

ДИСКУССИОННЫЕ СТАТЬИ, ЛЕКЦИИ, НОВЫЕ ТРЕНДЫ МЕДИЦИНСКОЙ НАУКИ

DISCUSSION PAPERS, LECTURES, NEW TRENDS IN MEDICAL SCIENCE

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОЭПИДЕМИЧЕСКИХ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ МЕР С ПОМОЩЬЮ ОРИГИНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

РЕЗЮМЕ

Каратеев А.Ю.

ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»
(119991, г. Москва, Ленинские горы, 1,
Россия)

Автор, ответственный за переписку:
Каратеев Артём Юрьевич,
e-mail: artem.karateev@gmail.com

Обоснование. Продолжающаяся пандемия COVID-19, связанные с ней человеческие жертвы, возможность возникновения новых эпидемических угроз актуализируют поиск эффективных мер противодействия. Одним из наиболее эффективных инструментов борьбы, как показал опыт пандемии COVID-19, оказались ограничительные меры различного характера, особенно значимые в условиях, когда медицинские меры противодействия отсутствуют или недостаточны. Вместе с тем тема ограничительных мер и их математического моделирования, особенно с учётом её важности, раскрыта в недостаточной степени.

Цель исследования. Определение возможности оценки эффективности противоэпидемических ограничительных мер с помощью применения оригинальных моделей клеточных автоматов с межклеточными границами.

Методы. Для определения влияния ограничительных мер на динамику ежедневного прироста инфицированных разработан оригинальный клеточный автомат с межклеточными границами, позволяющий моделировать противоэпидемические меры различной строгости. В проведённых численных экспериментах по методу Монте-Карло с последующей статистической обработкой изучалось воздействие ограничительных мер различной строгости на количество инфицированных, продолжительность эпидемии, качество прогнозирования. В заключительной серии экспериментов моделировалось распространение вируса COVID-19 в Германии в первой половине 2020 года.

Результаты показывают, что даже простая модель клеточного автомата с границами успешно описывает ход эпидемии и позволяет оценить эффективность ограничительных мер. Представлена зависимость ежедневного прироста инфицированных от строгости мер; показано, какие характеристики популяции могут влиять на эту зависимость. Выявлено, что наименее предсказуемый эффект имеют меры средней строгости (40–50 %, согласно Stringency Index), при которых может наступить как быстрая локализация очага, так и распространение эпидемии на большую часть популяции. Слабые и строгие ограничения дают более предсказуемый эффект.

Заключение. Модели клеточных автоматов с межклеточными границами имеют большой потенциал для моделирования влияния ограничительных мер на ход эпидемии, позволяя прогнозировать динамику инфицированных на основе данных о популяции и вводимых ограничительных мерах.

Ключевые слова: COVID-19, эпидемия, ограничительные меры, математическое моделирование, агентно-ориентированные модели, клеточный автомат

Статья поступила: 25.08.2022
Статья принята: 29.03.2023
Статья опубликована: 05.05.2023

Для цитирования: Каратеев А.Ю. Оценка эффективности противоэпидемических ограничительных мер с помощью оригинальных моделей клеточных автоматов. *Acta biomedica scientifica*. 2023; 8(2): 12-25. doi: 10.29413/ABS.2023-8.2.2

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF RESTRICTIVE EPIDEMIC CONTROL MEASURES USING ORIGINAL MODELS OF CELLULAR AUTOMATON

Karateev A.Yu.

Lomonosov Moscow State University
(Leninskiye Gory 1, Moscow 119899,
Russian Federation)

Corresponding author:

Artem Yu. Karateev,
e-mail: artem.karateev@gmail.com

ABSTRACT

Background. The ongoing COVID-19 pandemic, the human casualties caused by it, and the possibility of new epidemical threats make the search for effective countermeasures actual. One of the most effective tools, as the experience of the COVID-19 pandemic has shown, is restrictive measures of various types, which are especially significant with medical countermeasures being unavailable or insufficient. At the same time, the topic of restrictive measures and their mathematical modeling, especially given its importance, is not sufficiently disclosed in the scientific literature.

The aim. To determine the possibility of assessing the effectiveness of restrictive epidemic control measures using original models of cellular automaton with intercellular boundaries.

Methods. To determine the impact of restrictive measures on the dynamics of the daily increase in infected people, an original cellular automaton with intercellular boundaries was developed, which makes it possible to simulate epidemic control measures of varying stringency. In the simulations carried out using the Monte Carlo method with subsequent statistical processing, we studied the impact of restrictive measures of varying stringency on the number of infected people, the duration of the epidemic, and the quality of forecasting. The final series of experiments simulated the spread of the COVID-19 virus in Germany in the first half of 2020.

The results show that even a simple cellular automaton model with boundaries successfully describes the course of the epidemic and allows us to assess the effectiveness of restrictive measures. The dependence of the daily increase in infected people on the stringency of measures is presented; it is shown what characteristics of the population can influence this dependence. It was found that the measures of medium stringency (40–50 % according to the Stringency Index) have the least predictable effect; they can cause both rapid localization of the focus and the spread of the epidemic to a large part of the population. Weak and strong measures give a more predictable effect.

Conclusion. Cellular automaton models with intercellular boundaries have great potential for modeling the impact of restrictive measures on the course of an epidemic, making it possible to predict the dynamics of infected people based on the population data and the restrictive measures being introduced.

Key words: COVID-19, epidemic, restrictive measures, mathematical modeling, agent-based models, cellular automaton

Received: 25.08.2022
Accepted: 29.03.2023
Published: 05.05.2023

For citation: Karateev A.Yu. Assessment of the effectiveness of restrictive epidemic control measures using original models of cellular automaton. *Acta biomedica scientifica*. 2023; 8(2): 12-25. doi: 10.29413/ABS.2023-8.2.2

Продолжающаяся пандемия COVID-19, связанные с нею человеческие жертвы, экономические и неэкономические потери, возможность возникновения новых эпидемических угроз делают вопрос о поиске эффективных мер противодействия таким угрозам актуальным. Одним из наиболее эффективных инструментов борьбы, как показал опыт пандемии COVID-19, оказываются ограничительные меры различного характера. Особенно значимы данные меры в условиях возникновения новых вирусов, медицинские меры противодействия которым отсутствуют или недостаточны. Поэтому неудивительно, что страны, лидировавшие в международных рейтингах The Most Efficient Health Care (Bloomberg), The Global Health Security Index (Nuclear Threat Initiative, Университет Джона Хопкинса, The Economist Intelligence Unit) и рассчитывавшие на свой институциональный потенциал, оказались не в лучшем положении в период пандемии [1]. Значительно более успешным, особенно на начальном этапе, пока не были разработаны вакцины и протоколы лечения, оказался расчёт на ограничительные меры.

Ограничительные меры уже стали предметом изучения ряда исследований, нацеленных как на выявление их основных видов и оценку степени вводимых ограничений (см., например, проект Оксфордского университета [2]), так и на изучение связи между ограничениями и тяжестью прохождения пандемии [3, 4 и др.]. Вместе с тем надо отметить, что тема ограничительных мер, особенно с учётом её важности, раскрыта ещё в недостаточной степени. Целый ряд вопросов ещё нуждается в уточнении: какова оптимальная степень вводимых ограничений? Какие виды ограничений дают наибольший эффект? Имеет ли значение порядок введения различных видов ограничений? При этом очевидно, что ответы на эти вопросы не могут быть автоматически трансформированы в рецепты для конкретных ситуаций – принятие решения в каждом случае должно учитывать местную специфику. В связи с этим возникает вопрос о том, какие особенности страны или региона влияют на эффективность ограничительных мер.

В настоящем исследовании рассматриваются возможности оценки эффективности ограничительных мер с помощью применения оригинальных моделей клеточных автоматов (КА). Клеточные автоматы представляют собой разновидность агентных моделей (agent-based models), используемых, в частности, в эпидемиологических исследованиях для имитационного моделирования распространения эпидемий в популяции, состоящей из отдельных агентов (клеток). Принципиальной новизной обсуждаемого в статье КА являются межклеточные границы, с помощью которых моделируются вводимые ограничительные меры.

Считается, что понятие о КА вошёл в науку в конце 1940-х годов Дж. фон Нейман для моделирования сложных, пространственно протяжённых систем [5], основываясь на идее С. Улама [6]. Справедливо будет и утверждение, что «клеточные автоматы изобретались много раз под разными названиями, и несколько отличающиеся друг от друга понятия употреблялись под одним и тем же названием» [7]. Значительный вклад в развитие

теории клеточных автоматов и их использование внесли А. Бёркс [8], Дж. Холланд [9], Г. Хедлунд [10], С. Вольфрам [11 и др.] и другие авторы. КА позволяют моделировать различные по природе массовые процессы: распространение информации, мнений, протестной активности (как в реальном мире, так и в виртуальных социальных сетях); группообразование и возникновение сегрегации; рост городов; территориальную экспансию государств; военные конфликты и т. д.

