

УДК 519.218.28+ 303.725.36

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭПИДЕМИЙ

В. И. Балута^{1,2} [0000-0002-4399-0943], В. П. Осипов¹ [0000-0002-8237-1053], Т. В. Сивакова^{1,2} [0000-0001-8026-2198]

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, г. Москва

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова

vbaluta@keldysh.ru, osipov@keldysh.ru, sivakova15@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена рассмотрению методов моделирования эпидемий применительно к COVID-19 и обоснованию путей повышения эффективности управленческих решений с учетом прогнозируемых последствий. В работе приведён обзор методов моделирования для прогнозирования и оценки последствий эпидемиологической обстановки. Научная новизна работы заключается в использовании средств поддержки принятия решений для оперативной оценки ситуации и прогноза ее развития. Для поставленной задачи предлагается использовать мультиагентный подход имитационного моделирования.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, эпидемическая ситуация, суперкомпьютерное моделирование, социально-экономические последствия, математические модели, мультиагентный подход.

ВВЕДЕНИЕ

Охватившая мир пандемия COVID-19 коснулась не только сферы здравоохранения. Её последствия сегодня проявляются в экономической, политической, социальной сферах жизни общества. Это связано как с особенностями самой инфекции, так и с характером и масштабом мер реагирования, принимавшихся в оперативном порядке. Длительный инкубационный период развития вируса в организме человека, наличие случаев бессимптомного протекания болезни, отсутствие на первых порах или недостаточная эффективность средств выявления фактов наличия заболевания у конкретных лиц существенно ослож-

нили создание эффективных барьеров на пути распространения инфекции. В сложившихся условиях органы управления сосредоточились на снижении темпов распространения болезни и создании резерва времени на мобилизацию и перестройку системы здравоохранения для её более эффективного функционирования в условиях сложной эпидемиологической обстановки, а вопросы должного учета сопутствующих социальных и экономических последствий были временно отодвинуты на второй план. Введенные карантинные меры с изоляцией граждан, ограничением функционирования или закрытием ряда предприятий для уменьшения количества прямых контактов между людьми позволили лишь несколько сгладить темпы роста заболеваемости, однако не решили задачу локализации очагов инфекции. Существенными побочными эффектами принятых мер стали потеря доходов у части граждан, рост недовольства среди населения и ущерб экономике, особенно заметный в сегментах малого и среднего бизнеса.

Специалисты заявляют о высоком уровне угроз появления новых видов подобных инфекционных болезней, причем с неизвестными пока характеристиками периодов инкубации, механизмов распространения вирусов и тяжести заболеваний, что актуализирует необходимость целенаправленной превентивной проработки мер повышения эффективности государственного управления в условиях сложной эпидемиологической обстановки, обеспечивающих в динамических условиях развития эпидемии необходимый уровень безопасности населения при минимизации экономического ущерба и социальных издержек.

В качестве одного из важных направлений этой работы можно выделить разработку более совершенных средств поддержки принятия решений для оперативной оценки ситуации и прогноза ее развития, включая выработку соответствующей стратегии на основе оценки уровней эффективности альтернативных вариантов реагирования. Создание таких средств связано со сменой парадигмы подходов к моделированию эпидемий в контексте развития платформенных решений поддержки принятия решений органами государственного управления. Более того, необходимо создание универсальных средств моделирования, ориентированных не только на эпидемии, но и на другие виды чрезвычайных ситуаций.

Целесообразно одновременно моделировать и прогнозировать возможные социальные и экономические последствия не только самой эпидемии (или другой чрезвычайной ситуации), но и предпринимаемых защитных мер. При этом нужно обеспечить возможность находить сбалансированные управленческие решения с оценкой прямых и отдаленных последствий в рамках концепции приемлемого риска, которая предполагает, что предпринимаемые в рамках реагирования меры не повлекут больший ущерб, чем ожидаемый при отсутствии вмешательства.

Напомним, что тема необходимости разработки и практического создания программно-аналитических инструментов поддержки принятия решений органами государственного управления, в которых большие объемы разнообразных мониторинговых данных должны использоваться в качестве исходной информации для оценки и прогностического моделирования обстановки при различных стратегиях управления, обсуждается в научно-практическом сообществе достаточно давно [1, 2]. Тем не менее, проблема до сих пор остается открытой, невзирая на наличие прямой потребности её решения в интересах оснащения системы ситуационных центров органов государственной власти [3, 4]. Между тем, как следует из вышеприведенного обзора, предпосылки для её успешного решения формируются множеством различных научных групп и коллективов в рамках отдельных локальных направлений в виде разработки и совершенствования подходов к моделированию различных социальных, экономических, общественных явлений и процессов. В последние годы интенсивно развиваются методы работы с большими массивами данных, методы обработки зашумленных данных и т. п. Поэтому речь может идти не о недостатке научных разработок, а о способах их комплексного практически значимого применения.

