



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 101 за 2021 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

В.А. Судаков, Т.В. Сивакова,
В.И. Балута, А.В. Милаев,
Е.А. Давыдкина

Унифицированное
моделирование
распространения вируса в
городских агломерациях

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Унифицированное моделирование распространения вируса в городских агломерациях / В.А. Судаков [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 101. 20 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-101>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-101>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

В.А. Судаков, Т.В. Сивакова, В.И. Балута,
А.В. Милаев, Е.А. Давыдкина

**Унифицированное моделирование
распространения вируса
в городских агломерациях**

Москва — 2021

Судаков В.А., Сивакова Т.В., Балута В.И., Милаев А.В., Давыдкина Е.А.

Унифицированное моделирование распространения вируса в городских агломерациях

В данной работе представлен разработанный и реализованный программный комплекс, моделирующий распространение пандемии в городских агломерациях на примере коронавирусной инфекции. Данная программа позволяет спрогнозировать распространение вируса с целью предсказания развития эпидемиологической обстановки и проведения соответствующих мероприятий по борьбе с вирусом.

Ключевые слова: COVID-19 (коронавирусная инфекция), мультиагентное моделирование, программный комплекс, городские агломерации, пандемия, локации, прогнозирование

Vladimir Anatolievich Sudakov, Tatiana Vladimirovna Sivakova, Viktor Ivanovich Baluta, Artemiy Viktorovich Milaev, Elena Alexandrovna Davydkina

Unified modeling of the spread of the virus in urban areas

This work presents a developed and implemented software package that simulates the spread of a pandemic in urban agglomerations, using the example of coronavirus infection. This program allows you to predict the spread of the virus in order to predict the development of the epidemiological situation and take appropriate measures to combat the virus.

Key words: COVID-19 (coronavirus infection), multi-agent modeling, software package, urban agglomerations, pandemic, locations, forecasting

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.

Введение

Мультиагентное моделирование в последние годы получает все более широкое распространение в мировой научной практике [1]. В том числе и в ряду активизировавшихся в связи с пандемией COVID-19 исследований, спровоцировавших построение различных видов моделей для прогноза развития эпидемии и оценки эффективности противоэпидемических мероприятий [2]. При этом, как правило, несмотря на, казалось бы, детализированный до уровня рассмотрения поведения отдельных элементарных объектов подход предлагаемые модели характеризуются достаточно высокой степенью абстрагирования, ограничиваясь моделированием динамики распространения инфекции преимущественно за счет моделирования вероятных контактов агентов только в местах их массового скопления – в местах работы или учебы, в общественном транспорте и в магазинах. Причем сама картина относительного распределения как упомянутых, так и множества других возможных мест взаимодействия людей априори остается «за кадром». Поскольку калибровка таких моделей проводится на основе сопоставления с наблюдаемыми интегральными параметрами по темпам распространения инфекции, то возможная роль в этом процессе других аспектов жизнедеятельности населения остается неисследованной, а роль непосредственно учитываемых в моделях факторов может оказаться завышенной и искажающей общую картину реального распространения инфекции. Не секрет, что зачастую полученная в ходе моделирования информация и сделанные на ее основе выводы используются органами управления для выработки решений о характере ограничительных мероприятий, влияющих на жизнедеятельность населения. Представляется, что более детальное воспроизведение в модели разнообразных аспектов жизни и деятельности жителей населенного пункта поможет повысить адекватность оценок и выявить уровень реальной значимости тех или иных факторов и обстоятельств.

Кроме того, стоит обратить внимание, что обобщенные модели на уровне учета только «мест массовой коммуникации» не касаются характерных особенностей структуры населения и образа жизни людей и потому дают «обобщенные» результаты, не учитывающие национальной специфики, хотя реальные данные показывают, что в разных странах развитие эпидемии происходит по-разному. Хорошо известно, что образ жизни людей в разных странах существенно различается, поэтому учет этого обстоятельства может оказаться значимым при моделировании эпидемических процессов. Отличия могут касаться 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, интересов и свободного времяпрепровождения. Даже места вероятного

скопления граждан зависят от принятых в обществе обычаев. В связи с этим при построении мультиагентной модели отечественных населённых 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.

Основные характеристики модели

В данном разделе рассматриваются характерные особенности жизни и деятельности жителей населенных пунктов, на основе которых формируются предпосылки и исходные данные модели. Приводимые ниже сведения базируются на интеграции результатов различного рода статистических исследований.

Из статистических данных распределения городских населенных пунктов по числу жителей [3] можно видеть, что наибольшее их число приходится на города с населением от 10 до 100 тысяч жителей, что предрасполагает к выбору для дальнейшего исследования объектов соответствующего масштаба.

Для решения поставленных в проекте задач в комплексную мультиагентную модель города целесообразно включить взаимосвязанное рассмотрение следующих сфер: параметры популяции жителей, окружающую городскую среду с выделением мест вероятных коммуникаций жителей, характеристики транспортной системы, виды экономических отношений, а также вероятные параметры распространения инфекции и возможной результативности индивидуальных мер защиты. При этом, как отмечалось выше, имеет смысл акцентировать внимание на особенностях, свойственных менталитету и образу жизни населения страны.

Параметры популяции. Основой адекватной модели популяции жителей является задание половозрастной структуры населения. Для нашей страны её отличительной особенностью является наличие «демографических ям», связанных с проявлением отсроченных последствий ВОВ и последующих периодов социально-экономических потрясений. Численность и возрастной состав женщин и мужчин на 1 января 2020 г. представлен на рис. 1 [4].

