

# Вариант мультиагентной модели городской среды для исследования эпидемических процессов

В.И.Балута<sup>1</sup>, М.А.Берберова<sup>2,3</sup>, В.А.Судаков<sup>4</sup>, А.В.Милаев<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>АНО «НИЦФТИ», Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>РТУ МИРЭА, Москва, Россия

<sup>4</sup>РЭУ им.Г.В.Плеханова, Москва, Россия

<sup>5</sup>МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия

e-mail: [ybaluta@yandex.ru](mailto:ybaluta@yandex.ru)

## **Аннотация**

Обеспечение здоровья населения является одной из значимых задач социального государства. В период эпидемий происходит значительное обострение этой проблемы, требующее от органов государственного управления выработки оперативных решений и принятия адекватных мер реагирования, обеспечивающих соблюдение определенного баланса между эффективностью противоэпидемических мероприятий и ожидаемыми социально-экономическими потерями. Выработка таких решений происходит в ситуации существенной неопределенности вероятных значений этих показателей. Одним из рациональных методов их прогнозной оценки является математическое моделирование. В рамках международного гранта стран БРИКС (проект № 20-51-80002) разрабатывается взаимообусловленная совокупность математических моделей, включая комплексную имитационную мультиагентную модель населенного пункта, предназначенных для проведения модельных исследований различных аспектов эпидемий и получения прогнозных оценок при распространении инфекционных заболеваний с различной этиологией. В настоящей статье в качестве базовой версии рассматривается модель распространения инфекционных возбудителей, передающихся воздушно-капельным путем в результате непосредственного контакта инфицированных лиц с восприимчивыми здоровыми людьми. В работе выделяются ключевые направления для обоснования состава и параметров такой модели, обозначаются принципы формирования значимых исходных данных, а также обсуждаются некоторые важные аспекты учета поведения агентов. На текущем этапе разработки основное внимание сосредоточено на построении модели коммуникационной активности жителей, обуславливающей их контактное взаимодействие. Подчеркивается, что для повышения адекватности модели важен учет отечественных особенностей условий жизни, работы, быта, обычаев жителей. В качестве направлений формирования модели выделены следующие сферы: параметры популяции жителей и структура их потребностей, обуславливающих мотивы принятия решений на посещение различных объектов в городе и провоцирующих образование локальной скученности; условия и причины относительного расположения объектов интереса жителей в городской среде; предпочтения жителей в выборе способов перемещения и характерные черты организации внутригородского общественного транспорта. Дано краткое описание программного модуля для расчета динамики перемещения агентов между объектами в абстрактной постановке, позволяющего реализовать имитационное моделирование контактной коммуникационной активности жителей города, приведены примеры тестовых расчетов с использованием разработанного модуля.

## **Ключевые слова**

Мультиагентное моделирование, эпидемия коронавируса, параметры популяции, противоэпидемические мероприятия, городская среда, общественный транспорт, активность контактов.

Мультиагентное моделирование в последние годы получает все более широкое распространение в мировой научной практике. В том числе и в ряду активизировавшихся в связи с пандемией COVID-19 исследований, инициировавших построение различных видов моделей для прогноза развития эпидемии и оценки эффективности противоэпидемических мероприятий (например, [1-7]). В настоящей статье рассматривается вариант построения мультиагентной модели городской среды для исследования эпидемических процессов с учетом особенностей организации жизни и деятельности населения в нашей стране.

В отличие от традиционно используемых в эпидемиологии различных версий компартментальных моделей SIR, исходящих из предположения взаимодействия «всех со всеми» и оперирующих интегральными параметрами, агентные модели ориентированы на персонализацию взаимодействий. Потенциально такой подход позволяет получать детализированные результаты и проводить сравнительный анализ значимости различных факторов в распространении эпидемии, оценивать ожидаемую эффективность мер вмешательства, просчитывать распределение нагрузки на медицинскую инфраструктуру и исследовать множество других аспектов моделируемых

процессов. К сожалению, детализированный подход нуждается и в существенной детализации исходных данных для моделирования, что само по себе представляет проблему. Поэтому в большинстве своем такие модели имеют упрощенную постановку с различной степенью абстрагирования, когда в модели учитывается только несколько представляющихся разработчикам значимыми факторов. Вводимые при упрощении модели эндогенные параметры калибруются путем сопоставления результатов с наблюдаемыми интегральными величинами по темпам и масштабам распространения эпидемии, что может приводить к искажению соотношения значимости учитываемых и не учитываемых факторов. Этот момент важен, поскольку зачастую полученная в ходе моделирования информация и сделанные на ее основе выводы используются органами управления для выработки решений о характере ограничительных мероприятий, непосредственно регулирующих жизнедеятельность населения. Представляется, что более детальное воспроизведение в модели разнообразных аспектов жизни и деятельности жителей населенного пункта может повысить уровень адекватности подобных оценок и выявить уровень реальной значимости тех или иных факторов и обстоятельств в интересах более качественного обоснования управленческих решений.

Поскольку распространение эпидемии коронавируса связано с передачей возбудителей инфекции воздушно-капельным путем при непосредственном контакте людей, то построение мультиагентной модели предполагает формирование множества агентов  $A = \{a: C(a)\}$  с определенным набором атрибутов, в совокупности характеризующих состояние  $C(a_i)$  каждого  $i$ -го агента, а также задание множества объектов различных типов  $M = \{\{M1\}, \{M2\}, \dots\}$ , на базе которых может происходить контактная коммуникация агентов. Состав включаемых в модель объектов диктуется представлениями разработчиков о наиболее вероятных местах передачи инфекции от заболевших к восприимчивым людям. Как правило, в большинстве моделей в качестве объектов контактной коммуникации условно рассматриваются место проживания и место работы или учебы, в некоторых моделях дополнительно моделируются условия концентрации агентов в магазинах и в общественном транспорте. В атрибуты агентов включаются принадлежность к определенной группе/страте, влияющей на типовую схему суточного поведения, текущее местоположение (локация), ассоциированное с определенным объектом, и текущее состояние здоровья в терминах моделей SIR, а именно: здоровый без иммунитета = восприимчивый (Susceptible), заболевший = инфицированный (Infected) и здоровый с иммунитетом = выздоровевший (Recovered) или вакцинированный (vaccinated). В качестве эндогенных параметров вводятся какие-либо из следующих величин: коэффициент контагиозности (или вероятность передачи заболевания при контакте агентов в состояниях I и S), средние сроки выздоровления, доля бессимптомных больных среди инфицированных, доля смертельных исходов после болезни.

