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

Препринты ИПМ • Препринт № 74 за 2021 г.

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

Р.Л. Пономарёв, [В.А. Судаков](#),
[Т.В. Сивакова](#), А.Р. Энтентеев,
В.И. Ескин

Разработка модели
распространения COVID-19
в городских агломерациях

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Разработка модели распространения COVID-19 в городских агломерациях / Р.Л. Пономарёв [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 74. 20 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-74>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-74>

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

**Р.Л. Пономарев, В.А. Судаков, Т.В. Сивакова,
А.Р. Энтентеев, В.И. Ескин**

Разработка модели распространения COVID-19 в городских агломерациях

Москва — 2021

Пономарев Р.Л., Судаков В.А., Сивакова Т.В., Энтеннеев Р.А., Ескин В.И.

Разработка модели распространения COVID-19 в городских агломерациях

Вспышка коронавирусной инфекции COVID-19 в начале 2020 года застала врасплох большинство стран мира. Ввиду неспособности систем здравоохранения справиться с быстро распространяющимся вирусом человечество понесло колоссальные экономические и людские потери.

Данная пандемия не первая в истории, однако, несмотря на это, методы борьбы с распространением вируса были запоздалыми и малоэффективными.

Настоящая работа посвящена разработке модели распространения вирусных заболеваний на примере COVID-19 с целью прогнозирования масштабов будущих эпидемий и, как следствие, выбора успешных методов борьбы с ними.

Ключевые слова: COVID-19, имитационное моделирование, вирусные заболевания, городские агломерации

Roman Lvovich Ponomarev, Vladimir Anatolievich Sudakov, Tatyana Vladimirovna Sivakova, Aidar Rinatovich Ententeev, Vladimir Ivanovich Eskin

Development of a model for the spread of COVID-19 in urban agglomerations

The outbreak of the coronavirus infection COVID-19 in early 2020 caught most countries of the world by surprise. Humanity has suffered colossal economic and human losses due to the inability of health systems to cope with the rapidly spreading virus.

This pandemic is not the first in history, however, despite this, the methods of combating the spread of the virus were belated and ineffective.

This work is devoted to the development of a model for the spread of viral diseases using the example of COVID-19 in order to predict the scale of future epidemics and, as a result, select successful methods of combating them.

To conclude a conclusion about the effectiveness of the application of this technology, a simulation model of the corresponding process is being developed.

Key words: COVID-19, simulation, viral diseases, urban areas

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

Отличительной особенностью вируса COVID-19 стало его чрезвычайно быстрое распространение посредством контактов между людьми. Так, системы здравоохранения большинства стран физически не справились с масштабами эпидемии – количество медицинского персонала, оборудования, мест в больницах оказалось недостаточным для борьбы с пандемией. По этой причине повсеместно страны объявили о необходимости введения жестких карантинных мер – только максимальное сокращение количества физических контактов между гражданами позволило сократить темпы распространения вируса.

Следствием описанных выше событий послужили колоссальные экономические потери в большинстве стран мира ввиду остановки экономической деятельности, а также большое количество летальных случаев из-за неспособности систем здравоохранения справиться с вызовами, брошенными пандемией человечеству.

При этом стоит отметить, что наиболее эффективно и быстро удалось прекратить распространение вируса в стране, в которой произошла первая вспышка – в Китае [1]. Отличительной особенностью борьбы с вирусом в этой стране стало введение жесткого карантина в короткие сроки, что позволило в будущем избежать таких колоссальных финансовых и людских потерь, какие понесли другие страны.

Главным недостатком введения карантинных мер является приостановка экономической деятельности, что влечет за собой огромные финансовые потери. Исходя из этого, при борьбе с любым быстро распространяющимся вирусом, в частности коронавирусной инфекцией, основной проблемой является поиск баланса между экономическими ограничениями и нагрузкой на систему здравоохранения. Попытке облегчить поиск решения данной проблемы посвящена данная работа.