По нашему мнению, в качестве базового подхода при такой постановке вопроса представляет интерес мультиагентный подход имитационного моделирования, реализуемый в концепции агентно-ориентированных моделей (АОМ) [5]. Посредством мультиагентных моделей возможно имитирование поведения больших социально-экономических или других видов систем на основе реконструкции их внутренней структуры, а также структуры и поведения включенных в них более мелких акторов. По сути, динамика характеристик этих систем прояв-

ляется через результат действия совокупности самостоятельных акторов. АОМ позволяют смоделировать любую систему в приближении к реальности. Известно, что применение мультиагентных подходов в разработке имитационных моделей хорошо зарекомендовало себя в задачах, в которых учет индивидуального поведения объектов является существенным, определяющим динамику всей системы. Например, авторы с успехом применяли этот подход для решения задач моделирования динамики транспортной загрузки городской дорожно-уличной сети. На сегодняшний день есть примеры успешного применения этого подхода как для моделирования распространения инфекционных заболеваний, так и для описания экономических процессов в обществе, что позволяет предложить его в качестве базового для решения сформулированной проблемы.

МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭПИДЕМИЙ

Базовые направления развития агентных подходов в области эпидемиологии хорошо отражены в обзоре [6]. Отмечено, что при их реализации в области моделирования инфекционных эпидемий в качестве основных компонентов принято рассматривать в различной степени приближения четыре сферы, которые условно можно обозначить как «болезнь», «общество», «транспорт» и «окружающая среда». При создании агентной модели распространения инфекционных заболеваний необходимо разработать модель описания каждого из четырех компонентов.

При моделировании распространения заболевания определяется, как инфекционное заболевание передается между агентами и как болезнь прогрессирует у отдельного инфицированного агента. Моделирование общества включает в себя моделирование структуры населения и восприимчивости различных страт к инфекции. Моделирование транспорта определяет, как и по каким путям происходит перемещение агентов, в заметной мере сопутствующее распространению инфекции. Моделирование окружающей среды предполагает создание пространства, в котором происходит взаимодействие агентов, а также схемы этого взаимодействия.

Разделение на компоненты весьма условно, поскольку они переплетены между собой. Например, моделирование болезни будет определять, с какой ве-

роятностью заражается восприимчивый агент, вступающий в контакт с инфицированным агентом, однако контакт между агентами предопределяется тем, как моделируется их перемещение, а моделирование пространства формирует места возможных контактов агентов – дом, работа, транспорт, торговые точки и т. п.

В компонент «болезнь» включается рассмотрение ряда характеристических особенностей распространения и развития болезни, в частности, иммунные особенности подверженности заболеванию, формы и вероятности передачи инфекции, тяжесть и временные интервалы протекания болезни. Спектр различий в их значениях имеет достаточно большое разнообразие. Распространение инфекции может осуществляться через воздушную среду, загрязненную воду, зараженную пищу, при контакте с загрязненными поверхностями, либо через промежуточных носителей, таких как кровососущие насекомые или грызуны. Для многих возбудителей вероятны несколько путей одновременно. В этом аспекте рассматривается и опасность скрытого периода развития болезни. Многие виды инфекций имеют скрытый (латентный) период развития, когда инфицированный человек не имеет признаков заболевания, но является переносчиком возбудителя и инфицирует контактирующих с ним людей.

В компоненте «общество» описываются способы представления структуры населения в форме агентов. В большинстве имеющихся моделей, как правило, исходят из примитивных форм гомогенной структуры с рассмотрением простых форм взаимодействия относительно небольшой выборки представителей общества. В упомянутой работе предложено выделять модели, основанные на использовании хоть каких-то реальных данных в качестве «конкретных» моделей в отличие от «общих» моделей, описывающих только некоторые процессы без привязки к реальности. Общие модели общества могут быть созданы путем случайной генерации агентов в моделируемой обстановке. Например, в модели Данхема [7] рассматривается процесс распространения инфекции при взаимодействии пяти десятков одинаковых агентов по дороге на работу и обратно. А в работе [8] описана модель, основанная на сгенерированном населении жилого сектора со случайной разбивкой их на рабочих и студентов, имеющих разные схемы поведения.

Конкретные модели опираются на использование каких-либо источников фактических данных. Так, в модели [9] на основе переписи населения небольшого австралийского городка задана структура моделируемого общества путем усреднения параметров возрастного, гендерного состава и семейного положения граждан. Однако отмечается, что построение конкретных моделей общества чрезвычайно затруднено из-за недостатка данных, поэтому в большинстве своем модели с детализацией видов агентов, как правило, базируются на субъективных представлениях авторов и зачастую имеют характер виртуальных исследовательских экспериментов.

Транспортный компонент при моделировании определяет способ перемещения агентов между различными местоположениями. В зависимости от подробности модели в ней могут использовать различные подходы. Так, Данхем [7] применяет простую транспортную модель, в которой агенты просто перемещаются между точками по прямой линии с постоянной скоростью. Более реалистичные транспортные модели опираются на данные, содержащие информацию о транспортной инфраструктуре территории. В ряде случаев разработчики опираются на представления, уже развитые в научных областях моделирования транспортных потоков в интересах определения динамики загруженности улично-дорожной сети. В этом случае перемещения людей по схемам дорожной сети задаются на основе правил выбора маршрута агентами, например, по кратчайшему пути, как в [10]. В более сложных моделях включается рассмотрение общественного транспорта как мест локальной скученности людей, способствующей передаче инфекции [11].