В представленных в научной литературе агент-ориентированных моделях используются графовые схемы изменения местоположения и состояния агентов «универсального» типа, в которых не учитываются характерные особенности структуры населения и образа жизни людей, хотя известно, что в разных странах эти факторы существенно различаются, и учет этого обстоятельства может оказаться значимым при моделировании эпидемических процессов. Различия наблюдаются в отношении самых разных параметров и сторон жизни – половозрастной структуры населения, характеристик мест проживания, структуры семей и характера семейных отношений, форм и мест работы, распространенных способов перемещения по территории, уровней дохода и специфики трат, области интересов и обычаев свободного времяпрепровождения. Даже места вероятного скопления граждан зависят от принятых в обществе обычаев. В связи с чем при построении мультиагентной модели отечественных населенных пунктов имеет смысл в максимально возможной степени опираться как на характерные структурные и функциональные особенности их организации, так и на традиционные условия и характер жизни людей. Можно ожидать, что построение комплексной модели с учетом множества разнообразных аспектов, влияющих на условия жизни и поведение жителей, даст возможность исследовать роль различных факторов и их специфики в наблюдаемых процессах, причем не только касающихся непосредственно развития эпидемии в плане текущего состояния здоровья отдельных людей, но и в более широкой интерпретации – их возможного влияния на социальные и экономические процессы.

## 1. Базовые предпосылки построения модели

С целью обоснования основных положений модели в ходе выполнения проекта проведена значительная работа по выявлению и описанию характерных особенностей жизни и деятельности жителей отечественных населенных пунктов, на основе которых формируются предпосылки и

исходные данные модели. Приводимые ниже сведения базируются на интеграции результатов различного рода статистических исследований, анализе нормативных и распорядительных документов, включая их обобщение в отдельных монографиях.

Из диаграммы количественного распределения городских населенных пунктов по числу жителей (таблица 1) можно видеть, что в нашей стране больше всего городов с населением от 10 до 100 тысяч жителей (с пиком в диапазоне 30-50 тысяч), что предрасполагает к выбору для дальнейшего исследования объектов соответствующего масштаба.

Таблица 1. Количество городов с числом жителей в указанных диапазонах.

Границы диапазонов численности жителей (чел.)	$\leq 1_{103}$	$3_{103}$	$5_{103}$	$1_{104}$	$3_{104}$	$5_{104}$	$1_{105}$	$5_{105}$	$1_{106}$	$\geq 5_{106}$
Количество городов в указанном диапазоне численности (шт.)	11	25	107	<b>282</b>	<b>354</b>	<b>156</b>	129	24	11	

Для решения поставленных в проекте задач были исследованы следующие сферы формирования исходных данных при построении комплексной мультиагентной модели города: параметры популяции жителей, параметры городской среды с выделением мест вероятных контактных коммуникаций жителей, характеристики транспортной системы, виды экономических отношений. При этом, как отмечалось выше, акцентировано внимание на особенностях, свойственных менталитету и образу жизни населения страны.

### 1.1. Параметры популяции

Приводимые в этом разделе сведения базируются на данных статистических исследований [8]. Основой адекватной модели популяции жителей является половозрастная структура населения. В отличие от других для нашей страны отличительной особенностью является наличие «демографических ям», связанных с проявлением отсроченных последствий Великой отечественной войны и последующих периодов социально-экономических потрясений. Осредненная кривая распределения, построенная по скорректированным локальными измерениями данным последней переписи населения, приведена на рис.1. Наличие таких провалов может сказаться на количественных параметрах проявления различных видов активности граждан, обусловленных возрастными качествами.

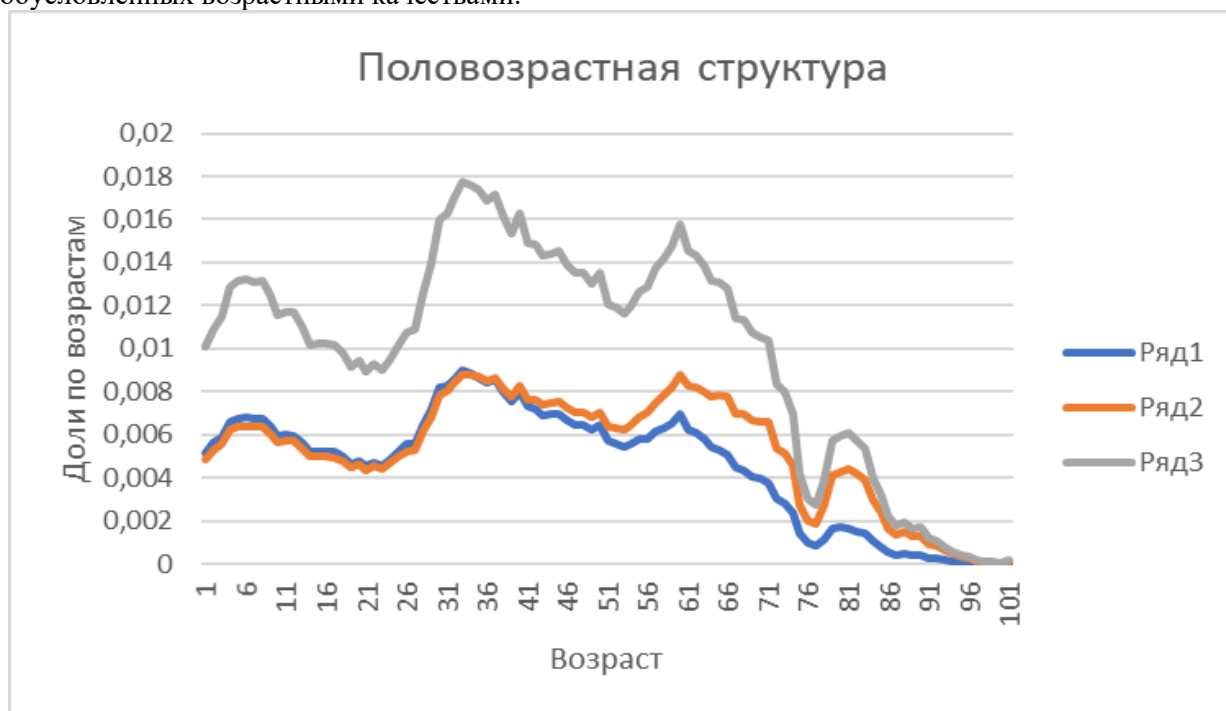


Рис. 1. Нормированная кривая половозрастной структуры населения (ряд 1 – мужское население, ряд 2 – женское население, ряд 3 – общая доля жителей соответствующего возраста)

Для определения структуры домохозяйств данные о распределении населения по возрастам необходимо дополнить сведениями о семейном положении. Согласно результатам тех же

статистических исследований 88% населения проживают в семьях, из которых 24,2% составляют полные семьи, 11,7% – неполные и 38,5% – семьи без детей. Среди семей с детьми до 18 лет основная доля принадлежит семьям с одним ребенком – 72,6%, семей с двумя детьми чуть менее четверти – 23,8%, а с тремя и более – лишь 3,6%. Можно отметить, что помимо популяционно-возрастной кривой структура семей является также одной из отличительных особенностей населения нашей страны, а именно: заметное преобладание семей с одним ребенком, а также высокая доля семей, в которых совместно проживают три поколения родственников. Доля семей из трех поколений составляет около четверти от их общего количества. Этот факт имеет значение при определении параметров активности агентов, поскольку совместное проживание со старшими влияет на перераспределение общих обязанностей в семье.

