. Б., Ковалев С. В., Сидляр М. Ю., Казарин И. С. Мультиагентное моделирование динамики развития городской среды // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 32–42. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-32-42.

Original article

AGENT-BASED MODELING FOR URBAN DEVELOPMENT DYNAMICS

Olga A. Kovaleva¹, Alina B. Saplina^{2✉}, Sergey V. Kovalev³,
Mikhail Yu. Sidlyar⁴, Ilya S. Kazarin⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia
¹ solomina-oa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6205>
² sapab23@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0000-3197-9176>
³ sseedd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5961-7561>
⁴ m1kmikl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5908-3400>
⁵ zar7q@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5369-6986>

Abstract. The relevance of the study is demonstrated through the issues of rapid urban development and search for optimal approaches to settle the issues using an analysis and forecasting of various cases arising when implementing designs for urban development. A model is proposed to implement the agent-based approach and analyze the dynamic urban development patterns according to the individual properties of system objects and rules for their cooperation. The allowance for the basic model is described. Simulation experiments are conducted to investigate the dynamic urban properties and recommendations are proposed to upgrade them.

Keywords: agent-based modeling, urban environment, simulation model

For citation: Kovaleva O. A., Saplina A. B., Kovalev S. V., Sidlyar M. Yu., Kazarin I. S. Agent-based modeling for urban development dynamics. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):32–42. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-32-42.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянной необходимостью принятия администрацией муниципального образования (МО) различного рода управленческих решений, направленных в основном на модернизацию и развитие инфраструктуры города, возникает потребность применения автоматизированных систем поддержки принятия решений (СППР). Основанная на мультиагентной модели МО, СППР может быть использована как инструмент для комплексного анализа и прогнозирования развития ситуации в городе, для оценки рисков реализации того или иного проекта, а также его воздействия на качество жизни горожан.

Общих математических формул для описания развития такой сложной системы, как МО, пока не найдено, поэтому его возможно прогнозировать лишь путем компьютерной имитации.

В большинстве разработанных моделей изучения тенденций развития городов используется агентное моделирование, основанное на разных критериях – с акцентом либо на ландшафт, либо на социальный аспект.

В работе [1] рассматривается процесс урбанизации в Бхопале, известном индийском городе первого уровня, где описаны изменения городского пространства за последние четыре десятилетия и визуализации будущего роста в 2018 и 2022 гг. За основу взят анализ тенденции развития города в период 1977–2014 гг. Изучение динамики городской морфологии осуществлялось посредством анализа данных дистанционного зондирования с пространственными метриками, градиентами плотности, а также с помощью модели КА-Марков, которая объединяет клеточные автоматы и цепь Маркова.

В статье [2] представлена имитационная модель развития городов и расселения студентов в районе Ватерлоо. В NetLogo модель была создана с использованием трех растровых слоев: близость к городку Университета Уотер, близость к продуктовым магазинам и близость к остановкам.

Работа группы колумбийских ученых посвящена агентно-ориентированному моделированию планирования городской среды на основе потребностей человека [3]. Авторы утверждают, что морфологию и судьбу города

определяет ряд критериев: экологическая среда, жилое и архитектурное пространство и история человеческих взаимоотношений. Города представляют собой сложные системы, включающие в себя элементы различных типов, такие как природные объекты, технические артефакты, человеческие акторы и социальные сущности, включая правила и законы, регулирующие их поведение.

В работе [4] описаны результаты агентного моделирования развития городского землепользования. Модель оснащена новыми методами для моделирования перемещений агентов и конкуренции между ними.

В статье [5] представлено агентное моделирование роста городов на примере Стамбула. Результат моделирования сравнивается с существующей картой плотности и разрастания Стамбула и возможностью дальнейших исследований.

В работе [6] предложенная модель основана на использовании связи между клеточными и векторными агентами, которые позволили учесть пространственное измерение городских систем.

В статье [7] используется подход геомоделирования, сочетающий агентное моделирование с многокритериальным анализом (multi-criteria analysis – MCA). Для моделирования основных детерминант, контролирующих городское развитие, определены три группы агентов: агенты-застройщики, правительственные агенты и резиденты.

Таким образом, разработка высокодетализированных, высокодинамичных и пространственно явных моделей для адаптивного городского планирования является актуальной задачей.

Цель – анализ динамических закономерностей развития муниципальных образований города посредством разработки модели, задачей которой является реализация мультиагентного подхода, позволяющего учитывать индивидуальные свойства объектов, формирующих систему, и правила их взаимодействия с помощью добавления определенных наборов шаблонов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать основные допущения и саму модель развития городских муниципальных

образований, предназначенную для реализации мультиагентного подхода.

2. Провести вычислительные эксперименты по изучению динамических характеристик городской среды.

