

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3

УДК 614.4:519.876.5:004.942:332.144, ББК 51.9:32.972:60.8

© Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф.

## Моделирование эпидемии COVID-19 – преимущества агент-ориентированного подхода

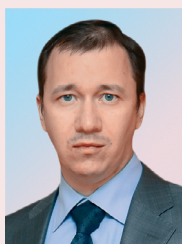


**Валерий Леонидович  
МАКАРОВ**

Центральный экономико-математический институт Российской академии наук  
Москва, Российская Федерация, 117418, Нахимовский пр., д. 47

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0002-2802-2100; ResearcherID: I-9022-2016



**Альберт Рауфович  
БАХТИЗИН**

Центральный экономико-математический институт Российской академии наук  
Москва, Российская Федерация, 117418, Нахимовский пр., д. 47

E-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9649-0168; ResearcherID: S-6203-2016



**Елена Давидовна  
СУШКО**

Центральный экономико-математический институт Российской академии наук  
Москва, Российская Федерация, 117418, Нахимовский пр., д. 47

E-mail: sushko\_e@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3565-5210; ResearcherID: E-4911-2015



**Алина Фагимовна  
АГЕЕВА**

Центральный экономико-математический институт Российской академии наук  
Москва, Российская Федерация, 117418, Нахимовский пр., д. 47

E-mail: ageevaalina@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4902-1489; ResearcherID: S-6016-2017

**Для цитирования:** Моделирование эпидемии COVID-19 – преимущества агент-ориентированного подхода / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко, А.Ф. Агеева // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. Т. 13. № 4. С. 58–73. DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3

**For citation:** Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Ageeva A.F. COVID-19 epidemic modeling – advantages of an agent-based approach. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 58–73. DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3

**Аннотация.** В статье представлен авторский подход к созданию модельного инструмента прогнозирования эпидемиологической динамики в зависимости от карантинных мер с оценкой пиковых нагрузок на систему здравоохранения. В качестве такого инструмента предложена агент-ориентированная модель, в которой агенты-люди проходят стадии заболевания от инфицирования до выздоровления или смерти. Отличие агент-ориентированной эпидемиологической модели от классической заключается в том, что эти переходы моделируются не на групповом, а на индивидуальном уровне, что позволяет учесть неоднородность населения по характеристикам, связанным с чувствительностью людей к инфекции и с их участием в распространении заболевания. Так, вероятность тяжелых осложнений заболевания у агентов зависит от индивидуального базового уровня здоровья, а распространение инфекции имитируется с учетом социальных (родственных) связей. Новизна представленной агент-ориентированной модели эпидемий заключается в использовании механизма формирования семей, что делает имитацию контактов на уровне отдельного агента максимально приближенной к реальности. Модель апробирована на примере эпидемии COVID-19 в г. Москве. Для правдоподобной имитации заболевания агентов использовались эпидемиологические характеристики COVID-19, заданные экспертами-практиками, занимающимися обследованием и лечением больных. С помощью компьютерных симуляций получены оценки хода эпидемии при различных значениях параметров модели, включая влияние карантинных мер на такие характеристики, как численность инфицированных и умерших за весь период эпидемии; дата наступления пика заражения и его размах; пиковая потребность в койко-местах, в том числе реанимационных. Используемые социально-демографическая структура населения и эпидемиологические характеристики конкретной инфекции являются параметрами модели, что позволяет произвести ее настройку на особенности других регионов и инфекций для ее дальнейшего практического использования как инструмента поддержки управленческих решений в региональных и отраслевых ситуационных центрах. Для этого планируется развитие суперкомпьютерного варианта модели.

**Ключевые слова:** моделирование эпидемий, агент-ориентированные модели, компьютерное моделирование, вычислительные эксперименты на моделях социальных процессов, информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений.

### Введение

В системе принятия важных управленческих решений необходимо использовать специально разработанное программное обеспечение, позволяющее моделировать реальную социально-экономическую ситуацию, прогнозировать ее развитие и предварительно оценивать последствия тех или иных планируемых мер. Решения, которые приходится оперативно принимать руководителям разного уровня в условиях пандемии COVID-19, беспрецедентны, что делает наличие подобного модельного инструментария еще более актуальным, так как позволяет накапливать и анализировать «виртуальный» опыт эффективных и неэффективных решений, полученный в ходе модельных (компьютерных) экспериментов. Такой опыт в дальнейшем может быть использован при наступлении аналогичных ситуаций, то есть он поможет оперативно принимать более подготовленные

решения в случае наступления новой эпидемии, вызванной аналогичной или какой-либо иной инфекцией.

Распространение эпидемий – это хорошо изученный и хорошо формализуемый процесс, что обеспечивает возможность его моделирования. Основной моделью эпидемий является модель, разработанная Андерсоном Г. Маккендриком и Уильямом О. Кермаком. Она описывает распространение инфекции, передающейся от человека к человеку [1]. Все население, согласно их концепции, делится на группы в зависимости от статуса по отношению к рассматриваемой инфекции. В базовой модели SIR такими группами выступают: S – Susceptible (восприимчивые, то есть те, кто не имеет иммунитета и может быть инфицирован), I – Infectious (инфицированные и заразные), R – Recovered (выздоровевшие и приобретшие

иммунитет), что соответствует основным стадиям заболевания. Со временем по мере распространения инфекции статус отдельных людей может меняться, что означает переход их в другую группу. Последовательность букв в аббревиатуре SIR означает последовательность перехода людей из одной группы в другую. Базовая модель SIR со временем усложнялась, в нее привносились новые стадии заболевания (и соответствующие группы населения), которые позволяли более детально учитывать особенности распространения различных видов инфекций. Появились такие модификации модели SIR, как SIS – для инфекций, при которых не образуется стойкий иммунитет (например, сезонный грипп); SEIR – для инфекций с инкубационным периодом (к которым относится и вирус COVID-19) и другие. Кроме того, для всех этих модификаций базовой модели есть варианты с добавлением в конце D – стадии смерти для отдельного учета динамики умерших.

На основе моделей класса SIR развилось целое направление моделирования эпидемий, имеющее опыт удачных практических разработок с использованием различных технологических подходов.

Традиционно для описания динамики развития эпидемии использовались дифференциальные уравнения, для которых подбирались коэффициенты, характеризующие как саму инфекцию – контагиозность, длительность инкубационного периода, летальность и др., так и конкретные условия ее распространения – численность населения, первоначальное число зараженных, наличие/отсутствие иммунитета у части населения и др. Важно то, что использование дифференциальных уравнений подразумевает однородность населения с точки зрения его участия в процессах распространения эпидемии. Поэтому, для того чтобы учесть существующую в действительности неоднородность, добросовестные исследователи делят население на группы (например, по возрастным категориям) и/или подбирают показатели, характеризующие, например, долю заразных людей среди инфицированных или же точку начала эпидемии, добиваясь совпадения результатов расчетов по модели с наблюдаемыми реальными данными. И только затем переходят к прогнозным расчетам. Хорошим примером подобного

исследования служит работа М.В. Тамма<sup>1</sup>, использовавшего для расчетов модель COVID-19 Scenarios<sup>2</sup> [2], созданную под руководством Рихарда Нейера. Она показательна и в другом отношении – автор подчеркивает то, что данные о выявленных инфицированных не отражают истинную картину распространения инфекции, и предлагает свой способ решения этой проблемы.

