

JEL: E27, C63, I18
УДК 004:94; 614:45

<https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.3.007-041>

Агент-ориентированное моделирование распространения эпидемий и их влияния на экономику регионов России

А.А. Машкова, А.Р. Бахтизин

Машкова Александра Леонидовна

кандидат технических наук
старший научный сотрудник лаборатории компьютерного моделирования социально-экономических процессов

Центральный экономико-математический институт РАН, Нахимовский пр-т, 47, Москва, 117418, Российская Федерация

E-mail: aleks.savina@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1701-5324

Бахтизин Альберт Рауфович

доктор экономических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН

директор

Центральный экономико-математический институт РАН, Нахимовский пр-т, 47, Москва, 117418, Российская Федерация

E-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9649-0168

Аннотация. Предметом данного исследования является оценка влияния ограничительных мер на процесс распространения эпидемии, доступность медицинской помощи и экономику регионов. Цель исследования состоит в разработке соответствующего инструмента на основе методов агент-ориентированного и ситуационного моделирования, а также проведении серии экспериментов для прогнозирования распространения вируса при различных сочетаниях противоэпидемических мер и оценки экономических последствий этих мер. Разработанная агент-ориентированная модель распространения эпидемий является частью программного комплекса МЕБИУС, в котором воспроизводится население, занятость, производство и сфера услуг, образовательная и бюджетная системы. Новыми функциями в модели стало распространение и регулирование заболеваемости через различные ограничительные меры и соответствующие изменения в работе организаций и образе жизни (обучении, работе, общении) агентов-жителей. Возможные сочетания карантинных мер были сгруппированы в сценарии отсутствия ограничений, мягких и жестких ограничений, соблюдаемых 40, 80 или 100% жителей. При отсутствии ограничений число заболевших достигает 22 миллионов, из них 876 тысяч смертей. В условиях мягких ограничений число заболевших снижается до 4,5 миллионов; умерших – до 138 тысяч. При полном соблюдении жестких ограничений заболевших менее миллиона, умерших – 26,5 тысячи. В условиях эпидемии даже при отсутствии ограни-

чений в российской экономике наблюдается спад в пределах 2% ВВП. При введении ограничений спад составляет 2,6–4,4% ВВП, заметнее всего в крупных городах (до –5,9% ВВП). Наименьшее влияние вводимые меры имеют на экономику регионов Северо-Кавказского федерального округа. Аналогичные тенденции характерны и для занятости.

Ключевые слова: агент-ориентированная модель, дискретно-ситуационная сеть, программный комплекс, эпидемия, смертность, карантинные ограничения, регион, валовой региональный продукт, занятость, Россия

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-15-2024-525 от 23.04.2024.

Для цитирования: Машкова А.А., Бахтизин А.Р. Агент-ориентированное моделирование распространения эпидемий и их влияния на экономику регионов России // Пространственная экономика. 2025. Т. 21. № 3. С. 7–41. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.3.007-041>

Agent-Based Modeling of Epidemics and Their Impact on the Economy of Russian Regions

A.L. Mashkova, A.R. Bakhtizin

Alexandra Leonidovna Mashkova

Candidate of Technical Sciences

Senior Researcher at the Laboratory of Computer Modeling of Socio-Economic Processes

Central Economics and Mathematics Institute RAS, 47 Nakhimovsky Av., Moscow, 117418, Russian Federation

E-mail: aleks.savina@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1701-5324

Albert Raufovich Bakhtizin

Doctor of Economics, Corresponding Member of the RAS, Professor of the RAS

Director

Central Economics and Mathematics Institute RAS, 47 Nakhimovsky Av., Moscow, 117418, Russian Federation

E-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9649-0168

Abstract. The subject of this study is assessing impact of restrictive measures on the spread of epidemics, availability of medical care and economy of regions. The purpose of the study is to develop an appropriate tool based on agent-based and situational modeling methods, as well as to conduct series of experiments to predict spread of a virus with various combinations of anti-epidemic measures, and assess economic consequences of these measures. The developed agent-based model of epidemics is part of the MEBIUS software package, which reproduces population, employment, production and services, educational and budgetary systems. New functions in the model are regulation of morbidity through various restrictive measures and corresponding changes in the work of organizations and lifestyle (training, work, communication) of agent residents. Possible combinations of quarantine measures were grouped into scenarios of no restrictions, soft and hard restrictions observed by 40, 80 or 100% of residents. In the absence of

restrictions, the number of cases reaches 22 million, of which 876 thousand deaths. Under soft restrictions, the number of cases drops to 4.5 million; deaths to 138 thousand. With full compliance with strict restrictions, there are less than a million cases and 26.5 thousand deaths. Under epidemic conditions, even without restrictions, the Russian economy is experiencing a decline of 2% of GDP. With restrictions, the decline is 2.6–4.4% of GDP, most noticeable in large cities (up to –5.9% of GRP). The introduced measures have the least impact on the economy of the North Caucasus Federal District.

Keywords: agent-based model, discrete situational network, software package, epidemic, mortality, quarantine restrictions, region, gross regional product, employment, Russia

Acknowledgements. The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of Project No. 075-15-2024-525 dated 23.04.2024.

For citation: Mashkova A.L., Bakhtizin A.R. Agent-Based Modeling of Epidemics and Their Impact on the Economy of Russian Regions. *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*, 2025, vol. 21, no. 3, pp. 7–41. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.3.007-041> (In Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Вспышка эпидемии коронавируса в 2020 г. стала шоком для жителей планеты и всей мировой экономики, став беспрецедентной в новейшей истории. Современный уровень развития медицины представлялся таким высоким, что мог справиться с осложнениями любого вируса, передающегося воздушно-капельным путем, однако на практике это оказалось не так. Для лечения тяжелых случаев необходима была высокотехнологичная медицинская помощь – аппараты искусственной вентиляции легких и специальные палаты, количество которых было ограничено, особенно в периферийных регионах. Это поставило перед обществом как социальную, так и этическую проблему: медицинские учреждения не смогли бы справиться с потоком тяжелобольных, если бы распространение вируса не было ограничено специальными мерами, в первую очередь самоизоляцией населения на пиках роста заболеваемости. В итоге коронавирус имел несколько волн усиления темпов заболеваемости, но при этом большую часть времени система здравоохранения справлялась с помощью больным, в том числе с тяжелым течением заболевания. Экономической ценой этих мер стал спад, особенно тяжелый в сфере услуг и развлечений, снижение доходов населения и рост безработицы, наиболее заметные в крупных городах. Первые исследования влияния этих мер на российскую экономику появились уже через несколько месяцев после начала пандемии и давали оценку как масштаба сложностей (доли попавшей под ограничения экономической деятельности, снижение объемов импорта комплектующих из различных стран), так и обусловленного ими спада ВВП и роста бюджетных расходов (Минакир, 2020). В 2021-м – начале 2022 гг. перечень исследуемых вопросов расширился и

включал реакцию бизнеса и правительства на распространение эпидемии, эффективность господдержки компаний и работы Банка России, ускоренное развитие отдельных отраслей (в первую очередь фармацевтической и технологий цифровизации бизнес-процессов) (Ответ..., 2022).

Несмотря на то что вектор социально-экономических исследований в последние годы изменил направление в сторону изучения внешнеполитической обстановки, ее финансовых и торговых последствий для России, прогнозирование эпидемий должно сохранять свое место, поскольку новые опасные вирусы могут появиться так же неожиданно, как это случилось с COVID-19 (De Araújo et al., 2025), а в мировом сообществе не приходится ожидать такого единения, которое наблюдалось в 2020 г. перед лицом коронавируса, что осложнит экономические последствия ограничительных мер.

Актуальной задачей, таким образом, становится разработка методологии и инструментария, позволяющего в современных социально-экономических условиях оценить последствия распространения вируса и возможных ограничительных мер и их влияние на экономику регионов. Для ее решения мы выбрали методы агент-ориентированного и ситуационного моделирования.

Агент-ориентированное моделирование (АОМ) распространения эпидемий ведет свою историю от Дж. Эпштейна, который в 2002 г. применил этот подход для оценки террористической опасности от распространения оспы через споры, вложенные в почтовые отправления (Epstein et al., 2002). Первоначально модель отражала течение вспышек эпидемии в небольших городах, а позднее была адаптирована для крупных городов и стран (Parker, Epstein, 2011). В дальнейшем агент-ориентированный подход часто применялся при моделировании различных вспышек эпидемий (Hunter et al., 2017), как теоретически возможных (Aleman et al., 2011), так и реальных: гриппа в Пенсильвании, США (Lee et al., 2008), Эболы в Либерии (Merler et al., 2015) и H1N1 в Мехико (Friás-Martínez et al., 2011).

Всплеск интереса к разработке АОМ эпидемий произошел с началом пандемии коронавируса в 2020 г., только за этот год было опубликовано 126 работ по этой теме в рецензируемых журналах и в виде препринтов, что позволило ускорить процесс публикации (Lorig et al., 2021). В этот период основное внимание исследователей было сосредоточено на влиянии ограничительных мер: перевода обучения в школах и университетах на дистанционный формат (Abdollahi et al., 2020), соблюдения дистанции (Bouchnita, Jebrane, 2020; Braun et al., 2020) и карантина для зараженных (Currie et al., 2020; Braun et al., 2020; Firth et al., 2020; Aleta et al., 2020), а также режима самоизоляции всего населения (Currie et al., 2020; Churches et al., 2020). В последующие годы акцент исследования сместился на вопросы вакцинации, в особенности важности личного выбора в данном решении (Li, Jager,

2023; Zhang et al., 2025). Вопросы введения ограничительных мер рассматриваются больше с точки зрения того, как они влияют на свободу индивида, чем на распространение вируса или экономику (Ale Ebrahim Dehkordi et al. 2024; Wildman et al., 2024; Kreulen et al., 2022). Таким образом, можно заключить, что экономические аспекты связанных с распространением эпидемий ограничений не являются предметом изучения в АОМ.

Агент-ориентированным моделированием распространения эпидемий ЦЭМИ РАН занимается с 2020 г., в первых работах основное внимание уделяется самому процессу распространения заболевания (Макаров и др., 2020а), а задачей нового исследования стала оценка последствий эпидемий для российской экономики и общества. В данной работе ставится задача оценки влияния различных наборов ограничительных мер на процесс распространения эпидемии и доступность медицинской помощи для зараженных с тяжелой формой заболевания, а также последствий этих мер для экономики регионов России.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Агент-ориентированная модель распространения эпидемий основана на модели искусственного общества, реализованной в программном комплексе МЕБИУС (Макаров и др., 2020б). Искусственное общество состоит из агентов-жителей, сгруппированных в домохозяйства, обучающихся в образовательных учреждениях и работающих в различных отраслях экономики: сельском хозяйстве, производстве, торговле и сфере услуг.

Формирование искусственного общества осуществляется в следующем порядке: сначала создаются регионы модели, затем инициализируются агенты, распределяются между домохозяйствами и расселяются по регионам. Создаются и закрепляются за регионами организации различных отраслей и рабочие места, с которыми связываются агенты-работники. В модели функционируют организации трех типов: коммерческие, бюджетные и финансовые. При создании коммерческих организаций инициализируются их объемы выпуска и поставки по значениям базового года моделирования. В организациях отрасли «Образование» создаются образовательные места различных ступеней (школа, среднее профессиональное и высшее образование), на них закрепляются агенты соответствующего возраста (Mashkova et al., 2020а).

Государство реализует функции сбора налогов, социальной поддержки граждан и инвестиций в национальную экономику через бюджетную систему, финансирует образовательную систему и систему здравоохранения (Mashkova et al., 2020b). Новой функцией государства в модели стало регулирование распространения эпидемий через различные ограничительные меры (рис. 1).