3. Разработать практические рекомендации по улучшению характеристик развития городской среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Любой город может быть условно разделен на несколько основных зон, каждая из которых обладает определенными характери-

стиками с точки зрения наличия жилья, бизнеса и качества жизни.

Модель имеет два основных типа агентов: житель (гражданин) и предприятие (фирмы или компании), на котором имеются рабочие места. Агент-житель является центральной частью этой модели, потому что именно его решения о местоположении жилья, месте работы и виде транспорта изменят поведение рынка жилья и транспортной системы. Упрощенная схема общей структуры модели дана на рис. 1.

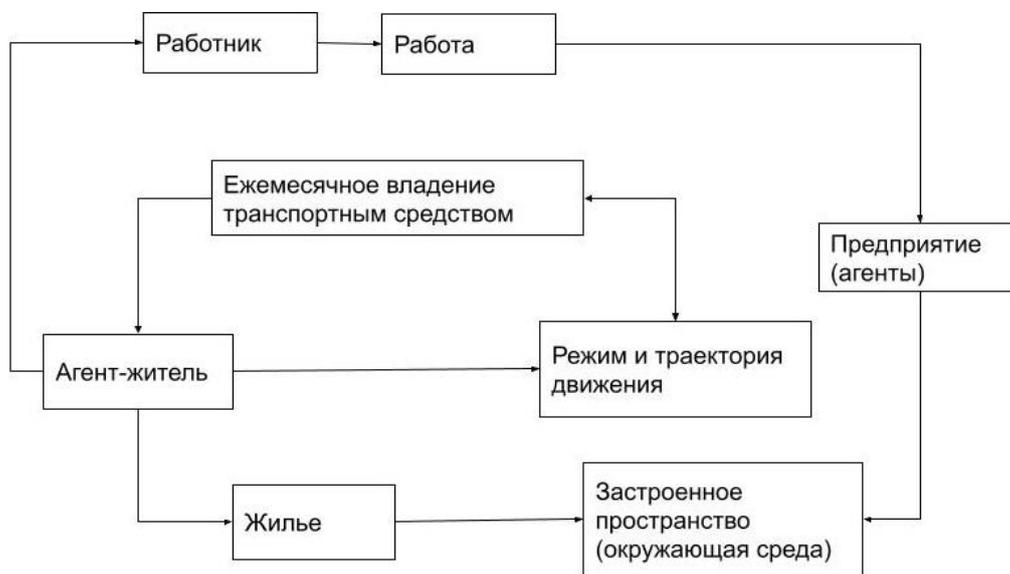


Рис. 1. Общая структура модели

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

В начале моделирования агент-житель, являющийся ключевым элементом модели, распределяется в среде случайным образом. В каждом районе заселено около 70 % жилой площади, следовательно, существует дополнительная возможность переселения. Возраст агента-жителя – от 20 до 80 лет, выбран случайным образом из равномерного распределения с исключением в процессе моделирования жителей-агентов, не участвующих активно в социальной и производственной сфере. 75 %-я вероятность того, что у каждого агента-жителя есть автомобиль, также сгенерирована случайным образом. Работа назначена из доступных рабочих мест для трудоустройства у агента-предприятия. Но поскольку это начальный момент симуляции, то с наибольшей вероят-

стью место работы будет выбрано в зоне проживания (30 %). Это не означает, что 30 % являются постоянной величиной, которая поддерживается на протяжении всего моделирования. Как и при любом моделировании на первых временных шагах модель будет сходиться к более стабильному состоянию. Баланс каждого агента-жителя рассчитывается в конце каждого месяца на основе размера текущего банковского счета и чистого дохода за прошедший месяц («зарплата – расходы»).

Поведение каждого агента-жителя контролируется диаграммой состояний (рис. 2), в которой переходы соответствуют состоянию агента-жителя и внешним условиям в его окружении.