Возможен и другой подход к реализации модели эпидемий – моделирование с точки зрения отдельного человека, который подвержен инфекции и может переходить от одной стадии заболевания к другой с вероятностью, зависящей от многих факторов. Наиболее гибким методом, реализующим моделирование на уровне отдельных людей, является особый вид имитационного моделирования – агент-ориентированное. В агент-ориентированной модели (АОМ) имитируется поведение отдельных агентов, способных действовать самостоятельно в соответствии со своими интересами и/или под влиянием внешней среды, в том числе под влиянием других агентов. С точки зрения задачи моделирования эпидемий, для решения которой в последние годы все чаще применяется агент-ориентированный подход, его основными преимуществами являются:

- отказ от требования знаний о взаимозависимостях различных глобальных характеристик, так как в случае агент-ориентированной модели изменение состояний социума в целом (искусственного общества) получается в результате агрегирования изменений состояния отдельных его членов (агентов). Как следствие – возможность при моделировании опираться на более достоверную информацию о процессах на микроуровне, то есть описывать условия перехода агентов из одной стадии заболевания в другую, опираясь на опыт экспертов-практиков, занимающихся обследованием и лечением больных;

<sup>1</sup> Тамм М.В. Коронавирусная инфекция в Москве: прогнозы и сценарии // Meduza. URL: <https://meduza.io/feature/2020/03/30/v-moskve-vveli-zhestkie-karantinnymery-pohozhe-eto-pravilno-matematicheskaya-model-pokazyvaet-chto-inache-mogli-by-pogibnut-bolshe-100-tysyach-chelovek> (дата обращения 30.05.2020).

<sup>2</sup> Интерактивный вариант модели доступен для проведения экспериментов на ресурсе: COVID-19 Scenarios. Available at: <https://covid19-scenarios.org/>

- возможность воспроизвести на популяции агентов наблюдаемую в действительности структуру населения по тем характеристикам, которые связаны с его чувствительностью к инфекции, а также с участием в распространении заболевания, то есть естественным образом учесть неоднородность населения и создать наиболее реалистичную имитацию эпидемии.

В последнее время появилось настолько много исследований, посвященных АОМ эпидемий, что это привело даже к возникновению работ, предлагающих систему классификации. Например, выделяются четыре основные группы компонентов эпидемиологических АОМ: особенности заболевания и его распространения; воссоздание характеристик общества; имитирование повседневных перемещений населения либо социальных контактов; характеристики местности и природной среды (климатические и т. п.) [3]. Все модели авторы условно разделяют на те, в которых изучаются характер и динамика распространения эпидемии с целью прогнозирования эпидемиологической ситуации, и те, которые разработаны для тестирования мероприятий по борьбе с эпидемиями. В отдельную группу выделяются те модели, в которых оценивается рентабельность противоэпидемических мероприятий, например вакцинации.

Представим несколько примеров удачных эпидемиологических АОМ, основанных на переходе агентов из одной стадии заболевания, соответствующей схеме модели SEIR, в другую. Имитация распространения инфекции осуществляется на основе социальных взаимодействий отдельных агентов. Модели используют геоинформационные системы (ГИС), позволяющие визуализировать на карте распространение эпидемий, получаемое в результате моделирования. Это следующие работы:

- модель распространения вспышки кори в Бернаби (Канада) [4], предназначенная для изучения пространственной диффузии инфекционных заболеваний в городской среде через сеть человеческих контактов;

- модель вспышки гриппа H1N1 в 2009 году в Мексике [5], предназначенная для оценки воздействий правительственных мер по ограничению мобильности граждан с помощью официальных пропусков;

- модель пандемии в районе Большого Торонто в Онтарио (Канада) [6], в которой учитываются индивидуальные уровни подверженности агентов заражению и их способности передачи заболевания, соотнесенные с реальными демографическими данными и поведением населения. Используется Агентством Онтарио по охране и укреплению здоровья как инструмент для определения стратегии смягчения последствий пандемии.

Классическим примером очень большой АОМ, создававшейся для решения прикладной задачи, может служить полномасштабная распределенная агентная модель эпидемий Джошуа Эпштейна [7]. Первоначально она включала 300 млн агентов, перемещавшихся по карте США в соответствии с матрицей корреспонденций размерностью 4000×4000, затем была расширена до 6,5 млрд агентов для имитации последствий распространения вируса гриппа А (H1N1/09) в масштабах всей планеты.

Есть и работы, в которых используются разные подходы. Так, на примере моделей распространения гриппа проводится сравнение двух вариантов имитационного моделирования — системно-динамического и агент-ориентированного [8]; сравниваются результаты, полученные при помощи стохастической АОМ и структурированной метапопуляционной стохастической модели для моделирования базового сценария пандемии в Италии [9]. На популяции агентов в АОМ подробно воспроизводится социально-демографическая структура населения Италии. При построении глобальной модели метапопуляции использовались данные переписей по всему миру, а также данные о потоках путешествий авиакомпаний с диаграммами мобильности людей. Обе модели синхронизировались в своих начальных условиях, включающих параметры заболевания и объема импорта зараженных из международных поездок.

Отдельно стоит остановиться на моделях, разработанных именно для актуальной ныне пандемии COVID-19. Во-первых, следует отметить классический пример использования модели класса SEIR [10] для имитации и анализа вспышки COVID-19 в г. Ухане с учетом индивидуальной поведенческой реакции людей и действий правительства (продление праздника,

ограничение на поездки, развертывание госпиталей и карантин). В работе проводится сравнение с пандемией гриппа в Лондоне в 1918 году.

В целом исследований, посвященных пандемии COVID-19, уже накопилось очень много. Достаточно указать на портал MedRxiv. The Preprint Server for Health Science<sup>3</sup>, посвященный изучению самых разнообразных аспектов пандемии коронавируса SARS-CoV-2, на котором размещены почти четыре с половиной тысячи научных препринтов, причем большая их часть содержит разного рода эпидемиологические модели. Здесь представлены самые разнообразные подходы, например:

*Эконометрическая модель* [11], в которой оцениваются параметры временных рядов данных о смертности от COVID-19 для таких стран, как Южная Корея, Италия, Испания, Франция, Великобритания, Германия, США.

*Глобальная макроэкономическая модель Global VAR (GVAR)* [12], рассматривающая социальные взаимодействия людей разных стран (использовались данные сети Facebook) и влияние этих взаимодействий на оценку рисков, связанных с эпидемией COVID-19. Отношение к рискам служит основой поведения людей в ситуации эпидемии, соблюдения/несоблюдения ими социального дистанцирования (использовались агрегированные показатели отслеживания мобильности, полученные из Google Mobility Reports). В модели также отслеживается влияние эпидемии на такие важные компоненты экономики, как рынок труда и безработица.