Для полноты картины приведем еще данные по долям одиноких мужчин и женщин в различных возрастных группах (таблица 2).

Таблица 2. Доля одиноких мужчин и женщин по возрастным группам

Диапазон возрастов, лет	25-29	30-39	40-49	50-59
Доля одиноких мужчин, %%	58,00	25,15	19,55	17,75
Доля одиноких женщин, %%	45,00	27,50	28,25	36,35

Приведенных здесь осредненных данных достаточно, чтобы отразить характерные особенности популяционной сферы модели, поскольку именно совокупность перечисленных параметров в значительной мере предопределяет области интересов и, как следствие, типовую схему поведения отдельных категорий жителей. Так, например, в традиционной отечественной практике в семьях с детьми основная забота о детях, включая общесемейные хозяйственные хлопоты, ложится на плечи матери, а отец отвечает за уровень материального благополучия. Если же в семье есть неработающие родственники старшего возраста, то обычно большую часть домашних хлопот и заботы о детях они берут на себя. Одинокие гораздо более коммуникативны, чем семейные, и чаще проводят время в различных сообществах – в кафе, на дискотеках, в спортзалах и т.п. Соответственно, при моделировании подобные обычаи и предпочтения должны найти отражение в вероятностной картине поведения агентов при построении их суточных графиков коммуникационной активности.

## 1.2. Коммуникационная активность жителей

В естественном процессе жизнедеятельности города всегда наблюдается активное перемещение и взаимодействие людей, связанное с удовлетворением ими каких-то личных потребностей. В мультиагентной модели картина перемещений и взаимодействий жителей воспроизводится путем моделирования активности каждого отдельного агента в течение исследуемых интервалов времени. Как правило, таким интервалом полагаются одни сутки, поскольку именно посуточные графики имеют определенную цикличность. В то же время, какие-то отдельные действия могут иметь более длительный интервал повторяемости – еженедельный или даже ежемесячный. В целях посуточного моделирования обобщенной картины коммуникации жителей населенного пункта для каждого отдельного агента необходимо сформировать график его перемещений в течение текущего дня с определением наиболее вероятных объектов, которые он должен посетить, и интервалов времени, когда он должен будет находиться в том или ином месте. Такой график имеет форму циклического графа, когда начало пути агента совпадает с его окончанием – этим объектом является место жительства.

Посуточный график для каждого из агентов формируется исходя из спектра его потребностей. Ежедневные потребности агентов целесообразно сгруппировать по следующим условным категориям: обязательные, регулярные, перманентные и срочно-неотложные.

Под обязательными понимаются такие потребности, которые вызывают необходимость посещения агентом одних и тех мест практически ежедневно в безусловном порядке. К ним относятся место жительства, а также место работы или учебы.

К регулярным будем относить такие потребности, которые связаны с обязательным посещением агентом одних и тех мест (или одних и тех же групп людей) с некоторой регулярностью, которые в какой-то мере можно считать категориями «сообществ по интересам». Таковыми являются ученики школы искусств, абоненты фитнес-клуба, верующие, регулярно участвующие в церковных службах, члены спортивных секций, группы бабушек у подъездов и т.п.

Перманентные потребности – это непрерывно возникающие потребности, которые не имеют строгой территориальной и временной привязки. Покупки продуктов совершаются агентом

постоянно и почти в ежедневном режиме, однако не обязательно в одном и том же магазине или в одно и то же время. А в семье удовлетворение этой потребности может быть делегировано в разные дни разным членам семьи. Поездки в общественном транспорте также могут иметь ежедневный характер, но они могут происходить на разных транспортных средствах и с разным составом пассажиров.

Срочно-неотложные потребности порождаются обстоятельствами в какой-то мере случайными для отдельного агента, однако в статистическом плане имеющими достаточно заметную роль. Например, заболевший зуб – явление не очень частое, однако в зубной кабинет почти всегда наблюдается очередь. Вышедший из строя телефон, сломавшаяся молния, попавший в ДТП автомобиль – постоянно порождают поток клиентов в сервисные мастерские. Посещение театра по заранее купленным билетам или обед в ресторане по приглашению юбиляра – из той же категории. Получение какой-то справки или документа тоже не бывает частым явлением в жизни отдельного человека, но услугами МФЦ, по статистике, ежемесячно пользуются не менее 3% населения, проживающего в зоне обслуживания этим центром.

Таким образом, все множество объектов  $M$  для отдельных групп агентов может быть отнесено к одной из перечисленных категорий  $M = \{\{M1\}, \{M2\}, \{M3\}, \{M4\}\}$ . При этом один и тот же объект для агентов с разным статусом может попадать в разные категории. Так, для учителя школа – место работы, для родителей учащихся в этой школе детей – место регулярных посещений, однако для большинства остальных – объект вне сферы их интересов.

В суточном графике каждого агента в обязательном порядке имеются объекты первой категории, регулярно – объекты второй категории, часто – объекты третьей категории, изредка – объекты четвертой. При этом у каждого из агентов своя система либо связанных с ним, либо предпочтительных для него объектов из указанных категорий. Понятно, что данная группа объектов интереса отдельного агента составляет некоторое малое подмножество всех объектов населенного пункта  $M(a_i) \subset M$ .

Формирование группы объектов интереса конкретного агента связано с соблюдением дополнительных условий или ограничений. Мастерской по ремонту автомобилей может заинтересоваться лишь владелец автомобиля, причем использующий его для поездок; в МФЦ за справкой может обратиться лишь лицо, имеющее паспорт; при покупке продуктов магазин, ближе расположенный к дому или к месту работы, имеет приоритет перед другими аналогичными. Отдельные объекты при их включении в график автоматически предполагают включение дополнительных объектов. Так, если место работы находится далеко от места проживания агента, то в график должно включаться использование личного автомобиля или общественного транспорта.

