



Попова А.Ю.^{1,2}, Зайцева Н.В.^{3,4}, Алексеев В.Б.³, Летюшев А.Н.¹, Кирьянов Д.А.³,
Клейн С.В.^{3,4}, Камалтдинов М.Р.³, Глухих М.В.³

Неоднородность параметров модифицированной SIR-модели волн эпидемического процесса COVID-19 в Российской Федерации

¹ Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 127994, Москва, Россия;

² ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, 125993, Москва, Россия;

³ ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»
Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 614045, Пермь, Россия;

⁴ Отделение медицинских наук (секция «Профилактическая медицина») Российской академии наук, 109240, Москва, Россия

Введение. Работа посвящена параметризации эпидемического процесса COVID-19 с учётом специфики регионов Российской Федерации.

Цель исследования – анализ пространственно-временного распределения неоднородных показателей распространения COVID-19 на основе формализации и параметризации волн эпидемического процесса с учётом региональной специфики.

Материалы и методы. В качестве базовой модели эпидемического процесса использована модификация классической SIR-модели, отражающая динамику переходов группы населения, восприимчивой к действию вируса (S – susceptible), в группу инфицированных (I – infected), выздоровевших (R – recovered) или умерших (L – lethal), – SIR(+L)-модель.

Результаты. На основе анализа динамических рядов о заболеваемости COVID-19 с недельным периодом осреднения выделены временные диапазоны активизации эпидемического процесса в регионах Российской Федерации, соответствующие волнам доминирования определённых штаммов вируса. Всего в период с 06.09.2020 г. до 25.02.2023 г. выделено четыре эпидемические волны для каждого региона. Анализ параметров SIR(+L)-модели для каждой волны по регионам позволил установить ряд характерных тенденций и получить поддающиеся интерпретации направления воздействия на отдельные этапы эпидемического процесса с последующей разработкой системных стратегических решений, направленных на сохранение здоровья населения, поддержание уровня эпидемиологической безопасности в масштабе регионов и страны в целом.

Ограничение исследования. Представленная модификация SIR-модели, SIR(+L)-модель, является значительным упрощением реального эпидемического процесса и не позволяет описывать ряд наблюдаемых эффектов.

Заключение. По результатам параметризации эпидемического процесса установлены основные особенности и закономерности распространения вируса COVID-19, интенсивности выздоровления и летальности. Направлением дальнейших исследований может стать совершенствование модели эпидемического процесса, добавление в неё новых параметров с учётом деления населения на половые и возрастные группы, заболеваний по тяжести, группировки по территориальному и социальному принципу, выделение латентной заболеваемости.

Ключевые слова: эпидемический процесс; COVID-19; SIR-модель; динамические ряды; параметры модели; волны заболеваемости; восприимчивые; инфицированные; выздоровевшие; умершие; индекс репродукции вируса

Соблюдение этических стандартов. Для проведения данного исследования не требовалось заключения комитета по биомедицинской этике (исследование выполнено на общедоступных данных официальной статистики).

Для цитирования: Попова А.Ю., Зайцева Н.В., Алексеев В.Б., Летюшев А.Н., Кирьянов Д.А., Клейн С.В., Камалтдинов М.Р., Глухих М.В. Неоднородность параметров модифицированной SIR-модели волн эпидемического процесса COVID-19 в Российской Федерации. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(8): 740–749. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-740-749> <https://elibrary.ru/rdotzd>

Для корреспонденции: Глухих Максим Владиславович, канд. мед. наук, мл. науч. сотр. отд. системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга Федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 614045, Пермь. E-mail: gluhih@ferisk.ru

Участие авторов: Попова А.Ю., Зайцева Н.В., Алексеев В.Б., Летюшев А.Н. – концепция и дизайн исследования, редактирование; Кирьянов Д.А. – редактирование, написание текста; Клейн С.В. – редактирование, написание текста; Камалтдинов М.Р. – сбор и обработка материала, статистическая обработка данных, написание текста; Глухих М.В. – сбор и обработка материала, статистическая обработка данных, написание текста. *Все соавторы* – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 28.07.2023 / Принята к печати: 15.08.2023 / Опубликовано: 09.10.2023