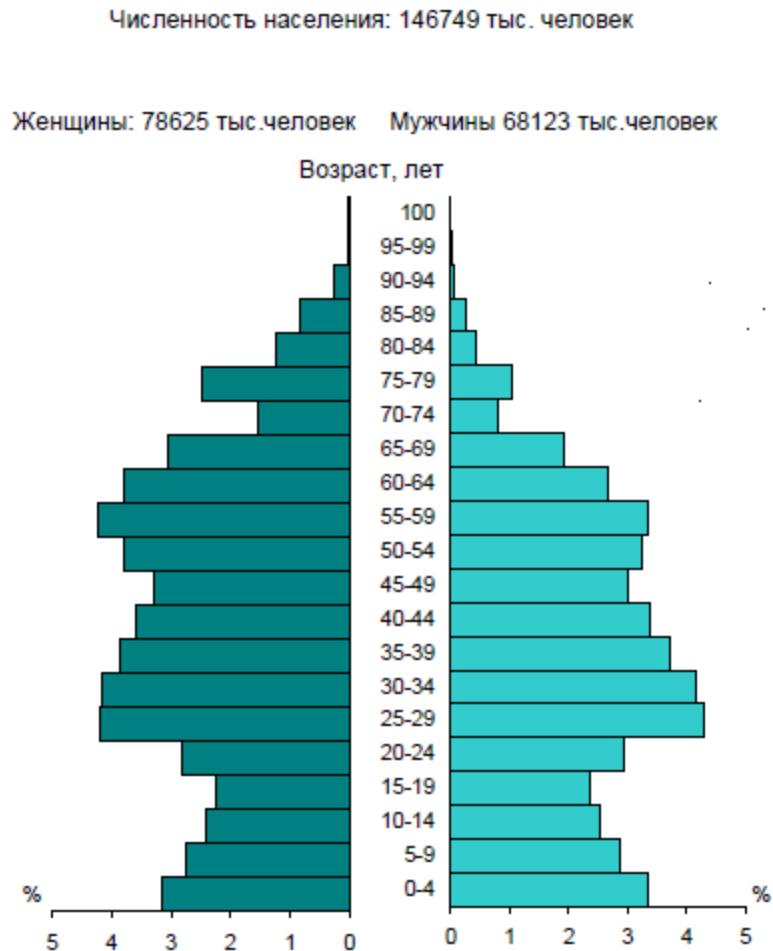


Рис. 1. Численность и возрастной состав женщин и мужчин на 1 января 2020 г.

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 предполагаться имеющими более редкий характер – еженедельные или даже ежемесячные. 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 мест, которые он должен посетить, и интервалов времени, когда он будет находиться в том или ином месте. Точки пересечения траекторий различных агентов будут давать места их вероятного контакта.

В модели выделяются четыре рода потребностей в посещении отдельным агентом тех или иных мест в течение суток. Условно их можно обозначить как обязательные, регулярные, эпизодические и urgentные. К обязательным относятся ежедневно совершаемые действия – нахождение дома, посещение места работы или учебы. Безусловно, у каждого человека места жительства и работы являются стационарными, и поэтому соответствующие места должны быть достаточно жестко ассоциированы с каждым конкретным индивидом. К регулярным относятся подобные же ассоциированные места, однако посещение которых происходит не в ежедневном режиме, а с определенной периодичностью. К ним относятся заведения дополнительного образования, спортивные секции, кружки, церковные службы и т.п. По сути, это места, где происходит регулярное объединение людей в рамках неких «сообществ по интересам». К эпизодическим предлагается относить места, посещаемые по мере необходимости – покупки в магазине, обслуживание в парикмахерской и др. При этом требование посещения одних и тех точек не является обязательным, поскольку они могут выбираться отдельным человеком из условий удобства в текущий момент удовлетворения данной потребности. И, наконец, к urgentным ситуациям стоит относить редко возникающие потребности – получить документы в МФЦ, отремонтировать вышедший из строя телефон или сломавшуюся на сумке молнию, пройти техосмотр и т.п.

Таким образом, при построении суточного графика каждого отдельного агента могут возникать точки ветвления с выбором той или иной траектории из ряда возможных, связанные с наличием вышеперечисленных причин посетить то или иное место. Вероятности выбора траектории являются динамическими и зависят как атрибутов агента, так и от некоторых дополнительных условий, влияющих на принятие решений. Расчет конкретного значения вероятности производится на основе совокупности вводимых в модели правил.

Стоит также отметить, что при построении общей картины динамики вероятных коммуникаций агентов должны приниматься во внимание две разнородных группы условий: с одной стороны, различного рода ежедневные потребности жителей, а с другой – характер функционирования объектов, связанных с оказанием услуг населению. Второе условие 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.

Такой подход к построению траекторий перемещения агентов позволяет более реалистично воспроизводить картину жизнедеятельности города в целом.

Городские агломерации. Архитектурно-планировочный облик городов нашей страны сформирован в соответствии с требованиями таких директивных документов, как «Строительные нормы и правила» [5].

На основе анализа этих документов можно констатировать, 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 выделяют центральную 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.

Характеристики транспортной системы. Из таблицы 1 можно сделать и дополнительный вывод – более половины из числа работающих граждан вынуждены пользоваться какими-то видами транспорта, чтобы добраться до своего места работы.

Таблица 1

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

При этом из них только 14% ездят на работу на личном автомобиле, остальные пользуются общественным транспортом. В большинстве отечественных городов 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 приведенных данных об использовании 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. И наличие личных автомобилей, и характер их использования также необходимо учитывать при построении модели.

