

Технология комплексного моделирования эпидемиологической обстановки

В.И. Балута^{1,2}, В.П. Осипов¹, Т.В. Сивакова^{1,2}

¹ ИИМ им. М.В. Келдыша РАН

² Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова

Аннотация. Статья посвящена актуальнейшей на сегодняшний день проблеме – эпидемии коронавирусной инфекции (COVID-19). 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

Title Technology for comprehensive modeling of the epidemiological situation

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

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences)

² Plekhanov Russian University of Economics

Abstract. The article is devoted to the most pressing problem today - the epidemic of coronavirus infection (COVID-19). 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 to quickly assess the situation and forecast its development. For the task, it is proposed to use the multi-agent approach of simulation.

Keywords: decision support, epidemic situation, supercomputer modeling, socio-economic consequences, mathematical models

1. 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 принимавшихся в оперативном порядке мер реагирования. 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 осложнили 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, с 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 предпринятых 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.

2. Эволюция подходов к моделированию эпидемий

Известно, что попытки применения математического аппарата для оценки последствий и прогнозирования эпидемий имеют почти трехвековую историю. Описание эволюции этих представлений присутствует в ряде работ исследователей. Так, в лекции профессора Боева Б.В. [1] отмечено, что первая модель расчета эпидемий была предложена еще в середине XVIII века Д.Бернулли, в которой он оценивал эффективность профилактических прививок против натуральной оспы. Следующей известной публикацией стали статистические показатели смертности населения Англии от эпидемии натуральной оспы У.Фарра, который не просто обобщил, но и построил прогностическую модель эпидемии. Статистический подход У.Фарра был развит Дж.Браунли, который анализировал закономерности эпидемиологических показателей с помощью развивавшихся в тот период методов математической статистики. Как отмечает Б.Боев, альтернативу статистическим подходам предложил Енько П.Л., опубликовавший в 1889 г. статью в издававшемся в С-Петербурге журнале «Врач». Его аналитический подход был развит в Англии в работах Росса и Хадсона. Боев отмечает, что эти разработки начала XX века сформировали основу современной теории математического моделирования эпидемий, включая первые прогностические модели в виде аналитических формул для прогнозирования конкретных видов болезней (корь, ветрянка, малярия и др.).

Несколько дополнительных примеров из истории развития методов математического моделирования, которые внесли вклад в формирование современного уровня моделирования эпидемий путем решения интегро-дифференциальных уравнений, приведены в [2]. Авторы помимо вклада Росса и Хадсона упоминают значение работ Хоппэнстэда, который обратил внимание на роль возрастных параметров и предложил несколько видов дифференциальных систем, описывающих динамику передачи болезни на основе поиска базовых репродуктивных чисел (то есть среднего количества заразившихся от одного больного).

Наиболее значимый этап в развитии теории моделирования эпидемий связан с появлением электронно-вычислительных машин, позволивших создавать модели значительно более сложные, чем ранее.

Особое внимание в обзоре Боева Б.В. уделено модели, разработанной академиком О.В. Барояном и профессором Л.А. Рвачевым. Ими была разработана новая методология математического моделирования эпидемий, базирующаяся на методе научной аналогии в отображении эпидемического процесса, в рамках которого «перенос» возбудителей инфекции от больных к здоровым предлагалось описывать с помощью уравнений математической физики, описывающих «перенос» материи [3]. Авторы использовали сложившиеся подходы эпидемиологов к описанию

темпов распространения инфекций между контактирующими людьми, дополнив ее описанием миграции самих носителей инфекции. Первая часть описывает динамику передачи возбудителей инфекции внутри популяции SEIR-моделью Кермака-Маккендрика, вторая - учитывает динамику территориального перемещения индивидов, опирающуюся на экспериментальные данные. Выведенная ими система нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями имела тот же вид, что и уравнения гидродинамики. А это позволило использовать достаточно хорошо разработанные к тому времени и апробированные численные методы при их решении на ЭВМ. В течение длительного времени упомянутая модель была основной при прогнозировании динамики распространения гриппа в стране. Тем не менее, поскольку многие эмпирические коэффициенты модели были откалиброваны по данным о миграционных потоках населения, после распада СССР она утратила свою адекватность.