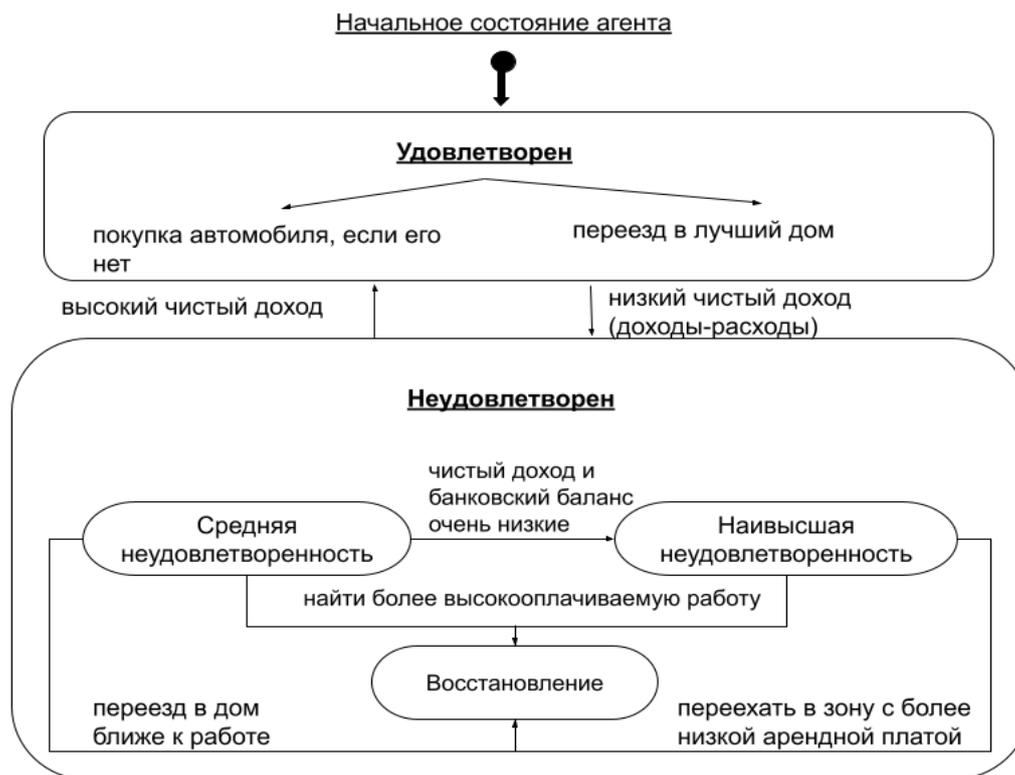


Рис. 2. Диаграмма состояний агента-жителя

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Как видно из рис. 2, агент-житель имеет два основных состояния: «удовлетворен» и «неудовлетворен». Изначально агент-житель находится в состоянии «удовлетворен», и в этом состоянии рассматривает возможность покупки автомобиля или переезда в более комфортное жилье и лучшую зону города. Эти два события происходят только с определенной вероятностью: если у агента-жителя есть автомобиль, то он не планирует покупать еще один, и переезд в зону с жильем высокого качества происходит с вероятностью 70 %, а с оставшейся 30 %-й вероятностью – в зону, где жилья в настоящее время больше и дешевле.

Этот процесс перезапускается, как только агент-житель, находившийся в состоянии «неудовлетворен», возвращается в состояние «удовлетворен».

Удовлетворенность агента-жителя зависит от чистого дохода, т. е. разницы между всеми доходами и расходами на жилье и транспорт без учета средств, имеющихся на банковском счете. Когда чистый месячный доход опустится ниже 90 тыс. руб., агент-житель перейдет из состояния «удовлетворен» в состояние

«неудовлетворен». Это также может произойти, если его время в пути до работы (в обоих направлениях) превышает 30 минут либо отсутствует возможность использования транспортных средств. Чтобы вернуться к состоянию «удовлетворен», необходимо отменить только что упомянутые три условия: доход выше 90 тыс. руб., возможность использования транспорта и затраты времени до работы менее 30 мин.

Если доход еще ниже (менее 33,5 тыс. руб.), или баланс истощен (сбережения в банке менее 33,5 тыс. руб.), или время в пути превышает 48 минут (0,8 часа), или у агента-жителя отсутствует возможность использования транспортных средств, происходит дальнейший переход в состояние «средняя неудовлетворенность» или «наивысшая неудовлетворенность». Оба эти состояния, относящиеся к состоянию «неудовлетворен», в целом можно изменить переездом в зону с более дешевым жильем, переездом в жилье поблизости от работы, либо поиском работы с более высокой оплатой.

Агент-житель в состоянии «средняя неудовлетворенность» будет принимать решение

об изменении условий жизни в срок от 60 до 90 дней (значение генерируется случайным образом), а вероятность переезда, нахождения лучшего жилья и высокооплачиваемой работы составляет 50 %. С 50 %-й вероятностью агент-житель рассматривает либо возможность переезда в зону, арендная плата в которой дешевле (зона выбирается случайным образом из трех самых дешевых зон, имеющих меньшую стоимость), либо более низких транспортных расходов (вероятность 25 %). Сокращение затрат всегда осуществляется за счет выбора одной зоны, поэтому для этой цели не используется модель дискретного выбора. Если зона выбрана из-за более низкой арендной платы, вероятна возможность роста транспортных расходов и, наоборот, зона, выбранная из-за более низких транспортных расходов, может иметь более высокую арендную плату. Если улучшение недоступно, диаграмма состояния будет циклически переключаться между восстановлением состояния и состоянием «средняя неудовлетворенность».

