

УДК 004.94, 616.9

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.030](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.030)

Имитационное моделирование эпидемий: агентный подход

А.Ф. Агеева

*Центральный экономико-математический институт РАН,
Москва, Российская Федерация*

Резюме: Последствия эпидемий могут оказаться весьма негативными, приводить к значительным экономическим и социальным потерям, в связи с чем актуальными являются вопросы создания современных инструментов для тестирования стратегий снижения ущерба и разработки эффективных мер борьбы с эпидемиями. В статье обосновывается перспективность использования агент-ориентированных моделей для этих целей, на примерах агент-ориентированных моделей эпидемий, разработанных зарубежными исследователями. Проведен анализ архитектуры агент-ориентированных моделей распространения эпидемий и выявлены основные конструктивные концепции и ключевые компоненты для моделирования эпидемических процессов. Рассмотрены преимущества агентного подхода имитационного моделирования, позволяющие имитировать динамику распространения инфекционных заболеваний в максимально приближенной к реальному обществу неоднородной синтетической популяции, а также воспроизводить различные схемы и механизмы передачи конкретных контактных заболеваний с учетом демографических, социально-экономических и территориально-пространственных факторов. Использование агентного подхода имитационного моделирования предоставляет возможность исследовать течение эпидемических и инфекционных процессов на детализированном уровне, а также проигрывать всевозможные сценарии эпидемических вспышек, тестировать вариативные стратегии борьбы с эпидемией и оценивать влияние на динамику эпидемий многокомпонентных стратегий вмешательства. Результаты исследования передового опыта проектирования агент-ориентированных моделей распространения эпидемий планируется использовать для создания агент-ориентированной модели распространения эпидемии в условиях мегаполиса.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, вычислительная эпидемиология, имитационные модели распространения эпидемий.

Для цитирования: Агеева А.Ф. Имитационное моделирование эпидемий: агентный подход. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Ageeva_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.030

Simulation of epidemics: agent-based approach

A.F. Ageeva

*Central Economics and Mathematics Institute
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Abstract: The consequences of the epidemics can be extremely negative, causing significant social and economic losses. The perspectivity of using agent-based models for these purposes are substantiated using agent-based models of epidemics developed by foreign researchers as examples. An analysis of the architecture of agent-based models of epidemics is carried out, which allows determining the key components for modeling epidemic processes. The advantages of the agent-based approach of simulation are identified, which allow modeling the dynamics of the infectious diseases spread in a heterogeneous synthetic population as close to real society as possible, as well as reproducing numbers

of patterns and mechanisms of transmission of specific contagious diseases, taking into account demographic, socio-economic and spatial factors. Applying the agent-based approach provides an opportunity to study the progression of epidemic and infectious processes at a micro-level, as well as run scenarios of epidemic outbreaks, test varied strategies for controlling the epidemic, and assess the impact of multicomponent intervention strategies on the epidemic dynamics.

Keywords: agent-based modeling, computational epidemiology, agent-based models of the epidemic spread.

For citation: Ageeva A.F. Simulation of epidemics: agent-based approach. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Ageeva_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.030 (In Russ).

Введение. Классические математические модели эпидемий

События конца 2019 – первой половины 2020 гг., связанные с пандемией COVID-19, показали актуальность вопросов создания современных инструментов, позволяющих максимально точно прогнозировать динамику и последствия эпидемий для разработки эффективных мер борьбы с эпидемиями и предотвращения сценария пандемии. Одним из наиболее результативных методов для достижения этой цели является применение имитационного моделирования.

Первые попытки моделирования эпидемий для исследования механизмов распространения заболеваний с помощью математического аппарата предпринимались с середины XVIII века, что положило начало развития математической эпидемиологии. Первой популярной математической моделью, описывающей с помощью систем дифференциальных уравнений динамику распространения заболеваний, которая применяется по сегодняшний день для моделирования эпидемий в больших городах, стала модель SIR, созданная шотландскими эпидемиологами Кермак А. и Маккендрик У. (Kermack, McKendrick) в 1920-х годах. Модель SIR («Susceptible – Infected – Recovered» или «Восприимчивые – Инфицированные – Выздоровевшие»), в которой выделяются группы людей (компарменты) и моделируется передача заболеваний между ними, дает базовое качественное понимание динамики распространения инфекционных заболеваний, но для количественного моделирования требуется учитывать особенности протекания и распространения конкретных инфекционных заболеваний, поэтому в дальнейшем модель SIR получила развитие в целом ряде других модификаций, таких как, например, SEIR («Susceptible – Exposed – Infected – Resistant» или «Восприимчивые – Контактные – Инфицированные – Выздоровевшие»); SIS («Susceptible – Infected – Susceptible» или «Восприимчивые – Инфицированные – Восприимчивые»); SEIHDR («Susceptible – Exposed – Infected – Hospitalized – Funeral – Removed» или «Восприимчивые – Латентные – Инфицированные – Госпитализированные – Непохороненные – Невосприимчивые») и др.