Тем не менее, «эпидемиологическая часть» модели, основанная на классической популяционной SEIR-модели Кермака-Маккендрика, лежит в основе и большинства современных подходов. Наименование SEIR-модели связано с используемыми в ней базовыми параметрами – посредством системы интегро-дифференциальных уравнений описывается процесс динамики в популяции следующих групп индивидов [4]: S – доля восприимчивых индивидов, E – доля индивидов в инкубационном периоде, I – доля инфекционных больных, R – доля иммунных индивидов.

Современный этап в развитии моделирования эпидемий в большей степени связан с быстрым прогрессом в области компьютерных технологий. Обзор современного состояния наиболее значимых и употребительных подходов к прогнозированию инфекционной заболеваемости и развития эпидемического процесса приведен в статье [5], в которой приведено описание подходов и дана их краткая характеристика. В частности, рассмотрены методы классического регрессионного анализа, исследования временных рядов на базе фильтрации, байесовские и искусственные нейронные сети, рассуждения на основе прецедентов, а также перечислены современные направления разработки математических моделей распространения заболевания: классические аналитические модели, детерминированные и стохастические методы, новые подходы имитационного моделирования, включая сетевые и агентные, рассмотрен и описанный выше биологический подход, включающий моделирование эпидемических показателей с помощью систем дифференциальных уравнений. Автор отмечает ограниченность каждого из подходов и постулирует эффективность применения смешанных техник прогнозирования, основанных на совместном использовании различных методов.

Анализ современных публикаций на тему моделирования эпидемий показывает, что наиболее часто используемые модели базируются на описании рассматриваемых в них процессов системами нелинейных ОДУ на основе популяционной модели Кермака-Маккендрика в различных вариациях. Этот подход сопровождается заданием некоторого набора начальных условий и большого числа параметров, которые, как правило, определяются весьма субъективно. На наш взгляд, именно последнее обстоятельство приводит к существенному разбросу получаемых различными исследователями результатов, что существенно снижает прогностическую ценность таких моделей¹.

Что касается других подходов, то можно отметить, что классические методы обработки временных рядов [6] эффективны при прогнозировании динамики инфекций, имеющих сезонный характер проявления, например, таких, как ОРВИ, когда есть возможность использования больших объемов ретроспективных исторических данных, но бесполезны при прогнозировании характера проявления новых видов инфекций. А приобретающие в последние годы большую популярность нейросетевые подходы [7,8] нуждаются в больших выборках для обучения ИНС, особенно виду часто наблюдаемой сильной «зашумленности» получаемых на практике данных, что делает их малоприменимыми для целей оперативного прогнозирования при необходимости выработки решений в ранее не наблюдавшихся ситуациях.

Кроме того, ключевым обстоятельством, которое, по нашему мнению, обуславливает необходимость поиска новых альтернативных подходов к моделированию эпидемиологической обстановки, является то, что все существующие на сегодня методы в своей основе ориентированы преимущественно на описание исключительно эпидемических процессов, вне их взаимообусловленности с жизнедеятельностью общества, что не позволяет использовать их для оценки последствий различных вариантов противоэпидемических мероприятий при принятии управленческих решений.

На основе приведенного обзора можно констатировать, что, с одной стороны, в научной среде создан обширный фундаментальный задел для моделирования динамики эпидемиологической обстановки. С другой стороны, опыт борьбы с пандемией COVID-19 показал, что в условиях подобных эпидемий одного «академического» взгляда на проблему явно недостаточно. Необходимо в комплексе моделировать и прогнозировать возможные социальные и экономические последствия не только самой

¹ Собственно, подобный разброс со ссылками на разные источники наблюдался нами воочию в текущем году на начальном этапе развития пандемии по различным новостным публикациям в СМИ.

эпидемии, но и предпринимаемых защитных мер, причем на уровне, позволяющем находить сбалансированные управленческие решения.

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 [9,10]. 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 [11, 12]. Между тем, как следует из вышеприведенного обзора, предпосылки для ее 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.

3. Новая парадигма моделирования

По нашему мнению, в качестве базового подхода при такой постановке вопроса представляет интерес упоминавшийся выше мультиагентный подход имитационного моделирования, реализуемый в концепции агентно-ориентированных моделей (АОМ) [13]. 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 проявляется через результат действия совокупности самостоятельных акторов. АОМ позволяют смоделировать систему, наиболее приближенную к реальности. Известно, что применение мультиагентных подходов в разработке имитационных моделей хорошо зарекомендовало себя в задачах, в которых индивидуальное поведение 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).