Постановка задачи

Прогнозирование распространения коронавирусной инфекции (COVID-19) имеет важное практическое значение для принятия своевременных профилактических и противоэпидемических мер как на региональном, так и на федеральном уровне с целью снижения заболеваемости и смертности [6-8].

Для решения задачи исследования распространения COVID-19 в городских агломерациях была разработана и реализована унифицированная модель.

Входные параметры модели

Локации:

- Координаты (равномерно в рамках заданного размера квадрата);
- Тип локации;
- Максимальная емкость локации (если емкость локации достигнута, то человек ждет другой подходящий локации);
- Вероятность контакта в локации.

Локации создаются перед запуском моделирования автоматически по датчику случайных чисел. Число локаций прописано в типе локации. Но должна быть возможность получить много прогонов модели с одними и теми же локациями (это называется зависимые испытания, их используют для снижения дисперсии).

Связи между локациями:

- Локация с ненулевой скоростью;
- Список локаций в маршруте.

Тип локации:

- Название типа локации (например, квартира/дом, домашнее место работы, подъезд, автобус, автомобиль, офис, цех, магазин, поликлиника, больница, место развлечения, улица);
- Число локаций данного типа, которое будет создано;
- Средняя скорость и СКО перемещений (по нормальному закону);
- Среднее число и СКО числа людей в данной локации (пуассоновское распределение);
- Вероятность заражения при контакте здорового и заразного;
- Список типов локаций, которые могут быть в маршруте;
- Среднее число локаций в маршруте по закону Пуассона.

Человек:

- Пол;
- Возраст;
- Состояние человека (приведено ниже);
- Текущая локация;
- Координаты;
- Тип человека
- Ссылка на мужа/жену;
- Список ссылок на членов семьи.

Типы людей:

- Название типа (офисный работник, рабочий, домохозяйка, домашняя работа, работник с частично удаленным графиком, студент);
- Доля людей в данном состоянии на момент начала работы модели (конкретные люди выбираются случайно).

Состояние:

- Имя состояния из диаграммы;
- Начальное число людей в состоянии.

Переход между состояниями:

- Состояние откуда;
- Состояние куда;
- Вероятность перехода;
- Среднее число дней на переход (по закону Вейбула, <https://github.com/sudakov/epidmod/blob/main/main.ipynb>).

Связь Типы локаций-Типы людей:

- Тип человека;
- Тип локации;
- Постоянная привязка (Да/Нет);
- Среднее число и СКО рабочих дней в неделю в данном типе локации;
- Среднее число и СКО выходных дней в неделю в данном типе локации;
- Среднее число часов и СКО в рабочем дне в данном типе локации;

- Среднее число часов и СКО выходном дне в данном типе локации;
- Список расходов/доходов в форме кортежей <статья, сумма, тарификация за час или за факт нахождения в локации.

Справочник статей расходов:

- Имя статьи (например, расходы государства, доходы предприятия, доходы человека, расходы человека).

Другие общие параметры:

- общее время моделирования tn ;
- Если шаг по времени так и останется дискретным, то нужен еще параметр: шаг времени;
- Число параллельных потоков.
- Временной шаг, с которым выводится таблица с результатами.

Унифицированный моделирующий комплекс пандемий на городских территориях

Далее более подробно опишем разработанный программный комплекс.

Системные требования:

Linux Ubuntu 20.04 или Windows 7/8/10;

Пакет libgdiplus (для Linux Ubuntu 20.04).

Язык разработки: C#.

Используемые сторонние библиотеки: ScottPlot – инструмент для создания графиков.

Выполнение программы можно разделить на два этапа: создание модели и симуляция. Входными данными является json-файл, в котором должны быть описаны параметры работы программы и данные модели.

Работа программы построена с помощью повторяющегося цикла, в ходе которого происходит перемещение людей между локациями и передача вируса от больных людей к здоровым с некоторой вероятностью, если они находятся в одной локации.

Типы людей, типы локаций, а также параметры нахождения какого-либо типа людей в локации какого-либо типа задаются во входных параметрах модели.

Перед запуском симуляции создаётся таблица маршрутов, в которой содержится информация о кратчайшем пути между любыми двумя локациями (кроме транспорта). При составлении таблицы маршрутов приоритет будет отдаваться перемещению между станциями (т.е. с помощью транспорта).

Программа поддерживает работу в нескольких потоках, что существенно сокращает время вычислений и относится к ее преимуществам.

Выходные данные:

Список локаций;

Список людей;

Таблица и графики критериев оценки:

- Среднее число контактов за день;
- Среднее время нахождения в каждой локации;
- Кол-во людей в локации в момент записи;
- Кол-во незаражённых людей;
- Кол-во людей на стадии инкубации вируса;
- Кол-во людей на стадии распространения вируса;
- Кол-во выздоровевших людей;
- Кол-во умерших людей;
- Статьи доходов / расходов;
- Кол-во заражённых;
- Кол-во здоровых;
- Таблица среднего за определённый временной промежуток кол-ва людей в локациях;
- Логи изменений:
 - Изменение кол-ва людей в локации;
 - Изменение состояния здоровья человека;
 - Изменение локации человека;
 - Заражение / выздоровление человека.

Запуск программы

Данная программа может работать с двумя операционными системами.

Запуск на Windows:

1. Задать параметры работы и данные модели в файле **UPDESUA.json**;
2. Запустить файл **SimulationConsole.exe**;
3. Ждать завершения вычислений;
4. Ознакомиться с результатами работы программы в папке **output**.