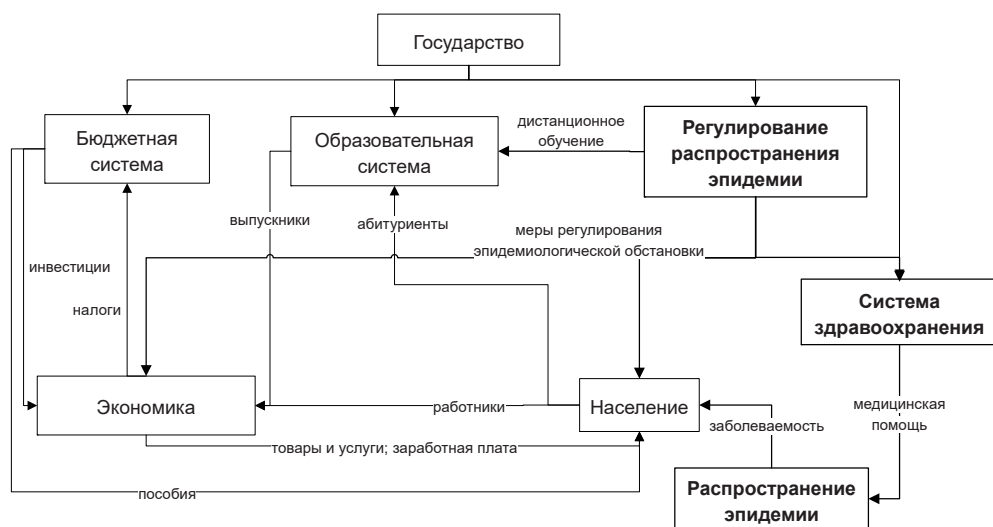


Рис. 1. Общая схема АОМ распространения эпидемий
Fig. 1. General scheme of the ABM of epidemics

Работа коммерческих организаций организована в форме производственно-финансовых циклов, в рамках которых осуществляется закупка материалов и комплектующих, выпуск и продажа продукции, выплата налогов и зарплат, подведение финансовых результатов и распределение прибыли. В конце каждого цикла коммерческая организация проводит анализ спроса в прошедшем периоде и осуществляет изменение объемов выпуска и поставок (рис. 2). При пересчете также принимается во внимание ожидаемая динамика внешней среды, формализованная в параметрах прогноза: ожидаемые объемы экспорта, изменение курса валют и мировых цен, изменение внутреннего спроса.

На первом шаге алгоритма изменения производственных параметров – выпуск следующего цикла корректируется относительно текущего с учетом совокупного спроса (удовлетворенного и неудовлетворенного) в текущем такте и прогноза на следующий такт:

$$D = \frac{CCD \cdot IDD}{CP}, \quad (1)$$

где *CCD* (Current Cycle Demand) – спрос на продукцию организации в текущем цикле; *IDD* (Internal Demand Dynamics) – ожидаемая динамика внутреннего конечного спроса; *CP* (Cycle Production) – объем выпуска в текущем цикле.

При исключении из формулы прогнозного компонента выпуск в каждом следующем цикле будет повторять спрос в предыдущем, то есть демонстри-

ровать регулярное запаздывание. Выпуск в следующем цикле CP^* рассчитывается следующим образом:

$$CP^* = CP \cdot D, \quad (2)$$

где CP (Cycle Production) – объем выпуска в текущем цикле; D – коэффициент динамики выпуска.

Пропорционально изменению выпуска происходит изменение оборотных межотраслевых поставок организации:

$$V^* = V \cdot D, \quad (3)$$

где V^* – объем поставки в следующем цикле; V – объем поставки в текущем цикле; D – коэффициент динамики выпуска.

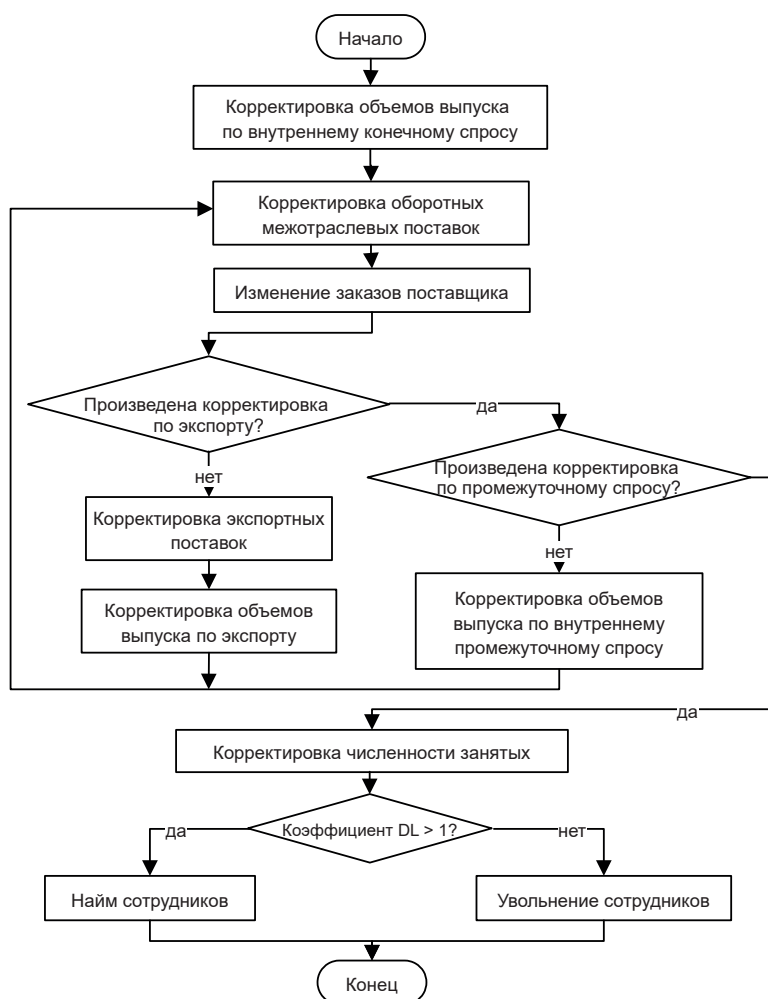


Рис. 2. Алгоритм динамики выпуска и занятости коммерческой организации

Fig. 2. Algorithm of output and employment dynamics of a commercial organization

Изменение поставок вызывает соответствующее изменение объемов выпуска организации-поставщика, на данном шаге фиксируется изменение ее объема заказов:

$$Z^* = Z + V \cdot (D - 1), \quad (4)$$

где Z^* – объем заказов организации в следующем цикле; Z – текущий объем заказов организации; V – объем поставки в текущем цикле; D – коэффициент динамики выпуска.

Далее в алгоритме реализовано изменение объемов выпуска, обусловленное динамикой спроса на экспортируемую продукцию. Корректируется объем экспортной поставки организации:

$$V_e^* = V_e \cdot EDD, \quad (5)$$

где V_e^* – объем экспортной поставки в следующем цикле; V_e – объем экспортной поставки в текущем цикле; EDD (External Demand Dynamics) – коэффициент динамики спроса на экспортируемую продукцию.

Далее рассчитывается коэффициент динамики выпуска:

$$D = \frac{V_e^* - V_e}{CP} + 1, \quad (6)$$

где V_e^* – объем экспортной поставки в следующем цикле; V_e – объем экспортной поставки в текущем цикле; CP (Cycle Production) – объем выпуска в текущем цикле.

Изменение оборотных межотраслевых поставок и заказов поставщика производится аналогично их изменению, обусловленному динамикой конечного внутреннего спроса.

После выполнения двух первых шагов алгоритма для всех организаций в модели у каждой организации-поставщика формируется набор заказов объемом Z^* , причем он может быть как больше, так и меньше объема заказов в текущем такте. Поскольку пересчет объемов выпуска организаций также приведет к череде изменений заказов у их поставщиков, работа третьего шага алгоритма осуществляется, начиная с организаций, которые имеют наибольший объем оборотных межотраслевых поставок, и заканчивая организациями добывающих отраслей и сельского хозяйства, у которых оборотные межотраслевые поставки отсутствуют. Коэффициент динамики выпуска на данном шаге определяется как:

$$D = \frac{Z^*}{CP}, \quad (7)$$

где Z^* – объем заказов организации в следующем цикле; CP (Cycle Production) – объем выпуска в текущем цикле.

После окончательного перерасчета объема выпуска организация корректирует численность занятых с учетом изменения объемов выпуска и значения коэффициента динамики численности занятых для отрасли, которой принадлежит организация:

$$DL = \frac{CP^*}{CP} \cdot EDC, \quad (8)$$

где CP^* – объем выпуска организации в следующем цикле; CP – объем выпуска в текущем цикле; EDC (Employees Dynamics Coefficient) – коэффициент динамики численности занятых.

Необходимость введения коэффициента EDC обусловлена изменением потребности отраслей в персонале, связанным с процессами информатизации и автоматизации производств. При исключении этого коэффициента из расчета численность занятых в организации всегда будет строго пропорциональна динамике ее выпуска.

Значение коэффициента $DL > 1$ свидетельствует о необходимости найма новых сотрудников, их количество L^* рассчитывается следующим образом:

$$L^* = L \cdot (DL - 1), \quad (9)$$

где L – текущая численность сотрудников организации; DL – коэффициент найма / увольнения работников организации в следующем цикле.

Если коэффициент $DL < 1$, то необходимо произвести увольнение части сотрудников организации:

$$L^* = L \cdot (1 - DL), \quad (10)$$

где L – текущая численность сотрудников организации; DL – коэффициент найма / увольнения работников организации в следующем цикле.

В модуле «Население» реализованы процессы рождаемости, смертности, вступления в брак и разводов (Маматов и др., 2019). Для отражения процессов распространения эпидемии к базовым функциям агента был добавлен ряд параметров, в результате чего в его архитектуре выделились следующие блоки:

- 1) характеристики агента: уникальный идентификатор, пол, возраст;
- 2) связи с социальным окружением, отражаемые через идентификаторы домохозяйства, отдела организации и / или группы в учебном заведении;
- 3) параметры состояния здоровья: стадия заболевания и срок окончания текущей стадии;
- 4) параметры, отражающие взаимодействие агента с окружением: соблюдаемые карантины и уровень социальной активности.

На рисунке 3 представлена автоматная модель распространения заболевания, отражающая переход от здорового состояния к заражению через контакты (К), инкубационный период (I1), острую фазу (I2) и исход болезни: выздоровление с приобретением иммунитета (Z2) или смерть (S).

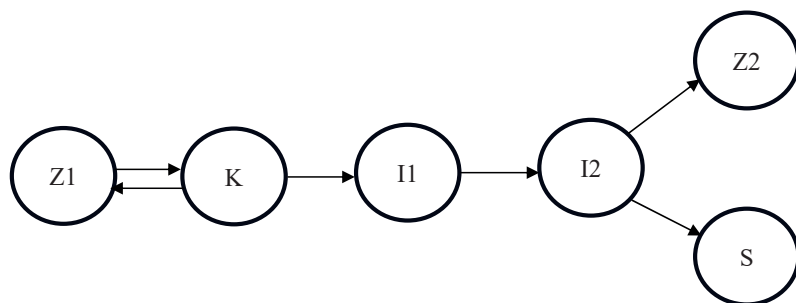


Рис. 3. Автоматная модель заражения и течения заболевания

Fig. 3. Automata model of infection and disease progression

Используемая нами модель является разновидностью классической модели динамики заболевания SEIR (Anderson, May, 1991), отличающейся выделением момента контактирования с зараженным в качестве отдельного этапа. Эта модификация позволяет оценить эффективность государственных ограничительных мер, а также повысить производительность расчетов для большого количества агентов, обрабатывая одновременно всех находящихся в состоянии К после контактов с зараженными. Таким образом, можно не разыгрывать вероятность заражения для каждого агента, а рассчитать количество вновь зараженных агентов в соответствии с вероятностью, заданной в качестве сценарного параметра. После этого рассчитанное число агентов выбирается случайным образом из находящихся в состоянии К и переводится в состояние I1, а все остальные возвращаются в состояние Z1. Для вновь зараженных агентов устанавливается срок окончания инкубационного периода, по окончании которого заболевание перейдет в активную фазу.