Принципы определения мотивов выбора маршрутов хорошо развиты в сфере моделирования динамики транспортных потоков на основе суточного цикла деятельности каждого индивида для выделения потребности в перемещениях. Такой подход, с одной стороны, наиболее точно отражает вторичность транспортного спроса по отношению к спросу на деятельность вне дома [12], с другой, позволяет моделировать меры, стимулирующие изменение вида транспорта и/или времени поездки, а также совместное использование транспортных средств.

В основе этих подходов лежит предположение о том, что деятельность каждого человека является результатом последовательно принятых решений, в процессе которых осуществляется дискретный выбор одной из нескольких альтернатив. Выбор каждого из вариантов определяется его привлекательностью для агента, принимающего решение. Для моделирования выбора вводится количественная оценка привлекательности рассматриваемых альтернатив, в качестве которой используется функция привлекательности. Последняя зависит от характеристик альтернатив и свойств принимающего решение. Задача усложняется тем, что помимо количественных характеристик (например, время, стоимость, выгода и т. д.) каждая альтернатива обладает и трудно формализуемыми качественными (комфортность, привычность, соответствие стилю жизни и т. д.).

В работе [13] для адекватного учета качественных характеристик используется модель скрытых переменных, в которой вводится предположение, что помимо наблюдаемых переменных существуют некие скрытые переменные, а индикаторы, характеризующие качественные характеристики альтернативы и важность той или иной характеристики для индивида, а также привлекательность альтернативы зависят как от наблюдаемых, так и от скрытых переменных. При этом в функцию привлекательности вводят случайную составляющую, отражающую:

- случайный характер принятия многих решений (влияние настроения, самочувствия и т. п.);
- неполную информированность о характеристиках альтернатив, которые также случайны, т. к. являются результатом взаимодействия многих факторов, в том числе, выбора остальных участников движения;
- неучтенную информацию о характеристиках альтернатив;
- неучтенную информацию о характеристиках принимающих решение лиц и последствия агрегирования такой информации по группам населения.

Случайная составляющая функции привлекательности необходима для адекватного моделирования принятия решений индивидами. На практике для моделирования реального распределения случайных величин или аппроксимации случайных функций используют априорно задаваемые аналитические распределения.

Описание «окружающей среды» является важным элементом модели, поскольку определяет пространство местоположений, в котором находятся и взаимодействуют агенты. Уровень сложности этого описания определяется задачами исследования и может быть как просто выделенной областью, которую можно сравнить с площадью, на которой находится толпа перемещающихся по каким-то правилам агентов (сеточная схема) [14], так и иметь сложную конфигурацию на основе картографических схем населенных пунктов или транспортных схем [15]. Так, в работе [16] схема расположения школ в городской среде использовалась для оценки сроков закрытия школ на карантин по гриппу. В некоторых работах рассматриваются и другие параметры окружающей среды, в частности, в [17] при моделировании распространения холеры учитывались температурный режим окружающей среды и гидрология территории.

Важным аспектом оценки качества модели при агентном моделировании является ее валидация. Наиболее приемлемой считается проверка на данных о характере распространения вспышек эпидемий в прошлых периодах [18]. Однако такие примеры можно найти только для случаев моделирования тех видов инфекций, по которым имеется достаточная статистика. В других ситуациях необходимо разрабатывать другие способы валидации моделей.

В текущем периоде уже появились работы со ссылкой на применение агентных моделей для моделирования COVID-19. Так, в статье [19] рассмотрен вариант общей (в терминах выше приведенной классификации Hunter et al.) модели в форме графа некоторого сетевого сообщества взаимно связанных агентов (граф Watts-Strogatz с 1000 вершинами), которые попарно взаимодействуют между собой случайным образом. В результате взаимодействия происходит инфицирование восприимчивых от заболевших. В модели учитываются не только процесс передачи инфекции, но и обратный процесс выздоровления, когда через некоторое условное время заболевшие считаются выздоровевшими, приобретая иммунитет, то есть они перестают быть переносчиками инфекции и не заражаются при контакте с инфицированными. Автор проводит аналогию с SIR-моделированием. Время в представленной модели является дискретным и измеряется «шагами» смены состояний системы, когда на каждом шаге происходит какое-то количество заражений или выздоровлений. Посредством модели-

рования проводится исследование вероятной динамики распространения инфекции в подобном сообществе и зависимость этой динамики от различных видов распределения входных параметров. Автор рассматривает также результаты исследования зависимости и масштабов эпидемии при вариациях форм сетевого сообщества, скоростей восстановления инфицированных, динамики и характера взаимодействий между агентами (часто–редко, один к одному, один ко многим, и т. п.). В процессе проведенных исследований получены, в общем-то, ожидаемо тривиальные выводы, что при уменьшении среднего числа контактов между агентами снижается скорость распространения эпидемии, что карантинные мероприятия могут дать положительный эффект, а проведение массовых мероприятий, напротив, негативный. Собственно, к моделированию непосредственно COVID-19 эта модель имеет весьма слабое отношение, поскольку подобным образом можно исследовать, например, распространение горячих новостей в интернет-сообществе или какие-то другие сходные процессы.