Клеточные автоматы являются популярным инструментом для моделирования эпидемий. Одним из первых применение КА для моделирования эпидемий описал Н. Бейли [12 и др.]. За ним последовали работы Д. Моллисона [13], С. Яковица и коллег [14] и ряда других исследователей [15, 16 и др.]. Обращают на себя внимание работы отечественных авторов: М.М. Башабшеха и Б.И. Масленникова [17], Д.К. Горковенко [18], А.В. Шабунина [19] и др. Пандемия COVID-19, вызвав волну публикаций по моделированию эпидемий, способствовала росту интереса к моделям, использующим КА [20, 21 и др.]. Однако при всём обилии публикаций потенциал клеточных автоматов для моделирования ограничительных мер фактически не используется.

Преимуществами КА являются наглядность, относительная простота создания модели и проведения экспериментов с ней. Важным доводом в пользу использования КА является также и то, что имитационное моделирование с их помощью не требует сверхвысокой мощности вычислительного устройства и может проводиться на обычном персональном компьютере.

Основным элементом клеточного автомата является *клетка*, которая, чаще всего имеет вид квадрата и в рамках моделирования эпидемий может интерпретироваться в качестве отдельного индивида, малой группы (семьи) или территориальной общности (жители городского квартала, деревни и т. д.). Множество соприкасающихся клеток образуют «игровое поле», или *решётку* КА; чаще всего решётка имеет вид, показанный на рисунке 1. В различных моделях клеточное поле может интерпретироваться и в качестве географического пространства, и в качестве условно изображённой популяции. С помощью геометрии клеток и формы решётки можно увеличивать или уменьшать количество имеющихся у клетки соседей и таким образом учитывать плотность связей между индивидами (или группами) в моделируемой популяции, а также заразность патогена.

Клетка может находиться в одном из нескольких *состояний*; минимально таких состояний может быть только два (например, клетка может быть инфицированной или неинфицированной). Переход клетки из одного состояния в другое определяется набором *правил*, которые в самом простом случае учитывают 1) текущее состояние клетки и 2) текущее состояние соседних с ней клеток. К примеру, можно задать такое правило: если у клетки два или более инфицированных соседа, то и сама клетка тоже становится инфицированной (см. рис. 1). Данное правило можно усложнить, указав, что инфицирование происходит при наличии двух или более инфицированных соседей не всегда, а с некоторой вероятностью, учи-

тывающей, с одной стороны, заразность патогена, а с другой – врождённую или приобретённую устойчивость индивида. В более сложных моделях подверженность индивида заболеванию может дополнительно являться функцией его возраста, пола, образа жизни, профессии, наличия хронических заболеваний и т. д.).

Клеточные автоматы позволяют учесть, что степень опасности инфицированной клетки для её соседей может меняться со временем. При этом могут быть учтены не просто средняя длительность инкубационного периода и средняя длительность контагиозности, а наличие различных форм течения заболевания (например, лёгкой, средней, тяжёлой), для каждой из которых задаётся своя функция изменения контагиозности от времени.

Таким образом, на состояние клетки может влиять большое количество факторов, связанных как со свойствами самой клетки, так и со свойствами и состоянием соседей клетки и со случайными факторами.

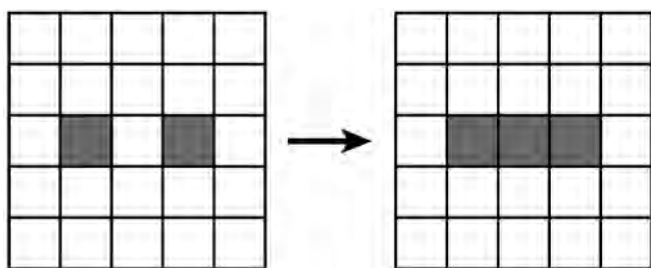


РИС. 1.

Два последовательных шага работы клеточного автомата, приводящие к инфицированию центральной клетки

FIG. 1.

Two consecutive steps of the cellular automaton leading to the infection of the central cell

Классические КА являются *дискретными* динамическими системами – то есть время в них измеряется шагами, а жизнь системы состоит как бы из отдельных статичных кадров.

Благодаря простоте и возможности практически бесконечно увеличивать набор свойств клеток, набор состояний и набор правил смены состояний, модели эпидемий, построенные с использованием КА, успешно конкурируют с классическими моделями, использующими системы обыкновенных дифференциальных уравнений – SIS, SIR, SIRS, SEIRD – и аналогичными, разработка которых началась ещё в 1920-е годы [22]. В пользу применения КА выступает и тот факт, что модели, использующие обыкновенные дифференциальные уравнения, являются так называемыми *моделями среднего поля*, то есть моделями, подразумевающими случайное и равномерное распределение здоровых и инфицированных индивидуумов в популяции. Это предположение не учитывает, что эпидемии чаще всего имеют очаговый характер, то есть распределение инфицированных и здоровых не является равномерным. Модели КА позволяют учесть неравномерность распределения в популяции здоровых и инфицированных.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение возможности оценки эффективности противозидемических ограничительных мер на основе применения оригинальных моделей клеточных автоматов с межклеточными границами.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- поиск того, как в рамках модели КА могут быть реализованы ограничительные меры;
- создание оригинальной модели КА, симулирующей введение ограничительных мер, на языке R;
- проведение численных экспериментов с созданной моделью КА;
- анализ результатов численных экспериментов.

Предлагаемый в статье метод может быть использован как эпидемиологами, так и лицами, принимающими решения, при планировании введения ограничительных мер для определения их необходимого уровня строгости, а также при оценке эффективности уже введённых мер.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ МЕР

Вводимые на государственном, региональном, местном уровнях меры ограничительного характера (как это ярко показал опыт противодействия COVID-19) направлены прежде всего на уменьшение физических контактов населения, в ходе которых происходит передача вируса. То есть это введение барьеров на пути вируса путём прекращения контактов или уменьшения их интенсивности. К этим мерам относятся: перевод сотрудников на удалённую работу; закрытие мест общественного питания; перевод учащихся на заочную форму обучения; ограничения на посещение общественных мест; ограничения выхода на улицу и т. д. Кроме того, существуют *адресные* ограничительные меры, направленные на уменьшение (или даже исключение) контактов инфицированного индивида, представляющего опасность для окружающих.

Для моделирования ограничительных мер нами были использован особый тип клеточной решётки с *границами*, ранее не встречавшийся авторам в научной литературе¹. Таким образом, если в обычном КА решётка состоит только из клеток, то в предлагаемом КА вводятся дополнительные объекты – границы, находящиеся между соседними клетками.

Введение ограничительных мер можно интерпретировать как закрытие части границ между клетками. Если граница закрыта, она становится непроницаемой – возбудитель не может через неё передаваться. Закрытие границы между двумя клетками на практике может быть выражено как перевод двух сотрудников на удалённую работу, в результате чего прерываются их физические контакты, как прекращение очного общения двух одноклассников при отмене занятий в школе и т. д. Вполне очевидно,

¹ Понятие границы встречается в некоторых работах по КА, но чаще всего речь идет о выделении на клеточном поле различных зон клеток, так что граница в этом случае не является значащим элементом модели (см., например, [23]). В нашем случае границы являются важным элементом модели, влияющим на состояния клеток и, таким образом, на динамику всей системы.

что на практике далеко не все вводимые ограничения являются «непроницаемыми», как аналогично и обратное: без введения ограничительных мер границы между клетками тоже не являются полностью «прозрачными» – контакт инфицированного индивида с неинфицированным не обязательно приводит к тому, что второй тоже становится инфицированным. В данной публикации мы ограничимся рассмотрением моделей с полностью непроницаемыми границами, показав, что даже такие упрощённые модели позволяют хорошо описывать эффект применения ограничительных мер. Вместе с тем в более сложных моделях оправдано использование частично проницаемых границ, то есть таких, которые с введением ограничительных мер снижают проницаемость, уменьшая вероятность прохождения вируса от клетки к клетке, но не исключая её полностью.

На представленном рисунке (рис. 2) закрытые границы показаны как черные прямоугольники. Предположим, что вирус может передаваться только ближайшим клеткам в 4 направлениях (вверх, вниз, влево, вправо), но не по диагонали – т. е. мы будем использовать так называемую окрестность Неймана ранга 1. Центральная клетка на рисунке имеет две открытые (верхнюю и правую) и две закрытые (левую и нижнюю) границы. Непосредственное инфицирование левой и нижней клеток от центральной клетки в этом случае невозможно. Возбудитель может быть передан только верхней и правой клеткам. В принципе, ничто не мешает использовать другие виды окрестностей – окрестность Мура (передача вируса идёт ещё и по диагонали) или окрестность Марголуса (геометрия которой не является статичной, т. е. на одном шаге соседями являются одни клетки, а на другом шаге – другие; данный вид окрестности успешно описывает периодические изменения круга контактов, что характерно, например, для работающего индивидуума, когда в будние дни он активно взаимодействует с коллегами по работе, а на выходных – с семьёй и друзьями).