Anna Yu. Popova^{1,2}, Nina V. Zaitseva^{3,4}, Vadim B. Alekseev³, Aleksandr N. Letyushev¹, Dmitry A. Kiryanov³, Svetlana V. Kleyn^{3,4}, Marat R. Kamaltdinov³, Maxim V. Glukhikh³

Heterogeneity of the modified SIR-model parameters of waves of COVID-19 epidemic process in the Russian Federation

¹Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow, 127994, Russian Federation;

²Russian Medical Academy for Postgraduate Studies, Moscow, 123995, Russian Federation;

³Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 614045, Perm, Russian Federation;

⁴Russian Academy of Sciences, Medical Sciences Division (Preventive Medicine Section), Moscow, 119071, Russian Federation

Introduction. The work is dedicated to the parameterization of the COVID-19 epidemic process, taking into account the specifics of the Russian Federation regions. **Purpose of study** is the analysis of the spatio-temporal distribution of heterogeneous indicators of the spread of COVID-19 based on the formalization and parameterization of waves of the epidemic process, bearing in mind regional specifics.

Materials and methods. SIR (+L) model as a modification of the classic SIR model, reflecting the trend in the transition of the susceptible to the action of the virus (S – susceptible) population to the group of infected (I – infected), recovered (R – recovered) and the dead (L – lethal) was used as a basic model of the epidemic process.

Results. Time ranges of activation of the epidemic process in the regions of the Russian Federation, corresponding to waves of domination of certain strains of the virus, have been allocated on the basis of the analysis of time series COVID-19 morbidity with a week period of averaging. In total, starting from September 6, 2020 and ending on February 25, 2023, four epidemic waves have been allocated for each region. Analysis of SIR (+L) model parameters for each wave by regions of the Russian Federation made it possible to establish a number of characteristic trends and obtain interpretable directions of influence on the epidemic process individual stages, with the subsequent development of systemic strategic decisions on the preservation of population health and its level of safety at the regional and country-wide scale.

Limitations. The presented modification of the SIR model (SIR (+L) model) is a significant simplification of the real epidemic process and does not allow describing a number of observed effects.

Conclusion. Based on the results of the parametrization of the epidemic process, the main features and patterns of the spread of the COVID-19, the intensity of recovery and mortality were established. A further direction of research may be the complication of the epidemic process model, the addition of new parameters to it, taking into account the division of the population into gender and age groups, diseases by severity, grouping according to the territorial and social principle, and the identification of the latent morbidity.

Keywords: epidemic process; COVID-19; SIR model; time series; model parameters; waves of morbidity; susceptible; infected; recovered; lethal; virus reproduction index

Compliance with ethical standards. The study does not require the conclusion of a biomedical ethics committee of other documents (the study was performed on publicly available official statistics).

For citation: Popova A.Yu., Zaitseva N.V., Alekseev V.B., Letyushev A.N., Kiryanov D.A., Kleyn S.V., Kamaltdinov M.R., Glukhikh M.V. Heterogeneity of the modified SIR-model parameters of waves of COVID-19 epidemic process in the Russian Federation. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2023; 102(8): 740–749. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-740-749> <https://elibrary.ru/rdotzd> (In Russ.)

For correspondence: Maxim V. Glukhikh, MD, PhD, junior research fellow at the Department of Sanitary and Hygienic Analysis and Monitoring Systemic Methods, Perm, 614045, Russian Federation. E-mail: gluhih@crisk.ru

Information about authors:

Popova A.Yu., <https://orcid.org/0000-0002-4315-5307>

Alekseev V.B., <https://orcid.org/0000-0001-5850-7232>

Kiryanov D.A., <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>

Kamaltdinov M.R., <https://orcid.org/0000-0003-0969-9252>

Zaitseva N.V., <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145>

Letyushev A.N., <https://orcid.org/0000-0002-4185-9829>

Kleyn S.V., <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>

Glukhikh M.V., <https://orcid.org/0000-0002-4755-8306>

Contribution of the authors: Popova A.Yu., Zaitseva N.V., Alekseev V.B., Letyushev A.N. – research concept and design, editing, approval of the final version of the article; Kiryanov D.A., Kleyn S.V. – editing, writing the text, approval of the final version of the article; Kamaltdinov M.R., Glukhikh M.V. – statistical data processing, collection and processing material, writing the text. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: July 28, 2023 / Accepted: August 15, 2023 / Published: October 9, 2023

Введение

Начавшись более трёх лет назад, пандемия COVID-19 затронула практически все аспекты жизнедеятельности человека, увеличив нагрузку на систему здравоохранения многих стран мира. За этот период наблюдались множественные волны распространения вируса, имеющие страновую и региональную специфику по основным характеристикам эпидемического процесса в зависимости от принимаемых комплексных мер профилактики и лечения болезни. В настоящее время пандемия, как в глобальном (мировом) масштабе, так и локализованном до уровня государств и отдельных регионов, приняла вид управляемого процесса с предсказуемыми уровнями распространения инфекции и её последствий. Вместе с тем констатация фактов, свидетельствующих о снижении агрессивности вируса COVID-19 [1], не снижает актуальности решения аналитических задач, направленных

как на изучение самого процесса распространения болезни, так и на исследование причин и закономерностей дифференциации хода эпидемии для различных условий.

Начало пандемии вызвало резкий рост числа исследований в области биофизического и математического моделирования распространения инфекции [2]. В современных исследованиях выделяются два основных типа математических моделей для описания эпидемического процесса: компартментные и стохастические [3, 4]. Компартментные модели основаны на использовании гипотезы об однородности популяции внутри отдельных компартментов (отсеков, групп), что позволяет оперировать осреднёнными характеристиками эпидемического процесса посредством записи системы нелинейных дифференциальных уравнений, характеризующих его развитие [5]. В стохастических моделях процесс заражения представляется случайным событием, а вероятность контакта между инфицированными и здоровыми

(восприимчивыми) людьми описывается законом распределения (например, законом распределения Пуассона). Существует возможность использования комбинированных вариантов двух рассмотренных подходов [6].

Одной из стандартных и при этом обладающих хорошей предсказательной силой моделей эпидемического процесса является SIR-модель, впервые представленная У.О. Кермаком и А.Г. Маккендриком [7, 8], которая отражает динамику переходов группы населения, восприимчивой к действию вируса (S – susceptible), в группу инфицированных (I – infected), а затем выздоровевших (R – recovered). К преимуществам модели относится её параметрическая простота, что позволяет выполнять ситуационное экспресс-прогнозирование. При этом следует отметить малую точность прогнозирования на больших временных масштабах [9], что, однако, является характерным для многих прогнозных моделей. Параметры SIR-модели обладают явным физическим смыслом, что важно для интерпретации получаемых результатов [10]. В SIR-модель можно легко вводить дополнительные компартменты, количество которых ограничено только имеющейся в доступе статистической информацией. В качестве примера можно привести модели, учитывающие группы людей, помещённых в карантин [11], скрытых носителей инфекции [12], вакцинированных [13–15], госпитализированных [16] или умерших от инфекции [17]. В ряде исследований показано, что учёт в модели запаздывания из-за длительного вирусносительства, характерного для COVID-19, может приводить к решениям, существенно отличным от классической модели SIR [18]. По некоторым данным, при помощи SIR-модели возможна разработка оптимальных стратегий вакцинации для минимизации числа случаев заражения вирусом COVID-19 и предотвращения его распространения [19]. Модель может быть полезна для прогнозирования экономических эффектов, связанных со случаями заболевания и смерти населения от COVID-19, при её применении к группам риска различного возраста [20, 21]. Использование SIR-модели ограничено относительно небольшими популяциями, для которых она способна давать хорошие результаты [22]. В классическом варианте модели используется гипотеза о замкнутости рассматриваемой популяции, отсутствии внешних контактов. Для учёта процесса миграции людей, переносящих инфекцию между регионами и странами, требуется вводить дополнительные источники и стоки в балансовые дифференциальные уравнения, описывающие динамику эпидемии [23]. В данном случае источником будет являться число заболевших людей, мигрирующих в регион, в единицу времени, а стоком – число больных, выезжающих из региона.