В отечественной литературе также появилась публикация с результатами мультиагентного моделирования процессов распространения пандемии COVID-19 [20]. Большой коллектив исполнителей под руководством Г. Рыкованова провел исследование эффективности различных подходов к моделированию пандемии, включая как традиционное решение системы дифференциальных уравнений по модели SEIRD, так и мультиагентное моделирование поведения людей в процессе их жизнедеятельности. Параметры моделей задавались экспертным путем, а результаты сопоставлялись с имеющимися данными по развитию эпидемий в таких городах, как Москва, Нью-Йорк и Ухань.

Помимо подробных результатов исследований, демонстрируемых графиками, и их сопоставления с данными статистики, приводимыми в открытых источниках, в качестве еще одного интересного результата применения мультиагентного подхода в этой работе можно считать отсылки к источникам получения данных для построения самой модели и калибровки параметров поведения агентов.

Из зарубежных работ особый интерес представляет работа [21], в которой рассмотрены процессы распространения заболевания и их влияние на экономические показатели при различных сценариях реагирования. Нужно заметить, что

в этой статье на стадии формулировки задачи и выбора методов её решения приведен достаточно детальный анализ работ других исследователей, имеющих на данном направлении и опубликованных в научных изданиях, что само по себе может представлять интерес в целях ознакомления с проблемой мультиагентного моделирования эпидемий.

В своей работе авторы опираются на традиционную модель распространения эпидемических процессов – модель SEIR. Однако используют парадигму агентного моделирования не только для оценки чисто эпидемиологических, но и экономических последствий эпидемии COVID-19. В качестве агентов в модели представлены следующие объекты: группа объектов A1 – люди, A2 – домовладения (семьи), A3 – производственные или сервисные предприятия, A4 – органы государственного управления, A5 – система здравоохранения с ее медицинскими учреждениями. Функции соответствующих агентов, позволяющие оценить степень приближений, принятых в модели, представлены ниже.

A1: Человек. Группа A1 – это основной тип агента. Его динамическое положение изменяется в зависимости от окружающей среды и может быть связано или нет (бездомный) с объектами группы A2 либо связано или нет (безработный) с объектами группы A3. В качестве атрибутов используются местоположение (динамическое), возраст, дом (A2), работодатель (A3), эпидемиологический статус, инфекционный статус, богатство, доход и положение в социальной структуре. Возможные действия: свободное перемещение (ежедневно), следование домой (ежедневно), следование на работу (ежедневно), личные контакты (ежечасно), деловые контакты (ежечасно), следование в больницу (при наличии инфицирования).

A2: Дом. Группу A2 представляют семьи, у которых одно место проживания и общие финансовые счета. В качестве атрибутов используются местоположение (статическое), социальный слой, соседи по дому (из группы A1), богатство, доходы и расходы. Агенты A2 осуществляют домашнюю регистрацию (ежедневно), ведут бухгалтерию (ежемесячно).

A3: Бизнес. Группа A3 – это экономические агенты, например, промышленность, магазины или рынки. Они взаимодействует с A1, выплачивая зарплату или продавая продукт. В качестве атрибутов используются местоположение (ста-

тическое), социальный слой, работники (группа А1), богатство, доходы и расходы. Действия включают бухгалтерский учет (ежемесячно), деловые контакты (ежечасно).

А4: Правительство. А4 – это единый агент, который получает налоги от А2 и А3, предоставляет средства А5 и страхует бездомных и безработных А1. В качестве атрибутов используются положение (статическое) и богатство. Осуществляемые действия – бухгалтерский учет (ежемесячно).

А5: Система здравоохранения. А5 – это также единственный агент (сингтон), представляющий собой систему здравоохранения в целом, которая в идеале должна быть способна обслуживать всё население (в котором объединяются возможности осуществлять контроль, выявлять больных, принимать их в больницах и лечить). Из атрибутов – только положение и богатство.

В работе рассмотрены семь сценариев возможного государственного вмешательства, которые были условно поименованы следующим образом: (1) – невмешательство (ничего не делать), (2) – блокировка, (3) – условная блокировка, (4) – вертикальная изоляция, (5) – частичная изоляция, (6) – использование масок для лица и (7) – использование масок для лица вместе с 50% социальной изоляцией. Все сценарии рассмотрены применительно к особенностям систем управления и жизнедеятельности населения в Бразилии. В модели представлена достаточно сложная структура взаимоотношений людей, организованных в семье, бизнес и правительство, которые взаимодействуют друг с другом. Для людей рассмотрены три действия: «иди на работу», «иди домой», «гуляй свободно». Для инфицированных при переходе болезни в тяжелую стадию добавляется действие «иди в больницу». Умершие в своих действиях обнуляются. При этом в качестве базового принят сценарий, который имитирует экономическое поведение общества в нормальных условиях – без пандемии. Моделирование проводится в виде почасовых итераций, в ходе которых рассматриваются взаимодействия агентов с определенными вероятностями. В ходе таких взаимодействий производится учет двух процессов. Один процесс отражает процесс распространения инфекции и протекания заболевания. Этот процесс включает:

- передачу заболевания с какой-то вероятностью от инфицированных агентов группы А1 к восприимчивым, к которым отнесены все не переболевшие агенты этой же группы, при их контакте;
- различный характер развития заболевания у отдельных агентов: либо в бессимптомной или слабой форме, либо в тяжелой форме, требующей госпитализации;
- выздоровление заболевших или их смерть с определенной вероятностью, зависящей от возраста.