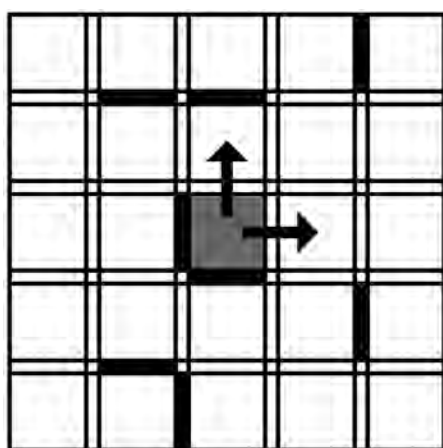


РИС. 2.

Клеточный автомат с закрытыми границами: стрелками показаны направления, по которым может передаваться вирус

FIG. 2.

Cellular automaton with closed boundaries: the arrows show the directions in which the virus can be transmitted

Степень строгости (жёсткости) ограничительных мер описывается в модели как доля закрытых границ. Очевидно, что рост доли закрытых границ влияет на скорость распространения вируса и на возможность локализации эпидемических очагов. В прикладных исследованиях процент закрытых границ можно считать равным, например, проценту снижения активности, который рассчитывается для крупных городов мира [24], или индексу самоизоляции [25], либо брать его из таких источников, как COVID-19 Government Response Tracker [2].

Важным является вопрос о том, какие именно границы на клеточном поле должны быть закрыты. На рисунке 2 показано клеточное поле с 25 клетками и 40 границами между ними, 8 из которых (т. е. 20 %) являются закрытыми. В самом простом случае расположение закрытых границ можно задавать случайно, основываясь на идее о том, что при введении ограничительных мер, если они не являются адресными, невозможно точно предсказать, между какими конкретно индивидами произойдёт разрыв физических контактов.

Случайное расположение закрытых границ (при котором единственным управляющим параметром является жёсткость ограничительных мер – т. е. доля закрытых границ) создаёт определённые сложности при моделировании влияния мер на распространение эпидемии. Закрытые границы могут распределяться по полю неравномерно, образовывать (или не образовывать) протяжённые структуры, локализовать (или не локализовать) очаги. Всё это делает необходимым проведение серий экспериментов с моделью по методу Монте-Карло с дальнейшей статистической обработкой полученных результатов.

Как показывает практика противодействия пандемии COVID-19 и другими эпидемиями, политика ограничений может быть превентивной, когда ограничения вводятся ещё до появления инфицированных в стране или регионе, либо реагирующей (ситуативной, догоняющей), когда ограничения вводятся уже после появления инфицированных. Оба эти сценария могут быть реализованы в моделях, использующих КА. При первом сценарии моделируется распространение эпидемии на клеточном поле с уже закрытыми границами, при втором сценарии эпидемия до определённого момента развивается без ограничений.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА

В ходе экспериментов использовался клеточный автомат со следующими характеристиками:

- решётку КА составляют одинаковые квадратные клетки;
- клетка может находиться в двух состояниях – неинфицированном или инфицированном;
- окрестность клетки – это окрестность Неймана ранга 1 (т. е. вирус от инфицированной клетки может передаваться только четырём её соседям – сверху, снизу, слева и справа);

- между клеткой и клетками, составляющими её окрестность, имеются 4 границы, и каждая граница может находиться в двух состояниях – открытом или закрытом;

- передача вируса от инфицированной клетки к неинфицированной происходит в том случае, если между этими клетками открыта граница. Для упрощения модели и получения более чёткой зависимости протекания эпидемии от ограничительных мер рассматривается вариант безусловного инфицирования при открытой границе;

- клетка начинает представлять опасность для соседей на следующий шаг после инфицирования (инкубационный период равен одному шагу), риск передачи вируса от инфицированной клетки сохраняется в течение 5 шагов;

- клеточное поле имеет квадратную форму, его размер 59×59 клеток (всего 3481 клетка и 6844 границы между клетками);

- распространение вируса начинается с центральной клетки.

Заданный размер поля позволяет проследить, во-первых, характер распространения эпидемии в замкнутой популяции, а во-вторых, характер эпидемии в незамкнутой популяции, поскольку в течение как минимум 30 шагов (или, интерпретируя 1 шаг как 1 сутки, в течение 30 дней) на распространение эпидемии влияют только вводимые ограничительные меры и не влияет краевой эффект (то есть никак не сказывается наличие краёв у клеточного поля). Пример работы описанного КА показан на рисунке 3.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены 3 серии экспериментов, нацеленные на оценку того, как ограничительные меры влияют на прохождение эпидемии и тяжесть её последствий.

В первой серии экспериментов рассматривалось то, какой характер в зависимости от строгости ограничительных мер (т. е. от доли закрытых границ между клетками) имеет прохождение эпидемии в замкнутой популяции размером 59×59 клеток. Прежде всего, акцент делался на изучении скорости распространения вируса, продолжительности эпидемии, ежедневном приросте инфицированных и пиковых значениях.

Рассматривалось 9 вариантов строгости ограничительных мер: доля закрытых границ менялась от 0 до 80 % с шагом 10 %. Распределение закрытых границ на клеточном поле задавалось случайным образом в каждом эксперименте. Для каждого из 9 вариантов выполнялось по 100 экспериментов, результаты которых затем подвергались статистической обработке.

Во второй серии экспериментов изучалось влияние ограничений на начальном этапе эпидемии (продолжительностью 30 шагов) в незамкнутой популяции. В продолжение этого времени используемый КА позволяет моделировать распространение вируса без влияния краевого эффекта и сравнивать развитие эпидемии при различной строгости ограничений.

В этой серии акцент делался на изучении количества клеток, затронутых вирусом за ограниченный период времени, и на точности оценки эффекта от введения ограничительных мер.

Рассматривалось 16 вариантов строгости ограничительных мер: доля закрытых границ менялась от 0 до 80 % с шагом 5 %. Распределение закрытых границ на клеточном поле задавалось случайным образом в каждом эксперименте. Для каждого из 16 вариантов выполнялось по 100 экспериментов, результаты которых затем подвергались статистической обработке.

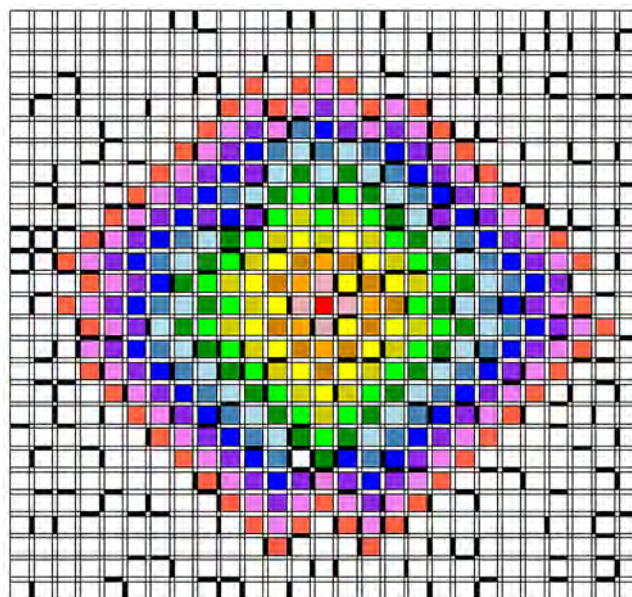


РИС. 3.

Пример работы клеточного автомата – распространение эпидемии при 20 % закрытых границ на 14-м шаге (показана центральная часть клеточного поля). Клетки, инфицированные на одном и том же шаге, имеют одинаковый цвет. Клетки, окружённые закрытыми границами со всех сторон, остаются неинфицированными на всём протяжении эпидемии

FIG. 3.

An example of the cellular automaton operation indicating the spread of an epidemic with 20 % of closed borders at the step 14 (the central part of the cellular field is shown). Cells infected at the same step have the same color. Cells surrounded by closed borders from all sides remain uninfected throughout the epidemic

В третьей серии из 100 экспериментов с помощью предложенного клеточного автомата с границами моделировалось распространение вируса COVID-19 в Германии в первой половине 2020 года.

Для построения модели и проведения численных экспериментов с ней использовалась среда R, версия 3.4.3. Статистическая обработка данных производилась с помощью среды R и MS Excel 2016 (Microsoft Corp., США) с использованием стандартных методов вариационной статистики. Аппаратное обеспечение: персональный компьютер с процессором Intel Core i5-1035G1 1,19 ГГц, оперативной памятью 8 Гб.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При отсутствии ограничений происходит постоянное увеличение ежедневного прироста инфицированных с 1-го по 30-й день. При этом визуально зона инфицированных клеток представляет собой разрастающийся с каждым шагом ромб. Начиная с 31-го дня за счёт краевого эффекта происходит сокращение ежедневного прироста, а зона инфицированных клеток из ромба превращается в восьмиугольник и постепенно заполняет всё клеточное поле. В результате популяция из 3481 клетки оказывается полностью инфицированной за 59 дней.