Так, имитационное моделирование позволяет без привлечения больших временных и финансовых ресурсов, а также проведения натурных экспериментов выдвигать и проверять различные гипотезы в различных сферах человеческой деятельности. В текущей работе представлена разработка мультиагентной имитационной модели распространения вируса, передающегося через контакты между гражданами. Данная модель является эффективным инструментом для моделирования распространения коронавирусной инфекции и проверки использования различных параметров при борьбе с ней. Использование данной модели позволит делать прогнозы, с помощью которых можно выбрать оптимальные методы борьбы с распространением вируса.

Распространение коронавирусной инфекции COVID-19

Как говорилось ранее, для решения задач прогнозирования и проверки гипотез применяется подход моделирования реальных систем с помощью

современных технических средств. Такой процесс подразумевает переход на определенный уровень абстракции: опускаются несущественные детали и учитывается только то, что считается важным. Система в реальном мире всегда сложнее своей модели. Также стоит сказать, что существуют различные методы моделирования, подразумевающие разную степень абстракции, используемой в модели. Однако, несмотря на это, любая модель должна соответствовать реальной системе для того, чтобы полученные в рамках исследования данные имели практическую ценность. Из этого следует, что необходимо тщательно изучить реальную систему и таким образом подобрать достоверные данные, подаваемые на вход разрабатываемой модели.

В июле 2021 года власти Российской Федерации анонсировали разработку проекта “Санитарный щит” [2]. Данный проект преследует цели более ведения более эффективной борьбы с возникновением вирусов наподобие COVID-19. Модель, разработанная в рамках текущего исследования, может быть применена в рамках рассматриваемого проекта.

При моделировании распространения коронавирусной инфекции критически важно, чтобы следующие параметры наиболее близко соответствовали параметрам реальной системы:

- количество контактов, совершаемых человеком в течение суток;
- вероятность ношения гражданами масок и перчаток;
- вероятность передачи вируса при контакте двух людей;
- длительность инкубационного периода развития болезни, за которым следует госпитализация;
- длительность лечения от вируса;
- развитие антител к вирусу и влияние их на следующую возможность заражения;
- количество рабочих мест, единиц общественного транспорта, развлекательных мест, мест общепита — количество замкнутых помещений;
- количество изначально больных людей.

Коронавирусная инфекция передается от человека к человеку при близком контакте, через микрокапли респираторных выделений, которые образуются, когда инфицированные люди говорят, чихают или кашляют. Также существует небольшая вероятность передачи вируса через предметы [3]. Таким образом, можно сделать вывод о прямой зависимости скорости распространения вируса и количества заболеваний от количества контактов граждан между собой изо дня в день.

Рис. 1. Схема передачи коронавируса

Количество ежедневных контактов каждого отдельного человека зависит от множества факторов, таких как особенность местности, место работы, способ передвижения, время, необходимое для передвижения на общественном транспорте, возраст, уровень социальной активности. По этой причине количество параметров человека является случайной величиной, сложно поддающейся прогнозированию. Поэтому данный параметр для проведения эффективного моделирования стоит выбирать, основываясь сугубо на статистике.

Различные научные исследования, и в частности, исследование, проведенное в работе “Проектирование матриц социальных контактов в 152 странах с использованием обследований контактов и демографических данных”, позволяют сделать вывод о том, что в странах Восточной Европы среднестатистический гражданин в течение суток совершает в среднем от 10 до 15 контактов [4]. Таким образом, разработанная в настоящей работе имитационная модель опирается на вышеуказанное значение количества контактов между людьми в течение суток.

На данный момент, после годичного пребывания планеты в состоянии пандемии коронавирусной инфекции, учеными различных стран на основе анализа появившейся статистики написано множество научных трудов. Так, изучение таких научных статей, как “Quantifying SARS-CoV-2 transmission suggests epidemic control with digital contact tracing” [5] и “Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission” [6], позволило сделать вывод о

приблизительных значениях вероятностей в зависимости от ношения медицинских средств индивидуальной защиты:

- вероятность передачи заболевания от больного человека при условии, что один из двух человек носит маску и перчатки составляет 3%;
- вероятность заражения больным человеком здорового при условии ношения обоими индивидуальных средств защиты равна 1.5%;
- при условии, что оба контактирующих человека не носят индивидуальные средства защиты, вероятность передачи вируса равна 4%.