Запуск на Linux Ubuntu:

1. Установить пакет **libgdiplus** командой **sudo apt-get install libgdiplus**;
2. Задать параметры работы и данные модели в файле **UPDESUA.json**;
3. Установить права для исполняемого файла **SimulationConsole** командой **chmod 777 SimulationConsole**;
4. Запустить программу командой **./SimulationConsole**;
5. Ознакомиться с результатами работы программы в папке **output**.

Этапы вычислений представлены на рисунке 2:

1. Обработка людей

1.1. Удаление локаций из стека (под стеком будем понимать множество локаций, посещение которых подразумевается в текущий момент времени, но фактически человек находится только в одной локации, расположенной в вершине стека), которые человек должен посетить за день, если время симуляции больше, чем определённые временные границы нахождения в конкретной локации.

1.2. Если был выполнен переход к новому дню, то генерируется новый список локаций, которые человек должен посетить за день.

1.3. Если время симуляции попадает во временные границы запланированного посещения локации, то локация добавляется в стек.

1.4. Если человек в данный момент не находится в локации, находящейся на вершине стека, то начинается перемещение в эту локацию

1.5. Если человек заражён и пришло время перехода в следующую стадию болезни, то этот переход осуществляется.

2. Обработка локаций

2.1. Если в локации появился новый человек, выполняется попытка передачи вируса между прибывшими людьми и теми, кто уже был в здании.

3. Обработка модулей

3.1. Запись изменений;

3.2. Запись критериев оценки;

3.3. Запись среднего за определённый промежуток времени кол-ва людей в локациях.

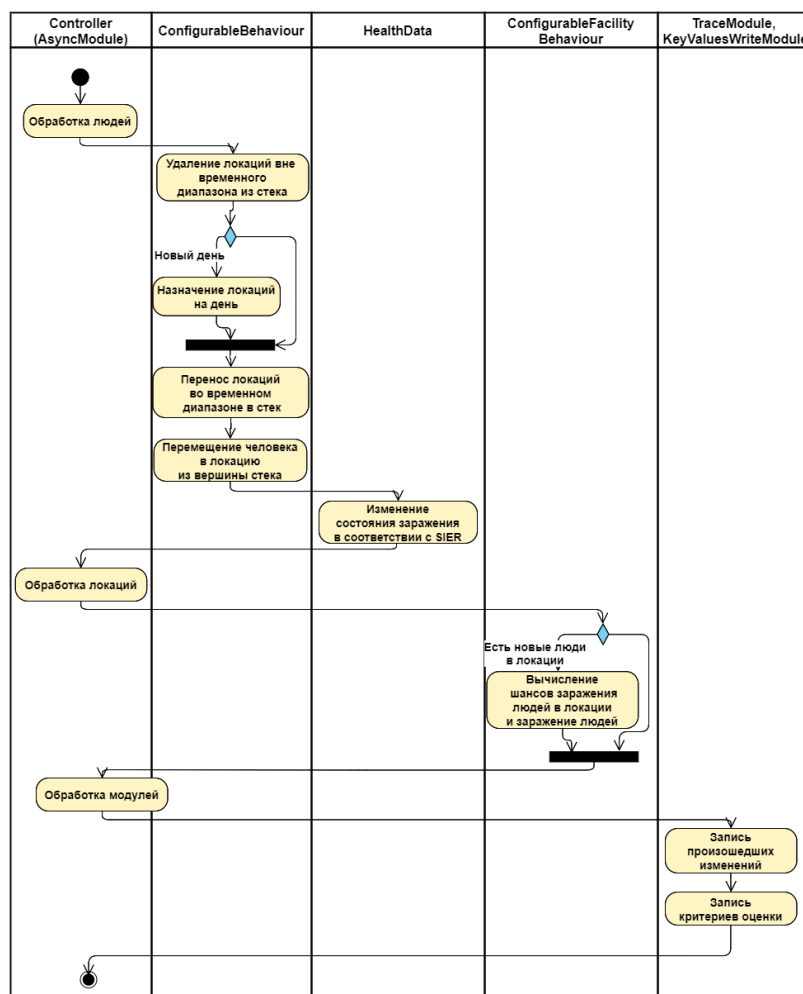


Рис. 2. Этапы вычислений

Перемещение между локациями

Перемещение в модели можно рассматривать как перемещение между узлами графа, причём перемещение между любыми локациями осуществляется либо напрямую, либо через станции.

Если человек не находится в точке назначения, то выполняется одно из следующих действий:

- Если человек выполняет перемещение:
 - Если человек в автобусе, и автобус прибыл на нужную станцию, то человек перемещается на эту станцию;
 - Если человек хочет переместиться на станцию, сам находится на другой станции и на ней есть автобус, который может приблизить человека к пункту назначения, то человек перемещается в этот автобус;
 - В других случаях выполняется мгновенное перемещение в требуемую локацию.
- Если человек не выполняет перемещение:
 - Начинается перемещение в соответствии с картой маршрутов.

Многопоточность

Множество людей и локаций делятся на группы, вычисления с которыми выполняются параллельно. Их работа синхронизируется три раза за один шаг вычислений:

- После обработки людей;
- После обработки локаций;
- После выполнения записи результатов.

Диаграмма классов

Далее на рисунках 3-7 представлены диаграммы классов.