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, в 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, по возрастным категориям, по социальному положению, по уровням дохода, по профессиональной принадлежности, по месту и условиям проживания, по состоянию здоровья, и т.д. Каждый человек одновременно может выступать в разных ролях в различных социумах (в семье, в трудовом коллективе, в общественном транспорте, в торговой точке, в 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, – процент заболевших, процент командированных, процент 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 откорректированы. Коррекция значений статистически значимых параметров общей модели функционирования социума целесообразно проводить путем установления согласованности со множеством доступных фактических данных: по базам данных паспортных 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 постоянно расширяются. И чем шире будет круг привлекаемых фактических данных прямых и косвенных систем измерений, используемых для калибровки имитационной модели, тем выше будет 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 полнокровного наполнения созданной комплексной модели [14], и её составных частей реальными данными в постоянном режиме. Для повышения 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.

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. 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 системы поддержки управления должна быть доведена до уровня отдельных муниципальных образований. Именно на этом уровне должно производиться наполнение модели фактическими данными, первоначально путем экспертных оценок, а в последующем их корректировкой и постоянной калибровкой с помощью механизмов искусственного интеллекта и обработки больших объемов разнородных данных подключаемых информационных систем и баз данных.

Литература

1. Боев Б.В. Прогнозно-аналитические модели эпидемий (оценка последствий техногенных аварий и природных катастроф), лекция, 2005. — <http://www.armscontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf> (обращение 15.05.2020).
2. Баталин Р.М., Терлецкий В.А. Оптимальное управление в моделях эпидемий трансмиссивных заболеваний с SEI-SEIR системами // Известия ИГУ, серия «Математика». — Т.14. — С.18-30.
3. Бароян О.В., Рвачев Л.А. Математика и эпидемиология. — М.: Знание, 1977.— 63 с.

4. Боев Б.В. Современные этапы математического моделирования процессов развития и распространения инфекционных заболеваний // Эпидемиологическая кибернетика: модели, информация, эксперименты. М.: 1991. — С. 6-13.
5. Кондратьев М.А. Методы прогнозирования и модели распространения заболеваний // Компьютерные исследования и моделирование, 2013. — Т. 5, № 5. — С. 863-882.
6. Тарасова С.А. Прогнозирование временного ряда инфекционной заболеваемости // Программные продукты и системы, 2019. — Т. 32, № 2. — С. 337–342.
7. Головинова В.Ю., Киреев С.Г., Котенко П.К., Минаев Ю.Л., Штамбург И.Н., Кузьмин С.Г. Нейросетевые модели прогнозирования заболеваемости в организованных коллективах // Вестн. Российской воен.-мед. акад., 2014. — № 3. — С. 150–154.
8. Ефимова Н. В., Горнов А. Ю., Зароднюк Т. С. Опыт использования искусственных нейронных сетей при прогнозировании заболеваемости населения (на примере г. Братска) // Экология человека, 2010. — № 3. — С. 3-7.
9. Зацаринный А.А. О повышении эффективности информационно-аналитической поддержки принятия стратегических решений в органах государственной власти // Межотраслевая информационная служба, 2015. — № 1. — С. 11—22.
10. Балута В.И., Осипов В.П, Яковенко О.Ю. Среда моделирования, прогнозирования и экспертиз как интеллектуальное ядро поддержки управления сложными системами // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. — 2015. — №82. — 16 с. URL: https://keldysh.ru/papers/2015/prep2015_82.pdf
11. Зацаринный А.А., Ильин Н.И., Колин К.К., В.Е. Лепский, 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.
12. Ильин Н.И. Интервью Национальному центру цифровой экономики МГУ им. М.В. Ломоносова, 10.12.2018 г. URL: <https://digital.msu.ru> (обращение 15.05.2020).
13. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Современные методы прогнозирования последствий управленческих решений. Управленческое консультирование. — 2015. — №7. — С.12-24.
14. Cisse P.A., Dembele J.M., Lo M., Cambier C. Multi-agent Systems for Epidemiology: Example of an Agent-Based Simulation Platform for Schistosomiasis. In: Bajo J. et al. (eds) // Highlights of Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems. — PAAMS 2017. — Communications in Computer and Information Science, 2017. — Vol. 722, Springer, Cham. . — P.157-168. DOI: 10.1007/978-3-319-60285-1_13