Помимо рассмотренных параметров необходимо корректно смоделировать местность. Так, в рамках настоящего исследования принято решение о выборе таких параметров, которые позволят соответствовать реальному населенному пункту с численностью населения, равной 10000 человек. Так, для среднестатистического российского города с таким населением смоделировано следующее количество транспортных средств и рабочих мест:

- количество закрытых помещений на рабочих местах, в которых может произойти передача вируса при непосредственном контакте, равняется 8000;
- количество закрытых помещений, представленных транспортными средствами, составляет 5500;
- количество мест пересечения граждан в продуктовых магазинах равно 800;
- развлекательные места представляют 530 мест возможных контактов между гражданами.

Программная реализация модели позволяет без особого труда изменять данные параметры, что дает возможность проводить различные эксперименты.

Мультиагентный подход при разработке модели

Разработанная модель позволяет проводить эксперименты, в ходе которых будет тем или иным образом оцениваться количество больных и здоровых людей, а также людей, находящихся в больницах в каждый из моментов времени. Проблема заключается в том, что данные значения сложно прогнозировать ввиду множества влияющих факторов.

Разрабатываемая имитационная модель является стохастической, так как реальная система работает в стохастических условиях. Так, например, время пребывания человека в той или иной локации обладает вероятностным характером.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данный процесс включает в себя множество независимых процессов со случайным временным интервалом выполнения. Для моделирования систем, обладающих подобными признаками, целесообразно использовать мультиагентный подход.

Агентное моделирование предлагает разработчику модели особый взгляд на поведение системы. Так, разработчик модели может не обладать исчерпывающей информацией о поведении системы в целом, о ее переменных и зависимостях между ними, также он может не понимать полной схемы процессов, ему важно лишь знать, как ведут себя отдельные элементы в системе. При выборе данного подхода разработку модели можно начинать с идентификации моделируемых объектов (агентов) и задания их поведения [7,8].

При агентном моделировании зачастую может возникнуть ситуация необходимости объединения агентов в сеть и предоставления им возможности взаимодействия друг с другом. Либо же бывает необходимо поместить агентов в среду, которая имеет свою собственную динамику. Таким образом, глобальное поведение системы определяется с помощью десятков (тысяч, миллионов) параллельно протекающих процессов.

В конкретном случае исследуемой в рамках текущей работы системы агентами являются жители моделируемого населенного пункта. Каждый из жителей может действовать исходя из ситуации, в которой он находится. Спрогнозировать состояние системы, а именно состояние каждого из 10000 жителей в любой из моментов времени, представляется весьма сложной задачей.

Для использования агентного подхода при решении текущей задачи необходимо определить возможное поведение каждого из жителей в любой момент времени [9]. При выбранном методе создания имитационной модели алгоритм модели определяется не диаграммами процесса, а формируется из поведения отдельных агентов. Так, одна из возможных диаграмм типовых активностей рабочего дня агента, соответствующего жителю населенного пункта, представлена на рисунке 2. Аналогично в системе реализуются и другие типы поведения для разных категорий агентов.

Рис. 2. Диаграмма активностей агента типа Citizen

По данной диаграмме видно, что каждый житель в течение суток выполняет вполне стандартный и прогнозируемый набор действий. Сложность прогнозирования заключается в том, что продолжительность каждой активности различается от человека к человеку и носит случайный характер. Также стоит обратить внимание на то, что в моделируемом городе существует большое множество различных мест работы, мест общепита, кинотеатров, продуктовых магазинов, единиц общественного транспорта разного типа. Все эти помещения являются потенциальным местом передачи вируса от человека к человеку. Также стоит обратить внимание на то, что в модели существует как минимум два типа людей – отличие между ними заключается в том, что одна группа людей по причине возраста или иных обстоятельств не ходит на работу.