Классические математические модели типа SIR довольно просты в построении и использовании, но не учитывают пространственные аспекты распространения инфекционных заболеваний, не способны эффективно моделировать индивидуальные контактные процессы и оценивать их воздействие на поведение модели. Кроме того, эпидемиологам и политикам зачастую приходится принимать решения в условиях быстро меняющейся ситуации и неопределенности в отношении применения различных мер вмешательства на местах.

Имитационное моделирование распространения эпидемий. Преимущества агентного подхода

В современный век информации, взрывного развития вычислительной техники и информационно-коммуникационных технологий, стало возможным создание подробных вычислительных моделей, обеспечивающих всеобъемлющую основу для интеграции разнообразных источников данных, что может привести к лучшему пониманию проблемы распространения эпидемий и разработке более эффективных противоэпидемических стратегий вмешательства. Компьютерные имитационные модели могут помочь в обеспечении лучшего понимания поведения вспышек инфекционных заболеваний путем анализа их передачи на индивидуальном уровне в неоднородной популяции. Таким образом, вычислительная эпидемиология призвана обеспечить лиц, принимающих решения, современными инструментами тестирования стратегий снижения ущерба от последствий эпидемий.

Применение агентного подхода имитационного моделирования позволяет преодолеть ограничения классических математических моделей: каждый член общества представляется в качестве наделенного множеством переменных программного агента, участвующего в схемах передачи конкретных контагиозных заболеваний посредством алгоритмов, воспроизводящих поведенческие паттерны. Агентный подход позволяет также учитывать фактор случайности, присутствующий в реальных процессах распространения эпидемий, и прогнозировать динамику потенциальных вспышек: агенты могут отличаться значительной вариативностью поведения, аналогично тому, как люди в реальном мире взаимодействуют друг с другом или принимают решения. Парадигма моделирования эпидемии на основе агентов предоставляет возможность проигрывать всевозможные сценарии вспышки, которые определяются взаимодействием агентов на индивидуальном уровне, и оценивать последствия эпидемии и влияние на ее динамику различных стратегий вмешательств. Обзор актуальных агент-ориентированных моделей эпидемий, разработанных зарубежными исследователями, а также анализ их архитектуры, позволил выделить конструктивные концепции и ключевые компоненты, которые рассмотрим ниже с помощью примеров.

Синтетическая популяция и эпидемические процессы

Преимущества агентного подхода позволяют имитировать в виртуальной среде моделирования, воспроизводящей условия исследуемого региона, динамику распространения инфекционных заболеваний в максимально приближенной к реальному обществу синтетической популяции. Члены искусственного общества – агенты модели, наделяются различными типами атрибутов, формируя его демографическую структуру, а также профили исследуемых социальных групп, участвующих в передаче заболевания. Атрибуты агентов отображают их индивидуальные характеристики: демографические (пол, возраст, семейное положение); сетевые (социальный тип, состав семьи, принадлежность к домохозяйству, структура домохозяйства); социально-экономические (занятость, социальный статус, размер дохода, жилищные условия); пространственные (географическая привязка по месту жительства, работе или учебе, плотность населения); медицинские (статус здоровья, ожидаемая продолжительность жизни, уровень вакцинации, иммунитет, риск инфицирования); информационные (знания об особенностях передачи конкретных инфекционных заболеваний, осведомленность о текущей эпидемиологической ситуации). Индивидуальные параметры агентов

устанавливаются в соответствии с официальными административными и статистическими данными, результатами статистических наблюдений и переписи населения, данными, полученными от министерств и ведомств.

Синтетическая популяция может воспроизводить общество на местном [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], страновом [12, 13, 14, 15, 16, 17] или региональном уровне [18, 19], при этом, в крупномасштабных агент-ориентированных моделях с максимально реалистичными искусственными сообществами [11, 16, 17], популяции агентов могут исчисляться миллионами и для реализации таких моделей требуется привлечение технологий высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных ресурсов. Демографические, медицинские и социально-экономические факторы оказывают существенное влияние на течение эпидемиологической ситуации, так что даже в городах, сопоставимых по численности населения, могут отмечаться разные по динамике и характеру вспышки. К таким выводам пришли авторы [10], которые с помощью агент-ориентированной модели распространения кори смоделировали вспышки инфекционного заболевания в 33 разных ирландских городах. Созданную ими модель можно использовать как инструмент эффективного распределения ограниченных ресурсов по борьбе с эпидемиями, например, выполнив процесс отбора городов страны для планирования мероприятий по массовой вакцинации.