Для отражения внесемейных и внерабочих контактов жителей в модели вводится понятие уровня социальной активности (УСА) агентов. Выделяется три уровня:

0 – агент взаимодействует только с членами своего домохозяйства и коллегами;

1 – агент взаимодействует с небольшими группами людей (друзья, родственники);

2 – агент участвует в собраниях с большим количеством людей (массовые мероприятия).

Социальная активность агентов реализуется через мероприятия. Мероприятия первого типа отражают взаимодействия в группах от 5 до 10 человек ($УСА = 1$), мероприятия второго типа – в более крупных ($УСА = 2$). Списки участников мероприятий формируются отдельно для каждого типа и региона в модели.

Рассматриваемые в модели меры государственного регулирования распространения эпидемии включают в основном карантинные ограничения различных видов:

1. Медицинский карантин после контакта с заболевшим (код QM1). Вводится для членов домохозяйства заболевшего в острой фазе, а также его коллег / сокурсников. Соблюдающие медицинский карантин воздерживаются от контактов за пределами своего домохозяйства. Порядок организации этого типа карантина рассматривается далее в статье.

2. Изоляция заболевшего в острой фазе (код QM2). Если агент госпитализирован, то он не общается ни с кем, только с членами своего домохозяйства. Порядок организации данного карантина также будет рассмотрен далее.

3. Общий карантин для населения, за исключением особых категорий: работников производства, транспорта, инфраструктуры (код QO). Соблюдающие общий карантин воздерживаются от контактов за пределами своего домохозяйства, для них устанавливается параметр $QO = 1$.

Если агент соблюдает медицинский или общий карантин и воздерживается от контактов за пределами своего домохозяйства, то у него устанавливается режим самоизоляции $Q = 1$. У нарушителей даже при действующих карантинных ограничениях режим самоизоляции не соблюдается ($Q = 0$). Исключение составляет изоляция заболевшего в острой фазе, это единственный тип карантина, который в модели не может быть нарушен агентом по собственной воле. Это допущение основано как на том, что сам больной будет находиться в слишком тяжелом состоянии для работы или участия в мероприятиях, так и на страхе его знакомых перед заражением.

Организация дистанционной работы для части сотрудников организаций (в зависимости от отрасли) и дистанционного обучения учащихся (код QD). К этой же категории относятся отпуска сотрудников, обусловленные закрытием организаций в торговле, сфере услуг и культуры, а также все неработающие агенты. Если агент находится на дистанционке и его уровень социальной активности равен нулю, то его контакты также ограничиваются членами своего домохозяйства, и он оказывается в режиме самоизоляции ($Q = 1$).

Запрет на организацию массовых мероприятий (код QS) вводится по регионам. При условии его соблюдения все мероприятия второго типа при-

останавливаются, однако нарушители могут их организовывать в меньших масштабах, попадая таким образом в первый тип мероприятий.

Меры государственного регулирования распространения эпидемии имеют большое значение, однако их итоговый результат определяется тем, насколько ответственно к их соблюдению подойдут жители. Для отражения вклада индивидуальных решений по соблюдению карантина в модели распространения эпидемии была разработана дискретно-ситуационная сеть (ДСС), представленная на рисунке 4. ДСС являются инструментом ситуационного подхода и позволяют описывать поведение сложных объектов или субъектов в нестандартных ситуациях, в данном случае – в условиях всплеска эпидемии (Поспелов, 2021). ДСС отражает решения и взаимодействия агентов и связана с окружающей средой (искусственным обществом) через истоки (входы) и стоки (выходы). Истоками являются жители (И1), меры регулирования распространения эпидемии со стороны государства (И2) и работодателей (И3), а также медицинская помощь заболевшим (И4) (табл. 1). Единственный сток С1 представляет умерших от заболевания агентов, подлежащих удалению из модели.

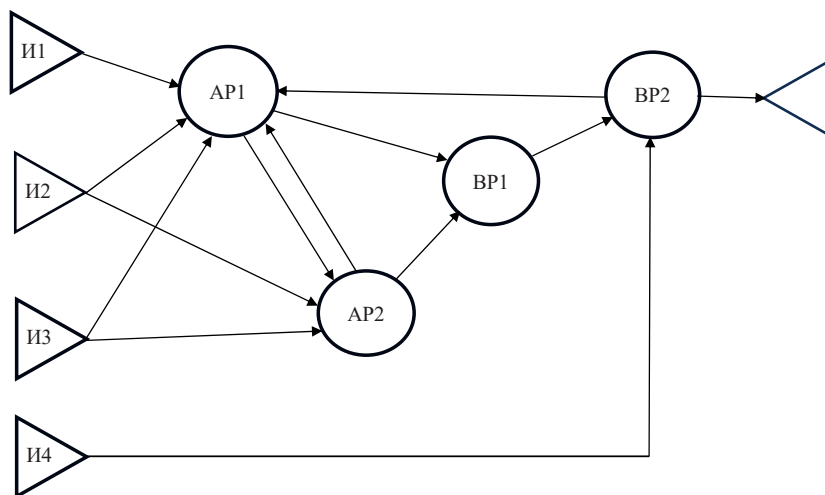


Рис. 4. Дискретно-ситуационная сеть динамики эпидемиологической ситуации

Fig. 4. Discrete situational network of the epidemiological situation dynamics

Обработка ситуации происходит с помощью решателей двух видов: активные (AP), в которых принимаются решения, и вероятностные (BP). Активные решатели представляют две возможные стратегии поведения агентов в условиях эпидемии: взаимодействие с окружением (AP1) и со-

блюдение изоляции (AP2). Вероятностные решатели отражают неопределенности в продолжительности (BP1) и исходе (BP2) заболевания у конкретных агентов.

Таблица 1

**Элементы дискретно-ситуационной сети динамики
эпидемиологической ситуации**

Table 1

**Elements of the discrete situational network
of the epidemiological situation dynamics**

Код элемента	Название элемента	Код элемента	Название элемента
Истоки		Активные решатели	
И1	жители	AP1	взаимодействие с окружением
И2	меры государственного регулирования распространения эпидемии	AP2	соблюдение изоляции
И3	меры работодателя в условиях распространения эпидемии	Вероятностные решатели	
И4	медицинская помощь заболевшим	BP1	продолжительность болезни
Стоки		BP2	исход болезни
C1	умершие от заболевания жители		

Источник: разработано авторами.

В каждом из активных решателей можно выделить действия, реализуемые при выбранной стратегии поведения, и возможность перехода к другой стратегии. Так, в AP1 «Взаимодействие с окружением» моделируется взаимодействие зараженных агентов в инкубационном периоде с членами своего домохозяйства, коллегами и / или сокурсниками, а также взаимодействия на мероприятиях, причем количество контактов в рамках мероприятия зависит от его типа (рис. 5).

В данном решателе отражаются лишь взаимодействия зараженных в инкубационном периоде, поскольку взаимодействия здоровых агентов не влияют на динамику заболеваемости, а зараженные в острой фазе не имеют контактов за пределами домохозяйства согласно принятому допущению.

Переход к альтернативной стратегии поведения (соблюдению изоляции) происходит при введении общего карантина. В AP1 моделируется переход к добровольной самоизоляции, также возврат к соблюдению общего карантина могут осуществлять нарушители. Эти возможности описываются с помощью вероятностной функции, параметры которой задаются на основе анализа данных о поведении населения в условиях пандемии коронавируса¹.

¹ ВЦИОМ: более 80% россиян соблюдали режим самоизоляции // ТАСС. 2020. 15 июня. URL: <https://tass.ru/obschestvo/8725029> (дата обращения: июль 2025).

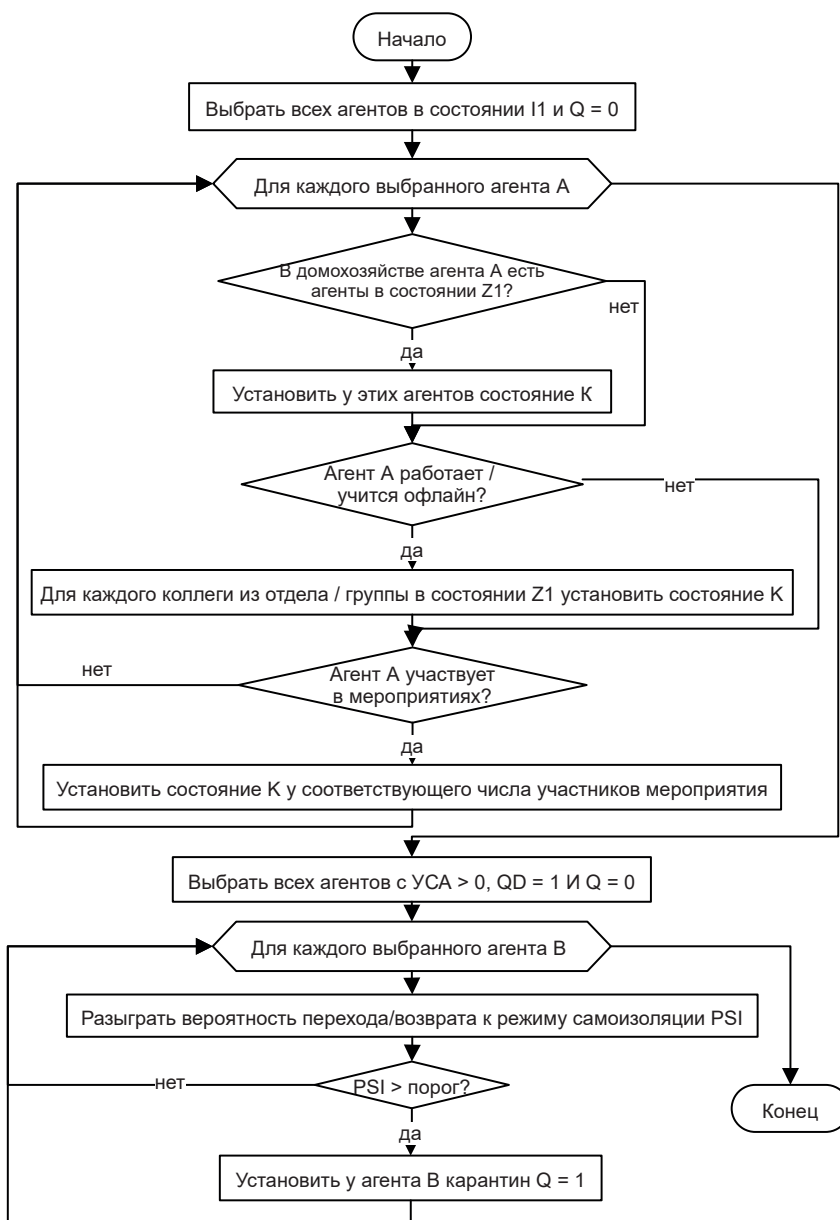


Рис. 5. AP1 Взаимодействие с окружением

Fig. 5. AS1 Interaction with the Environment

В AP2 «Соблюдение изоляции» агенты контактируют только с членами своего домохозяйства, за исключением госпитализированных больных в острой фазе, которые не контактируют ни с кем (рис. 6). Таким образом, в зоне риска оказываются агенты, проживающие вместе с находящимися на

карантине зараженными. Они переводятся в состояние К, и для них позднее разыгрывается риск заражения.