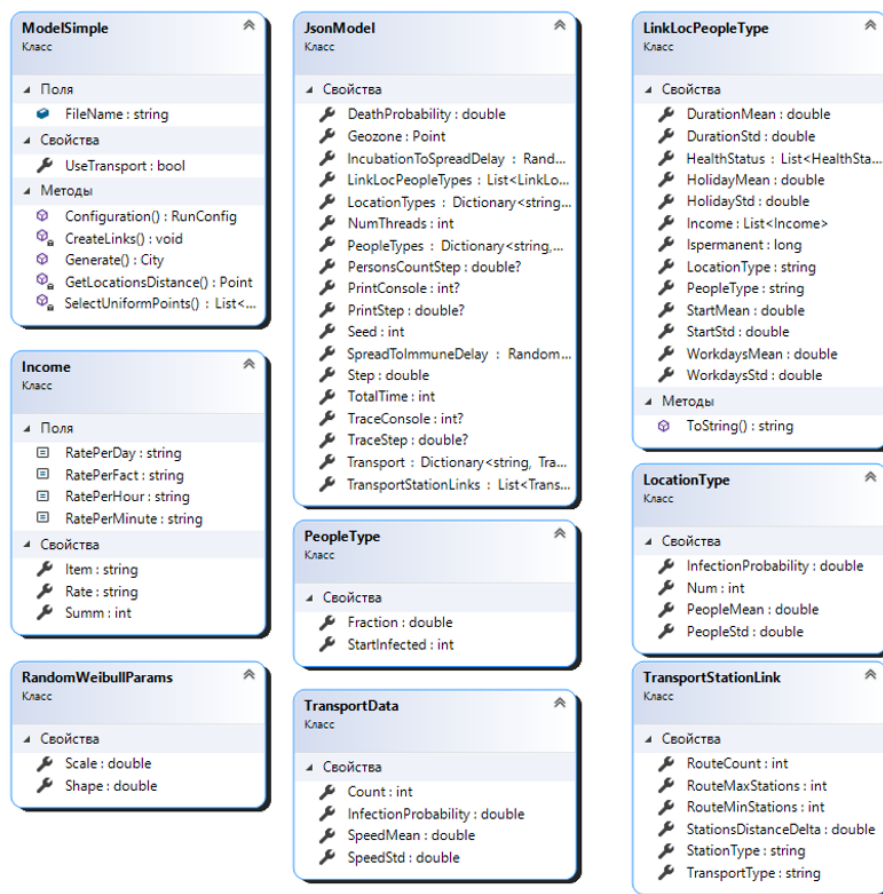


Рис. 3. Классы, обеспечивающие обработку входных данных и создание модели

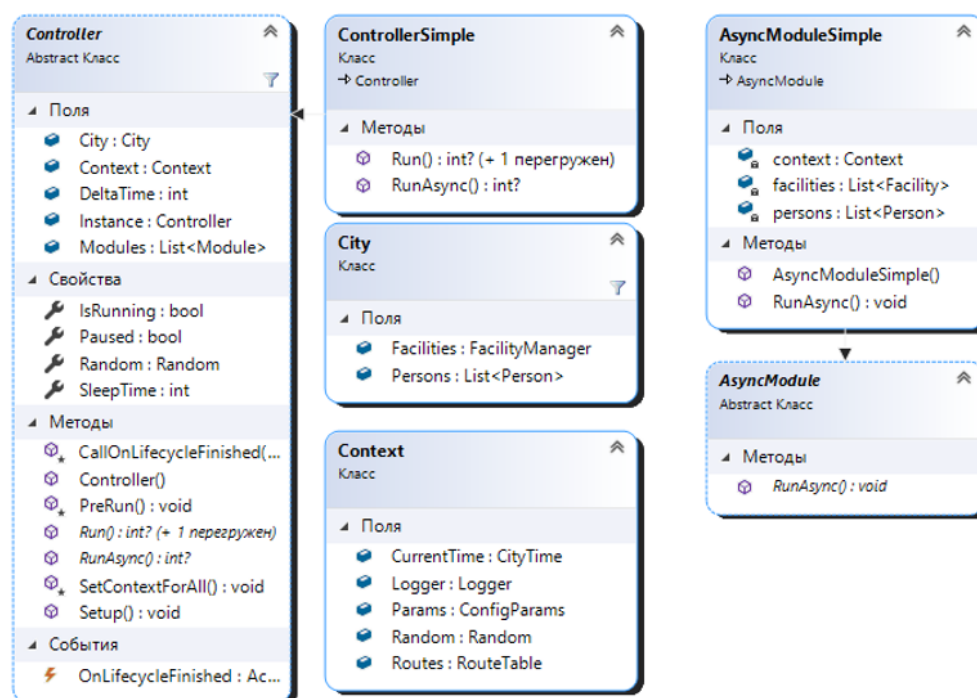


Рис. 4. Классы, обеспечивающие выполнение симуляции