Среда моделирования эпидемического процесса

Географические, климатические, пространственно-территориальные и социально-экономические средовые факторы оказывают влияние на процессы распространения эпидемий, поэтому виртуальная среда моделирования, в которой создается синтетическое общество, должна воспроизводить условия исследуемого региона. В агент-ориентированной модели распространения холеры в лагерях беженцев, расположенных вблизи г. Дадааб (Кения) [4], учитывались неудовлетворительные санитарные и жилищные условия в лагерях и моделировались сценарии распространения заболевания по типу SEIR в процессе взаимодействия агентов с окружающей средой: через воду – питьевую, дождевую, сточную.

С помощью агент-ориентированной модели, описанной в [5], изучалось распространение гриппа по типу SEIR в границах г. Дели (Индия) и оценивалось влияние средовых качеств районов трущоб на течение эпидемии. В модели использовались две топологические сети агентов: одна воспроизводила повседневную деятельность агентов, проживающих в обычных городских районах, а другая – агентов, населяющих районы трущоб. Они наделялись иными характеристиками, присущими данной группе, например, большим количеством членов семей и внешних контактов, а территории трущоб – большей плотностью населения и неудовлетворительным состоянием инфраструктуры. Результаты моделирования показали необходимость учета средовых факторов, так, в районах трущоб стратегии вмешательства оказываются менее эффективными, соответственно, игнорирование атрибутов трущоб приводит к переоценке эффективности мер борьбы с эпидемией, например, эффективность вакцинации можно переоценить на 30–55%. Население трущоб поддерживает более высокий уровень риска инфицирования при всех сценариях вмешательства, поэтому, задержка мероприятий по борьбе с эпидемией приводит к более неблагоприятным последствиям в районах трущоб, а раннее реагирование способно сдерживать эпидемию. Стратегия изоляции инфицированных является более эффективной для районов трущоб, а из всех возможных вмешательств наиболее эффективными для них – вакцинирование и социальное дистанцирование. Моделирование районов трущоб г. Дели, население

которых составляет 13% от численности жителей мегаполиса, и оценка роли средовых факторов в развитии эпидемии помогут регулирующим органам мегаполиса более точно расставить приоритеты в распределении ограниченных ресурсов, а также осуществлять эффективную политику общественного здравоохранения, направленную на организацию профилактических мер борьбы с эпидемиями.

Мобильность населения и распространение эпидемии в динамической социальной сети

При исследовании широкомасштабной пространственной передачи инфекционных заболеваний моделирование и количественная оценка мобильности населения играет важное значение. Моделирование ежедневных передвижений населения на индивидуальном уровне позволяет фиксировать взаимодействия между ними в форме пространственно-временных социальных контактов. При этом, все более активно используются данные, которые можно получить благодаря таким современным информационно-коммуникационным технологиям, как big data (большие данные), GPS-навигация, ГИС, сотовая связь и геолокация.

Эпидемические процессы развиваются в определенных территориально-пространственных границах. Преимущества агентного подхода, заключающиеся в его гибкости, предоставляют возможности для моделирования с использованием геоинформационных технологий, позволяя воспроизводить жизнедеятельность агентов в реальных географических координатах и приближая агент-ориентированные модели к реалистичному воспроизведению пространства распространения эпидемий. Для всех агентов, образующих синтетическую популяцию, устанавливается географическая привязка: по месту жительства, работы или учебы. В результате множества итераций модели микровзаимодействия агентов порождают макроскопические явления, то есть течение эпидемического процесса в пространстве и времени.

Для моделирования ежедневной активности населения широко используются транспортные модели, построенные на базе ГИС. В моделях агенты совершают ежедневные передвижения в соответствии с заданными индивидуальными графиками и маршрутами. Так, для моделирования сезонной вспышки гриппа в [1] использовалась транспортная модель г. Цюриха (Швейцария). В модель [3] была интегрирована информация с географической привязкой плотности населения, видов землепользования и дорожно-транспортной сети г. Бернаби (Канада). Перемещение агентов осуществлялось с помощью алгоритма маршрутизации по списку координат запланированного графика перемещений.