Второй процесс отражает экономические процессы, влияющие на изменение богатства (доходы и расходы), условно отражающиеся в бухгалтерском учете.

Несмотря на то, что взаимодействие различных категорий агентов рассматривается весьма условно, особенно в экономических ее аспектах, подобное моделирование позволяет получить качественную картину эффективности тех или иных мер реагирования для сопоставления их между собой, что позволяет выработать соответствующие рекомендации для органов управления. Уже на таком основании видна целесообразность применения агентных моделей для выработки и оценки эффективности различных сценариев реагирования в случае эпидемий. Таким образом, на основании результатов подобной работы можно сделать вывод о возможности и осуществимости решения поставленной фундаментальной проблемы средствами мультиагентного моделирования при комплексной постановке задачи.

НОВАЯ ПАРАДИГМА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как показывает приведенная работа, в ситуации анализа эпидемических процессов большим достоинством мультиагентного моделирования является возможность проведения прогностических исследований для оценки влияния на состояние социально-экономической системы и её элементов различных вариантов изменения внешней среды (в рассматриваемом случае – появления угрозы инфицирования) при одновременном рассмотрении изменения условий функционирования агентов (например, ввода каких-то ограничительных мер).

Если подходить к формулированию задачи более детально, то для моделирования распространения инфекций, передающихся воздушно-капельным путем, к которой относится и COVID-19, необходимо прежде всего построить модель, имитирующую все возможные коммуникации людей. Люди встречаются дома, на работе, на улице, в транспорте, других общественных местах, при этом контакт может быть тесным или мимолетным, что сказывается на возможности передачи инфекции. Необходимо учитывать, что сама вероятность таких контактов предопределяется множеством параметров. Люди делятся по гендерным признакам, возрастным категориям, социальному положению, уровням дохода, профессиональной принадлежности, месту и условиям проживания, состоянию здоровья и т. д. Каждый человек одновременно может выступать в разных ролях в различных социумах (в семье, трудовом коллективе, общественном транспорте, торговой точке, дружеском застолье и т. п.). В зависимости от любого из названных факторов человек с какой-то вероятностью может оказаться в конкретное время в том или ином месте.

В качестве базовой модели необходимо выбрать нормальный режим жизнедеятельности социума, для чего имеет смысл воспользоваться известным фактом «типового распорядка». В статистически значимом большинстве каждый человек выстраивает свой день по определенному распорядку, будь то работник предприятия, который утром должен прибыть на работу к определенному времени, используя какой-то маршрут в общественном транспорте, а затем вечером вернуться домой, возможно, по другому маршруту, если есть потребность куда-либо зайти (спортзал, магазин), или это мама-домохозяйка, которая должна собрать и проводить детей в школу или садик и забрать их после смены. Отклонения от типовой схемы также имеют более-менее статистически значимый характер, имеющий сезонные колебания, – проценты заболевших, командированных, отпускников и т. п. Значения характерных величин, определяющих эти соотношения, изначально могут быть заданы на основании экспертных оценок. Однако в процессе отладки модели исходные оценки могут быть откорректированы. Коррекция значений статистически значимых параметров общей модели функционирования социума целесообразно проводить путем установления согласованности со множеством доступных фактических данных: по базам данных пас-

портных столов, ЗАГСов, учета численности школьников и т. п. – в части состава населения на изучаемой территории; по данным систем видеонаблюдения, валидаторов в общественном транспорте, регистрации транзакций на кассах торговых точек, динамике привязки мобильных телефонов к сотовым вышкам – в части активности их перемещений; по регистрации приема в поликлиниках, билетов в транспортных узлах (аэропорт, железнодорожный или автовокзал) – в части процентных отклонений от типового распорядка, и так далее. В современном мире построения цифрового общества такие возможности привлечения дополнительных данных постоянно расширяются. И чем шире будет круг привлекаемых фактических данных прямых и косвенных систем измерений, используемых для калибровки имитационной модели, тем выше будут обеспечиваться уровень её достоверности и, соответственно, прогностический и исследовательский потенциал такой модели. При дополнении этой модели другими акторами жизнедеятельности общества – субъектами экономических, социальных, общественных отношений, тесно связанными с элементарными акторами-людьми, – возможно построение модели общества, коррелированной с реальной картиной жизни. Такая модель при коррекционном уточнении её текущих параметров за счет перманентно накапливаемых разнородных данных может служить целям анализа ситуации в реальном масштабе времени, что позволяет использовать её для исследования возможного изменения обстановки при трансформации внешних условий (инфекции, погодные аномалии, экономические шоки), а также применять для прогностического изучения последствий реализации различных управленческих решений.