Агент-житель, находящийся в состоянии «наивысшая неудовлетворенность», избавится от своего автомобиля и останется в этом состоянии от 10 до 60 дней, с поиском в дальнейшем лучшей работы, более дешевого жилья либо переезда в зону рядом с работой.

Выбор вида транспорта ежедневно осуществляется в зависимости от имеющихся транспортных условий. Модель выбора вида транспорта, используемая для принятия решения о поездке, представляет собой простую логическую модель, которая не предполагает корреляции между альтернативами.

Модель имеет следующие две функции полезности (1) и (2) для легкового (личного) (ЛТ) и общественного транспорта (ОТ):

$$ЛТ = 5 - 0,5 \times C_{\text{топлива}} - 0,07 \times t_{ЛТ} \quad (1)$$

$$ОТ = -0,5 \times C_{\text{билета}} - 0,055 \times t_{ОТ} - 0,08 \times t_{\text{ср. ожидания}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{топлива}}$ – стоимость топлива в денежных единицах (руб.) в день;

$t_{ЛТ}$ – время в пути в минутах по маршруту (учитывается длина маршрута, скорость и зазоры на дорогах);

$C_{\text{билета}}$ – стоимость билета в рублях в общественном транспорте;

$t_{ОТ}$ – время в пути в минутах, полученное по маршруту при средней скорости ОТ;

$t_{\text{ср. ожидания}}$ – среднее время ожидания в минутах для ОТ.

Наблюдая за функциями, можно увидеть, что существует предпочтение использования личного автомобиля по сравнению с общественным транспортом, потому что альтернативный удельный коэффициент, который является частью полезности автомобиля, положителен, что дает некоторую дополнительную полезность. Переменные в функциях полезности – это стандартный результат многих моделей спроса, применяемых в аналогичных исследованиях.

Логическая модель, которая используется для вычисления вероятностей выбора каждого из двух режимов, рассчитывается в соответствии со следующим выражением (3):

$$P(\text{транспорт}) = \frac{e^{ЛТ}}{e^{ЛТ} + e^{ОТ}}. \quad (3)$$

Затем выбирается режим в соответствии с вероятностями путем розыгрыша случайного числа (модель Монте – Карло). В случае, если у агента-жителя нет возможности использовать собственный автомобиль (все пути заблокированы), им будет выбран общественный транспорт (при условии наличия пропускной его способности), в противном случае агент-житель будет вынужден добираться из дома до работы и обратно, затрачивая много времени, что приведет его к состоянию «неудовлетворен». Когда транспортное средство выбрано, время в пути обновляется согласно упрощенной функции (4):

$$t_{\text{транспорт}} = 0,05 + \frac{L_{П}}{V_{П}} + 0,06 \times \frac{n_{\text{тр.п}}}{N_{\text{транспорт}}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{транспорт}}$ – время в пути в часах;

$L_{П}$ – длина пути в километрах;

$n_{\text{(тр.п)}}$ – количество машин на пути;

$N_{\text{транспорт}}$ – вместимость транспортных средств;

$V_{П}$ – ограничение скорости на пути в км/ч.

Для моделирования демографической динамики в конце каждого года агентам-жителям прибавляется один год, вследствие чего:

- появляется новый активный агент-житель 20-летнего возраста со следующими характеристиками: проживающий в самом дешевом жилье, без собственного автомобиля и в поиске работы в его либо в других зонах;

- для каждого агента-жителя старше 70 лет возрастает вероятность выбытия из активной социальной и производственной сферы.

Это означает, что количество агентов-жителей в модели никогда не изменится, это помогает анализировать результаты модели.

Агенты-предприятия имеют определенный набор свойств, таких как количество рабочих мест, размер выплачиваемой заработной платы. Их поведение определяется с точки зрения ежемесячных показателей стабильности, снижения или повышения. Если они развиваются, то пространственно передислоцируются в зоны с более высокой арендной платой, или если их активность снижается – в районы с более низкой арендной платой (на рис. 3 показана диаграмма состояний контроля агента-предприятия).



Рис. 3. Диаграмма состояний агента-предприятия

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Переходы между различными состояниями агента-предприятия не зависят от экономики региона. По умолчанию, агент-предприятие находится в состоянии «Работает» и каждый год повышение заработной платы будет обновляться на 1,5 %. Существует вероятность задержки роста или снижения активности агента-предприятия. Через 80 итераций агент-предприятие может перейти в состояние «Развивается» с возможностью увеличения числа рабочих мест и перемещения в более перспективную зону. Через 30 итераций агент-предприятие повысит заработную плату на 1,5 % и увеличит количество рабочих мест на 10. При очередном переходе агента-предприятия в состояние «Работает» снова начинается от-

счет 80 итераций для возвращения его в состояние «Работает». Из этого состояния также возможен переход в состояние «Реорганизация» с процессом, обратным росту, и вероятностью: (1) уменьшения количества рабочих мест, увольнения самых низкооплачиваемых сотрудников и снижение зарплаты на 2 %; (2) передислокации в одну из зон с более низкой арендной платой (рис. 3). Если агент-предприятие ликвидируется (0 рабочих мест), тогда в диаграмме появляется новый агент-предприятие с 10 сотрудниками в зоне с самой низкой арендной платой.