На представленной диаграмме несколько раз использовался процесс “Перемещение по городу”. Алгоритм данного процесса представлен на рисунке 3. Так, некоторые жители города могут перемещаться по городу без использования общественного транспорта – пешком либо на собственном транспортном средстве.

Рис. 3. Процесс "Перемещение по городу"

Непосредственно факт передачи вируса между людьми отображается в алгоритме модели, представленной на рисунке 2, с помощью подпроцесса "Вероятность заболевания вирусом либо его передачи здоровым людям". Алгоритм данного процесса зависит от параметров, выбранных исследователем при настройке модели. Описание процесса с использованием параметров, применимых к настоящему исследованию, представлено на рисунке 4.

Помимо этого, выполнение некоторых активностей, например, посещение развлекательных мест и продуктовых магазинов, не является обязательным и может не выполняться определенным человеком каждый день.

Программная реализация имитационной модели

Подводя итог к сказанному выше, можно сделать вывод о том, что для успешного решения задач исследования методов борьбы с вирусными эпидемиями, такими как коронавирусная инфекция, необходимо разработать имитационную модель соответствующего процесса. Вычислив параметры модели, соответствующие реальному поведению граждан в населенном пункте с населением размером в 10000 человек, исследователь получит возможность сделать обоснованный вывод по проведенному исследованию.

Разработка программной реализации модели велась путем создания новой программы с использованием системного каркаса для моделирования

поведения агентов. Такое решение обусловлено желанием обеспечить открытость программного кода, следствием чего является отсутствие ограничений на внесение изменений в работу, а также развитие программного продукта.

В качестве языка разработки для реализации соответствующей имитационной модели выбран динамично развивающийся на сегодняшний день язык программирования высокого уровня Python.

К преимуществам данного языка можно отнести высокую скорость разработки, небольшой объем программ и большое количество разработанных библиотек, что, несомненно, делает его одним из лучших инструментов для разработки демонстрационных программ [10].

Также Python является объектно-ориентированным языком программирования, что является наиболее подходящей методологией для разработки имитационной модели реальной системы посредством представления программы в виде совокупности объектов, каждый из которых является экземпляром определённого класса, а классы образуют иерархию наследования.

Так, в программе используются основные принципы объектно-ориентированного программирования, а именно инкапсуляция, абстракция, наследование и полиморфизм, что существенно упрощает ее понимание и возможности внесения дальнейших изменений.

Рассмотренные ранее агенты имитационной модели в программе представлены в качестве класса Citizen. Также помимо этого в программе созданы классы, соответствующие каждому из типов помещений и унаследованные от родительского класса Building – Work, Shop, PublicTransport, FunPlaces [11]. Экземпляры данных классов нужны для того, чтобы вести учет количества людей (здоровых и больных), находящихся в помещении в данный момент времени. Ведение такого рода статистики требуется для осуществления алгоритма передачи вируса между людьми, реализованного в программе – если в момент прибытия в помещение человека в здании или общественном транспорте находится четыре и более человек, он контактирует с четырьмя случайно выбранными людьми. В обратном случае, когда в помещении находится менее четырех людей, прибывший человек контактирует со всеми из них. В ходе данных контактов, с учетом ранее описанных вероятностей определяется, происходит передача вируса или нет. Алгоритм процесса передачи вируса между людьми представлен на рисунке 4.

Рис. 4. Процесс "Вероятность заболевания вирусом либо его передачи здоровым людям"

Благодаря данному подходу становится возможным настраивать модель под нужды конкретного исследования, изменяя параметры моделируемого населенного пункта, а также методов борьбы с распространением вируса.

Как упоминалось ранее, язык программирования Python обладает большим количеством качественных библиотек. Так, задачу разработки и запуска различных видов имитационных моделей успешно решает библиотека SimPy.