Моделирование траектории перемещений агента производится с использованием аппарата нечетких функций. Учитывается как вероятность отклонений по времени событий в пределах какого-то интервала, так и ограничения на возможность совершения очередного действия. Например, конкретный агент в какой-то день может оказаться на автобусной остановке чуть позже и ему может не хватить места в подошедшей маршрутке, в связи с чем он вынужден ожидать следующую, из-за чего прибудет в место назначения заметно позже намеченного. Это вполне естественное в обычной жизни событие приводит к тому, что случайно формирующийся состав лиц, с которыми он контактирует в общественном транспорте, оказывается другим. Более того, в связи с более поздним прибытием в точку назначения потребуются корректировка его дальнейших планов действий, например, если в графике запланировано до работы зайти в магазин, а время прибытия на работу имеет приоритет, то у него для этого действия не хватит запаса времени и его график должен измениться. Все подобные ограничения включаются в модель в форме системы правил.

Таким образом, при выполнении суточного графика каждого отдельного агента могут возникать точки ветвления с выбором той или иной траектории из ряда возможных. Вероятности выбора траектории являются динамическими и зависят как от значений текущих атрибутов агента, так и от некоторых внешних условий, влияющих на принятие решений.

Приведем еще один пример применения «динамической» вероятности. Если условный агент имеет абонемент на еженедельное посещение фитнес-клуба (входит в «сообщество любителей физкультуры»), то полагаемая в начале недельного цикла равномерная вероятность посетить фитнес-клуб автоматически увеличивается по мере «непосещения» в предыдущие дни или же аннулируется при совершении этого действия. А сама возможность посещения в какой-то конкретный момент зависит как от наличия у агента необходимого интервала свободного времени, так и от степени «загруженности» заведения в этот период. Последнее означает, что все из группы имеющих абонемент не могут прийти в фитнес-клуб одновременно. В то же время общее

количество находящихся на руках абонементов обуславливается мощностью множества потенциальных клиентов, емкостью зала, его равномерной загрузкой в течение недели или месяца. Кроме того, при этом учитывается еще и то обстоятельство, что стоимость и количество проданных абонементов должны гарантировать рентабельность заведения.

Последнее замечание приводит к необходимости формирования еще одного вида потребностей – потребностей экономических агентов, связанных с оказанием услуг населению. Это требование вытекает из естественного предположения, что предприятия и заведения, не получающие достаточного для их существования потока посетителей, если, конечно, они не являются бюджетными, не смогут выживать в современных рыночных условиях. На данном этапе разработки модели в центре внимания находится построение модели контактов, поэтому способы моделирования экономических отношений здесь не обсуждаются.

### 1.3. Городская среда

Архитектурно-планировочный облик городов нашей страны сформирован в соответствии с требованиями таких директивных документов как «Строительные нормы и правила» [9], основные положения которых действуют на протяжении многих десятилетий.

На основе анализа этих документов сделан вывод [10], что город с населением до 30 – 35 тыс. человек по существу представляет собой один жилой район, в котором находятся все учреждения, полностью обслуживающие потребности населения. Город с населением порядка 100 тыс. человек может иметь 2 – 3 жилых района. При этом общегородские обслуживающие учреждения дополняют систему повседневного обслуживания жилых районов. Согласно градостроительным нормам, жилые районы состоят из отдельных микрорайонов, в которых формируется необходимая для обеспечения комфортных и безопасных условий проживания людей социальная инфраструктура за счет достижения нормативного уровня обеспеченности населения учреждениями образования, здравоохранения, культуры, физической культуры и спорта.

Как правило, в городской среде выделяются центральная часть города, в которой сосредоточены административно-культурные и общественные учреждения, прилегающую к центру жилую зону и периферийную зону производственных объектов. Все эти зоны связаны улично-дорожной сетью. Понятно, что подобное представление не является единственно возможным, так как по мере развития тех или иных населенных пунктов может возникать чередование различных зон, однако в целом оно отражает общие тенденции и для целей моделирования его можно принять за приемлемую основу.

В центральной части города преобладают общественно-административные учреждения, к которым с учетом целей создаваемой модели относятся места, связанные так или иначе с массовым приемом посетителей. В таких учреждениях помимо собственных работников всегда наблюдается поток жителей, обращающихся за решением различных вопросов. Как правило, их нахождение в учреждении может занимать определенное время, связанное с ожиданием очереди приема или длительности решения их вопроса. К таким учреждениям относятся отделения пенсионного фонда, подразделения налоговой службы, отделения федеральной службы социальной защиты населения, военный комиссариат, банковские отделения, паспортные столы и некоторые другие представительства административно-государственного аппарата. В последнее десятилетие в стране внедрена система «одного окна» для оказания государственных услуг, для чего во всех городах созданы многофункциональные центры (МФЦ), на базе которых реализуется значительная часть функций большинства государственных учреждений. По сути, именно эти центры сейчас консолидируют основную часть посетителей, обращающихся в государственные или муниципальные органы за какими-либо справками или документами, что позволяет определить их в модели в качестве основного элемента этой сферы деятельности. По нормативам, МФЦ создаются из расчета наличия одного окна приема-выдачи документов на каждые 5 000 жителей при нормативной нагрузке до 35 жителей в день. Для задания параметров потока посетителей достаточно знать, что за получением различных услуг в МФЦ обращается ежемесячно примерно 3% взрослого населения, а ежедневная средняя нагрузка на одного специалиста составляет 6-7 клиентов.

Что касается зон проживания населения, то в большинстве своем отечественные города характеризуются наличием трех типов застройки жилых зон, различаясь их относительными пропорциями. Первый тип – зона индивидуальных жилых домов (рис. 2а), такие зоны характерны для большинства населенных пунктов: где-то это традиционно историческая застройка, а где-то современная коттеджная. Второй тип – зона малоэтажной застройки, состоящая из 3-5 этажных

домов, которая формировалась преимущественно в период 50-80-х гг. прошлого века как среда расселения работников при промышленных предприятиях (рис.2б), а также форма решения острой послевоенной проблемы обеспечения населения отдельным жильем. Третий тип – зона многоэтажной застройки, с жилыми строениями от 9-ти и более этажей, формирующаяся с конца прошлого – начала нынешнего века (рис.2в) для массового обеспечения населения комфортным жильем в рамках различных современных программ жилищного строительства. Эти зоны различаются плотностью расселения жителей. Для целей моделирования можно принять, что средняя плотность населения в первой зоне от 50 до 100 чел/га, во второй - от 100 до 200 чел/га, в третьей - 200-400 чел/га.