Для построения модели мобильности населения и отслеживания принадлежности агентов к социальным группам также используют данные телефонных звонков граждан исследуемого региона [12, 18]. Это позволяет выявить социальную пространственно-временную структуру общества, картировать взаимодействия между сообществами, отслеживать перемещения граждан между географическими зонами региона и прогнозировать пространственную динамику распространения болезни. В [18], с помощью специальных алгоритмов, был проведен анализ данных телефонных звонков граждан на предмет выявления «влиятельных» абонентов в каждой социальной группе, способных играть ключевую роль в распространении заболеваний и информации. С помощью созданной агент-ориентированной модели динамики эпидемии в западноафриканском регионе была протестирована стратегия контроля распространения заболеваний, основанная на информировании влиятельных агентов, которые с высокой

вероятностью могут распространить предупреждение о развитии эпидемии и мерах предосторожности среди большого числа агентов в их социальных группах.

Интеграция искусственного общества, мобильности агентов и географических привязок формирует динамическую социальную сеть. События передачи заболевания могут происходить только между агентами, находящимися в одной пространственной ячейке (в одном рабочем кабинете, одном школьном классе, одном вагоне метро и т.п.). Социальные контакты агентов, как правило, дифференцируются по суточным временным периодам и типам. Например, они могут относиться к тесным (дома, на работе, в общественном транспорте), случайным (в продуктовых магазинах, в местах общественного питания) и эпизодическим (на общественных мероприятиях), как в модели [2], или же, стационарным (дома, на работе), мобильным (в общественном транспорте), и происходить в границах личного пространства агента(ов) или в масштабах города, как в модели [3]. В соответствии с типами социальных контактов устанавливаются параметры риска инфицирования, очевидно, что наибольшими параметрами наделяются тесные и более длительные по времени контакты. В модели [13] агентам присваивался уровень социальной активности, который устанавливался на основе частоты их межличностных контактов. Вероятность инфицирования агента увеличивалась с увеличением количества инфицированных агентов, принадлежащих к его социальной сети(ям). В модели прогнозирования динамики эпидемии лихорадки Эбола в Либерии [15] весовые грани сетей социальных контактов переводились в вероятность заражения, таким образом, передача заболевания определялась как вероятность инфицирования восприимчивых агентов в единицу времени контакта.

Влияние поведения населения на динамику эпидемии

Преимущества агентного подхода, заключающиеся в возможности наделять агентов модели различными поведенческими паттернами, позволяют приблизить агент-ориентированные модели к максимально реалистичному воспроизведению эпидемических процессов в неоднородных популяциях, что достигается благодаря симуляции разнообразных схем и механизмов инфицирования посредством реализации индивидуальных поведенческих алгоритмов агентов.

Поведение членов общества оказывает большое влияние на течение эпидемических процессов, так, например, принятие населением профилактических мер снижает вероятность инфицирования. Мотивирующим фактором для изменения поведения населения является своевременное и массовое информирование. В агент-ориентированной модели вспышки гриппа [2] изучалась динамика принятия агентами, проживающими в границах г. Буффало (США), профилактического поведения. Распространение информации о течение эпидемической ситуации моделировалось по двум каналам – через личные контакты агентов (локально) и посредством СМИ. Информированные агенты принимали решение об активации профилактического поведения – «усыновлении», на которое оказывали влияние такие факторы, как количество агентов в их социальных группах, уже принявшие усыновление, уровень межличностного влияния, количество инфицированных агентов в популяции на текущий момент времени. Для каждого временного шага модели вычислялось давление со стороны членов социальных групп и риск инфицирования, обновляя, таким образом, параметры поведенческого усыновления.

В агент-ориентированных моделях распространения ВИЧ [7, 14] сравнивались два типа динамических сексуальных сетей и сексуального поведения: агентов, имеющих одного (двух) партнеров и агентов, имеющих множество партнеров. В моделях

оценивалось влияние топологии сетей на распространение ВИЧ среди населения и имитировался процесс внедрения программы по борьбе с ВИЧ с помощью методов информирования населения (о практике безопасного секса, раскрытия статуса с ВИЧ, принятия людей с ВИЧ и т.д.). В агент-ориентированной модели [14] оценивали эффективность стратегий многокомпонентной борьбы с эпидемией, в том числе, реализацию агентами поведения, основанного на страхе и выражающегося в самоизоляции. Самоизоляция агентов моделировалась функцией треугольника, определяемой временем начала, пика и конца, а также соответствующими долями искусственного общества, реализующих стратегию самоизоляции в конкретные временные интервалы.