Введение слабых ограничений (10–30 % закрытых границ) практически не оказывает влияния на эту картину, лишь немного отодвигая пик по времени. Введение более жёстких ограничений (40–50 % закрытых границ) снижает пик, удлиняет прохождение эпидемии и защищает некоторую часть популяции (как правило, не очень значительную) от заражения. Строгие ограничения (60 % и более закрытых границ) позволяют в большом числе случаев локализовать эпидемический очаг, защитив заметную часть популяции.

На рисунке 4 показаны типичные графики количества ежедневно инфицированных при различных уровнях строгости ограничительных мер.

Как видно из графиков, характер прохождения эпидемии практически не меняется при 10, 20, 30%-х ограничениях, не сильно отличаясь от ситуации полного от-

сутствия ограничений. Дело в том, что, затрудняя распространение вируса, слабые ограничительные меры практически не ограждают популяцию от вируса, а лишь незначительно снижают скорость его распространения. Доля изолированных от вируса клеток весьма небольшая и составляет всего лишь 1,5 % при 30%-х ограничениях (см. табл. 1). Иными словами, вероятность избежать инфицирования при таких ограничениях составляет для клетки только 1,5 %.

Вместе с тем даже эти слабые меры имеют несомненный положительный эффект: они сдвигают пик эпидемии вправо, а окончание эпидемии также наступает позже, что снижает нагрузку на систему здравоохранения. Например, при 30%-х ограничениях нагрузка в первые 30 дней эпидемии снижается в среднем на 28 % (см. табл. 1). При этом стоит отметить и возможные негативные последствия введения слабых ограничений: в некоторых случаях пиковое значение может оказаться даже выше, чем при отсутствии ограничений (см. рис. 4). И хотя это превышение обычно составляет не более 10 %, данный негативный эффект следует учитывать при введении ограничений и прогнозировании нагрузки на систему здравоохранения.

Введение более строгих ограничений (40–50 % закрытых границ) принципиально меняет картину прохождения эпидемии: существенно (до 75 %) возрастает доля изолированной популяции; в среднем на 83 % снижается в первые 30 дней нагрузка на здравоохранение (при 50%-х ограничениях); заметно снижается пиковое значение.

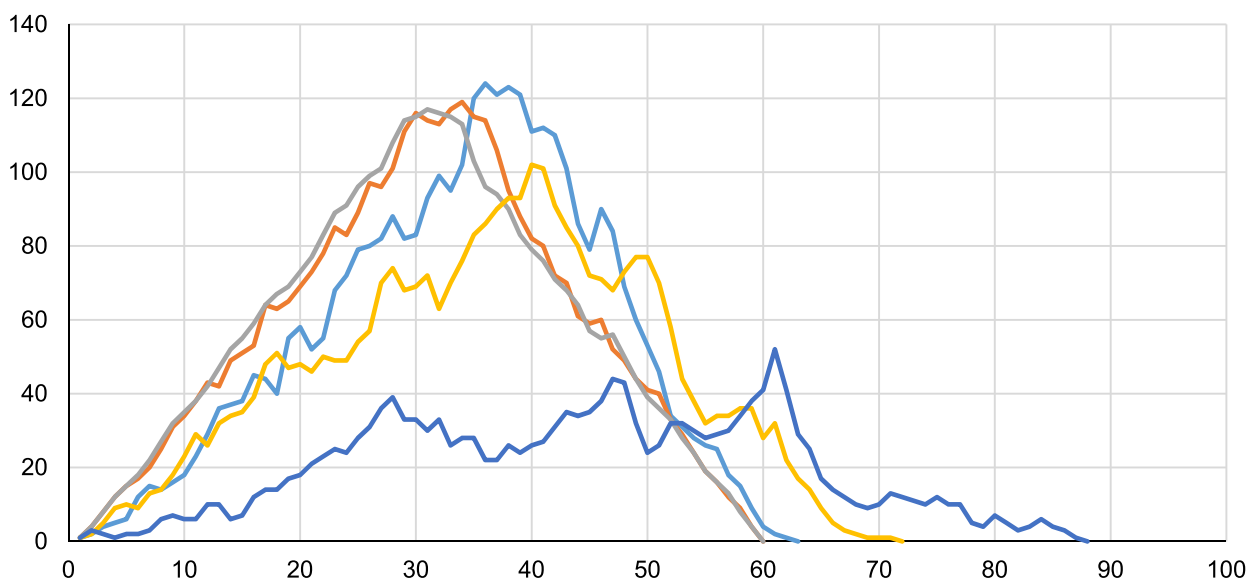


РИС. 4.

Примеры типичной динамики пошагового прироста инфицированных клеток при ограничениях различной строгости. По горизонтали – шаги; по вертикали – прирост инфицированных клеток. Серый цвет – 10 % ограничений; оранжевый цвет – 20 % ограничений; синий цвет – 30 % ограничений, жёлтый цвет – 40 % ограничений, голубой цвет – 50 % ограничений

FIG. 4.

Examples of typical dynamics of the stepwise growth of infected cells under restrictions of varying stringency. Horizontal axis represents steps; vertical axis – growth of infected cells. Gray – 10 % stringency; orange – 20 % stringency; blue – 30 % stringency; yellow – 40 % stringency; cyan – 50 % stringency

Сама эпидемия при этом может значительно удлиняться. Так, при 50%-х ограничениях продолжительность эпидемии выросла вдвое и более в 15 % экспериментов.

Наиболее важным эффектом от введения более строгих ограничений является рост вероятности локализации эпидемического очага, в результате чего значительная часть популяции оказывается защищена введёнными мерами от заражения. В той или иной мере, как было показано выше, изолированные клетки могут встречаться и при слабых ограничениях. Более того, при слабых ограничениях есть и вероятность купирования очага, однако она является очень низкой, так что полагаться на такой сценарий при слабых ограничениях не приходится. Именно при средних ограничениях можно рассматривать сценарий купирования очага: при 40%-х ограничениях локализация происходит примерно в 10 % случаев, а при 50%-х – уже примерно в 30 %².

Важной особенностью, выявленной в численных экспериментах с моделью, является большой разброс в результатах при введении мер средней строгости (см. табл. 1). В частности, если стандартное отклонение доли изолированных клеток при слабых ограничениях не превысило 0,5 %, то при средних ограничениях стандартное отклонение достигает 25 %, заметно снижая возможность предсказывать результативность вводимых мер. Так, в 100 экспериментах при 40 % закрытых границ минимальная доля изолированных клеток составила 5,08 %, максимальная – 99,97 %.

Аналогичный разброс наблюдается и по другим параметрам. При 40%-х ограничениях наблюдаются как случаи локализации очага в течение первой недели, так и рост продолжительности эпидемии до 100 дней. При 50%-х ограничениях разница между максимальной и минимальной продолжительностью увеличивается ещё больше и составляет почти 200 дней.

Таким образом, одним из основных недостатков мер средней строгости является плохо предсказуемый эффект от их введения. Анализируя поведение сконструированного КА, можно заметить, что, как и в реальной жизни, ограничительные меры выполняют две основные функции: изолируют часть популяции (1) и снижают скорость распространения вируса (2). Обе эти функции дают положительный эффект, одна – защищая часть популяции от инфицирования, другая – снижая нагрузку на систему здравоохранения и помогая выиграть время для мобилизации дополнительных ресурсов, разработки вакцин и т. д. При слабых ограничениях реализуется сценарий, при котором большее значение имеет эффект от снижения скорости распространения вируса, поскольку слабые ограничения (то есть малое число закрытых границ) не в состоянии оградить заметную часть популяции от инфицирования – ограждёнными оказываются единичные клетки. При увеличении количества за-

крытых границ всё чаще реализуется другой сценарий, при котором конфигурация закрытых границ такова, что позволяет оградить от вируса значительную часть клеток (вплоть до локализации очага эпидемии в первые несколько шагов работы КА). Чем выше количество закрытых границ, тем вероятней реализация такого сценария.

Большой разброс показателей и плохая прогнозируемость эффекта при введении мер средней тяжести связаны с тем, что при таких мерах почти с одинаковой вероятностью может быть реализован как первый из рассмотренных выше сценариев, так и второй. Подобная непредсказуемость хорошо иллюстрируется гистограммой распределения (рис. 5). По горизонтали отложена доля изолированных клеток при 50%-х ограничениях, а по вертикали – частота встречаемости такого результата. В трети случаев происходит локализация очага (самый правый столбик), однако в большом количестве случаев локализации не происходит, и эпидемия затрагивает значительное число клеток. В 21 % случаев эпидемия охватывает более половины популяции (самые левые четыре столбика).

Особо важно отметить, что при таком распределении ориентация на средние значения, может приводить к существенным ошибкам при прогнозировании результативности ограничительных мер. Средняя доля изолированных клеток при 50%-х ограничениях составляет 74,95 %, но, как видно по гистограмме, вероятность получить подобный результат (возьмём интервал от 70 до 80 %) составляет всего лишь 7 %, что гораздо ниже вероятности локализации очага или же распространения эпидемии на большую часть популяции.