Рис. 2. Типовые зоны городской застройки (фото из свободного интернета)

В зонах жилой застройки находятся и различные учреждения повседневного обслуживания населения - образования, здравоохранения и другие. Причем количество таких учреждений и их расположение также регулировались градостроительными нормативами, в соответствии с которыми в радиусе 500 м от любого жилого дома должно быть не менее одного детского сада, школы, магазина продовольственных и непродовольственных товаров, предприятия общественного питания, отделения связи, банка, парикмахерской. Что касается образовательных организаций, в 2016 году Министерством образования были выпущены рекомендации [11], устанавливающие, что «в городской местности должно быть не менее одной дневной общеобразовательной школы на 892 учащихся и не менее одной дошкольной образовательной организации на 174 воспитанника», а в дополнение к ним должны быть организации для «дополнительного образования детей (детские школы искусств по видам искусств)», количество которых исчисляется «исходя из необходимости обеспечения двенадцатипроцентного охвата детей в возрасте от 8 до 15 лет дополнительными предпрофессиональными программами в области искусств». Помимо вышеперечисленных стандартных требований, за последние десятилетия в пределах жилых зон количество предприятий сферы образовательных услуг увеличилось за счет появления частных курсов, школ, кружков, функционирующих на платной основе. Кроме того, в целом значительно увеличилось и количество других предприятий так называемого малого бизнеса в форме мелких частных торговых точек, салонов, кафешек, мастерских и т.д., располагающихся часто в полуподвальных помещениях или на первых этажах жилых зданий.

Производственные зоны обычно занимают большие территории на окраинах населенных пунктов. Если в советское время располагавшиеся там предприятия обеспечивали работой большую часть взрослого населения города, то в после реформенное время многие из крупных предприятий либо прекратили свое существование, либо значительно уменьшили объем производства и численность кадров, часть из них перепрофилировались, в ряде случаев на отдельных участках освободившихся производственных площадей разместились мелкие производственные фирмы. Трансформация сфер занятости жителей со смещением акцентов от промышленного сектора в сторону сферы услуг привела к частичному перетоку рабочих мест ближе к местам проживания населения. Об этом же свидетельствуют и результаты локальных исследований в части градации способов прибытия на работу занятого населения, в которых позиция «пешком» отмечена характерной для 40% работающих.

В таблице 3 приведены способы прибытия занятого населения на работу.

Таблица 3. Способ прибытия занятого населения на работу

Способ	всего	мужчины	женщины
Пешком	40,9	35,6	47,3
Общественный транспорт	39,2	36,8	42,1
Личный автомобиль	13,9	20,4	6,0
Другие способы	6,0	7,2	4,5

Из таблицы 3 можно сделать вывод – примерно половина из числа работающих граждан вынуждены пользоваться какими-то видами транспорта, чтобы добраться до своего места работы. При этом из них только около 14% ездят на работу на личном автомобиле, остальные пользуются общественным транспортом. В большинстве отечественных городов определенного выше масштаба общественный транспорт ныне представлен двумя формами перевозок – это автобусы и маршрутные такси. Поскольку и те, и другие ходят по установленным маршрутам, осуществляя посадку и высадку пассажиров на стационарных остановках, с точки зрения формата перевозок между ними нет большой разницы. Основное различие в характере принятия решений на текущее движение транспортного средства – для автобусов приоритетом является соблюдение графика движения вне зависимости от наполненности, а для маршрутного такси, напротив, приоритет в количестве перевозимых пассажиров без строгой привязки к расписанию. В связи с чем, как правило, в качестве маршрутных такси используются транспортные средства с относительно небольшой вместимостью в отличие от автобусов, но при этом их количество на маршруте обычно больше. Для каждого, кто пользуется общественным транспортом, можно выделить два места вероятного длительного контакта с другими пассажирами – это автобусная остановка в период ожидания и само транспортное средство в период поездки. Система маршрутов общественного транспорта строится таким образом, чтобы обеспечить возможность перемещения жителей между различными территориальными участками населенного пункта не более чем с одной пересадкой. В качестве комментария относительно использования личного автомобиля для поездок на работу стоит заметить, что, по статистике, личный автомобиль есть сегодня почти в каждой второй семье, однако отечественная специфика заключается в том, что в большинстве семей он используется не в повседневном режиме. Тем не менее, как наличие личных автомобилей, так и традиции их использования также необходимо учитывать при задании исходных данных в модели.

## **2. Программная реализация**

Изложенные выше соображения относятся к обоснованию исходных данных для создания замкнутой модели города с отечественной спецификой. Параллельно с работой по обоснованию входных данных модели проводилась разработка алгоритмов и программного модуля для имитационного моделирования жизнедеятельности населения в городе. Программа реализована в математически абстрагированном виде, что позволяет варьировать в широком диапазоне различные условия выполнения, входные параметры и исходные данные модели. Сам модуль ориентирован на имитационное моделирование перемещений агентов между отдельными локациями в соответствии с формируемой для каждого из агентов схемой переходов, а также фиксацию одновременного нахождения агентов в одной и той же локации. Во входных параметрах модели могут быть заданы популяционные характеристики (типы агентов), характеристики объектов (типы локаций), а также параметры нахождения какого-либо типа людей в соответствующих локациях.

Работа программы представляет собой повторяющийся цикл, в ходе которого имитируется посуточное перемещение агентов между локациями в соответствии с вырабатываемым на каждый текущий день графиком. В процессе моделирования перемещений рассматривается возможность передачи с некоторой вероятностью возбудителей инфекции от больных людей здоровым при их совместном нахождении в одном месте. Перед запуском симуляции формируется таблица возможных маршрутов, в которой содержится информация о путях перемещения между любыми двумя стационарными объектами. При составлении таблицы маршрутов приоритет отдается перемещению на средствах общественного транспорта, то есть при нахождении двух объектов на удалении более чем расстояние между остановками общественного транспорта его использование включается в маршрут.

На прилагаемых рисунках представлены некоторые результаты применения расчетного модуля в тестовых расчетах. На рис. 3 приведен пример ввода данных с характеристиками задаваемых объектов. Вводится информация о типах локаций, типах людей, которые могут эти локации посещать. Также указываются типы транспортных средств и создаются их маршруты. Остановочные пункты также выступают в качестве локаций.