В начале моделирования все агенты-предприятия генерируются с распределением их в каждой зоне до 60 % и соответствующей

этой зоне арендной платой. Максимальное количество рабочих мест в начале симуляции одинаково для всех агентов-предприятий, т. е. 6 агентов-жителей. В начале симуляции трудоустройство агента-жителя возможно только при наличии вакансий у агента-предприятия. Заработная плата агента-жителя генерируется случайным образом для всех агентов-предприятий в начале симуляции и каждый раз, когда нанимается новый агент-житель.

Как указано выше, город в модели разделен на зоны, каждая из которых имеет следующие характеристики: ограниченная максимальная численность агентов-жителей; ограниченное максимальное количество агентов-предприятий; качество и объем жилья и общая привлекательность зоны (оценивается от 0 до 1, где 1 – наивысшее качество); арендная плата для каждого агента-жителя и каждого агента-предприятия в зависимости от зоны.

В представленном городе есть две транспортные сети: личный автомобиль и общественный транспорт. Это очень упрощенные сети, в которых автомобильная сеть более детализирована и представляет информацию о топологии, которая позволяет вычислять кратчайшие пути, поэтому существует более одного выбора маршрута при заторах на дорогах посредством запуска алгоритма Дейкстры для каждой внутригородской зоны (с учетом уже имеющихся маршрутов). Сеть обще-

ственного транспорта представляет собой полный граф, соединяющий все зоны. Если агент-житель работает и живет в одном районе, предполагается, что он добирается до места работы пешком. Транспортные параметры, которые можно задавать в модели: стоимость билетов в общественном транспорте, стоимость топлива и средняя скорость транспортных средств. Эти параметры можно изменять, чтобы наблюдать их влияние на динамику городской среды. В модели рассматриваются только ежедневные поездки агентов-жителей на работу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации модели динамики развития городской среды была выбрана платформа имитационного моделирования AnyLogic [8].

Размер синтетической популяции в экспериментах составляет 10 600 жителей. Увеличение количества жителей потребует большего объема памяти и значительно увеличит время вычислений. В качестве объекта моделирования выбран город Магадан. Для запуска модели сначала необходимо задать несколько начальных значений для каждого района (зоны) (рис. 4). Центр города отличается высоким качеством жизни, большим количеством предприятий, но очень низким объемом жилья. Район Пионерный имеет самое высокое качество жилья, Марчеканский район – самое низкое качество жилья.

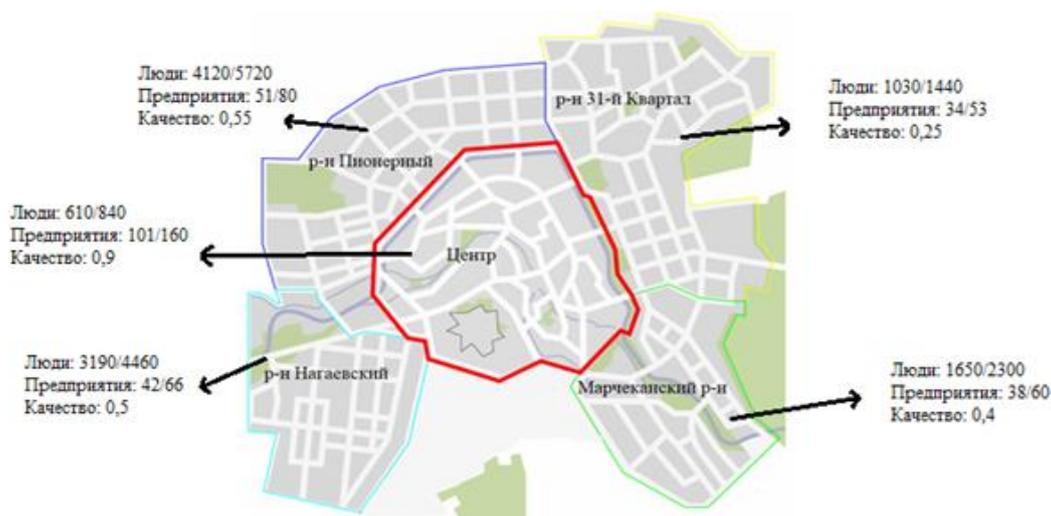


Рис. 4. Начальные параметры для каждой зоны

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Период моделирования соответствует календарю, начинающемуся в 12:00 1 января 2020 г. и заканчивающемуся в 12:00 1 января 2030 г., т. е. периоду в 10 лет, в которых наименьшая единица времени, генерирующая событие, равна дню. Важно отметить, что в любом моделировании должен быть период, чтобы позволить модели достичь равновесия. В начале, например, выбор местонахождения каждого агента-жителя не зависит от получаемого им дохода, поэтому потребуется некоторое время для его адаптации к своему экономическому положению.