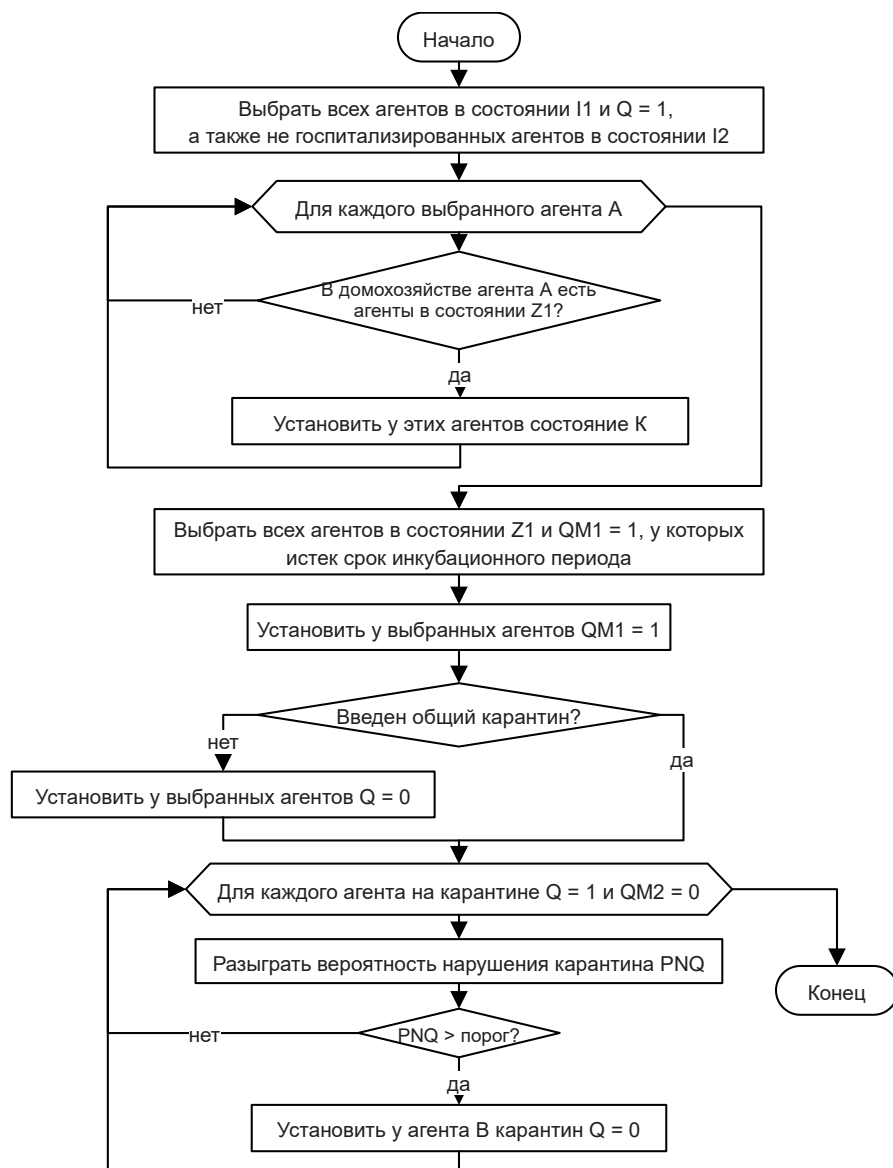


Рис. 6. AP2 Соблюдение карантина

Fig. 6. AS2 Compliance with quarantine

Переход к альтернативной стратегии поведения (взаимодействие с окружением) находящихся в режиме изоляции агентов происходит при отмене общего карантина, выздоровлении или истечении срока инкубационного

периода после контакта с зараженным в случае, если находившийся на карантине агент не заболел. Также учитывается возможность самовольного нарушения карантина агентами, вероятность которой рассчитывается на основе данных о поведении населения в условиях пандемии коронавируса¹.

Переход в BP1 «Продолжительность болезни» может происходить как из AP1, так и из AP2. В BP1 все зараженные агенты, у которых истек срок инкубационного периода, переводятся на больничный (в состояние I2) и медицинский карантин второго типа QM2, его соблюдение закрепляется параметром $Q = 1$. Определяется тяжесть течения заболевания (средняя или тяжелая) в зависимости от возраста агента в соответствии с вероятностной функцией. Продолжительность заболевания определяется в зависимости от его тяжести.

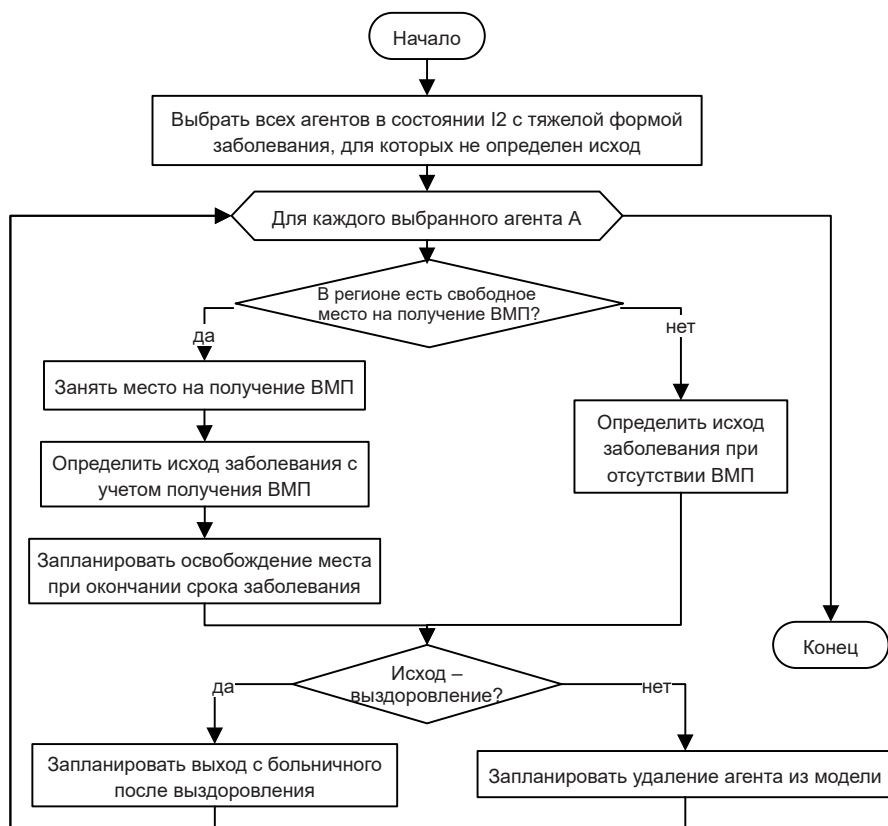


Рис. 7. BP2 Исход болезни

Fig. 7. SS2 Disease outcome

¹ ВЦИОМ: более 80% россиян соблюдали режим самоизоляции // ТАСС. 2020. 15 июня. URL: <https://tass.ru/obschestvo/8725029> (дата обращения: июль 2025).

Вероятностные функции, задающие тяжесть и продолжительность заболевания, регулируются сценарными параметрами, характеризующими возможную эпидемию. Если заболевание протекает в легкой или средней форме, то планируется выход с больничного после выздоровления. Агент будет переведен в состояние Z2 и будет находиться в режиме взаимодействия с окружением, поскольку приобретет иммунитет. Все проживающие в домохозяйстве агенты, не находящиеся в острой фазе заболевания и не имеющие иммунитета, переводятся на медицинский карантин первого типа QM1.

В BP2 «Исход болезни» моделируется возможность госпитализации и получения высокотехнологичной медицинской помощи (ВМП) для больных с тяжелой формой заболевания (в эпидемию коронавируса это были аппараты для искусственной вентиляции легких). Вероятность смертельного исхода зависит как от характера эпидемии, так и от доступа тяжелобольных к ВМП (рис. 7).

Если исходом является выздоровление, то планируется выход больного с больничного с приобретением иммунитета, иначе планируется удаление агента и сведений о нем из модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для программной реализации АОМ распространения эпидемий был выбран язык C#, что позволило сделать модель частью программного комплекса МЕБИУС и использовать уже реализованный в нем функционал (Макаров и др., 2020б). Исходные данные моделирования были взяты из официальных открытых источников, в первую очередь Федеральной службы государственной статистики¹ и Единой межведомственной информационно-статистической системы². Информация о вводившихся в регионах России эпидемиологических ограничениях при распространении коронавирусной инфекции систематизирована в международной базе ACAPS³ и была использована для моделирования ограничительных мер.

Отраслевая структура экономики России в модели соответствует ОКВЭД 2 и содержит 19 видов экономической деятельности по субъектам РФ⁴ (ОКВЭД 2, 2025), не рассматривается деятельность домашних хозяйств

¹ Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: июнь 2025).

² Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: июль 2025).

³ ACAPS, 2025. URL: <https://www.acaps.org/en/> (дата обращения: июль 2025).

⁴ ОКВЭД 2 – Общероссийский классификатор видов экономической деятельности / Общероссийские классификаторы. 2025. URL: <https://classifikators.ru/okved> (дата обращения: август 2025).

и экстерриториальных организаций. Из этих 19 ВЭД в модели бюджетными являются организации государственного управления, образования и здравоохранения (коммерческие организации в этих сферах в модели не создаются, что связано со сложностью разделения данных о выпуске и занятости в этих отраслях между бюджетными и коммерческими организациями); финансовыми – организации по ВЭД «Деятельность финансовая и страховая». Все прочие организации в модели являются коммерческими, объемы их выпуска продукции (оказания услуг) динамически изменяются в процессе моделирования. Для моделирования международной торговли необходимо было также создать зарубежные организации. В силу сложностей сведения воедино классификаторов различных стран, структура зарубежной экономики была сведена к 11 укрупненным отраслям (Машкова, Бахтизин, 2023). Для отражения структуры занятости в модели были использованы наиболее свежие данные ЕМИСС за 2023 г. о среднегодовой численности занятых в экономике по регионам и видам экономической деятельности.

В рамках сценарных расчетов моделировалось распространение эпидемии вируса, сходного по параметрам заболеваемости и смертности с COVID-19. Рассматривалось два варианта течения болезни: легкое / среднее со средней продолжительностью 2 недели, и тяжелое продолжительностью 4 недели, наблюдаемое у 5% зараженных. При тяжелом течении болезни вероятность смертельного исхода оценивается в 60% при получении ВМП и 90% в отсутствие ВМП.

Для серии расчетов были разработаны пять сценариев, представляющих собой различные варианты ограничительных мер и степень их соблюдения жителями. Сценарий № 1 «Отсутствие ограничений» сохраняет всю социально-экономическую активность населения, лишь вводя карантины для заболевших с подтвержденным диагнозом. Экономические последствия эпидемии в данном сценарии обусловлены влиянием разрыва международных логистических цепочек, который приводит к задержкам поставок и (потенциально) к временной остановке производств из-за недостатка комплектующих, снижению мирового спроса и цен на экспортируемые товары, что приводит к снижению объемов выпуска и прибыли в ряде отраслей (в первую очередь добывающих), а также – на пике эпидемии – снижением объемов производства из-за недостатка работников по причине их болезни и смерти. Также в сценарии закладывается снижение конечного спроса на 0,2% относительно предыдущего года, что связано со снижением расходов находящихся на карантине больных.

Сценарий № 2 «Мягкие ограничения» предусматривает перевод школьников и студентов на дистанционный формат обучения и запрет массовых мероприятий, а также карантины для членов семей заболевших. Экономиче-

ческие последствия в данном сценарии обусловлены вышеперечисленными причинами, и, сверх того, более значительным снижением конечного спроса (закладывается в качестве сценарного параметра на 0,5% меньше, чем в сценарии № 1, часть агентов-студентов и преподавателей снижают расходы при переходе на дистанционный формат обучения, а также увеличивается количество находящихся на карантине агентов) и выбытием из производственного процесса находящихся на карантине членов семей заболевших.

Сценарии № 3, № 4, № 5 «Жесткие ограничения» предусматривают введение дополнительных жестких ограничений в работе организаций торговли и сферы услуг, перевод части сотрудников организаций на дистанционный формат работы, длительные периоды самоизоляции для населения. Различия между этими сценариями определяются процентом нарушителей среди населения. Согласно данным о поведении жителей России в условиях пандемии коронавируса¹, изоляцию соблюдало около 80% населения, это значение было использовано в сценарии № 4. Сценарий № 3 предполагает большее количество нарушителей (соблюдают изоляцию лишь 40% населения), а сценарий № 5 – их отсутствие (изоляцию соблюдают 100% населения, за исключением лиц с официальными разрешениями на работу в ключевых сферах экономики). В данной группе сценариев к вышеперечисленным факторам, косвенно влияющим на экономику, добавляются прямые ограничения на работу организаций торговли и сферы услуг, что снижает их прибыль и приводит к временному сокращению части сотрудников, также негативно влияют на конечный спрос длительные периоды самоизоляции. Эти факторы закладываются в сценарных параметрах снижением конечного спроса на 5% (в отрасли «Торговля»), что, в свою очередь, приводит к снижению промежуточного спроса и выпуска организаций других отраслей.