References

1. Boev B.V. Prognozno-analiticheskie modeli epidemii (otsenka posledstviiv tekhnogennykh avarii i prirodnykh katastrof), lektsiia, 2005. — <http://www.armscontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf> (accessed 15.05.2020).
2. Batalin R.M., Terletskii V.A. Optimalnoe upravlenie v modeliakh epidemii transmissivnykh zabolevanii s SEI-SEIR sistemami // Izvestiia IGU, seriia «Matematika». — T.14. — С.18-30.
3. Baroian O.V., Rvachev L.A. Matematika i epidemiologiia. – M.: Znanie, 1977.– 63 s.
4. Boev B.V. Sovremennye etapy matematicheskogo modelirovaniia protsessov razvitiia i rasprostraneniia infektsionnykh zabolevanii // Epidemiologicheskaiia kibernetika: modeli, informatsiia, eksperimenty. M.: 1991. — S. 6-13.
5. Kondratev M.A. Metody prognozirovaniia i modeli rasprostraneniia zabolevanii // Kompiuternye issledovaniia i modelirovanie, 2013. — T. 5, № 5. — S. 863-882.
6. Tarasova S.A. Prognozirovanie vremennogo riada infektsionnoi zabolevaemosti // Programmnye produkty i sistemy, 2019. — T. 32, № 2. — S. 337–342.
7. Golovina V.Iu., Kireev S.G., Kotenko P.K., Minaev Iu.L., Shtamburg I.N., Kuzmin S.G. Neurosetevye modeli prognozirovaniia zabolevaemosti v organizovannykh kollektivakh // Vestn. Rossiiskoi voen.-med. akad., 2014. — № 3. — S. 150–154.
8. Efimova N. V., Gornov A. Iu., Zarodniuk T. C. Opyt ispolzovaniia iskusstvennykh neironnykh setei pri prognozirovanii zabolevaemosti naseleniia (na primere g. Bratska) // Ekologiia cheloveka, 2010. — № 3. — С. 3-7.
9. Zatsarinnyi A.A. O povyshenii effektivnosti informatsionno-analiticheskoi podderzhki priniatiia strategicheskikh reshenii v organakh gosudarstvennoi vlasti // Mezhotraslevaia informatsionnaia sluzhba, 2015. — № 1. — S. 11—22.
10. Baluta V.I, Osipov V.P., Iakovenko O.Iu. Sreda modelirovaniia, prognozirovaniia i ekspertiz kak intellektualnoe iadro podderzhki upravleniia slozhnymi sistemami // Preprinty IPM im.M.V.Keldysha. — 2015. — №82. — 16 s. URL: https://keldysh.ru/papers/2015/prep2015_82.pdf
11. Zatsarinnyi A.A., Ilin N.I., Kolin K.K., Lepskii V.E., Malinetskii G.G., Novikov D.A., Raikov A.N., Silvestrov S.N., Slavin B.B. Situatsionnye tsentry razvitiia v polisubiektnoi srede // Problemy upravleniia, 2017. — №5. — S.31-42.
12. Ilin N.I. Interviu Natsionalnomu tsentru tsifrovoy ekonomiki MGU im. M.V. Lomonosova, 10.12.2018 g. URL: <https://digital.msu.ru> (accessed 15.05.2020).

13. Makarov V. L., Bakhtizin A. R. Sovremennye metody prognozirovaniia posledstviu upravlencheskikh reshenii. Upravlencheskoe konsultirovanie. — 2015. — №7. — S.12-24.
14. Cisse P.A., Dembele J.M., Lo M., Cambier C. Multi-agent Systems for Epidemiology: Example of an Agent-Based Simulation Platform for Schistosomiasis. In: Bajo J. et al. (eds) // Highlights of Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems. — PAAMS 2017. — Communications in Computer and Information Science, 2017. — Vol. 722, Springer, Cham. . — P.157-168. DOI: 10.1007/978-3-319-60285-1_13