Эксперимент № 1

Начальные условия модели: общественный транспорт – стоимость билета (RUB/поездка) – 1 (эквивалентен 40 руб.), средняя скорость (км/ч) – 18; автомобиль – стоимость топ-

лива (RUB/км) – 0,1 (эквивалентен 60 руб.); скоростной режим (км/ч) – 40.

В начале проведения эксперимента только 37 % жителей работают на предприятии района, в котором проживают, а остальным 63 % приходится ездить в другие районы.

Каждый из видов передвижения жителей имеет приблизительно одинаковое процентное соотношение.

Удовлетворенность качеством жизни горожан, проживающих на территории района на начальный период имитационного исследования: удовлетворенных жителей – 50 %, частично неудовлетворенных – 37 %, полностью неудовлетворенных – 13 %.

Через 10 лет заканчивается период моделирования (графики изменения количества жителей в каждом районе показаны на рис. 5).

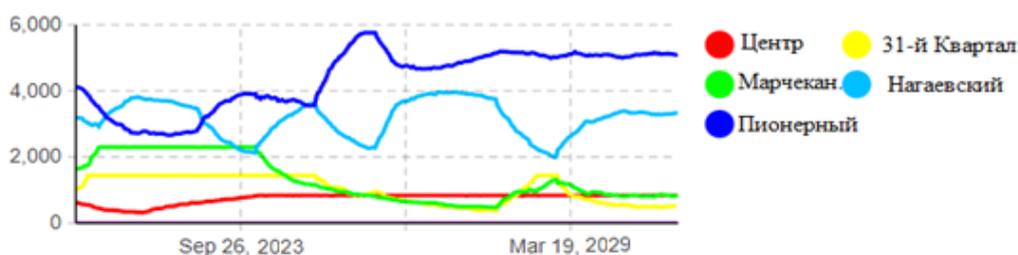


Рис. 5. Изменение количества жителей по районам в эксперименте № 1

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Процент жителей, работающих в своем районе, уменьшился до 20 %, а процент жителей, работающих в других районах, увеличился до 80 %.

Такие изменения отчасти повлияли на пользование общественным транспортом, которое после симуляции составило примерно 48 %, тех, кто передвигается пешком, стало 18 %, а процент пользователей собственными автомобилями остался неизменным – 33 %.

Во многом на состояние каждого жителя влияет его зарплата и расходы. В начале эксперимента средняя зарплата составляла 45 000 руб. В процессе симуляции средняя сумма зарплаты падала до 20 000 руб. либо поднималась до 95 000 руб., по завершению симуляции средняя заработная плата составила 60 000 руб.

Суммы, отведенные на арендную плату (оплату коммунальных услуг), также динамически изменялись. По истечению времени

эксперимента сумма, предназначенная для данных трат, приняла первоначальное значение в размере 10 000 руб.

В ходе симуляции удовлетворенности качеством жизни жителей количество удовлетворенных жителей увеличилось на 24 %, полностью неудовлетворенных уменьшилось на 6 %, в состоянии средней неудовлетворенности жителей стало на 18 % меньше.

Также произошли изменения и в остальных параметрах, но они не являются значительными.

Анализ полученных в ходе эксперимента результатов показал следующие изменения:

1. Значительное перераспределение жителей города: самым густонаселенным районом остался Пионерный (5 090), районом с наименьшей плотностью стал 31-й Квартал (500).

2. Число работающих в районе проживания упало на 17 %.

3. Доход граждан увеличился на 15 000 руб.

Эксперимент № 2

Начальные условия модели: общественный транспорт – стоимость билета (RUB/поездка) – 1,5 (эквивалентен 60 руб.), средняя скорость (км/ч) – 30; автомобиль – стоимость

топлива (RUB/км) – 0,15 (эквивалентен 90 руб.); скоростной режим (км/ч) – 50.

Графики изменения количества жителей по районам представлены на рис. 6.