*Модели класса SIR.* Модель [13], в которой население Греции поделено на две группы – моложе и старше 40 лет. Исследовано, как ослабление мер изоляции отдельно для той или иной группы влияет на общие показатели смертности. Модель [14], эксперименты с которой проводились на данных девяти европейских стран, что позволило выявить пандемические характеристики, являющиеся инвариантными в разных странах. Было обнаружено также небольшое влияние средней температуры в стране на вероятность инфекции в каждом контакте, причем более высокие температуры связаны с более низкой инфекционностью.

<sup>3</sup> MedRxiv. The Preprint Server for Health Science. Available at: <https://connect.medrxiv.org/relate/content/181>

*Агентная модель* [15] для оценки влияния социального дистанцирования на смягчение эпидемиологической ситуации.

Но наибольший интерес для авторов представляли примеры моделей эпидемий, в которых: а) используется дифференциация населения по восприимчивости к инфекции; б) в явном виде учитываются характеристики самой инфекции; в) обеспечена возможность оценки влияния эпидемии на систему здравоохранения; г) интерфейс позволяет апробировать различные меры противодействия распространению эпидемии, поскольку именно эти компоненты авторы считают ключевыми для создания адекватной имитации эпидемии с возможностью ее дальнейшего практического использования как инструмента поддержки управленческих решений. С этой точки зрения наиболее важными для нас явились следующие работы:

- комбинированная модель распространения холеры [16], использующая дифференциальные уравнения, в которых детально учитываются эпидемиологические характеристики этого заболевания, а также механизм клеточных автоматов для имитации способности людей (агентов) перемещаться;

- модель Рихарда Нейера COVID-19 Scenarios<sup>4</sup>, основанная на использовании дифференциальных уравнений, но при этом позволяющая дифференцировать группы населения по восприимчивости к инфекции и по интенсивности социальных контактов в зависимости от возраста, варьировать характеристики самой инфекции. Модель настроена на оценку потребностей в госпитализации, в том числе в реанимации;

- АОМ, разработанная американскими и индийскими учеными [17], в которой учитывается дифференциация населения по уровню здоровья, экономическому положению и доступу к медицинской помощи, причем используются данные о фактической распространенности серьезных хронических заболеваний среди населения разных возрастных когорт. Модель предназначена для оценки различных стратегий вакцинации населения с точки зрения достигаемого снижения заболеваемости, а также

<sup>4</sup> COVID-19 Scenarios. Available at: <https://covid19-scenarios.org/>

финансового бремени понесенных затрат. Эффективность затрат оценивается их соотношением со стоимостью инвалидности, которую удалось предотвратить;

- АОМ пандемического гриппа H1N1 в Египте [18], разработанная египетскими учеными. Агенты в модели дифференцируются по возрасту и социальным ролям (в том числе внутрисемейным), на основе чего имитируется их взаимодействие и инфицирование. Заданы параметры, характеризующие саму инфекцию. Кроме того, модель позволяет оценивать результативность различных мер борьбы с распространением эпидемии.

Наша цель — разработка АОМ как инструмента прогнозирования эпидемиологической динамики в зависимости от карантинных мер с оценкой пиковых нагрузок на систему здравоохранения на основе правдоподобной имитации процессов инфицирования отдельных людей и прохождения ими стадий заболевания COVID-19.

#### **АОМ эпидемии COVID-19 в городе Москве Постановка задачи**

Сама инфекция COVID-19 является новой и недостаточно изученной, поэтому информация о ее эпидемиологических характеристиках, об особенностях заражения, длительности различных периодов и др. с начала эпидемии поступала во многом противоречивая. К настоящему времени с уверенностью можно сказать следующее:

- инфекция новая, иммунитета к ней ни у кого нет;
- инфекция передается от человека к человеку, огромную роль играют личные контакты инфицированных;
- с момента инфицирования человека и до его заболевания наблюдается достаточно длительный инкубационный период, проходящий незаметно как для самого человека, так и для окружающих;
- человек, находящийся в инкубационном периоде, является источником инфекции при личном контакте, то есть латентный период практически совпадает с инкубационным (эта информация пока не уточнена, практически мы ориентировались на разницу в один день, характерную для гриппа);
- у большей части заболевших болезнь может протекать бессимптомно или же в легкой

форме, но при этом они также являются источниками инфекции при личном контакте;

- болезнь может протекать крайне тяжело, давать осложнения, вследствие которых возникает критическое состояние, требует длительного лечения в отделениях интенсивной терапии и даже приводить к летальному исходу;

- базовый уровень здоровья человека (наличие или отсутствие у него серьезных хронических заболеваний) играет существенную роль в том, как будет протекать болезнь и к какому исходу она приведет. В связи с тем, что среди людей старшего возраста значительно больше доля людей, страдающих хроническими заболеваниями, риск развития осложнений для них также значительно выше.

С учетом этих особенностей COVID-19 за основу была выбрана модификация модели распространения эпидемий SEIRD и для агентов-людей в создаваемой АОМ предусмотрены переходы между соответствующими состояниями.

При создании реалистичных АОМ, результаты работы которых можно было бы использовать в качестве оценки развития процессов, происходящих в реальной жизни, необходимо, как минимум, обеспечить два условия: во-первых, максимально точно воспроизвести структуру моделируемой системы в выбранный начальный момент времени; во-вторых, добиться максимально точной имитации действий агентов, участвующих в моделируемых процессах. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность менять характеристики среды, влияющие на поведение агентов. Обычно подобные характеристики вводят в АОМ в качестве параметров, которые можно будет изменять в ходе компьютерных экспериментов. Именно такой подход позволяет имитировать различные сценарии развития процессов и/или воздействие предпринимаемых управленческих мер, чтобы оценивать их последствия.

Здесь важно подчеркнуть, что структура популяции агентов должна воспроизводить дифференциацию реального сообщества по характеристикам, существенным образом влияющим на поведение агентов именно в тех процессах, на имитацию которых настроена модель. В нашем случае — это дифференциация людей по восприимчивости к инфекции, способам и скорости передачи ее дальше. С учетом нашей за-

дачи следует, как минимум, обеспечить правильное распределение на популяции агентов базовых демографических характеристик, таких как возраст и пол, а также некоторого показателя состояния здоровья. Кроме того, необходимо формирование семей, так как именно внутри семей происходят постоянные интенсивные контакты между людьми.

В качестве объекта моделирования была выбрана Москва. В условиях мегаполиса можно с большей уверенностью говорить об интенсивных взаимодействиях жителей, то есть можно ожидать большего правдоподобия модели SEIRD. Кроме того, Москва раньше других регионов столкнулась с проблемой COVID-19, и власти были вынуждены принимать меры, действие которых отразилось на развитии эпидемической ситуации.

Кроме объекта моделирования, важно было определиться с тем, какие данные можно считать достаточно надежными для использования в качестве исходных при построении модели. Если говорить о данных, связанных с населением, то следует понимать, что отделить Москву от Московской агломерации достаточно сложно. Есть данные о возрастном-половом составе постоянного населения Москвы, но существует также маятниковая трудовая миграция, есть обычная миграция, в том числе и неофициальная, а есть огромные транспортные потоки через вокзалы и аэропорты. И все эти люди могут принимать участие в процессе распространения инфекции. Однако на первом этапе создания АОМ эпидемии COVID-19 в г. Москве – при разработке ее прототипа – важно было апробировать механизмы имитации процессов распространения инфекции и прохождения агентами стадий заболевания, в связи с чем пришлось упростить задачу. Итак, мы ограничились рассмотрением постоянного населения Москвы. Кроме того, для чистоты эксперимента в течение моделируемого периода не учитывались процессы естественного движения населения – рождаемость и смертность от других причин.