SimPy – это платформа моделирования дискретных событий на основе процессов, основанная на стандартном Python. Процессы в SimPy определяются функциями генератора Python. Процессы используются для моделирования

активных компонентов, которые могут взаимодействовать друг с другом, к ним можно отнести, например, клиентов, транспортные средства и агентов.

Моделирование с помощью данной библиотеки подразумевает использование бесконечного цикла событий для каждого из объектов. Таким образом, для каждого из агентов модели в течение всего времени работы программы происходит вызов его методов. Однако при разработке модели распространения коронавирусной инфекции пришлось отойти от этого стандарта. Причиной такому решению послужило очень долгое выполнение модуляции, причем длительность выполнения каждого последующего дня при таком подходе значительно увеличивалась. На продолжительность выполнения модели влияет то, что в ней имеется 10000 агентов, каждый из которых в каждый момент времени совершает действия и влияет на окружающие объекты. Также в моделируемом городе находятся тысячи помещений и локаций, которые всегда ведут статистику относительно людей, как больных, так и здоровых.

По причинам, описанным выше, было принято решение отказаться от идеи использования бесконечного цикла событий для каждого из агентов – вместо этого модель запускается и работает ровно одни сутки, результат такого короткого моделирования сохраняется во внешнем файле. Таким образом, модель запускается с помощью цикла столько модулируемых дней, сколько требуется исследователю. Пример отдельного моделирования каждого из дней показан на листинге 1.

Листинг 1

```
for day in range(1, SIMULATING_DAYS):
    count_days = day
    env = simpy.rt.RealtimeEnvironment(initial_time=0,
factor=0.001, strict=False)

    city_humans = [Citizen(number=i,
work_type=random.choice(city_works_string), env=env) for i in
                    range(TOTAL_NUMBER_OF_CITIZENS)]
    if statistics_of_humans == {}:
        for _ in range(NUMBER_OF_INFECTED_PEOPLE):
            random_person = random.choice(city_humans)
            random_person.health_status = "infected"
            random_person.days_before_moving_to_hospital =
random.randint(DAYS_BEFORE_HOSPITALIZATION[0],
DAYS_BEFORE_HOSPITALIZATION[1])
        else:
            for human in city_humans:
                human.health_status =
statistics_of_humans[str(human.number)]["health_status"]
                human.antibodies =
statistics_of_humans[str(human.number)]["antibodies"]
```

```

        human.in_hospital =
statistics_of_humans[str(human.number)]["in_hospital"]
...

    for human in city_humans:
        env.process(human.run())

    env.process(calendar(env))
    env.run(until=30)
...

```

При этом в данном листинге стоит обратить внимание на то, что для объединения всех объектов модели и предоставления им возможности влиять друг на друга создается единое окружение. Так, создается среда `env = simpy.rt.RealtimeEnvironment(initial_time=0, factor=0.001, strict=False)`. Далее каждый процесс либо агент модели запускается с помощью данной среды. В данном случае таким образом вызываются методы агентов класса `Citizen` - `for human in city_humans: env.process(human.run())`. Помимо этого, через единую среду вызывается функция `calendar()`, которая является своеобразным счетчиком времени в сутках - `env.process(calendar(env))`.

Как упоминалось выше, в классе, моделирующем поведение агента, соответствующее поведению среднестатистического городского гражданина, помимо прочего, используется метод `run()`, который содержит в себе вызов с помощью предоставляемого библиотекой `SimPy` генератора `yield` методов, отображающих активности человека. Код данного метода изображен на листинге 2.