Численность переболевших, выздоровевших и умерших от эпидемии представлена в таблице 2.

Большое влияние на показатели смертности имеет доступность ВМП для зараженных с тяжелой формой заболевания. В расчетах для оценки количества мест ВМП использовалась информация о количестве аппаратов искусственной вентиляции легких в 2020 г.² В модели эти данные носят оценочный характер, потому что, во-первых, за прошедшее время оснащенность ИВЛ изменилась, во-вторых, новый вирус может поразить не легкие, а другие органы и потребовать совершенно другого оборудования для помо-

¹ ВЦИОМ: более 80% россиян соблюдали режим самоизоляции // ТАСС. 2020. 15 июня. URL: <https://tass.ru/obschestvo/8725029> (дата обращения: июль 2025).

² Грошева М. Эксперты назвали количество аппаратов ИВЛ в России // Медвестник. 2020. 23 марта. URL: <https://medvestnik.ru/content/news/Eksperty-nazvali-kolichestvo-apparatov-IVL-v-Rossii.html> (дата обращения: июль 2025).

щи тяжелобольным. С имеющимися данными заметно, что смертность среди зараженных выше в условиях отсутствия ограничений, поскольку больницы не справляются с потоком тяжелобольных и не могут предоставить им требуемую ВМП (см. табл. 2).

Таблица 2

Численность переболевших новым вирусом, выздоровевших и умерших среди населения Российской Федерации

Table 2

The number of infected, recovered and dead among the population of the Russian Federation

Сценарий	Переболело, всего	Выздоровело	Умерло	Процент умерших среди зараженных
№ 1 «Отсутствие ограничений»	21867140	20 991 035	876105	4,0
№ 2 «Мягкие ограничения»	4 474 964	4 336 884	138 080	3,1
№ 3 «Жесткие ограничения соблюдают 40% населения»	2 355 659	2 283 368	72 291	3,1
№ 4 «Жесткие ограничения соблюдают 80% населения»	1 938 759	1 878 160	60 599	3,1
№ 5 «Жесткие ограничения соблюдают 100% населения»	846 329	819 839	26490	3,1

Источник: расчеты авторов.

Рассмотрим более подробно динамику заражений по неделям в каждом сценарии. Точкой отсчета эпидемии будем считать показатель новых заражений более 1 на 10 тысяч населения. Соответственно, эпидемию будем считать завершенной при падении числа новых заражений ниже этого показателя. На рисунке 8 представлен график динамики новых заражений и смертей в условиях отсутствия ограничений (сценарий № 1).

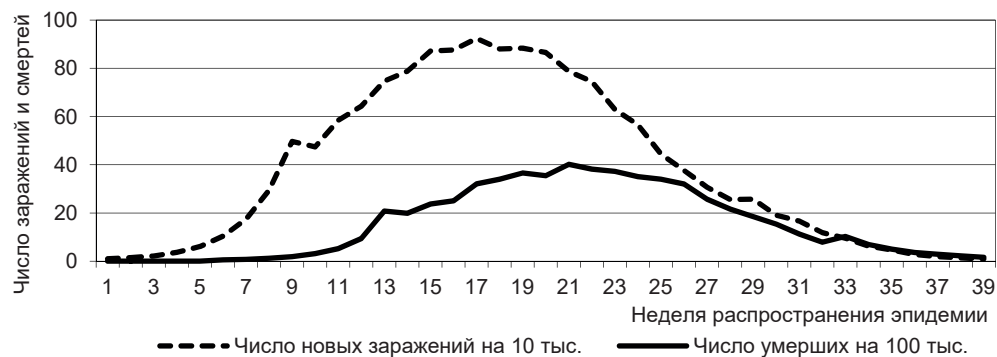


Рис. 8. Число новых заражений и смертей относительно численности населения в условиях отсутствия эпидемиологических ограничений

Fig. 8. Number of new infections and deaths relative to population size in the absence of epidemiological restrictions

Число новых заражений на пике эпидемии доходит до 90 на 10 тысяч населения в неделю (около 1,3 миллиона в абсолютном выражении), эпидемия продолжается 39 недель. Переболевшими в итоге оказываются почти 22 миллиона человек, умершими – 876 тысяч (см. табл. 1).

В условиях мягких ограничений (сценарий № 2) заболеваемость на пиках снижается до 17 новых случаев на 10 тысяч населения, а общая продолжительность эпидемии – до 32 недель (рис. 9).

Введение жестких ограничений (сценарий № 3) также существенно снижает заболеваемость, даже если они соблюдаются лишь 40% населения (рис. 10).

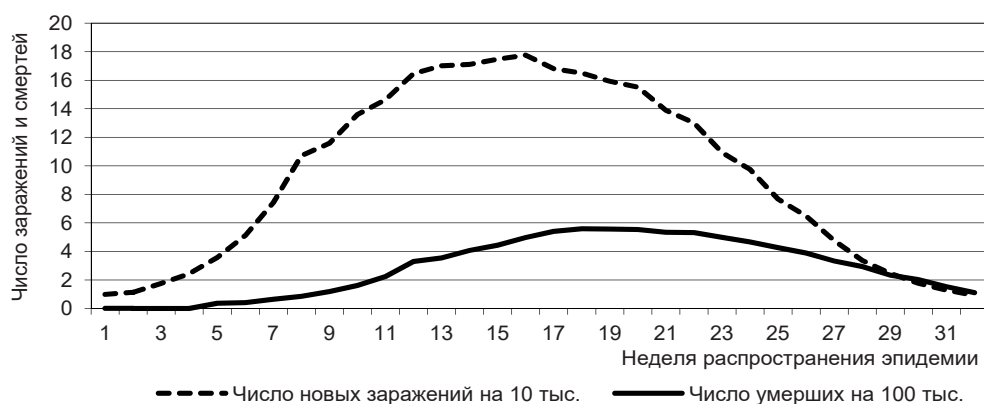


Рис. 9. Число новых заражений и смертей относительно численности населения в условиях мягких эпидемиологических ограничений

Fig. 9. Number of new infections and deaths relative to population size under soft epidemiological restrictions

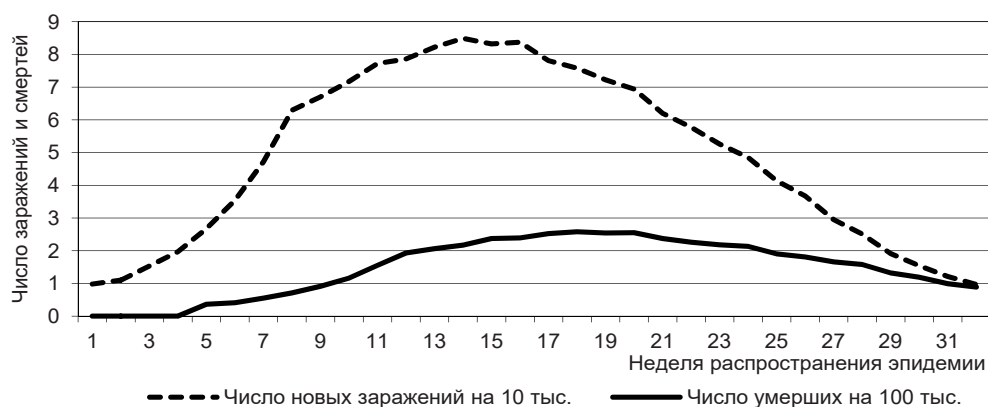


Рис. 10. Число новых заражений и смертей относительно численности населения в условиях жестких эпидемиологических ограничений, соблюдаемых 40% населения

Fig. 10. Number of new infections and deaths relative to population size under strict epidemiological restrictions observed by 40% of the population

Разница с вариантом, когда жесткие ограничения соблюдаются 80% населения (сценарий № 4), оказывается не слишком значительной: 8,5 заболевших на 10 тысяч населения по сравнению с 7; продолжительность эпидемии также практически не меняется (рис. 11).

Значительные изменения в характере течения эпидемии наблюдаются, когда жесткие ограничения соблюдают 100% населения (сценарий № 5) (рис. 12). В этом случае снижается не только число новых заражений (4 на 10 тысяч населения на пике заболеваемости), но и продолжительность эпидемии (23 недели против 31–32 недель при наличии нарушителей режима самоизоляции).

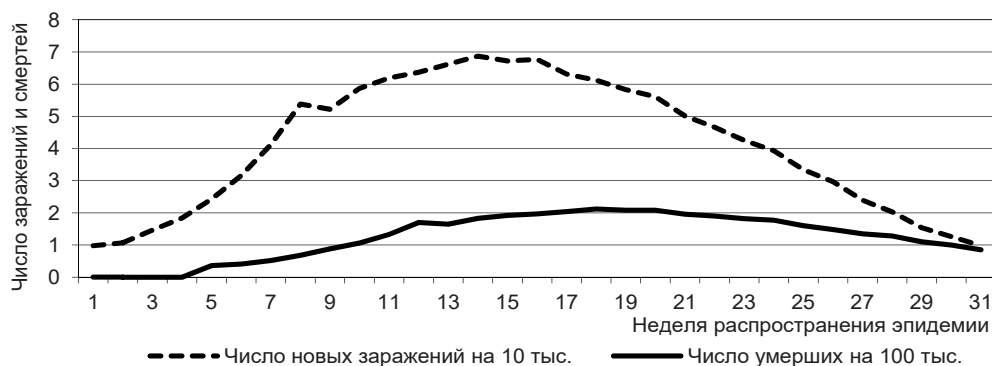


Рис. 11. Число новых заражений и смертей относительно численности населения в условиях жестких эпидемиологических ограничений, соблюдаемых 80% населения

Fig. 11. Number of new infections and deaths relative to population size under strict epidemiological restrictions observed by 80% of the population

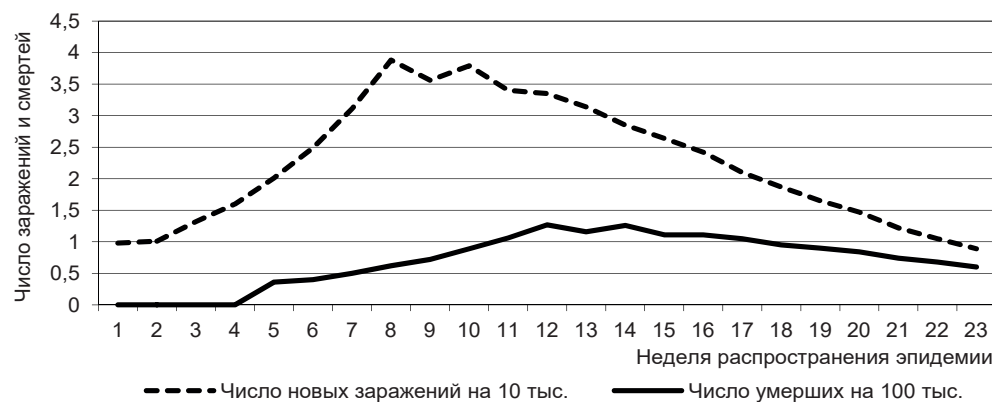


Рис. 12. Число новых заражений и смертей относительно численности населения в условиях жестких эпидемиологических ограничений, соблюдаемых 100% населения

Fig. 12. Number of new infections and deaths relative to population size under strict epidemiological restrictions observed by 100% of the population

При этом даже частичное соблюдение жестких ограничений позволяет разгрузить больницы и предоставить всем тяжелобольным доступ к ВМП (рис. 13). Мягкие ограничения в целом дают сходный результат, за исключением пика распространения эпидемии, когда без доступа к ВМП оказываются около 15% тяжелобольных. В условиях отсутствия ограничений недостаток мест ВМП наблюдается на протяжении большей части эпидемии, на пике достигая момента, когда ВМП доступна лишь 20% тяжелобольных.