Если же говорить о данных, связанных с самой новой коронавирусной инфекцией, то следует отметить, что публикуемые ежедневно данные о численности зараженных не дают и не могут дать полной картины, так как они зависят и от количества проведенных тестов, и от самой

схемы тестирования. Так, на первых порах тестирование проводилось в основном среди тех, у кого наблюдались подозрительные симптомы, и/или среди тех, кто имел контакты с уже выявленными заболевшими. Однако теперь уже достоверно известно и о длительном инкубационном периоде, и о большой доле бессимптомных больных. В связи с этим данные о численности заболевших мы посчитали недостаточно надежными, для того чтобы основывать на них работу модели.

Основным источником информации, использованной для имитации процессов заражения новых больных и особенностей протекания болезни, явились официальные методические рекомендации<sup>5</sup>, подготовленные отечественными экспертами-эпидемиологами с учетом опыта китайского, американского и европейского центров по контролю за заболеваемостью, результатов научных исследований и данных, подготовленных специалистами ВОЗ.

Прототип АОМ эпидемии COVID-19 в г. Москве был разработан в ЦЭМИ РАН на языке программирования Java. Исходные данные, необходимые для построения модели, создания популяции агентов и распределения их свойств, модель считывает из внешнего файла в Excel-формате и в файле такого же формата сохраняет результаты моделирования для последующей их обработки и анализа.

Так же, как и создатели модели COVID-19 Scenarios, мы считали важным оценить нагрузку на систему здравоохранения, поэтому в нашей модели на каждом шаге имитации (который соответствует одному дню), кроме численности групп агентов, находящихся на разных стадиях заболевания, также подсчитывается число необходимых койко-мест в больницах, в том числе в отделениях интенсивной терапии.

#### **Реализация АОМ эпидемии COVID-19**

*Исходные данные:* численность населения Москвы и его распределение по возрасту и полу; численность популяции агентов; распределение рождений детей по возрасту матери; распределение населения по уровню здоровья.

<sup>5</sup> Временные методические рекомендации Минздрава России, версия 5 от 08.04.2020. URL: [https://xn--80aesfpebagmfb1c0a.xn--p1ai/ai/doc/114/attach/vremennie\\_mr\\_COVID-19\\_versiya\\_5.pdf](https://xn--80aesfpebagmfb1c0a.xn--p1ai/ai/doc/114/attach/vremennie_mr_COVID-19_versiya_5.pdf) (дата обращения 30.05.2020).

*Параметры модели:* стартовая численность инфицированных; начальное репродуктивное число  $R_0$  (количество человек, которых в среднем заражает один носитель вируса); доля заболевших с легкой формой болезни; минимальная и максимальная длительность инкубационного периода; минимальная и максимальная продолжительность болезни.

*Установка стартового состояния модели*

Значения демографических характеристик агентов – возраста и пола – распределяются с помощью процедур масштабирования на популяции агентов заданной численности таким образом, чтобы воспроизвести в искусственном обществе возрастно-половую структуру населения Москвы, соответствующую исходным данным. В модели также учитывается дифференциация людей по уровню здоровья, который задается по шкале: «отличное», «практически здоров», «слабое» (последняя категория подразумевает наличие хронических заболеваний). Первоначально агенты наделяются базовым уровнем здоровья в соответствии с исходными данными о соотношении групп, после чего значение корректируется с учетом их возраста (с возрастом увеличивается вероятность перехода здоровья агента в худшую категорию). Затем агенты образуют семьи, для чего используется исходная информация о распределении рождений детей по возрасту матери. Агент «запоминает» свои семейные связи с помощью индивидуальных коллекций (списков) ближайших родственников: супруга; родителей; детей; братьев и сестер (подробнее о процедурах, с помощью которых в модели имитируются процессы образования семей, см. [19]).

*Имитация процессов распространения инфекции COVID-19*

На каждом шаге работы модели агенты заражаются от других агентов – больных или инфицированных (за исключением находящихся в больнице/на карантине/на самоизоляции). Каждый агент-источник инфекции на каждом шаге имитации может передавать ее дальше двумя разными способами: родственникам (вероятность заболеть для каждого родственника принята равной 0,2) и посторонним агентам, которые выбираются случайным образом из популяции агентов. Вероятность заразить для агента-источника инфекции в последнем случае определяется как отношение числа возможных заражений к длине периода, в течение которого он считается заразным (сумма длительностей инкубационного периода и периода болезни). В случае «успешного» заражения число возможных заражений у агента-источника уменьшается на единицу, и больше этот агент в течение шага имитации никого не заражает. А для вновь инфицированного агента определяется план течения болезни: длительность инкубационного периода, степень тяжести болезни и ее продолжительность, необходимость госпитализации (в том числе реанимации), а также исход болезни – выздоровление агента с образованием иммунитета или смерть. И в том, и в другом случае такой переболевший агент на последующих шагах имитации не участвует в процессе распространения инфекции. Конкретные значения всех этих параметров определяются для каждого агента вероятностным способом в соответствии с правилами, представленными в *таблице 1*.

Таблица 1. Характеристики агентов, связанные с заболеванием COVID-19, и способы их определения

Показатель	Возможные значения в модели	Способ определения значения	Экспертные оценки и их источник
Стадия заболевания	Целое число в интервале [0, 4]: 0 – восприимчивый; 1 – инфицированный; 2 – заболевший; 3 – выздоровевший; 4 – умерший	Первоначальное значение = 0. На дальнейших шагах имитации меняется при переходе к следующим категориям в соответствии с планом течения болезни	
Длительность инкубационного периода, дни	Целое число в интервале [Min, Max]	Выбирается вероятностным способом с помощью бета распределения с заданными границами. Параметры распределения подобраны таким образом, чтобы среднее значение ( $\approx 6$ ) совпадало с заданным экспертно (5-7)*	Для агентов в возрасте старше 18 лет: Min = 2; Max = 14; Среднее значение 5–7 дней. Для детей: Min = 2; Max = 10*