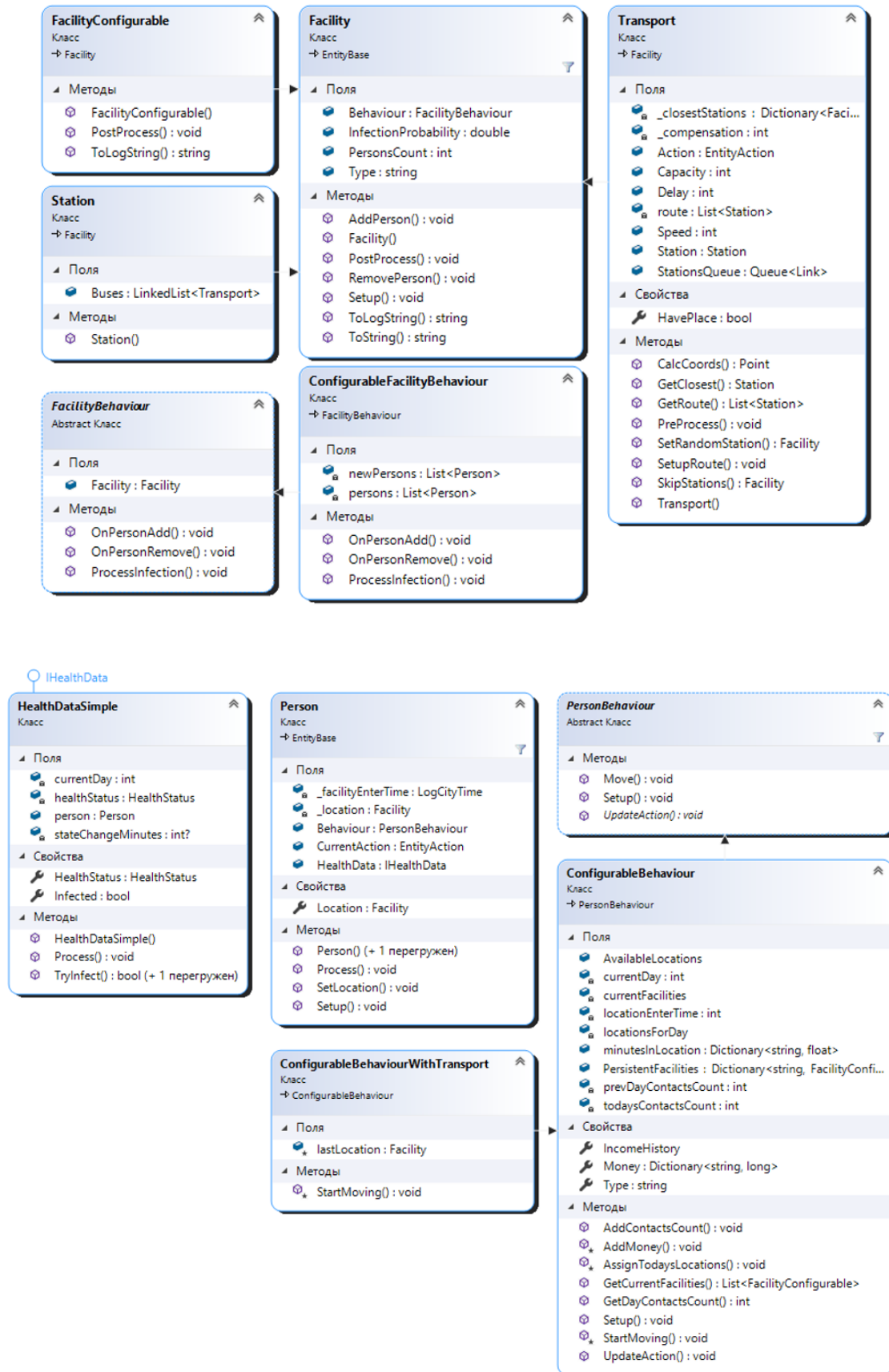


Рис. 5. Классы, представляющие собой локации, транспорт, людей и их поведение

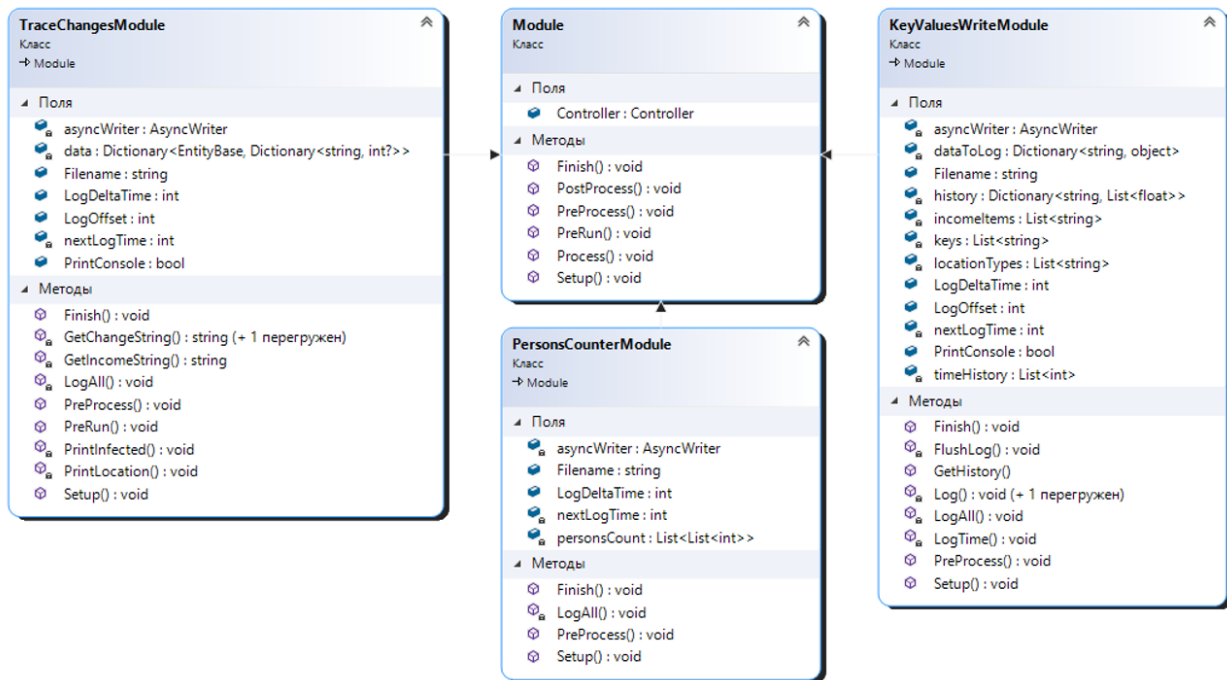


Рис. 6. Модули записи ключевых значений, среднего кол-ва людей в локации и трассировки