Данный вывод представляется одним из самых важных в нашей работе, позволяя объяснить, в частности, высокую вариативность результатов от введения сходных ограничений в разных странах мира при борьбе с COVID-19.

Ограничительные меры средней строгости значительно усложняют распространение вируса в популяции. Закрытые границы создают сложные структуры на клеточном поле, схожие с лабиринтом; возникают довольно крупные пространства, частично или полностью отгороженные от очага эпидемии. В результате распространение вируса нередко идёт скачкообразно – иногда медленно, с небольшим приростом инфицированных за шаг, а иногда быстро. Волнообразные графики инфицированных являются типичными для средних ограничений (см. рис. 4).

Строгие ограничения (60 % и более закрытых границ) оказываются, как и следовало ожидать, наиболее эффективными. Уже при 60%-х ограничениях доля ограждённых от вируса клеток достигает в среднем 99 %, что делает дальнейшее увеличение строгости мер фактически лишённым смысла, особенно если учесть, что увеличение строгости мер на практике сопряжено с экономическими, политическими и иными издержками. При 60%-х ограничениях нагрузка на систему здравоохранения в первые 30 дней эпидемии снижается почти на 97 %, а средняя продолжительность эпидемии сильно сокращается за счёт доминирования случаев локализации эпидемического очага – таких случаев было 87 %. И хотя по-прежнему возможны случаи, когда продолжительность

² В контексте проведённых экспериментов под локализацией (купированием) очага понималась такая ситуация, при которой распространение вируса было остановлено введёнными мерами за 25 или менее дней. Данное значение было выбрано, исходя из того, что при остановке распространения вируса за этот период ограждёнными от него оказываются более 65 % популяции. Возможен выбор и другого количества дней, что, однако, не меняет основного вывода о заметном росте случаев купирования очага с увеличением строгости ограничений начиная с 40%-х ограничений.

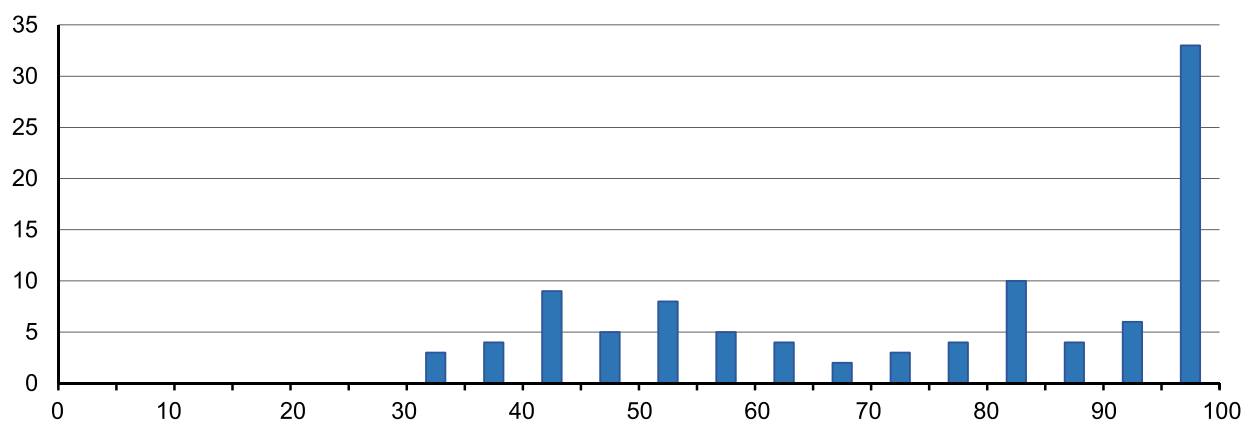


РИС. 5.

Распределение результатов численных экспериментов при 50%-х ограничениях. По горизонтали – доля клеток (%), которые оказались изолированными к окончанию распространения эпидемии в популяции; по вертикали – частота встречаемости (%)

FIG. 5.

Distribution of results of numerical experiments under 50 % restrictions. Horizontal axis represents the proportion of cells (%) that turned out to be isolated by the end of the spread of the epidemic in the population; vertical axis – frequency of occurrence (%)

ТАБЛИЦА 1
СТАТИСТИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Показатели	Строгость ограничительных мер (%)								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Средняя доля изолированных клеток (%)	0,00	0,02	0,27	1,50	14,33	74,95	99,07	99,78	99,92
Стандартное отклонение (%)	0,00	0,03	0,09	0,31	25,38	23,10	1,33	0,26	0,07
Среднее изменение продолжительности эпидемии (в днях и %)	0,00	+0,2	+0,95	+3,32	+9,19	+7,51	-48,15	-54,28	-56,71
	0,00	+0,34	+1,61	+5,63	+15,58	+12,73	-81,61	-92,00	-96,12
Стандартное отклонение (в днях)	0,00	0,53	1,23	2,14	20,53	46,60	12,05	4,45	1,67
Среднее снижение нагрузки на систему здравоохранения в первые 30 дней эпидемии (%)	0,00	3,60	12,54	28,18	52,59	83,42	96,85	98,89	99,54

TABLE 1
STATISTICS OF NUMERICAL EXPERIMENTS

эпидемии превышает продолжительность эпидемии без введения ограничений, разброс значений по этому показателю существенно сокращается по сравнению с 50%-ми ограничениями. Таким образом, результаты более строгих ограничений оказываются не только более эффективными в среднем, но и более предсказуемыми; это касается как ожидаемой продолжительности эпидемии, так и изолированной доли популяции.

Во второй серии экспериментов изучалось влияние ограничений на начальном этапе эпидемии (продолжительностью 30 шагов). В продолжение этого времени используемый КА позволяет моделировать распространение вируса без влияния краевого эффекта (т. е. затухание эпидемии в этих экспериментах не связано с тем, что популяция ограничена, а только с действием ограничений) и сравнивать развитие эпидемии при различной строгости ограничений.

Полученные результаты согласуются с результатами первой серии экспериментов. На рисунке 6 показано, как зависит среднее число инфицированных в 30-й день эпидемии от строгости ограничений (т. е. от доли за-

крытых границ между клетками). Как видно, слабые ограничения (10–30 % закрытых границ) приводят в среднем к довольно незначительному снижению темпов распространения вируса. При 30%-х ограничениях число инфицированных снижается примерно на 20 %.

Введение более строгих ограничений (40–50 % закрытых границ) заметно снижает темпы распространения вируса. На 30-й день при 50%-х ограничениях число инфицированных оказывается в среднем в 10 раз ниже, чем при отсутствии ограничений, и в 8 раз ниже, чем при 30%-х ограничениях.

Строгие ограничения (60 % и более закрытых границ) практически полностью останавливают распространение вируса.

Эффект от ограничений различной строгости наглядно виден на рисунке 7, где изображено среднее количество инфицированных по дням в зависимости от строгости ограничений. Как видно, при 50 % закрытых границ (и, соответственно, при более слабых ограничениях) количество инфицированных имеет тенденцию к постепенному росту. Более строгие ограничения (55 %) уже способны

переломить эту тенденцию – количество новых случаев заболевания стабильно, вирус распространяется по популяции с одинаковой скоростью. Ещё более строгие ограничения (60 %) позволяют постепенно снизить скорость распространения вируса и привести к остановке эпидемии.

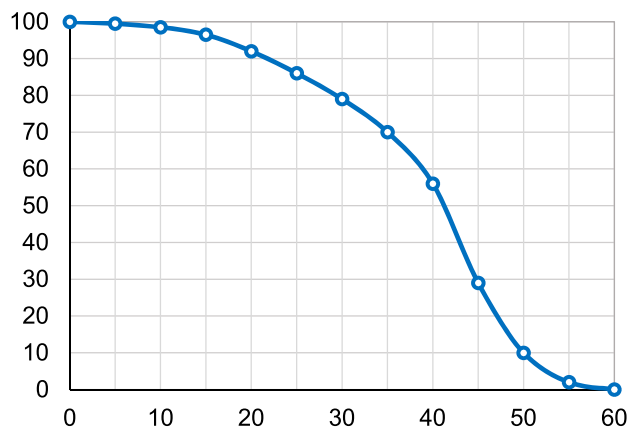


РИС. 6.
Зависимость доли инфицированных клеток (%) на 30-й день эпидемии от строгости введённых ограничений (%)

FIG. 6.
Dependence of the proportion of infected cells (%) on the 30th day of the epidemic on the stringency of restrictions (%)

Продemonстрированная в экспериментах высокая эффективность строгих ограничений (т. е. при закрытии 60 % границ и более) находится в некотором противоречии с реальными данными, в частности, по прохождению пандемии COVID-19 в различных странах и регионах, где, согласно статистике, улучшение ситуации происходило после введения более строгих ограничений

(80 % и выше). Как минимум, можно указать на три источника этих расхождений:

1. Важным допущением проведённых экспериментов с моделью КА является то, что распространение вируса происходит в модели уже *при наличии* ограничительных мер. Практика противостояния пандемии COVID-19 и другим эпидемиям показывает, что в реальности чаще реализуется другой сценарий: основной пакет ограничительных мер вводится не превентивно, а в ответ на усложняющуюся эпидемическую обстановку, т. е. когда вирус уже распространился на значительной территории и/или в заметной доле популяции. В этой ситуации правительства вынуждены идти на более строгие меры.