Окончание таблицы 1

Показатель	Возможные значения в модели	Способ определения значения	Экспертные оценки и их источник
Степень тяжести заболевания	Целое число в интервале [0, 2]: 0 – легкое течение; 1 – тяжелое; 2 – критически тяжелое	По умолчанию = 0. С вероятностью, зависящей от уровня здоровья агента, присваивается 1 – тяжелое течение, а из тех, кому выпала 1, с заданной вероятностью выбираются те, у кого тяжесть заболевания критическая	У 80% пациентов заболевание протекает в легкой форме. Доля критически тяжелых – 0,25 от всех тяжелых больных*
Продолжительность болезни, дни	Целое число в интервале [Min, Max]	Выбирается вероятностным способом с помощью бета распределения с заданными границами. Параметры распределения подобраны таким образом, чтобы длительность лечения возрастала с увеличением тяжести заболевания	Для агентов в возрасте старше 18 лет: Min = 2; Max = 14; Среднее значение 5-7 дней. Для детей: Min = 2; Max = 10*
Госпитализация	Целое число со значениями: 0 – не нуждается; 1 – нуждается	По умолчанию = 0. Если тяжесть заболевания больше 1, то устанавливается 1. Агент помещается в больницу на текущем шаге имитации	
Реанимация	Целое число со значениями: 0 – не нуждается; 1 – нуждается	По умолчанию = 0. Если тяжесть заболевания больше 1, то устанавливается 1 и агент помещается в реанимацию на текущем шаге имитации  Если тяжесть заболевания равна 1, то устанавливается 1 с вероятностью 0,33 и определяется время его перевода в реанимацию	Вероятность перевода в реанимацию рассчитана с учетом того, что потребность в реанимации оценена как 0,5 от числа госпитализированных**. Время наступления кризиса и соответствующего перевода агента в реанимацию устанавливается с учетом данных экспертов – 8-й день от начала заболевания*
Исход болезни	Стадия заболевания = 3 Стадия заболевания = 4	По умолчанию = 3. Если агент находится в реанимации, то с вероятностью = 0,09 устанавливается 4	Вероятность смерти рассчитана с учетом официальных данных по г. Москве о фактической летальности
Число возможных заражений	Целое число, означающее максимально возможное число агентов – не родственников, которых способен заразить агент	Рассчитывается вероятностным способом в соответствии со значением параметра в десятичном формате	Оценка ВОЗ от 20.03.2020***: 2–3,1
Режим изоляции	Целое число в интервале [0, 2]: 0 – свободное перемещение; 1 – самоизоляция; 2 – изоляция	По умолчанию = 0. Если агент госпитализирован, то устанавливается 2. Если агент попадает в категорию, для которой предусмотрен режим самоизоляции, то устанавливается 1	

Составлено с использованием данных:  
 \* Временные методические рекомендации Минздрава России, версия 5 от 08.04.2020. С. 11–13, 36, 49. URL: [https://xn--80aesfpebagmfb1c0a.xn--p1ai/ai/doc/114/attach/vremennye\\_mr\\_COVID-19\\_versiya\\_5.pdf](https://xn--80aesfpebagmfb1c0a.xn--p1ai/ai/doc/114/attach/vremennye_mr_COVID-19_versiya_5.pdf) (дата обращения 30.05.2020).  
 \*\* Изменения к Приказу Министерства здравоохранения Российской Федерации от 19 марта 2020 г. № 198н «О временном порядке организации работы медицинских организаций в целях реализации в целях профилактики и снижению рисков распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19» от 02 апреля 2020 г. С. 8.  
 \*\*\* Насколько опасен коронавирус: заразность, летальность и группы риска // РИА. 20.03.2020. URL: <https://ria.ru/20200319/1568742369.html> (дата обращения 30.05.2020).

По завершении каждого шага собирается статистика по популяции агентов об их состояниях, результаты демонстрируются в окне интерфейса модели и сохраняются в выходном файле.

### Анализ апробации прототипа АОМ эпидемии COVID-19

На *рисунке 1* показана область интерфейса модели, в которой пользователь может задать параметры эксперимента, а также обобщающие результаты, достигнутые при заданных значениях параметров на текущем шаге моделирования.

В данном случае – на 1 сентября 2020 года при отсутствии ограничительных мер для всего населения, но при соблюдении карантина членами семей госпитализированных агентов.

Апробация модели и оценка таких ее свойств, как реалистичность, устойчивость получаемых результатов, зависимость их от различных параметров и др., проводились с по-

мощью компьютерных экспериментов. Для каждого сценария эксперимента осуществлялась серия проб, затем полученные результаты усреднялись и оценивалась их устойчивость (разброс значений). Численность агентов во всех экспериментах – 100 тысяч. В течение моделируемого периода не учитывались процессы естественного движения населения – рождаемость и смертность от других причин.

Первая серия экспериментов проводилась для оценки адекватности реакции модели на изменение начального репродуктивного числа. Для сравнения были выбраны значения:  $R_0 = 0,9$  (при значении, меньшем единицы, эпидемия должна затухать);  $R_0 = 1,5$  (что соответствует показателю свиного гриппа) и  $R_0 = 2,0$  – по оценке специалистов ВОЗ для COVID-19. Динамика численности инфицированных агентов, получаемая по результатам моделирования при различных значениях  $R_0$  и при отсутствии карантинных мер, показана на *рисунке 2*.

Рис. 1. Интерфейс АОМ эпидемии COVID-19 в г. Москве



## Моделирование эпидемии COVID-19 г. Москва

АОМ-аналог модели распространения инфекций с инкубационным периодом и летальным исходом SEIRD (Susceptible - Exposed - Infectious - Recovered - Dead)

**Параметры, характеризующие эпидемию**

Начальное репродуктивное число	1.5	<input type="button" value="OK"/>
Доля заболевших с легкой формой болезни, %	80.0	
Длительность инкубационного периода, дней	2 -- 14	
Длительность лечения, дней	14 -- 21	

**Параметры эксперимента**

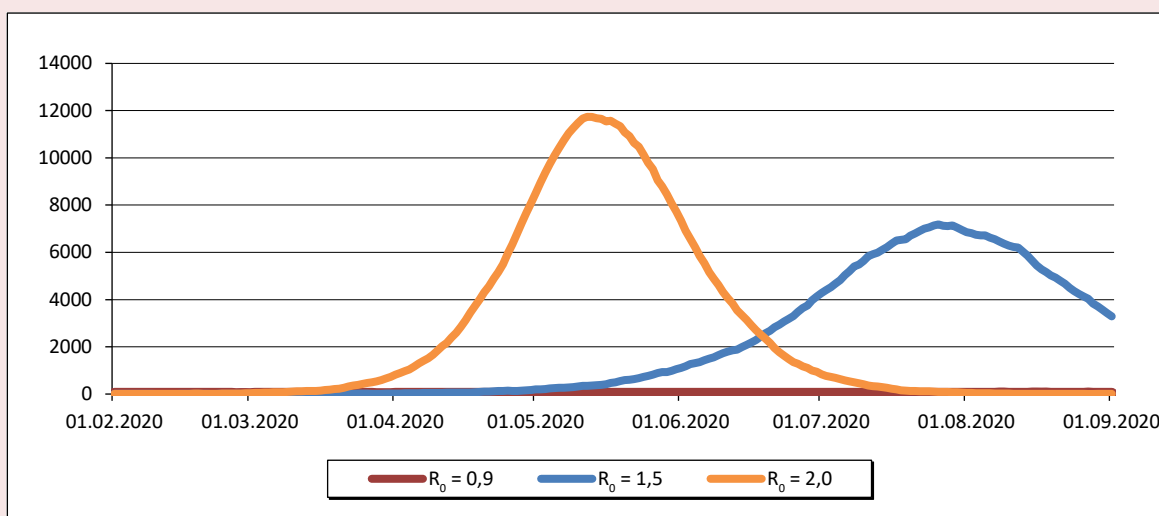
Стартовая численность инфицированных, чел.	500
<input type="checkbox"/> Самоизоляция для лиц старше 65 и их дисциплина:	0 0.9 1
<input type="checkbox"/> Самоизоляция для всех и их дисциплина:	0 0.6 1

Прогноз на 1 день

Прогноз на 30 дней

**Результаты моделирования**

Всего инфицированных, тыс. чел.	10,258.51
Максимальное число пациентов в больницах, тыс. /день	531.861
в том числе, в реанимации	223.039
Всего умерших, тыс. чел.	71.781

Рис. 2. Динамика численности инфицированных агентов при различных значениях начального репродуктивного числа  $R_0$  и отсутствии карантинных мер


Источник: рассчитано по результатам компьютерных экспериментов с АОМ эпидемии COVID-19 в г. Москве.