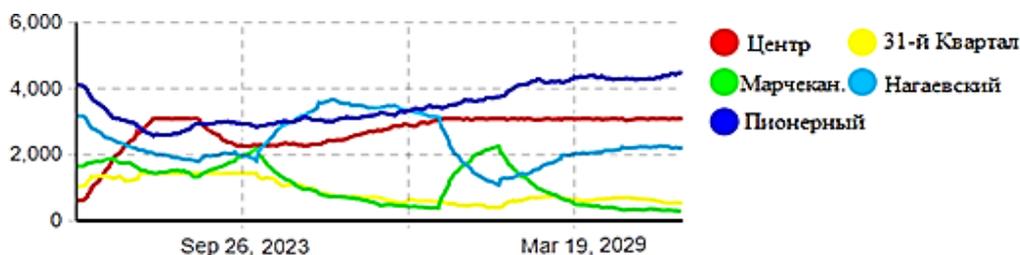


Рис. 6. Изменение количества жителей по районам в эксперименте № 2

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Процент жителей, работающих в районах проживания, уменьшился до 23 %, а работающих в других районах увеличился до 77 %.

В результате изменений параметров модели можно заметить, что, в отличие от условий первого эксперимента, в начальных условиях второго большее число жителей использовали для передвижения личные автомобили и в ходе симуляции произошло небольшое увеличение их числа до 55,6 %, передвижение на общественном транспорте составило 21,3 %, пешком – 23,1 %.

В начале эксперимента средняя заработная плата на предприятиях составляла 20 000 руб. В процессе симуляции средняя зарплата опускалась не ниже 20 000 руб. и поднималась приблизительно до 105 000 руб., по завершению симуляции средняя зарплата составила 65 000 руб.

По завершении периода эксперимента сумма арендной платы (оплаты коммунальных услуг) приняла значение 15 000 руб.

Количество удовлетворенных жителей увеличилось и составило 79 %, полностью

неудовлетворенных уменьшилось до 4 %, в состоянии средней неудовлетворенности стало 17 %.

Таким образом, произошли следующие изменения:

1. Значительное перераспределение жителей города: самым густонаселенным районом остался Пионерный (4 470), районом с наименьшей плотностью населения стал Марчканский (280).

2. Процент работающих в районе своего проживания упал на 14 %.

3. Доход граждан увеличился на 45 000 руб.

Эксперимент № 3

Начальные условия модели: общественный транспорт – стоимость билета (RUB/поездка) – 1,3 (эквивалентен 52 руб.), средняя скорость (км/ч) – 25; автомобиль – стоимость топлива (RUB/км) – 0,15 (эквивалентен 90 руб.); скоростной режим (км/ч) – 55.

Графики изменения количества жителей по районам представлены на рис. 7.

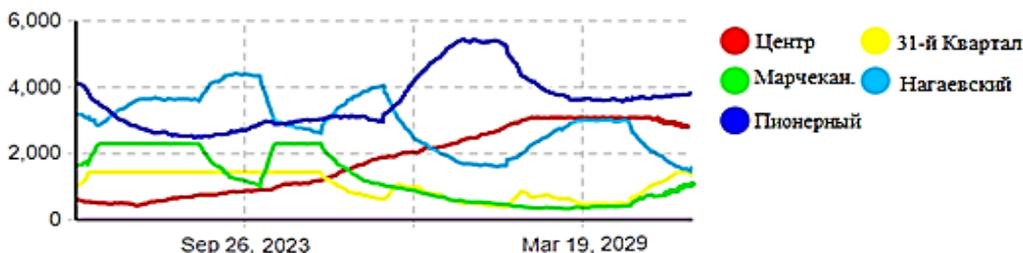


Рис. 7. Изменение количества жителей по районам в эксперименте № 3

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

В результате изменений параметров модели можно отметить, что процент жителей, работающих в районах проживания, уменьшился до 23 %, а работающих в других районах увеличился до 77 %.

В отличие от первого, в начальных условиях третьего эксперимента большее число жителей использовали для передвижения личные автомобили и в ходе симуляции произошло небольшое увеличение этого числа до 47 %, выбирающих общественный транспорт составило 24,7 %, пешком – 28,3 %.

Средняя заработная плата на предприятиях составляла в начале эксперимента 50 000 руб. В процессе симуляции средняя зарплата не опускалась ниже 48 000 руб., по завершению симуляции составила 68 000 руб.

Стоимость арендной платы также динамически изменялась и составила максимум в начале около 20 000 руб. и по завершению эксперимента – 14 500 руб.

Количество удовлетворенных жителей увеличилось и составило 82 %, полностью неудовлетворенных уменьшилось до 3 %, в состоянии средней неудовлетворенности стало 15 %.

Самым густонаселенным районом остался Пионерный, районом с наименьшей плотностью населения стал Марчканский. Число работающих в районе своего проживания снизилось на 3 %, доход увеличился на 18 000 руб.