Моделирование течения инфекционного процесса

Агентный подход позволяет реалистично моделировать течение инфекционного и эпидемического процессов с учетом особенностей динамики и клинических проявлений конкретных контагиозных заболеваний, а также их лечения. Во время социальных контактов в синтетической популяции возможна передача инфекционного заболевания, и в случае инфицирования агентов, происходит переоценка и обновление их статуса здоровья (изменение медицинских индивидуальных характеристик). Инфицированные агенты входят в новое инфекционное состояние, длительность которого устанавливается в соответствии с клинической классификацией, и таким образом, агенты поэтапно проходят все стадии заболевания и лечения. В мультиагентной модели распространения пандемического гриппа H1N1 в Египте [13] для воспроизведения эпидемического процесса была принята расширенная SIR типология компарментов. Агенты модели классифицировались в соответствии с их контактами, клиническим течением заболевания и стадиями лечения: 1) восприимчивые, но не контактирующие с инфицированными; 2) контактирующие с инфицированными; 3) инфицированные в течение инкубационного периода; 4) инфицированные, заразные; 5) инфицированные, помещенные на карантин; 6) инфицированные, не помещенные на карантин; 7) умершие; 8) выздоровевшие; 9) получившие иммунитет против заболевания.

Агентный подход предоставляет инструмент для более глубокого понимания характера моделируемой эпидемии, механизмов передачи контагиозных заболеваний и условий, при которых может произойти вспышка. В [20] описана агент-ориентированная модель циркуляции вируса гриппа во взаимодействии с другим респираторным патогеном – пневмококком. Инфицирование агентов происходит по усложненной схеме, в соответствии с различными механизмами приобретения второго патогена: эндемический тип предполагает рандомизированное заражение 20% популяции, а эпидемический – инфицирование по типу гриппа, с вероятностью отягощения течения заболевания. Механизмы для каждого возможного варианта инфицирования, связанного со взаимодействиями вируса гриппа и бактерии пневмококка или являющихся вторичными случаями, реализовывались через мультипликативные параметры, отображающие передачу патогенных микроорганизмов. Модель позволяет оценивать эффекты различных механизмов взаимодействия гриппа и пневмококка, влияние пневмококка на сезонную эпидемию гриппа, а также гриппа на восприимчивость агентов к пневмококковой пневмонии. Модель можно использовать как инструмент тестирования гипотез, касающихся взаимодействия патогенов, а также прогнозирования эффективности таких стратегий борьбы с эпидемиями, как вакцинация восприимчивых к патогенам групп населения.

Тестирование стратегий борьбы с эпидемиями

Агентный подход моделирования эпидемий позволяет тестировать вариативные стратегии борьбы с эпидемией, прогоняя сценарии и наблюдая изменения параметров агентов, таких как, например, статус здоровья, а также поведенческих паттернов, связанных с мобильностью, социальными контактами, получением информации или лечения. Получаемые в результате реализации сценариев выходные данные, позволяют оценивать эффективность различных мер вмешательства и осуществлять планирование стратегий борьбы с эпидемией, с учетом социально-экономических и эпидемиологических факторов. Без эффективной и правильно спланированной стратегии вмешательства последствия эпидемий могут оказаться весьма негативными, приводить к значительным экономическим и социальным потерям.

Агент-ориентированные модели являются инструментом разработки многокомпонентных стратегий фармацевтических и нефармацевтических вмешательств для отсрочки или сдерживания пика эпидемий, когда имеется проблема нехватки ресурсов для борьбы с эпидемиями, например, запасов противовирусных препаратов, вакцин, дорогостоящего оборудования. С помощью крупномасштабной агент-ориентированной модели распространения гриппа на юге Калифорнии (США) [19] тестировалась многокомпонентная интервенционная стратегия, заключающаяся в распределении доступных запасов противовирусных препаратов среди инфицированных агентов и членов их семей, закрытия школ и соблюдения социального дистанцирования. Коллективом авторов [17] в марте текущего года была построена крупномасштабная агент-ориентированная модель распространения COVID-19 в Швейцарии. В модели оценивалось влияние принятия немедикаментозных мер вмешательства, таких как, отмена массовых мероприятий, социальное дистанцирование, ношение средств индивидуальной защиты, закрытие школ и общественных учреждений, ограничение международных перевозок и т.д, на динамику эпидемии. С учетом принятых в стране мер, смертность от коронавируса составит менее 1%; сценарий без вмешательств показал инфицирование 42% населения страны к 25 апреля 2020 г.