Листинг 2

```

def run(self):
    global current_time
    if self.in_hospital is not True:
        if not self.sleep_now:
            if not self.activity_for_day["sleep"]:
                yield self.env.process(self.go_to_sleep())
            if not self.activity_for_day["road_to_work"]:
                yield
self.env.process(self.use_public_transport())
        self.activity_for_day["road_to_work"] = True
        if not self.activity_for_day["work"]:
            yield self.env.process(self.going_to_work())
        if not self.activity_for_day["road_from_work"]:
            yield
self.env.process(self.use_public_transport())
        self.activity_for_day["road_from_work"] = True

        yield self.env.process(self.go_to_fun_places())
        if random.randint(1, 2) == 1:
            yield self.env.process(self.go_to_shop())

```

```

        yield
self.env.process(self.use_public_transport())
        self.activity_for_day["road_to_home"] = True
        if self.activity_for_day["road_to_home"]:
            for activity in self.activity_for_day:
                self.activity_for_day[str(activity)] =
False

        yield self.env.timeout(0.0001) # In order to be able to
call as a generator

```

Также достоинством данной реализации является то, что входные параметры для модели задаются не вручную, а с помощью чтения (десериализации) заранее подготовленного файла формата json. Данный факт позволяет разработанной модели быть более гибкой по отношению к внесению будущих изменений и проведению различного вида экспериментов. Более того, так как json является форматом данных, используемых в популярном в настоящее время архитектурном стиле передачи информации между удалёнными устройствами в сети REST API, разработанную модель стало возможным реализовать в виде веб-сервиса, опубликованного на ресурсе <https://ws-dss.com/>. Такой формат предоставляет пользователю возможность использования удобного интерфейса для настраивания входных параметров модели, а также делает возможным одновременный запуск нескольких экземпляров модели с разных точек планеты [12].

Результаты моделирования

Для проведения экспериментов разработана программа, моделирующая поведение 10000 человек в условном населенном пункте, обладающем городской инфраструктурой. Как упоминалось ранее, каждый из жителей в течение дня совершает определенные действия, посещает различные помещения, тем самым контактируя с другими жителями. Продолжительность нахождения человека в определенной локации является случайной величиной, значение которой принадлежит определенному интервалу.

С помощью модели, параметры которой были заданы ранее, проведено исследование относительно распространения вируса в городе в течение 365 дней. В первый день в населенном пункте находится всего 5 зараженных вирусом человек, больницы также не содержат больных.

Проведенное исследование позволило получить несколько важных значений:

- Гистограмма распределения количества больных;
- Сравнительные графики кривых распределения количества больных, здоровых, а также находящихся в больнице людей в каждый из рассматриваемых дней.

Большой проблемой при борьбе с последствиями пандемии является то, что система здравоохранения не обладает достаточными ресурсами для

оказания качественной медицинской помощи и предоставления достаточного количества свободных коек в больницах для пациентов, которым требуется госпитализация. С помощью данной модели можно рассчитывать наиболее вероятное количество больных. Так, с помощью гистограммы, представленной на рисунке 5, можно определить значение данного параметра. Гистограмма частотного распределения позволяет сделать вывод о том, как часто какое-либо значение встречается среди большого массива чисел.

В данном случае при выбранных ранее параметрах модели была решена задача нахождения наиболее вероятного количества больных, здоровых и находящихся в больницах людей спустя два месяца с момента наблюдения за ситуацией в городе. Для этого модель запускалась 100 раз и в каждой из модуляций фиксировались данные значения на шестидесятый день наблюдений. На рисунках 5, 6 и 7 в виде гистограмм представлены результаты данного моделирования.

Рис. 5. Гистограмма распределения количества больных людей

Данная гистограмма позволяет сделать вывод о том, что к шестидесятому дню наблюдений количество зараженных и не помещенных в больницу людей соответствует числу, принадлежащему диапазону от 1500 до 2000 человек. Эта категория людей чрезвычайно важна ввиду того, что человек, относящийся к ней, уже является переносчиком вируса, но еще не помещен на карантин и лечение в больницу.

Рис. 6. Гистограмма распределения количества людей, находящихся в больнице

Благодаря данной гистограмме становится возможным рассчитывать необходимое количество коек и медицинского персонала. Так, к шестидесятому дню наблюдений наиболее вероятно, что количество людей, которые находятся в карантине в больнице, равняется числу от 4500 до 6000 человек.