На графике рисунка 2 видно, что результаты моделирования с помощью агент-ориентированного подхода аналогичны результатам, получаемым на классической SEIRD модели. Так, при значении  $R_0 = 0,9$  численность инфицированных крайне мала (максимальное число зараженных агентов не превышает 17) и не увеличивается до конца моделируемого периода; при  $R_0 = 2$  наблюдается высокий пик заражения (11,5–11,6 тыс. агентов), приходящийся на 8–10 мая, а при  $R_0 = 1,5$  пик значительно ниже

(7,1–7,2 тыс. агентов) и смещен вправо (25–27 июля), так что к концу периода эпидемия не заканчивается, хотя процесс инфицирования новых агентов идет на убыль.

Следующая серия экспериментов была направлена на оценку влияния ограничительных мер на скорость и масштаб развития эпидемии. Просчитаны следующие варианты при  $R_0 = 2$ :

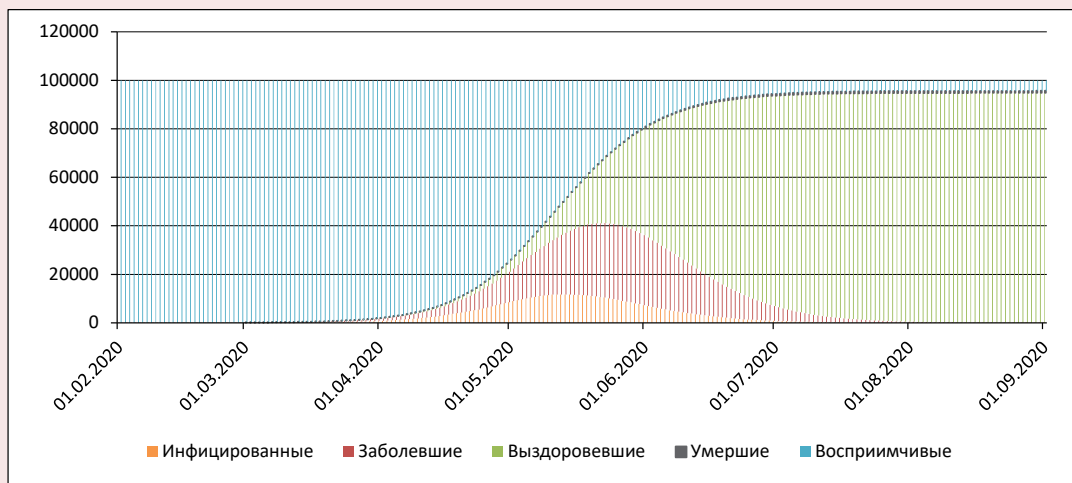
- Вариант 1 – отсутствие ограничительных мер;

Таблица 2. Оценка эпидемиологических показателей в отсутствие карантинных мер и при самоизоляции лиц старше 65 лет ( $R_0 = 2$ )

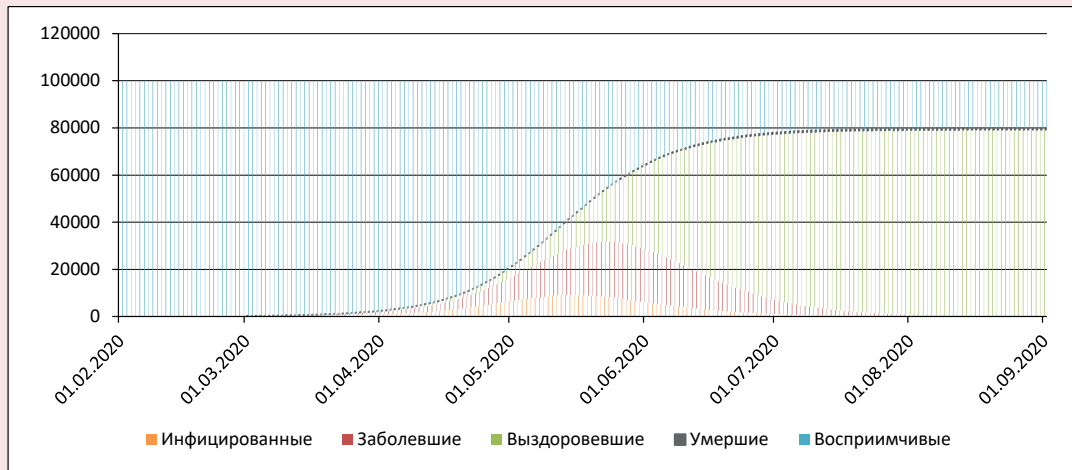
Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Общая численность инфицированных за весь период, тыс. чел.	12067,922	10083,283 (-16,4%)	Аналогично Варианту 2
Доля инфицированных от общей численности населения, %	95,7	79,9	Аналогично Варианту 2
Максимальное число необходимых мест в больницах, тыс.	861,120	630,513 (-26,8%)	Аналогично Варианту 2
в т. ч. в реанимационных отделениях, тыс.	359,410	257,857 (-28,3%)	Аналогично Варианту 2
пик потребности	27 мая	26 мая	29 июня
Численность умерших, тыс. чел.	105,842	88,433 (-16,4%)	79,098 (-25,3%)

Составлено по результатам компьютерных экспериментов с АОМ эпидемии COVID-19 в г. Москве.