Рис. 13. Процент зараженных с тяжелой формой заболевания, имеющих доступ к ВМП

Fig. 13. Percentage of infected people with severe forms of the disease who have access to high-tech medical care

В случае если новый вирус поражает не легкие, а другие органы, доступность мест ВМП оказывается критически низкой. В дополнительной серии расчетов мы рассмотрели вариант, когда мест для оказания ВМП в 10 раз меньше, чем аппаратов ИВЛ (4200 вместо 42 000 на всю Россию), параметры заболеваемости и смертности оставили неизменными. В этом случае даже при введении жестких ограничений доступность ВМП оказывается крайне низкой, составляя на пиках заболевания 20% при соблюдении ограничений 40 и 80% населения. Повсеместное соблюдение режима изоляции позволяет поднять этот показатель до 40% (рис. 14).

Несмотря на то, что жесткие ограничения оказываются эффективными в борьбе с вирусом, возможности их введения ограничены экономическими факторами. Чем жестче ограничения, тем сильнее спад экономики, в первую очередь в торговле и сфере услуг, и через них, опосредованно, в промышленности. Также негативное влияние на экономику имеют сбои в международной логистике и спад зарубежного спроса. Учет этих факторов в модели распространения эпидемий возможен за счет интеграции с программным комплексом МЕБИУС, где реализованы функции международной торговли России с Китаем, ЕС, США и остальным миром (Машкова, Бахтизин, 2023).

По этим причинам, даже если в России не вводятся ограничительные меры, в экономике все равно наблюдается спад (табл. 3). Этот спад достаточно равномерно распределен по регионам России, менее заметен в регионах Северо-Кавказского федерального округа и более всего ощутим на Урале, Дальнем Востоке и в крупнейших городах.

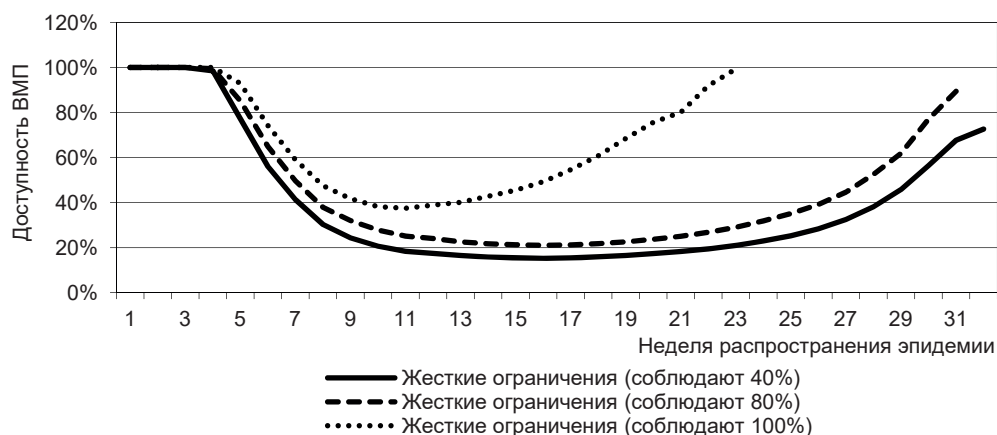


Рис. 14. Процент зараженных с тяжелой формой заболевания, имеющих доступ к ВМП, в условиях жестких ограничений при новых мутациях вируса

Fig. 14. Percentage of infected people with severe forms of the disease who have access to high-tech medical care under conditions of strict restrictions with new mutations of the virus

Таблица 3

Динамика валового регионального продукта в условиях различных сценариев
противоэпидемических мер, в процентах относительно предшествующего года

Table 3

Dynamics of gross regional product under different scenarios of anti-epidemic measures,
as a percentage of the previous year

Регион	Сценарий		
	без ограничений	мягкие ограничения	жесткие ограничения
1	2	3	4
Российская Федерация без учета новых субъектов	-1,9	-2,6	-4,4
Центральный федеральный округ	-1,9	-3	-5,1
Белгородская область	-1,4	-1,7	-3,7
Брянская область	-0,8	-1,1	-3,4
Владимирская область	-0,8	-1,2	-3
Воронежская область	-1,2	-1,5	-3,9
Ивановская область	-0,9	-1	-2,9
Калужская область	-0,5	-1	-2,9
Костромская область	-0,8	-1,3	-3,2
Курская область	-1,1	-1,4	-3,5

1	2	3	4
Липецкая область	-0,2	-0,6	-2,5
Московская область	-1,7	-2,4	-4,4
Орловская область	-0,8	-1	-3,5
Рязанская область	-1	-1,4	-3,5
Смоленская область	-1,3	-1,8	-3,9
Тамбовская область	-0,8	-1	-3,5
Тверская область	-1,3	-2	-4
Тульская область	-0,2	-0,7	-2,5
Ярославская область	-1,1	-1,8	-3,7
Город Москва	-2,4	-3,9	-5,9
Северо-Западный федеральный округ	-1,9	-2,3	-4,4
Республика Карелия	-1,5	-1,9	-3,5
Республика Коми	-2,4	-2,6	-3,8
Архангельская область	-2	-2	-3,4
Вологодская область	0,1	-0,3	-2,1
Калининградская область	-1,5	-2,4	-4,3
Ленинградская область	-1,1	-2,1	-4
Мурманская область	-0,9	-1,1	-2,8
Новгородская область	-0,4	-0,8	-2,7
Псковская область	-0,9	-1,1	-3,1
Город Санкт-Петербург	-2,3	-2,8	-5,2
Южный федеральный округ	-1,7	-2,4	-4,5
Республика Адыгея (Адыгея)	-1,4	-1,8	-3,9
Республика Калмыкия	-1,7	-2,9	-5
Республика Крым	-1,4	-1,7	-3,5
Краснодарский край	-2	-3,4	-5,5
Астраханская область	-2,7	-2,9	-4,3
Волгоградская область	-0,8	-1,1	-3,2
Ростовская область	-1,3	-1,6	-3,8
Город Севастополь	-1,6	-2	-3,7
Северо-Кавказский федеральный округ	-1,1	-0,9	-3
Республика Дагестан	-1,3	-1,2	-3,4
Республика Ингушетия	-0,3	1,1	-0,7
Кабардино-Балкарская Республика	-0,9	-0,4	-2,7
Карачаево-Черкесская Республика	-0,7	-0,6	-2,6
Республика Северная Осетия – Алания	-1	-0,9	-3,1
Чеченская Республика	-0,6	0,3	-1,3
Ставропольский край	-1,2	-1,4	-3,5
Приволжский федеральный округ	-1,5	-2	-3,7
Республика Башкортостан	-1,1	-1,5	-3,3
Республика Марий Эл	-0,5	-0,7	-2,8
Республика Мордовия	-0,4	-0,7	-2,9
Республика Татарстан (Татарстан)	-1,9	-2,4	-4,1
Удмуртская Республика	-1,6	-2	-3,6

1	2	3	4
Чувашская Республика – Чувашия	–0,8	–1,2	–3,2
Пермский край	–1,5	–1,9	–3,4
Кировская область	–0,6	–0,8	–2,6
Нижегородская область	–1,3	–2,1	–4
Оренбургская область	–2,2	–2,5	–3,9
Пензенская область	–0,9	–1,3	–3,5
Самарская область	–1,8	–2,4	–4,1
Саратовская область	–1,1	–1,6	–3,7
Ульяновская область	–0,9	–1,3	–3,2
Уральский федеральный округ	–2,5	–2,9	–4,2
Курганская область	–0,8	–1,2	–3
Свердловская область	–1,1	–1,8	–3,7
Тюменская область	–3,2	–3,5	–4,5
Челябинская область	–0,8	–1,2	–3
Сибирский федеральный округ	–1,6	–2	–3,7
Республика Алтай	–1,2	–1	–2,6
Республика Тыва	–0,7	0,6	–0,7
Республика Хакасия	–1,5	–1,7	–3,3
Алтайский край	–0,9	–1,1	–3,2
Красноярский край	–1,3	–1,7	–3,2
Иркутская область	–2,1	–2,4	–3,8
Кемеровская область – Кузбасс	–2,2	–2,5	–4
Новосибирская область	–1,8	–2,7	–4,7
Омская область	–1	–1,5	–3,4
Томская область	–2	–2,3	–3,9
Дальневосточный федеральный округ	–2,3	–2,5	–4
Республика Бурятия	–1,5	–1,6	–3,2
Забайкальский край	–2,1	–2,4	–3,7
Республика Саха (Якутия)	–3,1	–3,1	–4,1
Камчатский край	–0,6	–0,2	–2,4
Приморский край	–1,7	–2,3	–4,3
Хабаровский край	–1,8	–2,2	–4
Амурская область	–1,8	–2,2	–3,7
Магаданская область	–2,8	–2,7	–3,9
Сахалинская область	–3	–3,2	–4,2
Еврейская автономная область	–1,5	–1,5	–3
Чукотский автономный округ	–2,3	–2,4	–3,4

Анализ динамики региональных экономик осуществляется через сравнение ВРП регионов со значениями базового года. Агрегирование результатов моделирования осуществляется следующим образом. Алгоритмы модели воспроизводят динамику работы предприятий (закупки и выпуск, складывающийся из экспорта, промежуточного и конечного спроса), затем рассчитывается добавленная стоимость (продажи минус закупки) для

каждого предприятия, суммируется по регионам, затем по федеральным округам. Для базового года суммируется ВРП регионов, входящих в федеральные округа. Результаты моделирования ВРП в региональном разрезе представлены в таблице 3.

При введении ограничений, как жестких, так и мягких, спад заметнее всего в Москве (–5,9%) и Санкт-Петербурге (–5,2%), где в структуре валового продукта высока доля торговли и сферы услуг. Наименьшее влияние вводимые меры имеют на экономику Северо-Кавказского федерального округа (см. табл. 3).

Сходные выводы можно сделать и в отношении занятости в различных регионах, с той разницей, что различия по этому параметру минимальны для сценариев отсутствия ограничений и мягких ограничений (–1,4% против –1,5%) в среднем по России (табл. 4). В расчетах коэффициент динамики численности занятых EDC (формула 9) принимался равным 1.