2. В модели закрытие границы между клетками полностью исключает прохождение вируса. В реальности введение ограничений не означает их идеального соблюдения. В этих условиях введение, например, 60%-х ограничений на практике может привести всего лишь к 50%-м или даже 40%-м ограничениям. Таким образом, чем ниже уровень соблюдения ограничений, тем строже должны быть меры для достижения необходимого эффекта.

3. Современные исследователи обращают внимание на то, что методология КА несколько «устарела» для описания эпидемий, возникающих в наше время. Если раньше ключевым фактором распространения эпидемий были именно «соседские» контакты, то сейчас, в условиях высокой географической мобильности, существенную роль играют «дальние» связи, то есть миграции населения на большие расстояния, связанные с отдыхом, деловыми поездками и т. д. В результате перенос вируса с одного континента на другой может произойти быстрее, чем перенос из одного района города в соседний. Так что при построении полноценной модели распространения эпидемии необходимо учитывать дальние связи, как это делают некоторые модификации КА (см., например, [19]). С другой стороны, как показывает

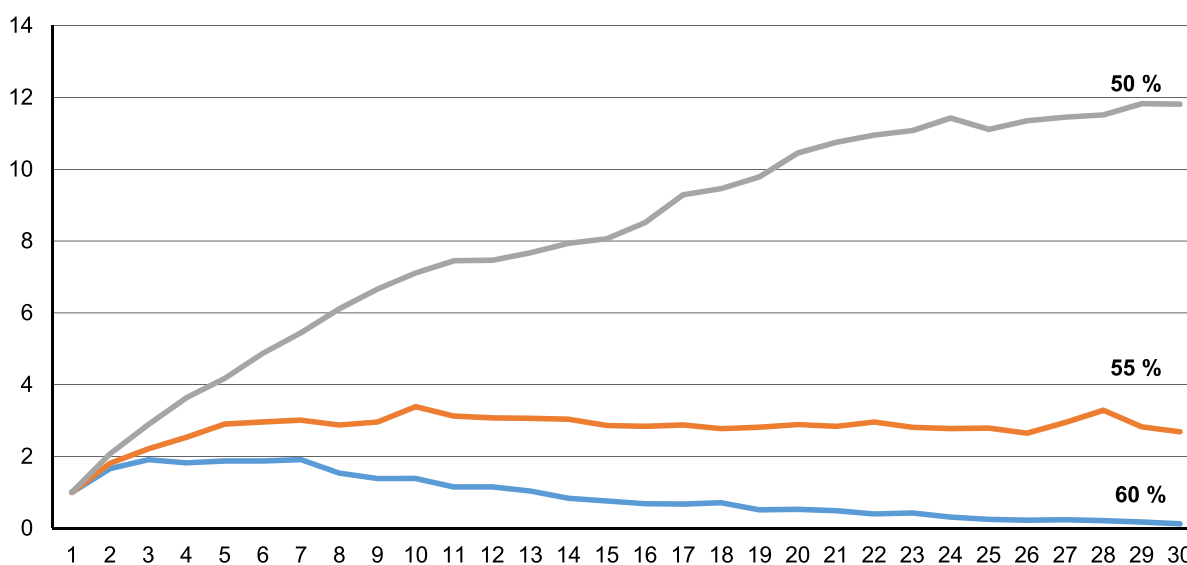


РИС. 7.
Среднее количество инфицированных клеток по шагам (новые случаи) в зависимости от строгости ограничений

FIG. 7.
Average number of infected cells per step (new cases) depending on the stringency of restrictions

практика противостояния эпидемиям, одними из первых вводятся ограничения на передвижение (особенно дальние поездки), что должно существенно снижать влияние «дальнего действия» на распространение вируса.

Целью третьей серии экспериментов было тестирование модели на реальных данных: с помощью клеточного автомата с границами моделировалось распространение вируса COVID-19 в Германии во время первой волны. Данные Германии были выбраны по причине их относительной достоверности и полноты³.

В ходе экспериментов для повышения точности использовался КА большого размера (101×101), который базировался на рассмотренных выше принципах и включал ряд дополнительных правил для более полного учёта особенностей протекания эпидемии в Германии.

1. Количество закрытых межклеточных границ менялось динамически, в соответствии с данными Stringency Index (SI) – агрегированным параметром, получаемым исследователями Оксфордского университета на основе COVID-19 Government Response Tracker [2]. SI учитывает строгость вводимых ограничительных мер и рассчитывается на каждый день по шкале от 0 до 100. Незначительно упрощая реальное изменение SI по времени, в экспериментах использовалась схема, приведённая в таблице 2.

2. Закрытые границы в модели были сделаны частично проницаемыми, т. е. учитывался факт того, что часть населения могла пренебрегать ограничениями, а какие-то ограничения могли работать неэффективно. Степень проницаемости была установлена в 25 % случаев, т. е. с вероятностью в 25 % вирус передавался через закрытую границу (для открытых границ, как и в предыдущих сериях экспериментов, предполагалась 100%-я проницаемость). Степень проницаемости закрытых границ была выбрана исходя из тезиса, что на проницаемость прежде всего оказывает влияние поведение населения и его отношение к ограничениям, которые, в свою очередь, можно операционализировать при помощи уровня законопослушности и уровня доверия к вводимым мерам. Однако, как показывают исследования по теме распространения COVID-19 и противостояния ему, на сегодняшний день нет объективных социологических или иных данных, отражающих законопослушность [26], в связи с чем в нашем исследовании для понимания уровня несоблюдения ограничительных мер были использованы косвенные показатели из исследований, проводившихся в рамках World Value Survey (WVS) [27]. В частности, были учтены ответы жителей Германии на вопросы об их доверии Всемирной организации здравоохранения (Q88), в соответствии с рекомендациями которой вводились ограничения, и об их отношении к уклонению от налогов (Q180). По вопросу Q88 23,9 % респондентов заявили, что не доверяют или совсем не доверяют ВОЗ. По вопросу Q180 75,7 % заявили, что уклонение от налогов ни в коем случае не может быть оправдано. Как видим, оба показателя позволяют принять уровень несоблюдения ограничительных мер примерно в 25 %.

3. Помимо взаимодействия соседних клеток, в модели учитывались «дальние» связи, т. е. взаимодействия между двумя клетками, не являющимися соседями, которые имитируют дальние поездки жителей. Работа «дальних» связей управлялась в модели двумя параметрами: средним количеством таких связей, приходящихся на одного жителя Германии, и теми ограничениями, которые вводились в отношении дальних перемещений в соответствующий период времени.

По статистике, житель Германии совершает три дальние поездки в год [28]. Таким образом, было рассчитано, что за один шаг в модели может возникнуть $(101 \times 101 \times 3) / 365 = 84$ «дальних» связей. Это количество регулировалось с учётом ограничений, которые вводились и числовые выражения которых были получены из данных по компонентам SI, которые описывают ограничения на дальние перемещения жителей (компоненты C7 и C8). В результате количество «дальних» связей варьировало от 73 в начальный период эпидемии до 0, а потом незначительно вырастало до 10 (см. табл. 2). Участвующие в «дальних» связях клетки выбирались случайным образом.

Полученные в результате экспериментов графики пошагового прироста инфицированных клеток (рис. 8) в значительной мере совпадают с реальными графиками ежедневного прироста инфицированных (рис. 9). Сходство видно как в характере экспоненциального роста количества инфицированных в первые недели пандемии, так и в форме вершины пика и форме относительно мягкого снижения кривой. Это свидетельствует о том, что предложенный метод моделирования позволяет довольно точно описывать динамику заболеваемости на основе данных о популяции и степени строгости вводимых ограничительных мер и, соответственно, может, применяться для оценки эффективности противоэпидемических ограничительных мер.

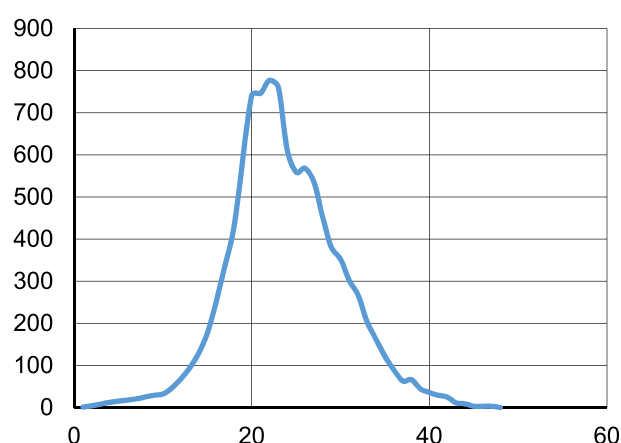


РИС. 8.
Пример типичной динамики пошагового прироста инфицированных клеток при моделировании на данных Германии

FIG. 8.
An example of a typical dynamics of incremental growth of infected cells in a simulation based on German data

³ Германия входит в число лидирующих стран по параметру real-time surveillance and reporting (Global Health Security Index – 2019) и одновременно с этим в период первой волны пандемии COVID-19 Германия имела один из самых высоких удельных показателей тестирования населения (см., например, <https://ourworldindata.org/grapher/full-list-total-tests-for-covid-19>).