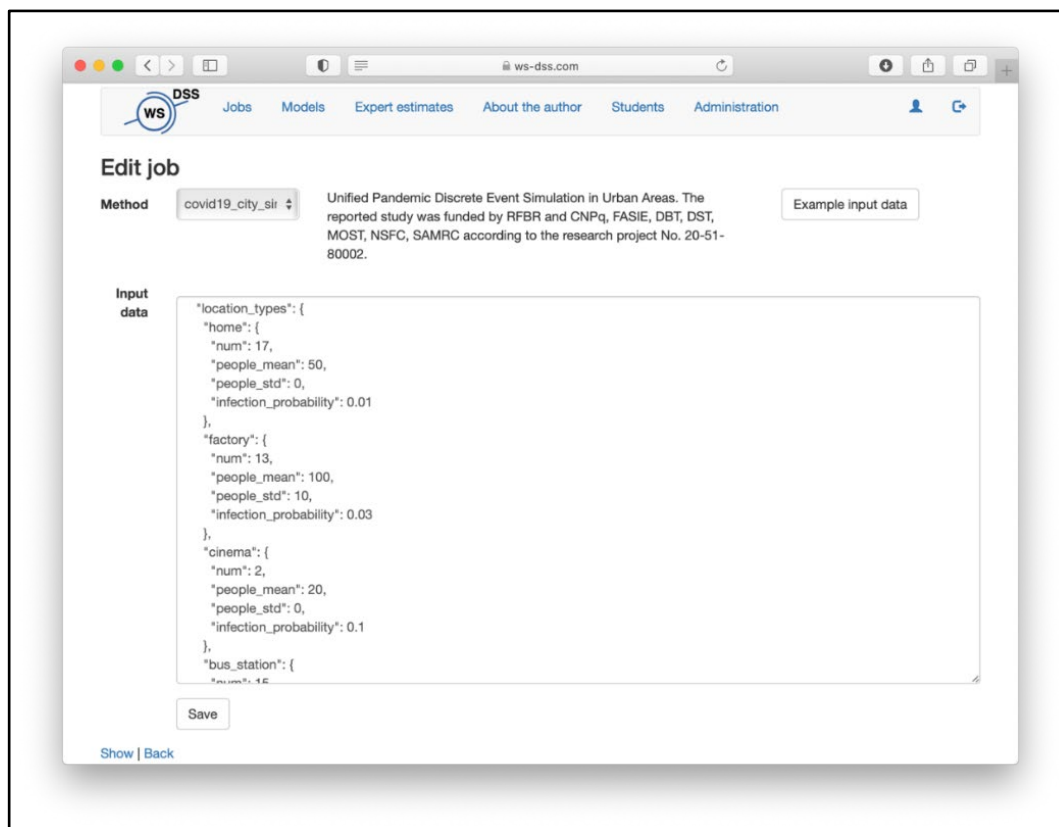


Рис. 3. Пример ввода параметров модели

На рис. 4 выведен фрагмент трассировочной печати программы. Моделирование происходит с фиксированным по времени шагом. На данном примере в те такты времени, когда меняется состояние модели, выводится информация по перемещению людей, транспорта, параметрам развития эпидемического процесса. Перечень выводимых параметров задается при вводе данных.

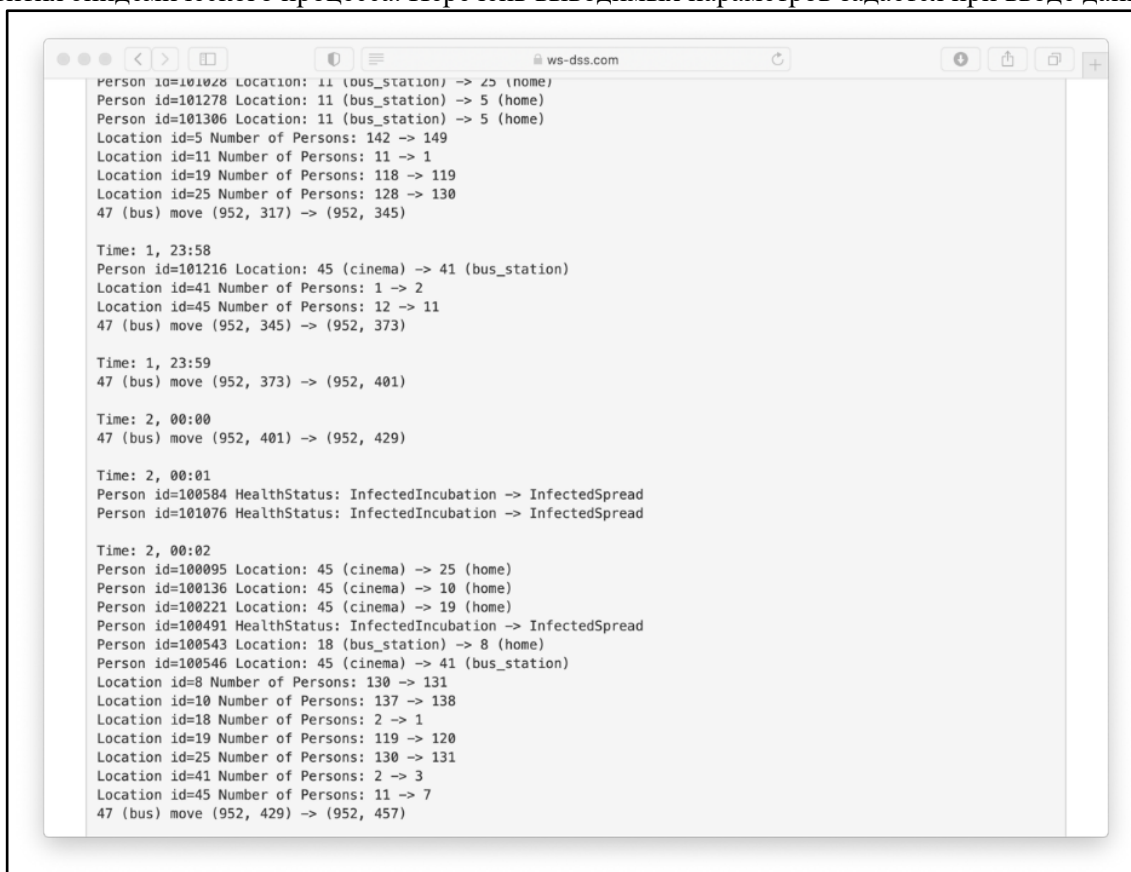


Рис. 4. Трассировочная печать по результатам моделирования

Результаты работы программного модуля сохраняются в базе данных в табличной форме и могут быть выведены в виде графиков. Примеры вывода графиков представлены на рисунках 5-7. Заметим, что в приводимых примерах по оси абсцисс обозначается текущее имитационное время в автоматически формируемом виде «расчетный день, часы:минуты», по оси ординат – количественные значения числа агентов в соответствующем месте или состоянии.

На рис.5 показана условная динамика изменения численности сотрудников в одном из офисов в течение двух суток. Дан пример офиса, в котором приоритет отдается выполнению заданий, а не присутствию людей на рабочем месте, поэтому кривые нахождения людей в офисе для двух сравниваемых дней несколько отличаются.