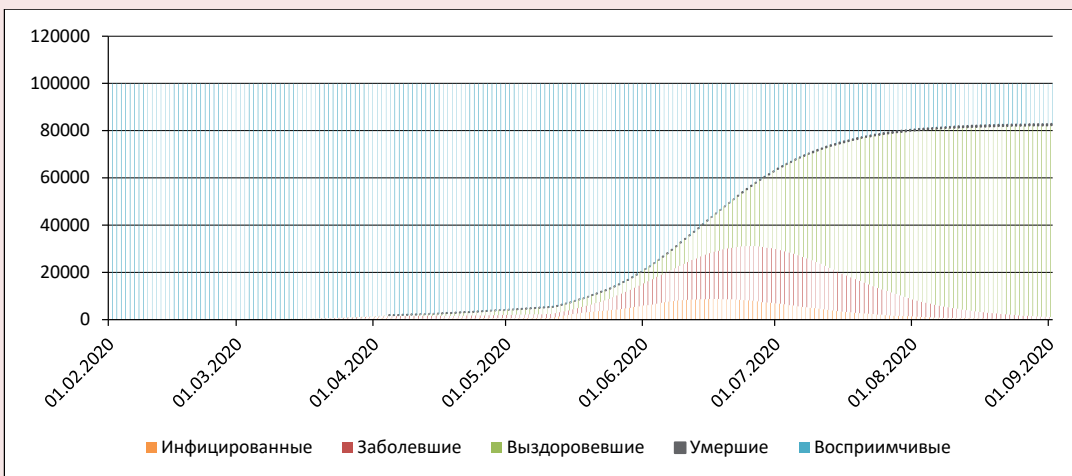
Рис. 3. Динамика соотношения групп популяции агентов. Варианты: а) отсутствие ограничительных мер; б) самоизоляция граждан старше 65 лет; в) самоизоляция всех граждан с 04.04.2020 по 11.05.2020



а)



б)



в)

Источник: рассчитано по результатам компьютерных экспериментов с АОМ эпидемии COVID-19 в г. Москве.

- Вариант 2 – имитировалось выполнение указа мэра Москвы от 23 марта 2020 г.<sup>6</sup> в части соблюдения гражданами в возрасте старше 65 лет режима самоизоляции начиная с 26 марта и до 1 сентября. Считалось, что граждане этой категории достаточно дисциплинированы (вероятность выполнения ими предписания составляет 0,9);

- Вариант 3 – дополнительно к условиям варианта 2 – самоизоляция всех остальных, дисциплинированность – 0,5.

Результаты моделирования показали, что введение ограничительных мер позволяет существенно снизить число умерших (-16,4%), а также пиковые нагрузки на систему здравоохранения (-26,8%). Более подробно результаты моделирования представлены в *таблице 2*, где численность агентов и число необходимых койко-мест переводятся в масштаб, соответствующий численности населения. В варианте 3 заметное улучшение касается только числа умерших (-25,3% по сравнению с вариантом 1), а пик заболевания отодвигается на месяц – до 29–30 июня. Ход эпидемии для рассмотренных вариантов проиллюстрирован на *рисунках 3а-в*.

Сопоставление различных вариантов прогнозов свидетельствует об адекватной реакции модели на введение соответствующих ограничительных мер. Что же касается абсолютных значений численности различных групп агентов, то очевидно, что модель нуждается в калибровке для уточнения множества параметров, заданных экспертно, в первую очередь даты начала эпидемии и начального числа инфицированных. Откалиброванная таким образом модель, на наш взгляд, может использоваться при решении практических задач, связанных с апробацией ограничительных мер.

Следует отметить, что наблюдавшийся разброс результатов различных проб достаточно велик, что связано с самим использованием вероятностных механизмов при большом числе параметров модели на относительно малой по численности популяции агентов. Для того чтобы улучшить устойчивость модели,

необходимо увеличить популяцию агентов. Это потребует перехода на суперкомпьютерные технологии. Суперкомпьютерный вариант эпидемической АОМ планируется разрабатывать на основе созданной в ЦЭМИ РАН программной системы МЕБИУС [20], позволяющей проектировать АОМ с численностью агентов до 1 млрд.

#### **Заключение**

Проанализировав результаты апробации представленного прототипа демографической АОМ эпидемии COVID-19 в г. Москве, можно сделать следующие выводы.

Использование агент-ориентированного подхода позволило создать конструкцию реалистичной эпидемиологической модели, в которой в явном виде учитываются: а) особенности протекания конкретного инфекционного заболевания, вызвавшего эпидемию; б) неоднородность населения региона с точки зрения его восприимчивости к инфекции; в) социальные связи отдельных людей, существенным образом влияющие на частоту контактов и, как следствие, – на вероятность передачи инфекции. Особенностью представленной конструкции, отличающей ее от других известных АОМ эпидемий, является использование механизма формирования семей, что делает имитацию контактов на уровне отдельного агента максимально приближенной к реальности.

Модель в ходе компьютерных экспериментов показала адекватную реакцию как на варьирование основных эпидемиологических параметров, так и на управляющие воздействия, направленные на ограничение распространения инфекции.

Используемые социально-демографическая структура населения и эпидемиологические характеристики конкретной инфекции являются параметрами модели, что делает ее достаточно универсальной и позволяет настроить ее на особенности других инфекций и других регионов.

Предложенный подход к моделированию эпидемий может быть расширен. Например, в АОМ одновременно можно дифференцировать агентов и с точки зрения их участия в различных видах экономической деятельности. Причем на основе учета межотраслевых связей возможно выстраивать цепочки создания ко-

<sup>6</sup> О внесении изменений в указ Мэра Москвы от 5 марта 2020 г. № 12-УМ: указ мэра Москвы от 23 марта 2020 г. № 26-УМ.

нечного продукта, что позволит в ходе компьютерных экспериментов оценивать как прямые, так и отдаленные последствия эпидемии, различных ограничительных мер и мер поддержки населения и бизнеса не только для экономики в целом, но и для отдельных ее отраслей.

Таким образом, на основе представленной АОМ эпидемии можно разрабатывать универсальные программные комплексы, предназначенные для систем поддержки принятия решений для ведомственных и региональных ситуационных центров.

## Литература

1. Kermack W.O., McKendrick A.G. Contribution to the mathematical theory of epidemics. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, August 1927. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. Vol. 115, issue 772, pp. 700–721. DOI: 10.1098/rspa.1927.0118
2. Noll N.B., Aksamentov I., Druelle V., Badenhorst A., Ronzani B., Jefferies G., Albert J., Neher R. COVID-19 Scenarios: An interactive tool to explore the spread and associated morbidity and mortality of SARS-CoV-2. *COVID-19 SARS-CoV-2 preprints from medRxiv and bioRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.05.05.20091363. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.05.20091363v2>
3. Hunter E., Namee B.M., Kelleher J.A Taxonomy for Agent-Based Models in Human Infectious Disease Epidemiology. *JASSS*, 2017, 20(3), 2. DOI: 10.18564/jasss.3414. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/20/3/2.html>.
4. Perez L., Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. *International Journal of Health Geographics*, 2009, no. 8 (50). DOI: 10.1186/1476-072X-8-50
5. Frias-Martinez E., Williamson G., Frias-Martinez V. An agent-based model of epidemic spread using human mobility and social network information. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Social Computing (SocialCom'11), Boston, MA, USA, 9–11 October 2011*. Pp. 49–56. DOI: 10.1109/PASSAT/SocialCom.2011.142
6. Aleman D.M., Wibisono T.G. A nonhomogeneous agent-based simulation approach to modeling the spread of disease in a pandemic outbreak. *Interfaces*, 2011, 41 (3), pp. 301–315. DOI: 10.1287/inte.1100.0550
7. Epstein J.M. Modelling to contain pandemics. *Nature*, 2009, vol. 460, p. 687. Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7256/full/460687a.html>
8. Аль-Азази А.А., Масленников Б.И. Сравнительный анализ методов имитационного моделирования // *Науковедение*. 2014. Вып. 1. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/30TVN114.pdf> (дата обращения 30.05.2020).
9. Ajelli M., Gonçalves B., Balcan D., Colizza V., Hu H., Ramasco J.J., Merler S., Vespignani A. Comparing large-scale computational approaches to epidemic modeling: Agent-based versus structured metapopulation models. *BMC Infectious Diseases*, 2010, no. 10, p. 190. Available at: <https://bmcinfectdis.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/1471-2334-10-190>
10. Lin Q., Zhao S., Gao D., Lou Y., Yang S., Musa S.S., Wang M.H., Cai Y., Wang W., Yang L., He D. A conceptual model for the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan, China with individual reaction and governmental action. *International Journal of Infectious Diseases*, 2020, 93, pp. 211–216. DOI: 10.1016/j.ijid.2020.02.058
11. Fokas A.S., Dikaios N., Kastis G.A. COVID-19: Predictive mathematical models for the number of deaths in South Korea, Italy, Spain, France, UK, Germany, and USA. *COVID-19 SARS-CoV-2 preprints from medRxiv and bioRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.05.08.20095489. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.08.20095489v1>
12. Milani F. COVID-19 outbreak, social response, and early economic effects: A global VAR analysis of cross-country interdependencies. *COVID-19 SARS-CoV-2 preprints from medRxiv and bioRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.05.07.20094748. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.07.20094748v1>
13. Fokas A.S., Cuevas-Maraver J., Kevrekidis P.G. Two alternative scenarios for easing COVID-19 lockdown measures: One reasonable and one catastrophic. *COVID-19 SARS-CoV-2 preprints from medRxiv and bioRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.05.08.20095380. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.08.20095380v2>