Разработать принципиальную архитектуру и ключевые субмодели такой комплексной модели общества, создать и апробировать алгоритмы моделирования и калибровки параметров модели вполне по силам опытному научному коллективу, однако реализовать её полномасштабную версию для практического использования без подключения административных механизмов невозможно [13]. А именно, помимо разработки математического и программно-инструментального аппарата моделирования необходимо обеспечить создание отдельной системы полноценного наполнения созданной комплексной модели и её составных частей реальными данными в постоянном режиме. Для повыше-

ния уровня адекватности комплексной модели целесообразно применение методов когнитивного моделирования и технологий искусственного интеллекта.

Возвращаясь к вопросу о новой парадигме моделирования эпидемий, имеет смысл подчеркнуть уже имеющиеся условия и постоянно наращиваемые возможности для её успешной реализации. В числе этих условий и возможностей:

- обоснованные теоретически и апробированные при решении различных задач методы мультиагентного моделирования сложных систем;
- развитые технологии высокопроизводительных вычислений, технологии облачного хранения данных, технологии дистанционных коммуникаций и удаленного доступа;
- развернутая сетевая инфраструктура взаимодействия органов государственного управления и сформулированная потребность в подобных платформенных решениях;
- интенсивное внедрение цифровых технологий во все сферы жизни общества, естественным образом способствующее производству огромного количества фактологических данных, которые могут быть использованы для калибровки моделей в условиях повседневной жизнедеятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве одного из возможных вариантов практической реализации предлагаемого подхода можно предложить следующую схему. Собственно комплексная модель социума и расчетный аппарат для его имитационного моделирования на базе высокопроизводительных вычислительных систем может разрабатываться группой специалистов прикладных академических институтов в рамках отдельной комплексной программы или государственного задания. С учетом имеющегося опыта, как нам представляется, в качестве базовых организаций для формирования такого коллектива могут выступить ЦЭМИ РАН и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Поскольку разрабатываемую модель необходимо адаптировать для применения в качестве одного из платформенных решений Системы распределенных ситуационных центров органов государственного управления, в команду разработчиков целесообразно включить также специалистов ФИЦ ИУ РАН и ИПУ РАН. Внедряемая модель в качестве одного из элементов си-

стемы поддержки управления должна быть доведена до уровня отдельных муниципальных образований. Именно на этом уровне должно производиться наполнение модели фактическими данными, первоначально путем экспертных оценок, с последующей их корректировкой и постоянной калибровкой с помощью механизмов искусственного интеллекта и обработки больших объемов разнородных данных, которые накапливаются в базах данных информационных систем, а также на основе обработки информации из социальных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацаринный А.А.* О повышении эффективности информационно-аналитической поддержки принятия стратегических решений в органах государственной власти // Межотраслевая информационная служба. 2015. № 1. С. 11–22.
2. *Балута В.И., Осипов В.П., Яковенко О.Ю.* Среда моделирования, прогнозирования и экспертиз как интеллектуальное ядро поддержки управления сложными системами // М.: Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. №82. 16 с. URL: https://keldysh.ru/papers/2015/prep2015_82.pdf
3. *Зацаринный А.А., Ильин Н.И., Колин К.К., Лепский В.Е., Малинецкий Г.Г., Новиков Д.А., Райков А.Н., Сильвестров С.Н., Славин Б.Б.* Ситуационные центры развития в полисубъектной среде // Проблемы управления. 2017. №5. С. 31–42.
4. *Ильин Н.И.* Интервью Национальному центру цифровой экономики МГУ им. М.В. Ломоносова, 10.12.2018 г. URL: <https://digital.msu.ru>
5. *Макаров В.Л., Бахтизин А.Р.* Современные методы прогнозирования последствий управленческих решений // Управленческое консультирование. 2015. №7. С. 12–24.
6. *Hunter E., Mac Namee B., Kelleher D.* A taxonomy for agent-based models in human infectious disease epidemiology // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2017. V. 20, No. 3. P. 2. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/20/3/2.html>
7. *Dunham J.B.* An agent-based spatially explicit epidemiological model in MASON // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2005. V. 9, No. 1. P. 3.

8. *Perez L., Dragicevic S.* An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread // *International Journal of Health Geographics*. 2009. V. 8. No. 50. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-50>

9. *Skvortsov A.T., Connell R.B., Dawson P.D. and Gailis R.M.* Epidemic modelling: Validation of agentbased simulation by using simplemathematical models // *MODSIM 2007 International Congress Modelling on and Simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. 2007. P. 657–662.

URL:

https://www.mssanz.org.au/MODSIM07/papers/13_s20/EpidemicModeling_s20_Skvortsov_.pdf

10. *Crooks A.T., Hailegiorgis A.B.* An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera // *Environmental Modelling&Soware*. 2014. V. 62. P. 164–77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.027>

11. *Rakowski F., Gruziel M., Bieniasz-Krzywiec L., Radomski J.P.* Influenza epidemic spread simulation for Poland – a large scale, individual based model study // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2010. V. 389 (16). P. 3149–3165. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.04.029>

12. *Armstrong J.S., Green K.C.* Demand Forecasting: Evidence-based Methods // *Strategic Marketing Management: A Business Process Approach*. 2005. V. 24. URL: https://www.researchgate.net/publication/5179920_Demand_Forecasting_Evidence-Based_Methods

13. *McFadden D.L.; Train K.* Mixed MNL Models for Discrete Response // *Journal of Applied Econometrics*. 2000. V. 15. No. 5. P. 447–470.