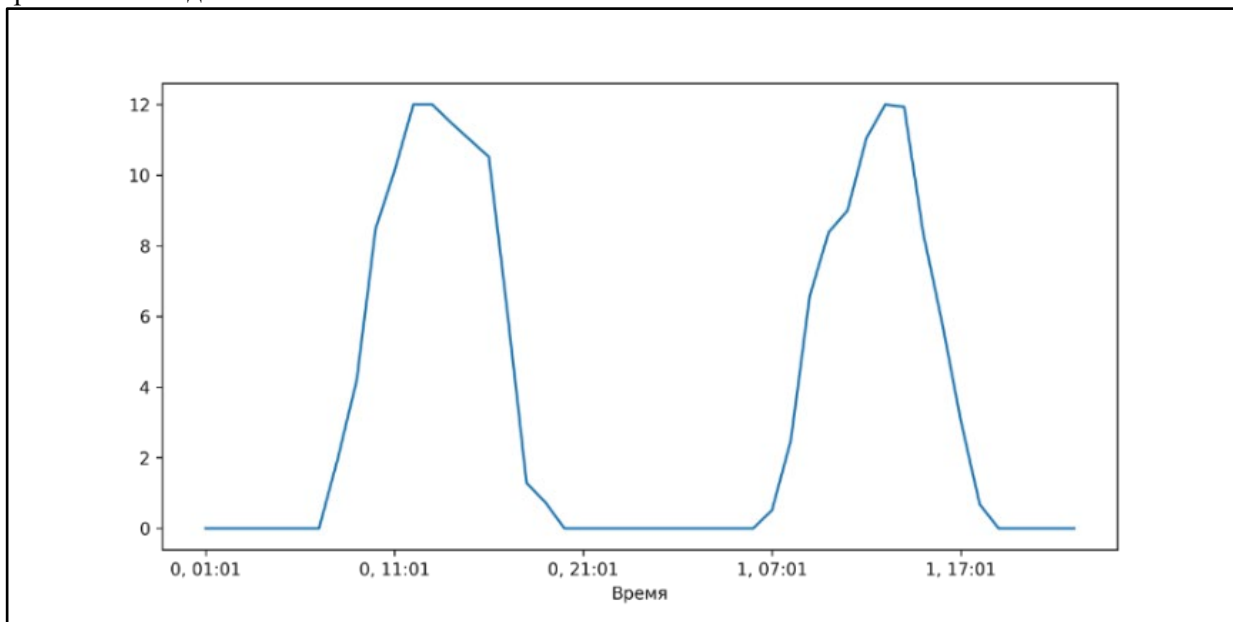


Рис. 5. Кривая изменения количества работников в офисе

На рис. 6 выведен график изменения посещаемости кинотеатра в течение десяти дней, включая два выходных. Можно видеть, что именно в эти дни у людей появляется возможность и наблюдается заметный всплеск интереса к посещению этого культурного объекта.

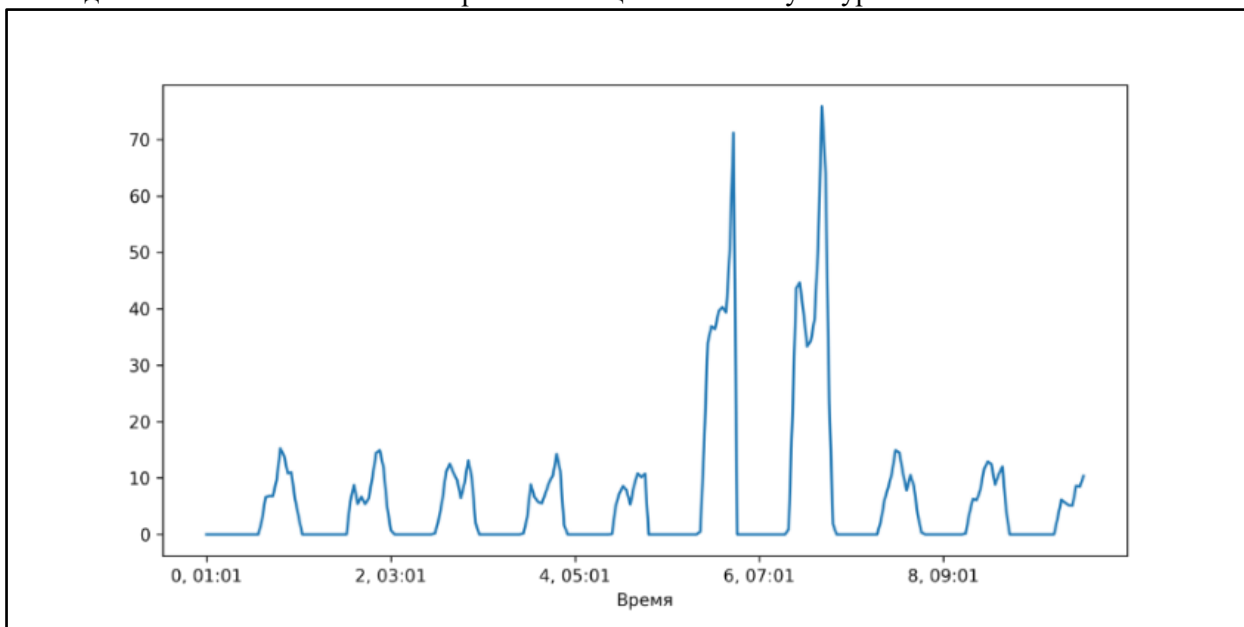


Рис. 6. Динамика изменения посетителей кинотеатра в течение 10 суток

На рис. 7 представлены данные гипотетического расчета возможного развития эпидемических процессов с учетом всей совокупности имитации контактов между агентами в заданных условиях осуществления их деятельности при относительно высоких значениях вероятности заражения.

Значения вероятности заданы высокими с целью проверки работоспособности модели путем выявления значимой динамики на коротких отрезках времени.