Для тестирования стратегии снижения мобильности населения в агент-ориентированной модели вспышки гриппа H1N1 в Мексике [12] измеряли динамику мобильности агентов по периодам оповещения, ограничения, и постепенного снятия карантина. Расчеты показали, что введение карантина и ограничение мобильности населения сократило пиковое число инфицированных агентов на 10% и отложило пик эпидемии на два дня. Реализация сценариев массового информирования населения и повышения контроля за вакцинацией в модели распространения H1N1 в Египте [13] демонстрирует снижение инфицированных агентов на 6,7% и 32%, соответственно. Пользователь через интерфейс модели может задавать комбинации различных стратегий вмешательств и процент охвата, применяемый к населению.

В крупномасштабной агент-ориентированной модели распространения гриппа в Большом Торонто (Канада) [11] оценивалась эффективность реализации стратегии домашнего карантина инфицированных агентов. Выходные данные выводились на географические карты прогнозируемой зоны распространения эпидемии. Модель использовалась региональным ведомством по охране и укреплению здоровья как инструмент для мониторинга эпидемической ситуации в режиме реального времени и планирования мероприятий вмешательства. С помощью агент-ориентированной модели заражения птичьим гриппом в г. Бандунг (Индонезия) [6] оценивалась эффективность таких мер снижения риска инфицирования, как социальное дистанцирование и ношение масок. В [9] смоделированы четыре стратегии инфекционного контроля распространения

гриппа в отделении скорой помощи больницы в г. Виннипеге (Канада). Результаты продемонстрировали большую эффективность мер, ориентированных на пациентов больницы (альтернативные потоки лечения, маскирование пациентов с симптомами).

В агент-ориентированной модели контроля эпидемии оспы [8], разработанной с целью оценки потенциальной эффективности стратегий борьбы с распространением вируса, которые могут стать ответом на условную биотеррористическую атаку, были протестированы сценарии реагирования для виртуальных городов с различной численностью населения. Модель позволяет рассчитать необходимое количество реактивных массовых прививок, необходимых для постепенного уменьшения эпидемии в каждом городе, с учетом количества первых случаев инфицирования.

Заключение

Проведенный анализ актуальных имитационных моделей, созданных с помощью агентного подхода для исследования эпидемических процессов на детализированном уровне, позволяет сделать вывод о том, что агент-ориентированные модели эпидемий являются современным инструментом прогнозирования распространения контагиозных заболеваний в неоднородных популяциях и оценки эффективности стратегий борьбы с эпидемиями и смягчения их последствий.

Выделим ключевые преимущества агентного подхода для имитационного моделирования эпидемических процессов:

1) Возможность имитировать динамику распространения инфекционных заболеваний в максимально приближенной к реальному обществу синтетической популяции, члены которой, являющиеся программными агентами, наделенными различными типами атрибутов, формируют демографическую структуру общества, а также профили исследуемых социальных групп, участвующих в передаче заболевания;

2) Возможность наделять агентов искусственного общества, в котором протекают эпидемические процессы, различными поведенческими алгоритмами для имитирования различных схем и механизмов передачи конкретных контагиозных заболеваний, что позволяет приблизить агент-ориентированные модели к максимально реалистичному воспроизведению эпидемических процессов в неоднородных популяциях;

3) Возможность моделирования ежедневной активности и мобильности населения посредством реализации индивидуальных графиков и маршрутов агентов, что позволяет имитировать динамику распространения эпидемий;

4) Возможность моделирования с использованием геоинформационных технологий, что позволяет воспроизводить жизнедеятельность агентов в реальных географических координатах и приближает агент-ориентированные модели к реалистичному воспроизведению распространения эпидемий с учетом территориально-пространственных факторов;

5) Возможность моделировать течение инфекционного и эпидемического процессов посредством воспроизведения стадий инфекционных заболеваний и их лечения, с учетом особенностей динамики и клинических проявлений конкретных контагиозных заболеваний;

6) Возможность проигрывать всевозможные сценарии эпидемической вспышки, тестировать вариативные стратегии борьбы с эпидемиями и оценивать последствия эпидемий и влияние на их динамику различных стратегий вмешательства.