Таблица 4

**Динамика занятости в регионах в условиях различных сценариев
противоэпидемических мер, в процентах относительно предшествующего года**

Table 4

**Dynamics of employment under different scenarios of anti-epidemic measures,
as a percentage of the previous year**

Регион	Сценарий		
	без ограничений	мягкие ограничения	жесткие ограничения
1	2	3	4
Российская Федерация без учета новых субъектов	–1,4	–1,5	–3,4
Центральный федеральный округ	–1,6	–2	–4
Белгородская область	–1,1	–0,9	–3
Брянская область	–1	–0,9	–2,9
Владимирская область	–0,9	–0,8	–2,7
Воронежская область	–1,3	–1,2	–3,4
Ивановская область	–0,9	–0,5	–2,4
Калужская область	–0,9	–1,1	–2,9
Костромская область	–0,7	–0,4	–2,2
Курская область	–1,2	–0,8	–2,9
Липецкая область	–1,1	–1	–3,1
Московская область	–1,6	–1,8	–3,8
Орловская область	–0,8	–0,3	–2,2
Рязанская область	–1,5	–1,2	–3
Смоленская область	–1	–1	–2,9
Тамбовская область	–0,8	–0,6	–2,9
Тверская область	–1	–0,9	–2,8
Тульская область	–1,5	–1,5	–3,4
Ярославская область	–0,9	–0,8	–2,8

1	2	3	4
Город Москва	-2,2	-3,2	-5,1
Северо-Западный федеральный округ	-1,4	-1,6	-3,4
Республика Карелия	-1,1	-0,8	-2,5
Республика Коми	-1,1	-0,7	-2,3
Архангельская область	-0,7	-0,3	-2
Вологодская область	-0,9	-0,8	-2,7
Калининградская область	-1,4	-1,4	-3,3
Ленинградская область	-1,3	-1,4	-3,4
Мурманская область	-1,1	-0,7	-2,3
Новгородская область	-0,9	-0,7	-2,6
Псковская область	-0,9	-0,6	-2,6
Город Санкт-Петербург город федерального значения	-1,8	-2,4	-4,2
Южный федеральный округ	-1,4	-1,4	-3,5
Республика Адыгея (Адыгея)	-0,8	-0,3	-2,3
Республика Калмыкия	-0,8	-0,2	-2,2
Республика Крым	-1,4	-1,2	-3,2
Краснодарский край	-1,7	-1,7	-3,8
Астраханская область	-1,7	-1,6	-3,6
Волгоградская область	-1,2	-1,2	-3,3
Ростовская область	-1,3	-1,2	-3,4
Город Севастополь	-1,6	-1,5	-3,4
Северо-Кавказский федеральный округ	-1	-0,6	-2,7
Республика Дагестан	-0,9	-0,3	-2,5
Республика Ингушетия	-0,9	-0,2	-2,4
Кабардино-Балкарская Республика	-1,2	-0,9	-3,1
Карачаево-Черкесская Республика	-1,4	-0,9	-2,9
Республика Северная Осетия – Алания	-0,9	-0,2	-2,1
Чеченская Республика	-0,6	0,3	-1,8
Ставропольский край	-1,3	-1,2	-3,5
Приволжский федеральный округ	-1,2	-1,1	-3
Республика Башкортостан	-1,3	-1,3	-3,2
Республика Марий Эл	-0,6	-0,1	-2,1
Республика Мордовия	-0,6	-0,2	-2,4
Республика Татарстан (Татарстан)	-1,5	-1,6	-3,5
Удмуртская Республика	-0,8	-0,6	-2,4
Чувашская Республика – Чувашия	-0,8	-0,5	-2,5
Пермский край	-1	-1	-2,8
Кировская область	-0,6	-0,1	-2,1
Нижегородская область	-1,2	-1,2	-3,1
Оренбургская область	-1,3	-1,1	-3,2
Пензенская область	-1	-0,9	-3
Самарская область	-1,3	-1,5	-3,5
Саратовская область	-1,2	-1	-3,1
Ульяновская область	-1,1	-1	-2,8

1	2	3	4
Уральский федеральный округ	–1,4	–1,4	–3,1
Курганская область	–0,5	0,2	–1,7
Свердловская область	–1,3	–1,2	–3,1
Тюменская область	–1,9	–2,1	–3,7
Челябинская область	–1	–0,9	–2,7
Сибирский федеральный округ	–1,3	–1,1	–3
Республика Алтай	–0,5	0,5	–1,5
Республика Тыва	–0,3	1,5	–0,2
Республика Хакасия	–1,2	–0,7	–2,5
Алтайский край	–1,1	–0,6	–2,8
Красноярский край	–1,2	–1,1	–2,9
Иркутская область	–1,4	–1,1	–2,9
Кемеровская область – Кузбасс	–1,7	–1,8	–3,5
Новосибирская область	–1,4	–1,6	–3,5
Омская область	–1,1	–0,9	–2,9
Томская область	–1,3	–1,1	–2,9
Дальневосточный федеральный округ	–1,7	–1,4	–3,3
Республика Бурятия	–2	–1,3	–3,3
Забайкальский край	–1,2	–0,8	–2,6
Республика Саха (Якутия)	–1,7	–1,4	–2,9
Камчатский край	–1,9	–1,3	–3,2
Приморский край	–1,6	–1,5	–3,6
Хабаровский край	–1,8	–1,8	–3,6
Амурская область	–1,6	–1,5	–3,2
Магаданская область	–1,7	–1,5	–3
Сахалинская область	–1,9	–1,7	–3,4
Еврейская автономная область	–1	–0,4	–2,2
Чукотский автономный округ	–1,7	–1,5	–2,9

Во всех рассмотренных сценариях спад занятости достаточно равномерно распределен по регионам, являясь наиболее сильным в Москве, наименее заметным – в Северо-Кавказском федеральном округе (см. *табл. 4*). Соблюдение карантинных мер при введении жестких ограничений не оказывает существенного влияния на экономические показатели, поскольку возникающая активность нелегальна и не отражается в документации (подпольные вечеринки, нелегальная работа мастеров в сфере услуг и т. п.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена агент-ориентированная модель для прогнозирования распространения эпидемий и оценки их последствий для экономики. Модель является частью программного комплекса МЕБИУС для исследования сложных социально-экономических процессов, в котором отражена

демографическая и географическая структура населения регионов, образовательная система, производство и сфера услуг, занятость и международная торговля. Это позволяет детально моделировать контакты агентов в семье, на работе и учебе и оценивать эффект различных вариантов противоэпидемических мер: карантинов для заболевших, перехода на дистанционный формат обучения, ограничения массовых мероприятий, а также их экономические последствия. Агенты в представленной модели имеют возможности принимать решения, в частности, о соблюдении введенных карантинных мер, для отражения этого процесса был использован инструмент ситуационного моделирования – дискретно-ситуационная сеть. Для информационного наполнения модели были использованы данные Федеральной службы государственной статистики и Всероссийской переписи населения, а также международной базы данных ACAPS.

Экспериментальные исследования ставили две основные задачи: прогнозирования распространения вируса, сходного по параметрам с COVID-19, при различных сочетаниях противоэпидемических мер, и оценки экономических последствий этих мер. Дополнительной задачей была оценка доступности высокотехнологичной медицинской помощи для зараженных с тяжелой формой заболевания. Возможные сочетания карантинных мер были сгруппированы в пять сценариев: отсутствие ограничений, мягкие ограничения, жесткие ограничения при соблюдении изоляции 40, 80 и 100% жителей.

В первом сценарии эпидемия продолжается 39 недель, с общим числом заболевших в районе 22 миллионов и 876 тысяч умерших. В условиях мягких ограничений продолжительность эпидемии снижается до 32 недель, число заболевших – до 4,5 миллионов; умерших – до 138 тысяч. Жесткие ограничения приносят результат даже при частичном соблюдении (число заболевших снижается до 2–2,3 миллиона, умерших – до 60–72 тысяч), однако наиболее эффективными оказываются при полном соблюдении. В этом случае продолжительность эпидемии снижается до 23 недель, число заболевших – менее миллиона, умерших – 26,5 тысяч. Также следует отметить, что даже частичное соблюдение жестких ограничений позволяет разгрузить больницы и предоставить всем тяжелобольным доступ к ВМП.

Оценка экономического эффекта противоэпидемических мер проводилась в региональном разрезе, поскольку ограничения в наибольшей степени затронули сферу услуг и развлечений, а ее вес отличается в ВРП различных регионов. В целом можно заключить, что даже при отсутствии ограничений в российской экономике наблюдается спад, обусловленный снижением мирового спроса и логистическими сбоями. При введении ограничений спад заметнее всего в Москве и Санкт-Петербурге, в структуре экономики кото-

рых высока доля сферы услуг. Наименьшее влияние вводимые меры имеют на экономику Северо-Кавказского федерального округа.

Новизна проведенного исследования связана с созданием комплексного инструментария для прогнозирования последствий эпидемий, их влияния на экономику и общество, а также с учетом поведения жителей в условиях введения противоэпидемических ограничений и оценкой вклада их решений в динамику распространения заболевания. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть связаны с моделированием распространения эпидемий в других странах и перемещения жителей между странами и регионами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф. Моделирование эпидемии COVID-19 – преимущества агент-ориентированного подхода // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020а. Т. 13. № 4. С. 58–73. <https://doi.org/10.15838/esc.2020.4.70.3>
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Хабриев Б.Р., Ильин Н.И. Программно-аналитический комплекс «МЕБИУС» – инструмент планирования, мониторинга и прогнозирования социально-экономической системы России // Искусственные общества. 2020b. Т. 15. Вып. 4. <https://doi.org/10.18254/S207751800012303-2>
- Маматов А.В., Маишкова А.Л., Новикова Е.В., Савина О.А. Воспроизведение динамики населения регионов России методом агентного моделирования // Информационные системы и технологии. 2019. № 2 (112). С. 48–55.
- Маишкова А.Л., Бахтизин А.Р. Анализ отраслевой структуры и динамики товарообмена между Россией, Китаем, США и Европейским союзом в условиях торговых ограничений // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2023. Т. 16. № 3. С. 54–80. <https://doi.org/10.15838/esc.2023.3.87.3>
- Минакир П.А. Экономика пандемии: российский путь // Пространственная экономика. 2020. Т. 16. № 2. С. 7–18. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2020.2.007-018>
- Ответ российского бизнеса на пандемию (Круглый стол в НИУ ВШЭ) // Вопросы экономики. 2022. № 5. С. 147–160. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-5-147-160>
- Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: URSS, 2021. 288 с.
- Abdollahi E., Haworth-Brockman M., Keynan Y., Langley J.M., Moghadas S.M. Simulating the Effect of School Closure during COVID-19 Outbreaks in Ontario, Canada // BMC Medicine. 2020. Vol. 18. No. 230. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01705-8>
- Ale Ebrahim Dehkordi M., Melnyk A., Herder P., Ghorbani A. Examining the Interplay between National Strategies and Value Change in the Battle Against COVID-19: An Agent-Based Modelling Inquiry // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2024. Vol. 27 (1). 18. <https://doi.org/10.18564/jasss.5283>
- Aleman D.M., Wibisono T.G. A Nonhomogeneous Agent-Based Simulation Approach to Modeling the Spread of Disease in a Pandemic Outbreak // Interfaces. 2011. Vol. 41. No. 3. Pp. 301–315. <https://doi.org/10.1287/inte.1100.0550>
- Aleta A., Martín-Corral D., Pastore Y., Piontti A., Ajelli M., Litvinova M., Chinazzi M., Dean N.E., Halloran M.E., Longini I.M. Jr, Merler S., Pentland A., Vespignani A., Moro E., Moreno Y. Modelling the Impact of Testing, Contact Tracing and Household Quarantine on Second Waves of COVID-19 // Nature Human Behaviour. 2020. Vol. 4. Pp. 964–971. <https://doi.org/10.1038/s41562-020-0931-9>