ТАБЛИЦА 2
УПРОЩЁННАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ
СТРОГОСТИ ОГРАНИЧЕНИЙ В ГЕРМАНИИ В ПЕРИОД
ПЕРВОЙ ВОЛНЫ ПАНДЕМИИ COVID-19

TABLE 2
SIMPLIFIED SEQUENCE OF CHANGES IN THE STRINGENCY
OF RESTRICTIONS IN GERMANY DURING THE FIRST WAVE
OF THE COVID-19 PANDEMIC

Период времени	Продолжительность периода	Stringency Index	Доля закрытых межклеточных границ	Дальние связи
1.03 – 9.03	9 дней	25	25 %	87,5 %
10.03 – 17.03	8 дней	32,87	32,87 %	87,5 %
18.03 – 20.03	3 дня	55,09	55,09 %	0 %
21.03 – 04.05	45 дней	76,85	76,85 %	0 %
05.05 – 16.05	12 дней	64,35	64,35 %	0 %
17.05 – 15.06	30 дней	59,72	59,72 %	12,5 %

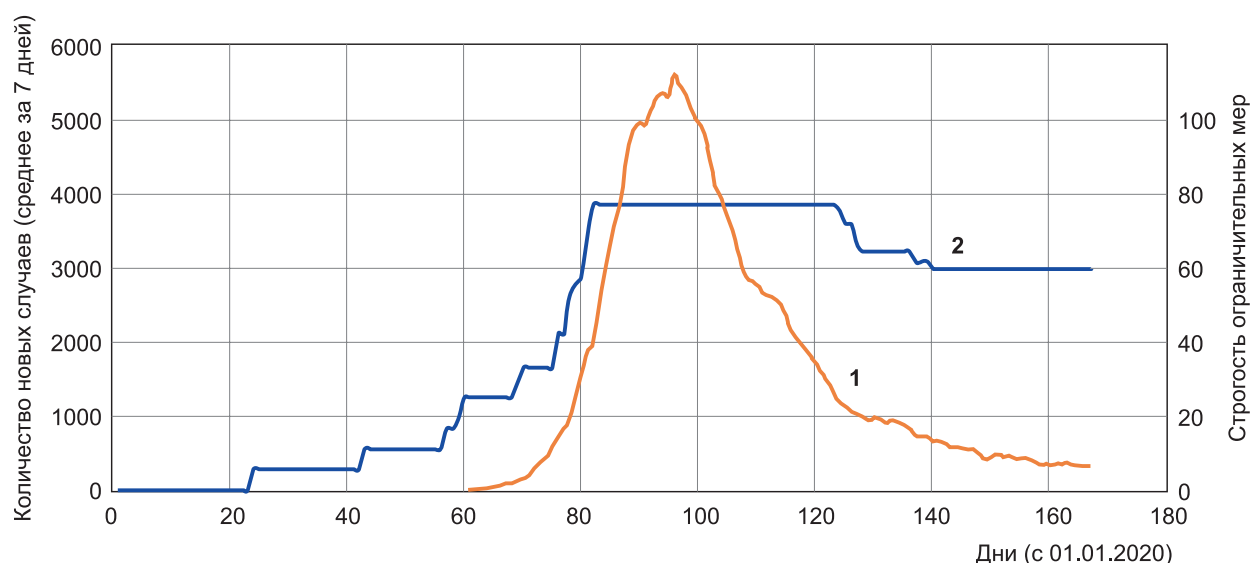


РИС. 9.
Реальная динамика ежедневного прироста инфицированных в Германии: 1 – количество новых случаев; 2 – строгость ограничительных мер

FIG. 9.
The real dynamics of the daily increase in infected people in Germany: 1 – number of new cases; 2 – stringency of the restrictive measures

Вместе с тем заметны и расхождения графиков, связанные с сопоставлением масштаба кривых. Так, например, прекращение экспоненциального роста происходит в модели примерно на 10 дней раньше, чем в реальности (если интерпретировать один шаг работы КА как одни сутки). В какой-то мере подобные расхождения могут быть объяснены тем, что модель демонстрирует то, как меняется количество инфицированных на момент их заражения, в то время как статистика показывает количество инфицированных на момент их регистрации.

Дальнейшие исследования по данному направлению могут включать создание модели, учитывающей большее количество *свойств популяции*, а также *отдельные виды* ограничительных мер, в целях понимания влияния этих мер на эпидемическую обстановку и, возможно, формулирования практических рекомендаций их эффективного использования с учётом особенностей страны или региона. Другим важным вопросом является изучение связи между продолжительностью инкубационного пе-

риода, длительностью контагиозности и другими характеристиками патогена (с одной стороны) и эффективностью ограничительных мер и их видов (с другой стороны). Вместе с тем требует уточнения ряд «технических» вопросов, связанных с выбором оптимального размера решётки клеточного автомата, с определением отношения дискретного времени КА и реального времени и т. д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показывают, что даже довольно простая модель клеточного автомата с границами позволяет успешно описывать ход эпидемии и оценивать эффективность ограничительных мер. Предложенная методика (проведение серий численных экспериментов) позволяет оценить вероятность реализации того или иного сценария при введении ограничительных мер. Здесь важным выводом является то, что при различных уровнях вво-

димых ограничений качество прогнозирования также является различным. Наименее предсказуемый эффект имеют меры средней строгости (40–50 %), при которых может наступить как быстрая локализация очага, так и распространение эпидемии на большую часть популяции. Слабые и строгие ограничения дают более предсказуемый эффект.

Модели КА с межклеточными границами имеют большой потенциал для моделирования эпидемий и влияния ограничительных мер. Клеточные автоматы как разновидность агентно-ориентированных моделей потенциально позволяют с максимальной полнотой описывать свойства популяции, задавая возрастные, социальные, культурные, медицинские характеристики каждого агента, которые могут оказывать влияние как на распространение эпидемии, так и на эффективность ограничительных мер. Кроме того, модели КА позволяют модифицировать и дополнять правила перехода клеток из одного состояния в другое, увеличивать количество этих состояний, менять «правила работы» межклеточных границ, беря в расчёт их частичную проницаемость.

Все это даёт возможность, во-первых, более полно учитывать в модели специфику населения в конкретном регионе или стране и специфику его контактов, а во-вторых, полнее описывать введение ограничительных мер и их воздействие на поведение населения и распространение эпидемии, что, в свою очередь, позволяет выбрать оптимальную степень строгости ограничений с учётом местных особенностей.