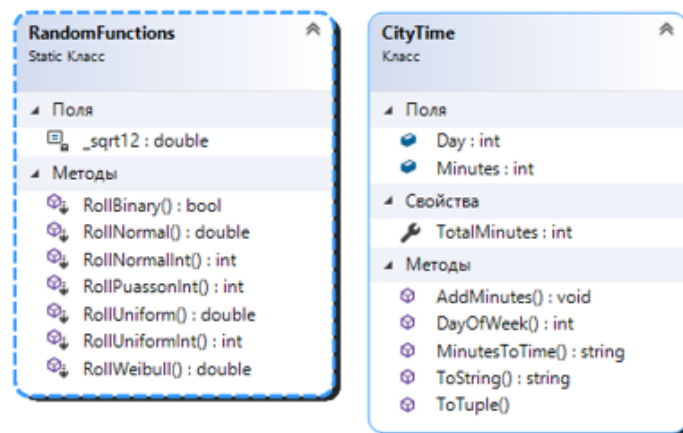


Рис. 7. Вспомогательные классы

Результаты моделирования

Модуль имитационного моделирования написан на языке разработки: C# [9]. Данный модуль интегрирован в портал веб-сервисов поддержки принятия решений ws-dss.com [10,11]. Он позволяет запускать множество моделей в режиме облачного сервиса через интернет-браузер.

Работа программы представляет собой повторяющийся цикл, в ходе которого происходит перемещение людей между локациями и передача вируса от больных людей к здоровым с некоторой вероятностью, если они находятся в одной локации.

Типы людей, типы локаций, а также параметры нахождения какого-либо типа людей в локации какого-либо типа задаются во входных параметрах модели.

Перед запуском симуляции создаётся таблица маршрутов, в которой содержится информация о кратчайшем пути между любыми двумя локациями (кроме транспорта). При составлении таблицы маршрутов приоритет будет отдаваться перемещению между станциями (т.е. с помощью транспорта).

Программа поддерживает работу в нескольких потоках, что существенно сокращает время вычислений.

На рисунке 8 показано, как вводятся исходные данные для моделирования. Вводится информация о типах локаций и типах людей, которые могут эти локации посещать. Также указываются типы транспортных средств и создаются их маршруты. Остановочные пункты также выступают в качестве локаций.

Редактирование задачи

Метод covid19_city_sir

Унифицированный моделирующий комплекс пандемий на городских территориях. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и CNPq (Бразилия), Фонда содействия инновациям (Россия), DBT, DST (Индия), MOST, NSFC (Китай), SAMRC(IQAP) в рамках научного проекта № 20-51-80002.

Входные данные

```

{
  "bus_station": {
    "num": 15,
    "people_mean": 0,
    "people_std": 0,
    "infection_probability": 0.1
  },
  "people_types": {
    "Office worker": {
      "fraction": 0.9,
      "start_infected": 2
    },
    "Housewife": {
      "fraction": 0.1,
      "start_infected": 1
    }
  },
  "link_loc_people_types": [
    {
      "people_type": "Housewife",
      "loc": "bus_station"
    }
  ]
}

```

Сохранить

Рис. 8. Ввод параметров модели

На рис. 9 показан фрагмент трассировочной печати программы. Моделирование происходит с фиксированным по времени шагом. В те такты времени, когда меняется состояние модели, выводится информация по перемещению людей, транспорта и изменению состояния инфицирования.

```

Person id=101937 Location: 47 (bus) -> 32 (bus_station)
Person id=101938 Location: 32 (bus_station) -> 47 (bus)
Person id=101954 Location: 32 (bus_station) -> 47 (bus)
Person id=102017 Location: 47 (bus) -> 32 (bus_station)
Person id=102068 Location: 32 (bus_station) -> 47 (bus)
Location id=1 Number of Persons: 3 -> 2
Location id=18 Number of Persons: 139 -> 141
Location id=32 Number of Persons: 51 -> 49
Location id=44 Number of Persons: 89 -> 90
Location id=47 Number of Persons: 63 -> 67

Time: 1, 21:02
Person id=100000 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=100211 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=100336 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=100617 Location: None -> 32 (bus_station)
Person id=100814 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=100822 Location: None -> 8 (home)
Person id=100828 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=100925 Location: None -> 44 (home)
Person id=101009 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101089 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101148 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101168 Location: None -> 46 (bus_station)
Person id=101179 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101395 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101402 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101422 Location: None -> 46 (bus_station)
Person id=101826 Location: None -> 32 (bus_station)
Person id=101921 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101937 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Person id=101957 Location: None -> 46 (bus_station)
Person id=102017 Location: 32 (bus_station) -> 42 (home)
Location id=8 Number of Persons: 98 -> 99
Location id=32 Number of Persons: 49 -> 37
Location id=42 Number of Persons: 67 -> 81
Location id=44 Number of Persons: 90 -> 91
Location id=46 Number of Persons: 46 -> 49
47 (bus) move (317, 190) -> (337, 210)

```

Рис. 9. Трассировочная печать по результатам моделирования

Результаты работы сохраняются в форме таблицы и выводятся в виде графиков. Примеры графиков показаны на рисунке 10. Моделирование приведено для небольшой городской агломерации в 26 тыс. человек.