14. Bhanot G., DeLisi C. Predictions for Europe for the Covid-19 pandemic from a SIR model. *COVID-19 SARS-CoV-2 preprints from medRxiv and bioRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.05.26.20114058. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.26.20114058v2>
15. Milne G.J., Xie S., Poklepovich D. A Modelling Analysis of strategies for relaxing COVID-19 social distancing. *COVID-19 SARS-CoV-2 preprints from medRxiv and bioRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.05.19.20107425. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.19.20107425v1>
16. Башабшех М.М., Масленников Б.И. Имитационное моделирование пространственного распространения эпидемий (на примере холеры) с применением метода клеточных автоматов с помощью программы Anylogic // *Наукоедение*. 2013. Вып. 6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/135TVN613.pdf> (дата обращения 30.05.2020).
17. Megidido I., Colson A.R., Nandi A., Chatterjee S., Prinja S., Khera A., Laxminarayan R. Analysis of the Universal Immunization Programme and introduction of a rotavirus vaccine in India with IndiaSim. *Vaccine*, 2014, vol. 32, suppl. 1, pp. A151–A161. DOI: 10.1016/j.vaccine.2014.04.080
18. Khalil K.M., Abdel-Aziz M., Nazmy T.T., Abdel-Badeeh Salem M. An agent-based modeling for pandemic influenza in Egypt. In: *INFOS 2010: 7th International Conference on Informatics and Systems, Cairo, Egypt, 28-30 March 2010*. Pp. 1–7. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1001/1001.5275.pdf>
19. Агент-ориентированная суперкомпьютерная демографическая модель России: анализ апробации / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко, Г.Б. Сушко // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2019. Т. 12. № 6. С. 74–90. DOI: 10.15838/esc.2019.6.66.4
20. Система проектирования масштабируемых агент-ориентированных моделей, включающих популяции агентов разных типов с динамически изменяющейся численностью и сложными многоэтапными взаимодействиями агентов, образующих социальные сети. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020612410, 20.02.2020. Заявка № 2020611366 от 06.02.2020 / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко, Г.Б. Сушко.

### Сведения об авторах

Валерий Леонидович Макаров – академик РАН, доктор физико-математических наук, научный руководитель, Центральный экономико-математический институт Российской академии наук (117418, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47; e-mail: [makarov@cemi.rssi.ru](mailto:makarov@cemi.rssi.ru))

Альберт Рауфович Бахтизин – член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, директор, Центральный экономико-математический институт Российской академии наук (117418, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47; e-mail: [albert.bakhtizin@gmail.com](mailto:albert.bakhtizin@gmail.com))

Елена Давидовна Сушко – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный экономико-математический институт Российской академии наук (117418, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47; e-mail: [sushko\\_e@mail.ru](mailto:sushko_e@mail.ru))

Алина Фагимовна Агеева – кандидат архитектуры, ведущий инженер, Центральный экономико-математический институт Российской академии наук (117418, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47; e-mail: [ageevalina@yandex.ru](mailto:ageevalina@yandex.ru))

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Ageeva A.F.

### COVID-19 Epidemic Modeling – Advantages of an Agent-Based Approach

**Abstract.** The article presents the authors' approach to creating a model tool for predicting epidemiological development depending on quarantine measures with an assessment of peak loads on the health system. An agent-based model is proposed as such a tool, where agents-people go through the stages of disease

from infection to recovery or death. The difference of an agent-based epidemiological model from the classical one is that these transitions are modeled not at the group level but at the individual one, which makes it possible to account for the heterogeneity of the population by the characteristics related to people's sensitivity to the infection and their involvement in the spread of the disease. Thus, the probability of the agents' severe disease complications depends on the individual basic level of health, and the infection spread is simulated taking into account the agents' social (family) relationships. The novelty of the presented agent-based model of epidemics lies in the use of the mechanism of family formation, which makes the simulation of contacts at the level of an individual agent as close to reality as possible. The model was tested on the example of the COVID-19 epidemic in the city of Moscow. For a plausible simulation of the agents' disease, the epidemiological characteristics of COVID-19 were used, set by expert practitioners involved in the examination and treatment of patients. Using computer simulations, the researchers obtained estimates of the epidemic course for various values of the model parameters, including the impact of quarantine measures on such characteristics as the number of infected and dead over the entire period of the epidemic, the date of the infection peak and its scope, and the peak need for beds, including intensive care. The used socio-demographic structure of the population and epidemiological characteristics of a specific infection are the parameters of the model, which allows it to be adjusted to the particular qualities of other regions and infections for its further practical use as a tool for supporting management decisions in regional and sectoral situation centers. A supercomputer version of the model is planned to be developed for this purpose.

**Key words:** epidemic modeling, agent-based models, computer modeling, computational experiments on social processes models, information technologies of decision-making intellectual support.

### Information about the Authors

Valerii L. Makarov – RAS Academician, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Scientific Director, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (47, Nakhimovsky Avenue, Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru)

Albert R. Bakhtizin – RAS Corresponding Member, Doctor of Sciences (Economics), Director, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (47, Nakhimovsky Avenue, Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com)

Elena D. Sushko – Candidate of Sciences (Economics), Leading Researcher, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (47, Nakhimovsky Avenue, Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: sushko\_e@mail.ru)

Alina F. Ageeva – Candidate of Sciences (Architecture), Leading Engineer, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (47, Nakhimovsky Avenue, Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: ageevaalina@yandex.ru)

Статья поступила 04.06.2020.