URL: [https://doi.org/10.1002/1099-1255\(200009/10\)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1099-1255(200009/10)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1)

14. *Duan W., Qiu X., Cao Z., Zheng X., Cui K.* Heterogeneous and stochastic agent-based models for analyzing infectious diseases' super spreaders // *IEEE Intelligent Systems*. 2013. V. 13. P. 1541–1672.

15. *Mao L.* Modeling triple-diusions of infectious diseases, information, and preventive behaviors through a metropolitan social network – an agent-based simulation // *Applied Geography*. 2014. V. 50. P. 31–39.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.02.005>

16. Lee B.Y., Brown S.T., Cooley P., Potter M.A., Wheaton W.D., Voorhees R.E., Stebbins S., Grefenstette J.J., Zimmer S.M., Zimmerman R.K., Assi T.-M., Bailey R.R., Wagener D.K., Burke D.S. Simulating school closure strategies to mitigate an influenza epidemic // *Journal of Public Health Management and Practice*. 2008. V. 16. No. 3. P. 252–261. URL: <https://doi.org/10.1097/PHH.0b013e3181ce594e>

17. Crooks A.T., Hailegiorgis A.B. An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera // *Environmental Modelling & Software*. 2014. V. 62. P. 164–177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.027>

18. Merler S., Ajelli M., Fumanelli L., Gomes M.F.C., Y Piontti A.P., Rossi L., Chao D.L., Jr I. M.L., Halloran M.E., Vespignani A. Spatiotemporal spread of the 2014 outbreak of ebola virus disease in Liberia and the effectiveness of non-pharmaceutical interventions: A computational modelling analysis. *The Lancet Infectious Diseases*. 2015. V. 15. No. 2. P. 204–211. URL: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(14\)71074-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)71074-6)

19. Wolfram C. An Agent-Based Model of COVID-19 // *Complex Systems*. 2020. V. 29. No. 1. P. 87–105. URL: <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.29.1.87>

20. Адарченко В.А. и др. Моделирование развития эпидемии коронавируса по дифференциальной и статистической моделям // Снежинск. Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. 2020. Препринт №264. 29 с. URL: <http://vniitf.ru/data/files/pdf/corona.pdf>

21. Silva P.C.L., Batista P.V.C., Lima H.S., Alves M.A., Guimarães F.G., Silva R.C.P. COVID-ABS: An agent-based model of COVID-19 epidemic to simulate health and economic effects of social distancing interventions // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020. P. 37. E-print: arXiv:2006.10532 [cs.AI] URL: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110088>

SUGGESTIONS FOR DEVELOPING TOOLS TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS OF MANAGEMENT IN THE CONTEXT OF EPIDEMICS

V. I. Baluta^{1,2}, V. P. Osipov¹, T. V. Sivakova^{1,2}

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow

²Plekhanov Russian University of Economics, Moscow

vbaluta@keldysh.ru, osipov@keldysh.ru, sivakova15@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the consideration of methods for modeling epidemics in relation to COVID-19 and substantiation of ways to improve the efficiency of management decisions, taking into account the predicted consequences. The paper provides an overview of modeling methods for predicting and assessing the consequences of the epidemiological situation. The scientific novelty of the work lies in the use of decision support tools for the operational assessment of the situation and forecast of its development. For the task at hand, it is proposed to use a multi-agent approach to simulation.

Keywords: *decision support, epidemic situation, supercomputer modeling, socio-economic consequences, mathematical models, multi-agent approach*

REFERENCES

1. Zacarinniy A.A. O povyshenii effektivnosti informacionno-analiticheskoy podderzhki prinyatiya strategicheskikh reshenij v organah gosudar-stvennoj vlasti // Mezhotraslevaya informacionnaya sluzhba. 2015. № 1. S. 11–22.
2. Baluta V.I., Osipov V.P., Yakovenko O.YU. Sreda modelirovaniya, prognozirovaniya i ekspertiz kak intellektual'noe yadro podderzhki upravleniya slozhnymi sistemami // M.: Preprinty IPM im. M.V. Keldysha. 2015. №82. 16 s. URL: https://keldysh.ru/papers/2015/prep2015_82.pdf
3. Zacarinniy A.A., Il'in N.I., Kolin K.K., Lepskij V.E., Malinec-kij G.G., Novikov D.A., Rajkov A.N., Sil'vestrov S.N., Slavin B.B. Situacionnye centry razvitiya v polisub'ektnoj srede // Problemy upravleniya. 2017. №5. S. 31–42.
4. Il'in N.I. Interv'yu Nacional'nomu centru cifrovoj ekonomiki MGU im. M.V. Lomonosova, 10.12.2018 g. URL: <https://digital.msu.ru>

5. *Makarov V.L., Bahtizin A.R.* Sovremennye metody prognozirovaniya posledstvij upravlencheskih reshenij // Upravlencheskoe konsul'tirovanie. 2015. №7. S. 12–24.