Дальнейшее развитие агент-ориентированных моделей эпидемий связано с построением крупномасштабных сценариев, реализация которых требует привлечения

технологий высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных ресурсов. Результаты исследования передового опыта проектирования агент-ориентированных моделей распространения эпидемий планируется использовать для создания агент-ориентированной модели распространения эпидемии в условиях мегаполиса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного заказа ЦЭМИ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hackl J., Dubernet T. Epidemic Spreading in Urban Areas Using Agent-Based Transportation Models. *Future Internet*. 2019;11(4):92. DOI:10.3390/fi11040092
2. Mao L. Modeling triple-diffusions of infectious diseases, information, and preventive behaviors through a metropolitan social network – An agent-based simulation. *Applied Geography*. 2014;50:31-39.
3. Perez L., Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. *International Journal of Health Geographics*. 2009; 8(50). URL: <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-50> (Дата обращения: 06.06.2020).
4. Crooks A. T., Hailegiorgis F. B. An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera. *Environmental Modelling and Software*. 2014;62:164-177.
5. Adiga A., Chu S. Disparities in spread and control of influenza in slums of Delhi: findings from an agent-based modelling study. *BMJ Open*. 2018;8(1). e017353. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-017353
6. Putro U.S., Novani S. et. al. Searching for effective policies to prevent bird flu pandemic in Bandung city using agent-based simulation. *Systems Research and Behavioral Science*. 2008;25:663-673.
7. Alam S., Meyer R., Norling E. A model for HIV spread in a South African village. Conference Paper. *Multi-Agent-Based Simulation IX. MABS 2008*. Estoril, Portugal. May 12-13, 2008:33-45.
8. Burke D.S., Epstein J.M. et al. Individual-based Computational Modeling of Smallpox Epidemic Control Strategies. *Academic Emergency Medicine*. 2006;13(11):1142-1149.
9. Laskowski M, Demianyk BC, Witt J, Mukhi SN, Friesen MR, McLeod RD. Agent-based modeling of the spread of influenza-like illness in an emergency department: A simulation study. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*. 2011;15(6):877–889.
10. Hunter E., Namee B. M., Kelleher J. An open-data-driven agent-based model to simulate infectious disease outbreaks. *PLOS One*. 2018;14(1): e0211245.
11. 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):301–315. DOI 10.1287/inte.1100.0550
12. Frías-Martínez E., Williamson G., Frías-Martínez 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, 2011:49–56.
13. Khalil K.M., Abdel-Aziz M., Nazmy T.T., Salem A. M. An Agent-Based Modeling for Pandemic Influenza in Egypt. 7th International Conference on Informatics and Systems, *INFOS 2010*. Cairo, Egypt. 28-30 March, 2010. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1001/1001.5275.pdf> (Дата обращения: 06.06.2020).

14. Rhee M. *An agent-based approach to HIV/AIDS epidemic modeling: a case study of Papua New Guinea*. Master of Science Thesis. Massachusetts Institute of Technology. 2006.
15. Venkatramanan S., Lewis B., Chen J., Higdon D., Vullikanti A., Marathe M. Using data-driven agent-based models for forecasting emerging infectious diseases. *Epidemics*. 2018; 22:43-49.
16. Marini M., Brunner C., Chokani N., Abhari R.S. Enhancing response preparedness to influenza epidemics: Agent-based study of 2050 influenza season in Switzerland. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020;103. 102091. DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102091
17. Marini M., Chokani N., Abhari R.S. *COVID-19 Epidemic in Switzerland: Growth Prediction and Containment Strategy Using Artificial Intelligence and Big Data*. Preprint. 2020. DOI: 10.1101/2020.03.30.20047472
18. Saravanan M., Karthikeyan P., Arathi A., Kiruthika M, Suganya S. Mobile agent-based approach for modeling the epidemics of communicable diseases. Conference Paper. *International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*: Niagara, Ontario, CAN. 25-29 August, 2013: 16-20.
19. Mniszewski S.M., Del Valle S.Y., Stroud P.D., Riese J.M., Sydoriak S.J. EpiSimS Simulation of a Multi-Component Strategy for Pandemic Influenza. *Proceedings of the 2008 Spring simulation multi-conference*. Ottawa, Canada. April 14-17, 2008: 556-563.
20. Arduin, H., Domenech de Cellès, M., Guillemot, D. et al. An agent-based model simulation of influenza interactions at the host level: insight into the influenza-related burden of pneumococcal infections. *BMC Infectious Diseases*. 2017; 17(382). URL: <https://bmcinfectdis.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12879-017-2464-z> (Дата обращения: 06.06.2020).