Рис. 7. Гистограмма распределения количества здоровых людей

Гистограмма, представленная на рисунке 7, также представляет определенный интерес – благодаря ней становится понятным число людей, еще никаким образом не контактирующих с вирусом.

Исходя из цифр, полученных с помощью гистограмм, можно прогнозировать необходимое количество как людских, так и материальных ресурсов системы здравоохранения для успешной борьбы с последствиями распространения коронавирусной инфекции.

Не менее важным результатом проведенного моделирования являются графики, соответствующие количеству здоровых, больных и находящихся в больнице людей в каждый из рассматриваемых дней. Данный график представлен на рисунке 8.

Рис. 8. Распространение COVID-19

Данный график наглядно показывает, что распространение коронавирусной инфекции происходит волнами, с утихающей амплитудой – за всплеском заболеваемости следует небольшой период снижения распространения вируса, после чего наблюдается очередной рост прироста больных.

Заключение

Разработана мультиагентная модель распространения коронавирусной инфекции, которая позволяет оперативно вносить изменения в алгоритмы своей работы, а также с помощью удобного интерфейса, представленного на сайте https://ws-dss.com/persons/74/test_output?locale=ru, любой желающий может с помощью программы проводить исследования, подставляя необходимые ему параметры.

Также проведено исследование распространения коронавируса в населённом пункте с численностью 10000 человек и изначальным количеством больных людей, равным 5. Данное исследование показало пригодность модели для решения задач прогнозирования необходимой городской инфраструктуры и медицинских ресурсов для успешной борьбы с пандемией.

Библиографический список

1. Чжао Жун, Сюй Фэнцай Преимущества китайской модели: опыт Китая в борьбе с коронавирусом в русской прессе // Мир русскоговорящих

стран. — 2021. — № 1 (7). — С. 17-32. — DOI 10.20323/2658-7866-2021-1-7-17-32.

2. Тадтаев Г. Голикова анонсировала выделение 30 млрд руб. на «санитарный щит» России [Электронный ресурс] / Г. Тадтаев // РБК "РосБизнесКонсалтинг" - информационное агентство. — 2021. — <https://www.rbc.ru/economics/19/07/2021/60f58d8e9a79479b9181263c>.

3. Романов Б.К. Коронавирусная инфекция COVID-2019. Безопасность и риск фармакотерапии. — 2020. — 8(1). С.3–8. — <https://doi.org/10.30895/2312-7821-2020-8-1-3-8>.

4. Prem K. Projecting social contact matrices in 152 countries using contact surveys and demographic data / K. Prem, A. Cook, M. Jit // PLOS COMPUTATIONAL BIOLOGY. — 2017. — С.1-10. — <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1005697#pcbi.1005697.s001>.

5. Ferretti, L. (n.d.). Quantifying SARS-CoV-2 transmission suggests epidemic control. Science. — 2021. — <https://science.sciencemag.org/content/368/6491/eabb6936>.

6. Yafang Cheng, Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission Science. — 2021. — <https://science.sciencemag.org/content/372/6549/1439>.

7. Osipov V., Posadskii A. and Sivakova T. Methods of rational decision making in multi-agent systems for evaluating the effectiveness of innovations // AIP Conference Proceedings 2181, 020031.

8. 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.

9. 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>.

10. 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.

11. Мартин Р. Чистый код: создание, анализ и рефакторинг – СПб.: Питер СПб. — 2018. — 464 с.

12. Судаков В.А., Нестеров В.А., Куренных А.Е. Подходы к интеграции систем поддержки принятия решений с имитационными моделями в авиационно-космической отрасли // В сборнике: Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2017. Труды десятой международной конференции в двух томах. Под общей редакцией Васильева С.Н., Цвиркуна А.Д. — 2017. — С. 81-88.

Оглавление

Введение	3
Распространение коронавирусной инфекции COVID-19.....	3
Мультиагентный подход при разработке модели	6
Программная реализация имитационной модели	9
Результаты моделирования	14
Заключение.....	18
Библиографический список.....	18