6. *Hunter E., Mac Namee B., Kelleher D.* A taxonomy for agent-based models in human infectious disease epidemiology // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2017. 20(3) 2. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/20/3/2.html>

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

8. *Perez L., Dragicevic S.* An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread // International Journal of Health Geographics. 2009. V. 8. No. 50. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-50>

9. *Skvortsov A.T., Connell R.B., Dawson P.D. and Gailis R.M.* Epidemic modelling: Validation of agentbased simulation by using simplemathematical models // MODSIM 2007 International Congress Modelling on and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. 2007. P. 657–662. URL: https://www.mssanz.org.au/MODSIM07/papers/13_s20/EpidemicModeling_s20_Skvortsov_.pdf

10. *Crooks A.T., Hailegiorgis A.B.* An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera // Environmental Modelling&Soware. 2014. V. 62. P. 164–77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.027>

11. *Rakowski F., Gruziel M., Bieniasz-Krzywiec L., Radomski J.P.* Influenza epidemic spread simulation for Poland – a large scale, individual based model study // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2010. V. 389 (16). P. 3149–3165. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.04.029>

12. *Armstrong J.S., Green K.C.* Demand Forecasting: Evidence-based Methods // Strategic Marketing Management: A Business Process Approach. 2005. V. 24. URL: https://www.researchgate.net/publication/5179920_Demand_Forecasting_Evidence-Based_Methods

13. *Mcfadden D.L.; Train K.* Mixed MNL Models for Discrete Response // Journal of Applied Econometrics. 2000. V. 15. No. 5. P. 447–470. URL: [https://doi.org/10.1002/1099-1255\(200009/10\)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1099-1255(200009/10)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1)

14. *Duan W., Qiu X., Cao Z., Zheng X., Cui K.* Heterogeneous and stochastic agent-based models for analyzing infectious diseases' super spreaders // *IEEE Intelligent Systems*. 2013. V. 13. P. 1541–1672.

15. *Mao L.* Modeling triple-diffusions of infectious diseases, information, and preventive behaviors through a metropolitan social network – an agent-based simulation // *Applied Geography*. 2014. V. 50. P. 31–39.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.02.005>

16. *Lee B.Y., Brown S.T., Cooley P., Potter M.A., Wheaton W.D., Voorhees R.E., Stebbins S., Grefenstette J.J., Zimmer S.M., Zimmerman R.K., Assi T.-M., Bailey R.R., Wagener D.K., Burke D.S.* Simulating school closure strategies to mitigate an influenza epidemic // *Journal of Public Health Management and Practice*. 2008. V. 16. No. 3. P. 252–261. URL: <https://doi.org/10.1097/PHH.0b013e3181ce594e>

17. *Crooks A.T., Hailegiorgis A.B.* An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera // *Environmental Modelling & Software*. 2014. V. 62. P. 164–177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.027>

18. *Merler S., Ajelli M., Fumanelli L., Gomes M.F.C., Y Piontti A.P., Rossi L., Chao D.L., Jr I. M.L., Halloran M.E., Vespignani A.* Spatiotemporal spread of the 2014 outbreak of ebola virus disease in Liberia and the effectiveness of non-pharmaceutical interventions: A computational modelling analysis. *The Lancet Infectious Diseases*. 2015. V. 15. No. 2. P. 204–211.

URL: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(14\)71074-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)71074-6)

19. *Wolfram C.* An Agent-Based Model of COVID-19 // *Complex Systems*. 2020. V. 29. No. 1. P. 87–105.

URL: <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.29.1.87>

20. *Adarchenko V.A. i dr.* Modelirovanie razvitiya epidemii koronavirusa po differencial'noj i statisticheskoj modelyam // *Snezhinsk. Izd-vo RYAC-VNIITF*. 2020. Preprint №264. 29 s. URL: <http://vniitf.ru/data/files/pdf/corona.pdf>

21. *Silva P.C.L., Batista P.V.C., Lima H.S., Alves M.A., Guimarães F.G., Silva R.C.P.* COVID-ABS: An agent-based model of COVID-19 epidemic to simulate health and economic effects of social distancing interventions // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020. P. 37. E-print: arXiv:2006.10532 [cs.AI]

URL: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110088>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



БАЛУТА Виктор Иванович – старший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, к. т. н., с.н.с.;

Victor Ivanovich BALUTA – Keldysh Institute of Applied Mathematics, senior research, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor.

vbaluta@keldysh.ru; ORCID: 0000-0002-4399-0943



ОСИПОВ Владимир Петрович – ведущий научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, к. т. н., доцент;

Vladimir Petrovich OSIPOV – Keldysh Institute of Applied Mathematics, lead researcher, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor.

osipov@keldysh.ru; ORCID: 0000-0002-8237-1053



СИВАКОВА Татьяна Владимировна – научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН;

Tatiana Vladimirovna SIVAKOVA – Keldysh Institute of Applied Mathematics, research.

email: sivakova15@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8026-2198

Материал поступил в редакцию 27 ноября 2020 года