REFERENCES

1. Hackl J., Dubernet T. Epidemic Spreading in Urban Areas Using Agent-Based Transportation Models. *Future Internet*. 2019;11(4):92. DOI:10.3390/fi11040092
2. Mao L. Modeling triple-diffusions of infectious diseases, information, and preventive behaviors through a metropolitan social network – An agent-based simulation. *Applied Geography*. 2014;50:31-39.
3. Perez L., Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. *International Journal of Health Geographics*. 2009;8(50). Available at: <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-50>
4. Crooks A. T., Hailegiorgis F. B. An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera. *Environmental Modelling and Software*. 2014;62:164-177.
5. Adiga A., Chu S. Disparities in spread and control of influenza in slums of Delhi: findings from an agent-based modelling study. *BMJ Open*. 2018;8(1):e017353. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-017353
6. Putro U.S., Novani S. et. al. Searching for effective policies to prevent bird flu pandemic in Bandung city using agent-based simulation. *Systems Research and Behavioral Science*. 2008;25: 663-673.
7. Alam S., Meyer R., Norling E.A model for HIV spread in a South African village. Conference Paper. *Multi-Agent-Based Simulation IX. MABS 2008*. Estoril, Portugal. May 12-13. 2008:33-45.

8. Burke D.S., Epstein J.M. et al. Individual-based Computational Modeling of Smallpox Epidemic Control Strategies. *Academic Emergency Medicine*. 2006;13(11):1142-1149.
9. Laskowski M, Demianyk BC, Witt J, Mukhi SN, Friesen MR, McLeod RD. Agent-based modeling of the spread of influenza-like illness in an emergency department: A simulation study. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*. 2011;15(6): 877–889.
10. Hunter E., Namee B. M., Kelleher J. An open-data-driven agent-based model to simulate infectious disease outbreaks. *PLOS One*. 2018;14(1):e0211245.
11. 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):301–315. DOI 10.1287/inte.1100.0550
12. Frías-Martínez E., Williamson G., Frías-Martínez 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, 2011:49–56.
13. Khalil K.M., Abdel-Aziz M., Nazmy T.T., Salem A. M. An Agent-Based Modeling for Pandemic Influenza in Egypt. 7th International Conference on Informatics and Systems, *INFOS 2010*. Cairo, Egypt. 28-30 March, 2010. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1001/1001.5275.pdf>
14. Rhee M. *An agent-based approach to HIV/AIDS epidemic modeling: a case study of Papua New Guinea*. Master of Science Thesis. Massachusetts Institute of Technology. 2006. 133p.
15. Venkatramanan S., Lewis B., Chen J., Higdon D., Vullikanti A., Marathe M. Using data-driven agent-based models for forecasting emerging infectious diseases. *Epidemics*. 2018;22:43-49.
16. Marini M., Brunner C., Chokani N., Abhari R.S. Enhancing response preparedness to influenza epidemics: Agent-based study of 2050 influenza season in Switzerland. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020;103.102091. DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102091
17. Marini M., Chokani N., Abhari R.S. *COVID-19 Epidemic in Switzerland: Growth Prediction and Containment Strategy Using Artificial Intelligence and Big Data*. Preprint. 2020. DOI: 10.1101/2020.03.30.20047472
18. Saravanan M., Karthikeyan P., Arathi A., Kiruthika M, Suganya S. Mobile agent-based approach for modeling the epidemics of communicable diseases. Conference Paper. *International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*: Niagara, Ontario, CAN. 25-29 August. 2013:16-20.
19. Mniszewski S.M., Del Valle S.Y., Stroud P.D., Riese J.M., Sydoriak S.J. EpiSimS Simulation of a Multi-Component Strategy for Pandemic Influenza. *Proceedings of the 2008 Spring simulation multi-conference*. Ottawa, Canada. April 14-17. 2008:556-563.
20. Arduin, H., Domenech de Cellès, M., Guillemot, D. et al. An agent-based model simulation of influenza interactions at the host level: insight into the influenza-related burden of pneumococcal infections. *BMC Infectious Diseases*. 2017;17(382). Available at: <https://bmcinfectdis.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12879-017-2464-z>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Агеева Алина Фагимовна, кандидат архитектуры, младший научный сотрудник Лаборатории компьютерного моделирования социально-экономических процессов ФГБУН, Центральный экономико-математический институт Российской академии наук, Москва, Российская Федерация.

e-mail: ageevaalina@yandex.ru

ORCID: [0000-0003-4902-1489](https://orcid.org/0000-0003-4902-1489)

Alina F. Ageeva, PhD, Junior Research Scientist of Laboratory of Computer Modeling of Socio-Economic Processes of CEMI RAS, Moscow, Russian Federation.