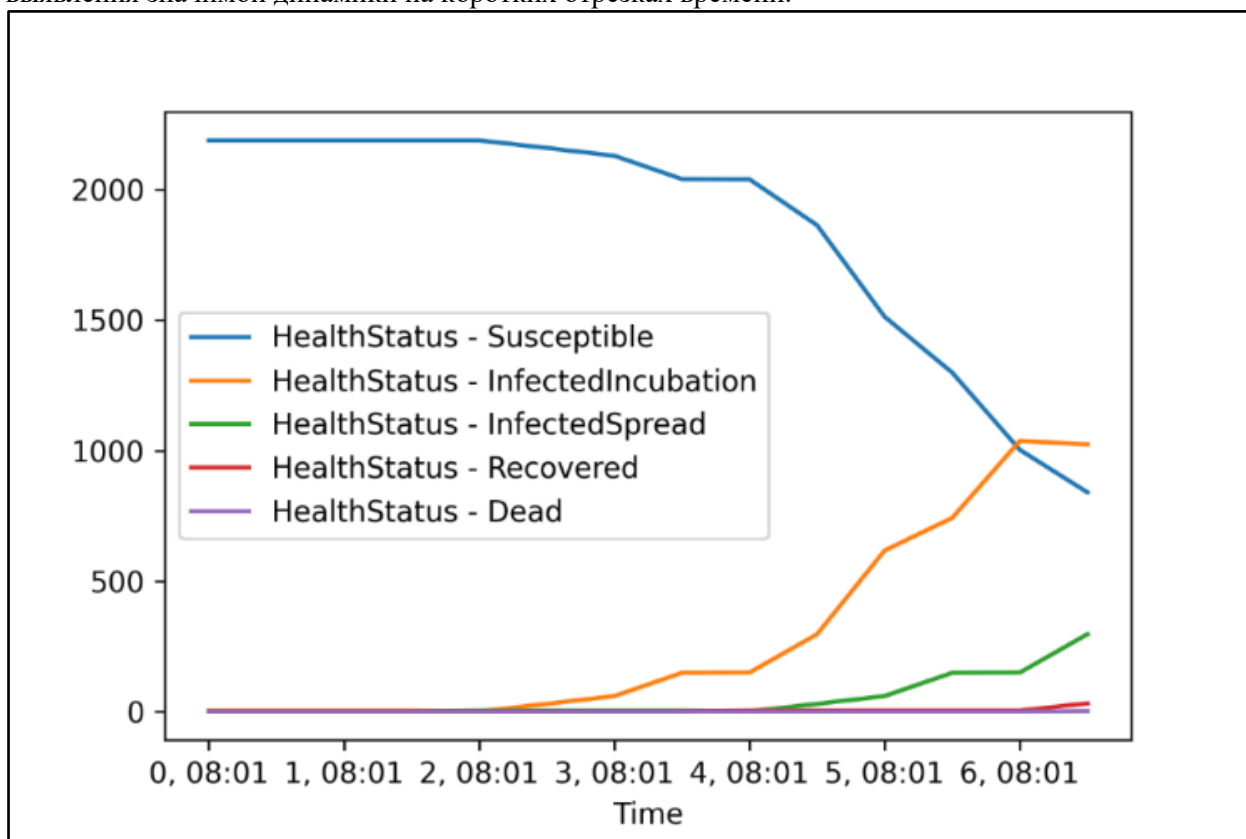


Рис. 7. Графическое представление результатов тестового моделирования

### 3. Заключение

В настоящей статье освещены ключевые особенности построения мультиагентной модели небольшого города с численностью населения в пределах 10-100 тысяч жителей в интересах исследования эпидемических процессов и прогностической оценки эффективности управленческих решений, а также последствий предпринимаемых мер. Этот выбор обусловлен, с одной стороны, тем, что подобные города являются наиболее характерными для нашей страны, с другой стороны, большинство известных работ по моделированию развития эпидемии касаются мегаполисов, имеющих отличную от небольших городов специфику. Предложение о создании такой модели было обосновано ранее в [12,13], поскольку её реализация может служить основой для решения множества задач при принятии органами местного самоуправления каких-либо стратегических или оперативных решений за счет прогностической оценки их последствий не только в чрезвычайных условиях, но и в повседневной жизни.

В заключение заметим, что модуль имитационного моделирования написан на языке разработки C#. Программа поддерживает многопоточный расчетный режим, что существенно сокращает время вычислений. Созданный модуль имитационного моделирования процессов контактного взаимодействия агентов в рамках их посуточного жизненного цикла на базе задаваемых локаций интегрирован в портал веб-сервисов поддержки принятия решений ws-dss.com, который содержит и позволяет запускать также множество других моделей в режиме облачного сервиса через интернет-браузер [14].

### 4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и CNPq (Бразилия), Фонда содействия инновациям (Россия), DBT, DST (Индия), MOST, NSFC (Китай), SAMRC (ЮАР) в рамках научного проекта № 20-51-80002.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dunham, J. B. (2005). An agent-based spatially explicit epidemiological model in MASON. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1), 3.

- [2] Crooks, A. T. & Hailegiorgis, A. B. (2014). An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera. *Environmental Modelling & Software*, 62, 164 – 177
- [3] Rakowski, F., Gruziel, M., Bieniasz-Krzywiec, L. & Radomski, J. P. (2010a). Influenza epidemic spread simulation for Poland – a large scale, individual based model study. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(16), 3149 – 3165
- [4] Christopher Wolfram (2020). An Agent-Based Model of COVID-19 // *Complex Systems*. 29(1): 87-105 DOI: 10.25088/ComplexSystems.29.1.87.
- [5] Silva P.C.L., Batista P.V.C., Lima H.S., Alves M.A., Guimarães F.G., Silva R.C.P. (2020). COVID-ABS: An agent-based model of COVID-19 epidemic to simulate health and economic effects of social distancing interventions // *Chaos, Solitons & Fractals*. arXiv:2006.10532 [cs.AI] DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110088.
- [6] Hunter E., Mac Namee B., Kelleher D. (2017). A taxonomy for agent-based models in human infectious disease epidemiology // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 20(3): 2 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/20/3/2.html>>. DOI: 10.18564/jasss.3414.
- [7] Адарченко В.А. и др. Моделирование развития эпидемии коронавируса по дифференциальной и статистической моделям // Снежинск. Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. 2020. Препринт №264. 29 с. URL: <http://vniitf.ru/data/files/pdf/corona.pdf>.
- [8] Данные с сайта Росстата: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/inspection/prob-pn2018/prob-rerrep2018.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/inspection/prob-pn2018/prob-rerrep2018.htm) (обращение 10.06.2021).
- [9] СНиП 2.07.01-89\* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2002, 60 с.
- [10] Соболева О.Н., Богатина А.Ю. Инженерно-планировочная организация жилого микрорайона: учебно-методическое пособие к курсовому проектированию / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – 36 с.
- [11] Методические рекомендации по развитию сети образовательных организаций и обеспеченности населения услугами таких организаций, включающие требования по размещению организаций сферы образования, в том числе в сельской местности, исходя из норм действующего законодательства Российской Федерации, с учетом возрастного состава и плотности населения, транспортной инфраструктуры и других факторов, влияющих на доступность и обеспеченность населения услугами сферы образования. Утв. Минобрнауки РФ 4 мая 2016 года N АК-15/02вн. <https://docs.cntd.ru/document/420360998#7D20K3>.
- [12] Балута В.И., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Предложения по разработке средств повышения эффективности управления в условиях эпидемий // *Электронные библиотеки*, 24(1), 20-41. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2021-24-1-20-41>.
- [13] Балута В.И., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Технология комплексного моделирования эпидемиологической обстановки // *Научный сервис в сети Интернет: труды XXII Всероссийской научной конференции (21-25 сентября 2020 г., онлайн)*. — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2020. — С. 68-79. (<https://doi.org/10.20948/abrau-2020-51>).
- [14] Chetverushkin, B.N., Sudakov, V.A. Factor Model for the Study of Complex Processes // *Doklady Mathematics*, 2019, 100(3), pp. 514–518.