Конфликт интересов

Автор данной статьи сообщает об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демчук А.Л., Капицын В.М., Каратеев А.Ю., Емельянова Н.Н., Дашкина И.В., Пашин М.М., и др. Возможности количественного анализа взаимосвязи тяжести пандемии COVID-19 и институциональных характеристик стран мира. *Acta biomedica scientifica*. 2021; 6(6-2): 133-144. doi: 10.29413/ABS.2021-6.6-2.14
2. COVID-19 Government Response Tracker. URL: <https://www.bsg.ox.ac.uk/research/research-projects/covid-19-government-response-tracker> [date of access: 12.02.2022].
3. Greer SL, King EJ, Fonseca EM, Peralta-Santos A (eds). *Coronavirus politics: The comparative politics and policy of COVID-19*. University of Michigan Press; 2021. doi: 10.3998/mpub.11927713
4. Демчук А.Л., Капицын В.М., Каратеев А.Ю., Емельянова Н.Н., Дашкина И.В., Пашин М.М. Тяжесть пандемии COVID-19, строгость ограничительных мер и институциональные характеристики стран мира: подходы к количественному анализу. *Вестник Московского университета. Серия 12: Политические науки*. 2022; 2: 58-82.
5. Von Neumann J. *Theory of self-reproducing automata*. University of Illinois Press; 1966.
6. Ulam S. Random processes and transformations. *Proceedings of International Congress of Mathematicians, Cambridge (30 August – 6 September 1950)*. American Mathematical Society; 1952: 264-275.
7. Тоффоли Т., Марголюс Н. *Машины клеточных автоматов*. М.: Мир; 1991.
8. Burks A (ed.). *Essays on cellular automata*. University of Illinois Press; 1970.
9. Holland J. Universal spaces: A basis for studies in adaptation. *Automata theory*. Academic Press; 1966: 218-230.
10. Hedlund GA. Endomorphism and automorphism of the shift dynamical systems. *Mathematical Systems Theory*. 1969; 3: 51-59.
11. Wolfram S (ed.). *Theory and applications of cellular automata*. World Scientific; 1986.
12. Bailey NTJ. *The mathematical approach to biology and medicine*. John Wiley and Sons; 1967.
13. Mollison D. Spatial contact models for ecological and epidemic spread. *J R Stat Soc B*. 1977; 39(3): 283-326.
14. Yakowitz S, Gani J, Hayes R. Cellular automaton modeling of epidemics. *Appl Math Comput*. 1990; 40(1): 41-54. doi: 10.1016/0096-3003(90)90097-M
15. Boccara N, Cheong K. Critical behaviour of a probabilistic automata network SIS model for the spread of an infectious disease in a population of moving individuals. *J Physics A Math Gen*. 1993; 26: 3707-3717.
16. White SH, Rey AM, Sanchez GR. Modeling epidemics using cellular automata. *Appl Math Comput*. 2007; 186: 193-202.
17. Башабшех М.М., Масленников Б.И. Имитационное моделирование пространственного распространения эпидемий (на примере холеры) с применением метода клеточных автоматов с помощью программы Anylogic. *Наукоедение*. 2013; 6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/135TVN613.pdf> [дата доступа: 23.05.2022].
18. Горковенко Д.К. Сравнительный анализ моделей эпидемии и клеточного автомата при моделировании распространения информации в социальных сетях. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2017; 10(3): 103-113. doi: 10.18721/JCSTCS.10309
19. Шабунин А.В. Моделирование эпидемий решетками клеточных автоматов. SIRS модель с учетом воспроизводства и миграции. *Известия Саратовского университета. Серия Физика*. 2020; 20(4): 278-287. doi: 10.18500/1817-3020-2020-20-4-278-287
20. Moghari S, Ghorani M. A symbiosis between cellular automata and dynamic weighted multigraph with application on virus spread modeling. *Chaos Solitons Fractals*. 2022; 155: 111660. doi: 10.1016/j.chaos.2021.111660
21. Lima I, Balbi PP. Estimates of the collective immunity to COVID-19 derived from a stochastic cellular automaton based framework. *Nat Comput*. 2022; 21(3): 449-461. doi: 10.1007/s11047-022-09893-3
22. Kermack WO, McKendrick AG. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc Math Phys Eng Sci*. 1927; 115(772): 700-721. doi: 10.1098/rspa.1927.0118.JSTOR94815
23. Axelrod R. The dissemination of culture: A model with local convergence and global polarization. *The Journal of Conflict Resolution*. 1997; 41(2): 203-226.
24. Активность на улицах мегаполисов разных стран. URL: <https://yandex.ru/company/researches/2020/cities-activity> [дата доступа: 15.07.2022].
25. Самоизоляция. По городам России и ближнего зарубежья. URL: <https://datalens.yandex/7o7is1q6ikh23?tab=q6> [дата доступа: 15.07.2022].

26. Как законопослушность граждан помогает бороться с пандемией коронавируса. URL: <https://www.hse.ru/news/expertise/405304338.html> [дата доступа: 11.08.2022].

27. *World Values Survey Wave 7: 2017–2022*. URL: <https://www.worldvaluessurvey.org/WVSOnline.jsp> [date of access: 11.08.2022].

28. *For European holidaymakers, there's no place like home*. URL: <https://www.euronews.com/2017/07/20/europe-tourism-travel-no-place-like-home> [date of access: 12.02.2022].

REFERENCES

1. Demchuk AL, Kapistyn VM, Karateev AY, Emelyanova NN, Dashkina IV, Pashin MM, et al. The possibilities of quantitative analysis of the relationship between the severity of the COVID-19 pandemic and the institutional characteristics of the countries of the world. *Acta biomedica scientifica*. 2021; 6(6-2): 133-144. (In Russ.). doi: 10.29413/ABS.2021-6.6-2.14

2. *COVID-19 Government Response Tracker*. URL: <https://www.bsg.ox.ac.uk/research/research-projects/covid-19-government-response-tracker> [date of access: 12.02.2022].

3. Greer SL, King EJ, Fonseca EM, Peralta-Santos A (eds). *Coronavirus politics: The comparative politics and policy of COVID-19*. University of Michigan Press; 2021. doi: 10.3998/mpub.11927713

4. Demchuk AL, Kapistyn VM, Karateev AY, Emelyanova NN, Dashkina IV, Pashin MM. Severity of the COVID-19 pandemic, stringency of restrictive measures and institutional characteristics of the countries in the world: Approaches to quantitative analysis. *Moscow University Bulletin. Series 12. Political Science*. 2022; 2: 58-82. (In Russ.).

5. Von Neumann J. *Theory of self-reproducing automata*. University of Illinois Press; 1966.

6. Ulam S. Random processes and transformations. *Proceedings of International Congress of Mathematicians, Cambridge (30 August – 6 September 1950)*. American Mathematical Society; 1952: 264-275.

7. Toffoli T, Margolus N. *Machines of cellular automata*. Moscow: Mir; 1991. (In Russ.).

8. Burks A (ed.). *Essays on cellular automata*. University of Illinois Press; 1970.

9. Holland J. Universal spaces: A basis for studies in adaptation. *Automata theory*. Academic Press; 1966: 218-230.

10. Hedlund GA. Endomorphism and automorphism of the shift dynamical systems. *Mathematical Systems Theory*. 1969; 3: 51-59.

11. Wolfram S (ed.). *Theory and applications of cellular automata*. World Scientific; 1986.

12. Bailey NTJ. *The mathematical approach to biology and medicine*. John Wiley and Sons; 1967.

13. Mollison D. Spatial contact models for ecological and epidemic spread. *J R Stat Soc B*. 1977; 39(3): 283-326.

14. Yakowitz S, Gani J, Hayes R. Cellular automaton modeling of epidemics. *Appl Math Comput*. 1990; 40(1): 41-54. doi: 10.1016/0096-3003(90)90097-M

15. Boccara N, Cheong K. Critical behaviour of a probabilistic automata network SIS model for the spread of an infectious disease in a population of moving individuals. *J Physics A Math Gen*. 1993; 26: 3707-3717.

16. White SH, Rey AM, Sanchez GR. Modeling epidemics using cellular automata. *Appl Math Comput*. 2007; 186: 193-202.

17. Башабшех М.М., Масленников Б.И. Simulation modeling of the spatial spread of epidemics (cholera for example) using the method of cellular automata using the Anylogic. *Naukovedenie*. 2013; 6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/135TVN613.pdf> [date of access: 23.05.2022]. (In Russ.).

18. Gorkovenko DK. Comparison of epidemic models and cellular automata in modeling of diffusion of information in social networks. *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2017; 10(3): 103-113. (In Russ.). doi: 10.18721/JCSTCS.10309

19. Shabunin AV. Modeling of epidemics by cellular automata lattices. SIRS model with reproduction and migration. *Izvestiya of Saratov University. Physics*. 2020; 20(4): 278-287. (In Russ.). doi: 10.18500/1817-3020-2020-20-4-278-287

20. Moghari S, Ghorani M. A symbiosis between cellular automata and dynamic weighted multigraph with application on virus spread modeling. *Chaos Solitons Fractals*. 2022; 155: 111660. doi: 10.1016/j.chaos.2021.111660

21. Lima I, Balbi PP. Estimates of the collective immunity to COVID-19 derived from a stochastic cellular automaton based framework. *Nat Comput*. 2022; 21(3): 449-461. doi: 10.1007/s11047-022-09893-3

22. Kermack WO, McKendrick AG. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc Math Phys Eng Sci*. 1927; 115(772): 700-721. doi: 10.1098/rspa.1927.0118. JSTOR94815

23. Axelrod R. The dissemination of culture: A model with local convergence and global polarization. *The Journal of Conflict Resolution*. 1997; 41(2): 203-226.

24. *Activity on the streets of megacities in different countries*. URL: <https://yandex.ru/company/researches/2020/cities-activity> [date of access: 15.07.2022]. (In Russ.).

25. *Self-isolation. In the cities of Russia and neighboring countries*. URL: <https://datalens.yandex/7o7is1q6ikh23?tab=q6> [date of access: 15.07.2022]. (In Russ.).

26. *How law-abiding citizens help fight the coronavirus pandemic*. URL: <https://www.hse.ru/news/expertise/405304338.html> [date of access: 11.08.2022]. (In Russ.).

27. *World Values Survey Wave 7: 2017–2022*. URL: <https://www.worldvaluessurvey.org/WVSOnline.jsp> [date of access: 11.08.2022].

28. *For European holidaymakers, there's no place like home*. URL: <https://www.euronews.com/2017/07/20/europe-tourism-travel-no-place-like-home> [date of access: 12.02.2022].

Сведения об авторе

Каратеев Артем Юрьевич – кандидат исторических наук, доцент кафедры истории и теории политики факультета политологии, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», e-mail: artem.karateev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8930-8807>

Information about the author

Artem Yu. Karateev – Cand. Sc. (Hist.), Associate Professor at the Department of History and Theory of Politics, Lomonosov Moscow State University, e-mail: artem.karateev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8930-8807>