- Anderson R.M., May R.M. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Oxford: Oxford University Press, 1991. 766 p.
- Bouchnita A., Jebrane A. A Hybrid Multi-Scale Model of COVID-19 Transmission Dynamics to Assess the Potential of Non-Pharmaceutical Interventions // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020. Vol. 138. 109941. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109941>
- Braun B., Taraktas B., Beckage B., Molofsky J. Simulating Phase Transitions and Control Measures for Network Epidemics Caused by Infections with Presymptomatic, Asymptomatic, and Symptomatic Stages // *PLoS*. 2020. Vol. 15 (9). 0238412. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238412>
- Churches T., Jorm L. Flexible, Freely Available Stochastic Individual Contact Model for Exploring COVID-19 Intervention and Control Strategies: Development and Simulation // *JMIR Public Health and Surveillance*. 2020. Vol. 6. No. 3. 18965. <https://doi.org/10.2196/18965>
- Currie C.S.M., Fowler J.W., Kotiadis K., Monks T., Onggo B.S., Robertson D.A., Tako A.A. How Simulation Modelling Can Help Reduce the Impact of COVID-19 // *Journal of Simulation*. 2020. Vol. 14 (2). Pp. 83–97. <https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1751570>
- De Araújo L.P., Silva E.N., Costa A.L.C., Corsetti P.P., de Almeida L.A. Targeting Conserved Epitopes in Structural Proteins: A Next-Generation Vaccine Strategy Against the Newly Identified HKU5-CoV-2 Virus // *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2025. Vol. 10. 164. <https://doi.org/10.1038/s41392-025-02257-0>
- Epstein J.M., Cummings D., Chakravarty S., Singa R. Toward a Containment Strategy for Smallpox Bioterror: An Individual-Based Computational Approach / Center on Social and Economic Dynamics. Working Paper No. 31. 2002. 24 p. URL: <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/bioterrorism.pdf> (дата обращения: июнь 2025).
- Firth J.A., Hellewell J., Klepac P., Kissler S., CMMID COVID-19 Working Group, Kucharski A.J., Spurgin L.G. Using a Real-World Network to Model Localized COVID-19 Control Strategies // *Nature Medicine*. 2020. Vol. 26 (10). Pp. 1616–1622. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-1036-8>
- Frias-Martinez E., Williamson G., Frias-Martínez V. An Agent-Based Model of Epidemic Spread Using Human Mobility and Social Network Information / IEEE International Conference on Privacy, Security, Risk, and Trust, and IEEE International Conference on Social Computing. 2011. Pp. 57–64. <https://doi.org/10.1109/PASSAT/SocialCom.2011.142>
- Hunter E., Namee B.M., Kelleher J.A. A Taxonomy for Agent-Based Models in Human Infectious Disease Epidemiology // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2017. Vol. 20 (3). 2. <https://doi.org/10.18564/jasss.3414>
- Kruelen K., Bruin B., Ghorbani A., Mellema R., Kammler C., Vanhée L., Dignum V., Dignum F. How Culture Influences the Management of a Pandemic: A Simulation of the COVID-19 Crisis // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2022. Vol. 25 (3). 6. <https://doi.org/10.18564/jasss.4877>
- 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., 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. Vol. 16 (3). Pp. 252–261. <https://doi.org/10.1097/PHH.0b013e3181ce594e>
- Li T., Jager W. How Availability Heuristic, Confirmation Bias and Fear May Drive Societal Polarisation: An Opinion Dynamics Simulation of the Case of COVID-19 Vaccination // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2023. Vol. 26 (4). 2. <https://doi.org/10.18564/jasss.5135>

- Lorig F., Johansson E., Davidsson P. Agent-Based Social Simulation of the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2021. Vol. 24 (3). 5. <https://doi.org/10.18564/jasss.4601>
- Mashkova A.L., Nevolin I.V., Savina O.A., Burilina M.A., Mashkov E.A. Generating Social Environment for Agent-Based Models of Computational Economy // *Communications in Computer and Information Science*. 2020. Vol. 1349. Pp. 291–305. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67238-6_21
- Mashkova A.L., Novikova E.V., Savina O.A., Mamatov A.V., Mashkov E.A. Simulating Budget System in the Agent Model of the Russian Federation Spatial Development // *Communications in Computer and Information Science*. 2020b. Vol. 1135. Pp. 17–31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39296-3_2
- Merler S., Ajelli M., Fumanelli L., Gomes M.F.C., 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. Vol. 15. Issue 2. Pp. 204–211. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(14\)71074-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)71074-6)
- Parker J., Epstein J.M. A Distributed Platform for Global-Scale Agent-Based Models of Disease Transmission // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 2011. Vol. 22. Issue 1. Pp. 1–25. <https://doi.org/10.1145/2043635.2043637>
- Wildman W., Hodulik G., Shults F.L. The Role of Values in Pandemic Management: An Agent-Based Model // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2024. Vol. 27 (1). 19. <https://doi.org/10.18564/jasss.5350>
- Zhang Z., Jalali M.S., Ghaffarzadegan N. Behavioral Dynamics of Epidemic Trajectories and Vaccination Strategies: A Simulation-Based Analysis // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2025. Vol. 28 (1). 3. <https://doi.org/10.18564/jasss.5583>

REFERENCES

- Abdollahi E., Haworth-Brockman M., Keynan Y., Langley J.M., Moghadas S.M. Simulating the Effect of School Closure during COVID-19 Outbreaks in Ontario, Canada. *BMC Medicine*, 2020, vol. 18, no. 230. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01705-8>
- Ale Ebrahim Dehkordi M., Melnyk A., Herder P., Ghorbani A. Examining the Interplay between National Strategies and Value Change in the Battle Against COVID-19: An Agent-Based Modelling Inquiry. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2024, vol. 27 (1). 18. <https://doi.org/10.18564/jasss.5283>
- Aleman D.M., Wibisono T.G. A Nonhomogeneous Agent-Based Simulation Approach to Modeling the Spread of Disease in a Pandemic Outbreak. *Interfaces*, 2011, vol. 41, no. 3, pp. 301–315. <https://doi.org/10.1287/inte.1100.0550>
- Aleta A., Martín-Corral D., Pastore Y., Piontti A., Ajelli M., Litvinova M., Chinazzi M., Dean N.E., Halloran M.E., Longini I.M.Jr., Merler S., Pentland A., Vespignani A., Moro E., Moreno Y. Modelling the Impact of Testing, Contact Tracing and Household Quarantine on Second Waves of COVID-19. *Nature Human Behaviour*, 2020, vol. 4, pp. 964–971. <https://doi.org/10.1038/s41562-020-0931-9>
- Anderson R.M., May R.M. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Oxford: Oxford University Press, 1991, 766 p.
- Bouchnita A., Jebrane A.A Hybrid Multi-Scale Model of COVID-19 Transmission Dynamics to Assess the Potential of Non-Pharmaceutical Interventions. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2020, vol. 138. 109941. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109941>
- Braun B., Taraktas B., Beckage B., Molofsky J. Simulating Phase Transitions and Control Measures for Network Epidemics Caused by Infections with Presymptomatic,

- Asymptomatic, and Symptomatic Stages. *PLoS*, 2020, vol. 15 (9). 0238412. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238412>
- Churches T., Jorm L. Flexible, Freely Available Stochastic Individual Contact Model for Exploring COVID-19 Intervention and Control Strategies: Development and Simulation. *JMIR Public Health and Surveillance*, 2020, vol. 6, no. 3. 18965. <https://doi.org/10.2196/18965>
- Currie C.S.M., Fowler J.W., Kotiadis K., Monks T., Onggo B.S., Robertson D.A., Tako A.A. How Simulation Modelling Can Help Reduce the Impact of COVID-19. *Journal of Simulation*, 2020, vol. 14 (2), pp. 83–97. <https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1751570>
- De Araújo L.P., Silva E.N., Costa A.L.C., Corsetti P.P., de Almeida L.A. Targeting Conserved Epitopes in Structural Proteins: A Next-Generation Vaccine Strategy Against the Newly Identified HKU5-CoV-2 Virus. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 2025, vol. 10. 164. <https://doi.org/10.1038/s41392-025-02257-0>
- Epstein J.M., Cummings D., Chakravarty S., Singa R. *Toward a Containment Strategy for Smallpox Bioterror: An Individual-Based Computational Approach*. Center on Social and Economic Dynamics. Working Paper No. 31, 2002, 24 p. Available at: <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/bioterrorism.pdf> (accessed June 2025).
- Firth J.A., Hellewell J., Klepac P., Kissler S., CMMID COVID-19 Working Group, Kucharski A.J., Spurgin L.G. Using a Real-World Network to Model Localized COVID-19 Control Strategies. *Nature Medicine*, 2020, vol. 26 (10), pp. 1616–1622. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-1036-8>
- Frias-Martinez E., Williamson G., Frías-Martínez V. *An Agent-Based Model of Epidemic Spread Using Human Mobility and Social Network Information*. IEEE International Conference on Privacy, Security, Risk, and Trust, and IEEE International Conference on Social Computing, 2011, pp. 57–64. <https://doi.org/10.1109/PASSAT/SocialCom.2011.142>
- Hunter E., Namee B.M., Kelleher J.A. A Taxonomy for Agent-Based Models in Human Infectious Disease Epidemiology. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2017, vol. 20 (3). 2. <https://doi.org/10.18564/jasss.3414>
- Kruelen K., Bruin B., Ghorbani A., Mellema R., Kammler C., Vanhée L. Dignum V., Dignum F. How Culture Influences the Management of a Pandemic: A Simulation of the COVID-19 Crisis. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2022, vol. 25 (3). 6. <https://doi.org/10.18564/jasss.4877>
- 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., 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, vol. 16 (3), pp. 252–261. <https://doi.org/10.1097/PHH.0b013e3181ce594e>
- Li T., Jager W. How Availability Heuristic, Confirmation Bias and Fear May Drive Societal Polarisation: An Opinion Dynamics Simulation of the Case of COVID-19. *Vaccination Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2023, vol. 26 (4). 2. <https://doi.org/10.18564/jasss.5135>
- Lorig F., Johansson E., Davidsson P. Agent-Based Social Simulation of the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2021, vol. 24 (3). 5. <https://doi.org/10.18564/jasss.4601>
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Khabriev B.R., Ilyin N.I. Software and Analytical Complex ‘MÖBIUS’ – A Tool for Planning, Monitoring and Forecasting the Socio-Economic System Of Russia. *Isskustvenye Obshchestva = Artificial Societies*, 2020b, vol. 15, issue 4. <https://doi.org/10.18254/S207751800012303-2> (In Russian).

- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Ageeva A.F. COVID-19 Epidemic Modeling – Advantages of an Agent-Based Approach. *Ekonomicheskie i Sotsialnye Peremeny: Fakty, Tendentsii, Prognoz = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2020a, vol. 13, no. 4, pp. 58–73. <https://doi.org/10.15838/esc.2020.4.70.3> (In Russian).
- Mamatov A.V., Mashkova A.L., Novikova E.V., Savina O.A. Reproduction of Dynamics of Population of Russian Regions using Agent Modeling. *Informatsionnye Sistemy i Tekhnologii = Information Systems and Technologies*, 2019, no. 2 (112), pp. 48–55. (In Russian).
- Mashkova A.L., Bakhtizin A.R. Analyzing the Industry Structure and Dynamics of Commodity Exchange between Russia, China, The USA and the EU under Trade Restrictions. *Ekonomicheskie i Sotsialnye Peremeny: Fakty, Tendentsii, Prognoz = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 54–80. <https://doi.org/10.15838/esc.2023.3.87.3> (In Russian).
- Mashkova A.L., Nevolin I.V., Savina O.A., Burilina M.A., Mashkov E.A. Generating Social Environment for Agent-Based Models of Computational Economy. *Communications in Computer and Information Science*, 2020, vol. 1349, pp. 291–305. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67238-6_21
- Mashkova A.L., Novikova E.V., Savina O.A., Mamatov A.V., Mashkov E.A. Simulating Budget System in the Agent Model of the Russian Federation Spatial Development. *Communications in Computer and Information Science*, 2020b, vol. 1135, pp. 17–31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39296-3_2
- Merler S., Ajelli M., Fumanelli L., Gomes M.F.C., 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, vol. 15, issue 2, pp. 204–211. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(14\)71074-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)71074-6)
- Minakir P.A. Pandemic Economy: The Russian Way. *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 7–18. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2020.2.007-018> (In Russian).
- Parker J., Epstein J.M. A Distributed Platform for Global-Scale Agent-Based Models of Disease Transmission // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2011, vol. 22, issue 1, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1145/2043635.2043637>
- Pospelov D.A. *Situational Management: Theory and Practice*. Moscow, 2021, 288 p. (In Russian).
- Russian Business Response to the Pandemic (The Round Table at the HSE University). *Voprosy Ekonomiki [Economic Issues]*, 2022, no. 5, pp. 147–160. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-5-147-160> (In Russian).
- Wildman W., Hodulik G., Shults F.L. The Role of Values in Pandemic Management: An Agent-Based Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2024, vol. 27 (1). 19. <https://doi.org/10.18564/jasss.5350>
- Zhang Z., Jalali M.S., Ghaffarzadegan N. Behavioral Dynamics of Epidemic Trajectories and Vaccination Strategies: A Simulation-Based Analysis. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2025, vol. 28 (1). 3. <https://doi.org/10.18564/jasss.5583>

Поступила в редакцию / Submitted: 30.07.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after reviewing: 25.08.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 01.09.2025

Доступно онлайн / Available online: 30.09.2025