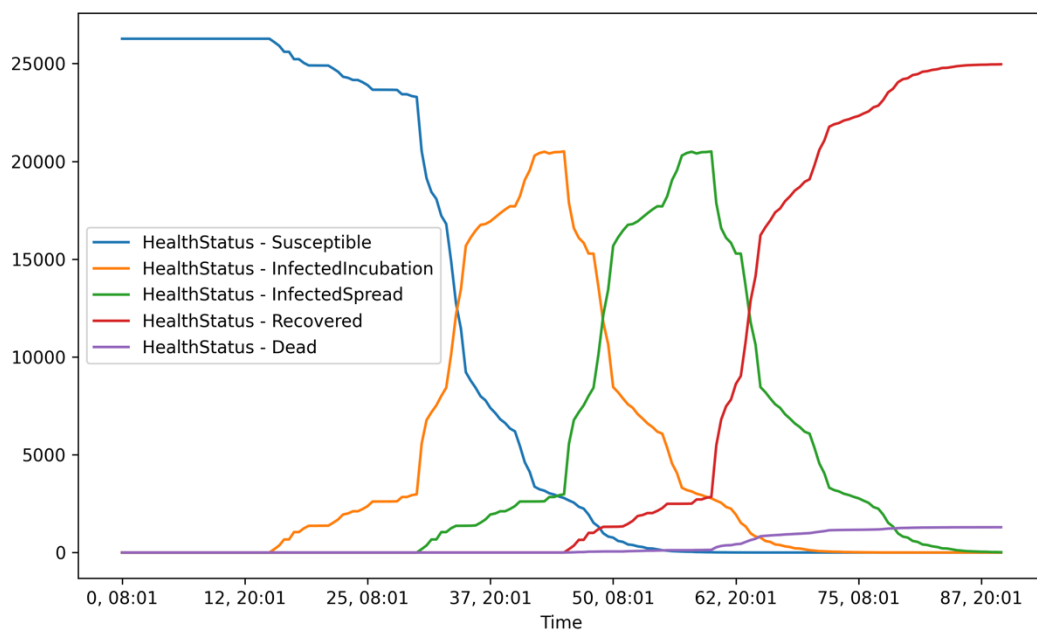


Рис. 10. Графическое представление результатов моделирования

Заключение

С помощью мультиагентной модели был разработан и реализован «Унифицирующий моделирующий программный комплекс пандемий для городских агломераций». Данный комплекс моделирования распространения коронавирусной инфекции помогает спрогнозировать поведение вируса и предсказать наиболее вероятное развитие событий в части заболеваемости в определенной агломерации. К достоинствам данной программы можно отнести повышение точности за счет увеличения входных параметров, а также возможность проводить вычисления сразу в нескольких потоках.

Данная программа была апробирована на примере населённого пункта с численностью населения 26 000 человек и доказала пригодность для прогнозирования распространения вируса в городских агломерациях.

Библиографический список

1. Мельничук А.В., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Решение задач оптимизации с использованием мультиагентных моделей // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. — 2019. — № 100. — 16 с. — <https://doi.org/10.20948/prepr-2019-100>.
2. Пономарёв Р.Л., Судаков В.А., Сивакова Т.В., Энтентеев А.Р., Ескин В.И. Разработка модели распространения COVID-19 в городских агломерациях // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. — 2021. — № 74. — 20 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-74>.
3. Социально-демографический портрет России: По итогам Всероссийской переписи населения 2010 года. // Федер. служба гос. статистики. — М.: ИИЦ «Статистика России». 2012. — 183 с.
4. Женщины и мужчины России. 2020. Ст.сб. М. — 2020. — 239 с.
5. СНиП 2.07.01-89 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.
6. Судаков В.А., Сивакова Т.В. Мультиагентное моделирование на базе нечетких суждений экспертов области борьбы с пандемией / В книге: Математическое моделирование. Тезисы II Международной конференции. Москва. — 2021. — С. 81-83.
7. Судаков В.А. Применение метода TOPSIS для моделирования эпидемиологической обстановки на основе нечетких суждений / В книге: Математическое моделирование. Тезисы II Международной конференции. Москва. — 2021. — С. 83-84.
8. Балута В.И., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Технология комплексного моделирования эпидемиологической обстановки // Научный сервис в сети Интернет. — 2020. — № 22. — С. 68-79. — DOI 10.20948/abrau-2020-51.
9. Кобелев Н.Б. Имитационное моделирование: Учебное пособие / Н.Б. Кобелев, В.А. Половников, В.В. Девятков; Под общ. ред. Н.Б. Кобелева. — М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М. — 2018. — 368 с.

10. Четверушкин Б.Н., Судаков В.А. Факторная модель для исследования сложных процессов // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 489. № 1. – С. 17-21.

11. Судаков В.А. Веб-сервисы для систем поддержки принятия решений. <https://ws-dss.com/>.

Оглавление

Введение	3
Основные характеристики модели	4
Постановка задачи.....	8
Унифицированный моделирующий комплекс пандемий на городских территориях	10
Результаты моделирования	16
Заключение.....	19
Библиографический список.....	19