Так как в ходе проведенных экспериментов не удалось достигнуть равномерного расселения жителей по районам и обеспеченности работой большей части жителей в районах своего проживания, можно предположить, что требуется ввести больше условий для разработки плана развития городской среды.

Для равномерного расселения жителей требуется, вероятно, равномерное распределение по районам предприятий с достаточным количеством рабочих мест, помощь работникам предприятий в аренде жилья в своем районе, чтобы сотрудникам было удобнее добираться до своего места работы.

Благодаря структуризации города на зоны – жилые, промышленные и др., а также на микрорайоны, кварталы и пр., появляется возможность рациональной планировки и застройки городской территории.

Результаты экспериментов показали, что снижение стоимости за проезд на общественном транспорте влияет на количество использующих его горожан.

Несмотря на возросшую цену на бензин, произошел рост использования личного транспорта, что, вероятно, обосновывается увеличением доходов жителей города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа посвящена агент-ориентированному моделированию динамики развития городской среды на основе платформы AnyLogic, которая может использоваться для проведения экспериментов с моделью города.

Конечным итогом проведенного исследования является пошагово разработанная модель развития городской среды, которая предназначена для реализации мультиагентного подхода. Были проведены вычислительные эксперименты по изучению динамических характеристик городской среды, что в итоге позволило разработать практические рекомендации по их улучшению.

Список источников

1. Aithal T. B., Vinay S., Ramachandra T. V. Agent based modelling urban dynamics of Bhopal, India. *Journal of Settlements and Spatial Planning*. 2016;7(1):1–14.
2. Malik A., Abdalla R. Agent-based modelling for urban sprawl in the region of Waterloo, Ontario, Canada. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017;3(1):1–9.
3. González-Méndez M., Olaya C., Fasolino I. et al. Agent-based modeling for urban development planning based on human needs. Conceptual basis and model formulation. *Land Use Policy*. 2021;101:105110.

References

1. Aithal T. B., Vinay S., Ramachandra T. V. Agent based modelling urban dynamics of Bhopal, India. *Journal of Settlements and Spatial Planning*. 2016;7(1):1–14.
2. Malik A., Abdalla R. Agent-based modelling for urban sprawl in the region of Waterloo, Ontario, Canada. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017;3(1):1–9.
3. González-Méndez M., Olaya C., Fasolino I. et al. Agent-based modeling for urban development planning based on human needs. Conceptual basis and model formulation. *Land Use Policy*. 2021;101:105110.

4. Hosseinali F., Alesheikh A. A., Nourian F. Agent-based modeling of urban land-use development, case study: Simulating future scenarios of Qazvin city. *Cities*. 2013;31:105–113.
5. Bingöl C. K., Çolakoğlu B. Agent-based urban growth simulation – A case study on Istanbul. In: Herneoja A., Österlund T., Markkanen P., editors. *Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34th eCAADe Conference*, August 22–26, 2016, Oulu, Finland. Vol. 2. p. 41–48.
6. Barramou F., Addou M. Agent-based model for simulating urban system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020;11(12):353–362.
7. Arsanjani J. J., Helbich M., de Noronha Vaz E. Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran. *Cities*. 2013;32:33–42.
8. AnyLogic. URL: www.anylogic.ru (дата обращения: 19.07.2023).
4. Hosseinali F., Alesheikh A. A., Nourian F. Agent-based modeling of urban land-use development, case study: Simulating future scenarios of Qazvin city. *Cities*. 2013;31:105–113.
5. Bingöl C. K., Çolakoğlu B. Agent-based urban growth simulation – A case study on Istanbul. In: Herneoja A., Österlund T., Markkanen P., editors. *Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34th eCAADe Conference*, August 22–26, 2016, Oulu, Finland. Vol. 2. p. 41–48.
6. Barramou F., Addou M. Agent-based model for simulating urban system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020;11(12):353–362.
7. Arsanjani J. J., Helbich M., de Noronha Vaz E. Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran. *Cities*. 2013;32:33–42.
8. AnyLogic. URL: www.anylogic.ru (accessed: 19.07.2023). (In Russian).

Информация об авторах

О. А. Ковалева – доктор технических наук, доцент.
А. Б. Саплина – аспирант.
С. В. Ковалев – доктор технических наук, доцент.
М. Ю. Сидляр – старший преподаватель.
И. С. Казарин – аспирант.

Information about the authors

O. A. Kovaleva – Doctor of Sciences (Engineering),
Docent.
A. B. Saplina – Postgraduate.
S. V. Kovalev – Doctor of Sciences (Engineering),
Docent.
M. Yu. Sidlyar – Senior Lecturer.
I. S. Kazarin – Postgraduate.