Результаты решения представленных выше моделей позволяют описать только один пик заболеваемости, то есть рассмотреть эпидемический процесс в рамках одной волны. Одним из вариантов учёта нескольких всплесков заболеваемости является добавление в модель обратной связи – выздоровевшие могут снова заболеть через некоторое время [24, 25]. Другой вариант – введение зависимости коэффициентов от времени [26, 27], что значительно усложняет решение задачи идентификации. В силу того, что за три года пандемии параметры, описывающие эпидемический процесс, претерпели существенные изменения, не представляется целесообразным использовать только одну модель для описания множества волн заболеваемости. Весь наблюдаемый период можно разбить на временные интервалы, характеризующие каждую волну в отдельности, и для каждой волны определить уникальные параметры модели.

Опыт применения математических моделей для описания распространения инфекции COVID-19 в Российской Федерации носит преимущественно локальный характер с уклоном в теоретический аспект моделирования эпидемического процесса [28–32]. В 2022 г. группой авторов [33] выполнено исследование закономерностей и особенностей территориального распределения параметров распространения варианта Delta коронавирусной инфекции (сентябрь – декабрь

2021 г.), интенсивности выздоровления и летальности при модифицирующем действии факторов неинфекционной природы [34]. Анализ индекса репродукции вируса позволил выделить регионы, в которых эпидемические процессы протекают наиболее остро и сопровождаются пиковыми нагрузками на систему здравоохранения, сферу социального обеспечения и другие региональные службы. Следует отметить, что с точки зрения принятия управленческих решений на уровне страны, регионов, отдельных населённых пунктов углубление исследования и расширение математического описания эпидемических процессов представляется актуальным и важным. В данной статье представлены результаты расширенного исследования, рассматривающего параметры эпидемического процесса в рамках множественных волн эпидемии COVID-19 в регионах Российской Федерации.

Цель исследования – анализ пространственно-временного распределения неоднородных показателей распространения COVID-19 на основе формализации и параметризации волн эпидемического процесса с учётом региональной специфики.

Материалы и методы

Любой эпидемический процесс распространения инфекции среди населения и на территории его проживания характеризуется рядом параметров, отражающих интенсивность и условия передачи инфекции, тяжесть и длительность протекания болезни, а также обладает определёнными механизмами развития и проявления. В рамках настоящей работы рассматривается эпидемический процесс распространения SARS-CoV-2 в масштабе регионов Российской Федерации.

Предварительная оценка динамики процесса распространения заболеваемости коронавирусной инфекцией показала волнообразный характер его протекания (длительность каждой волны составляла примерно 3–4 мес). Каждая волна может быть формализована в виде математической модели, содержащей параметры, отражающие наиболее значимые свойства эпидемического процесса, которые в свою очередь связаны с особенностями и условиями его протекания.

Для проведения моделирования и последующего анализа причинно-следственных связей использованы следующие положения и гипотезы:

- эпидемический процесс рассматривается локально в условиях отдельного региона Российской Федерации без учёта межрегиональных взаимодействий;
- каждая волна эпидемии – отдельный эпидемический процесс;
- эпидемические процессы для каждого штамма инфекционного агента не связаны друг с другом.

На основе анализа динамических рядов данных по заболеваемости COVID-19 с недельным периодом осреднения выделены временные диапазоны активизации эпидемического процесса в виде случаев заболеваний в регионах Российской Федерации, соответствующие волнам доминирования определённых штаммов вируса. Несмотря на быстрые мутации вируса SARS-CoV-2, фактическая динамика регистрации случаев заболевания в Российской Федерации позволяет проследить и проанализировать закономерности эпидемического процесса только по четырём волнам, каждая из которых характеризуется пиковыми значениями заболеваемости. Первая волна формировалась преимущественно вариантом Alpha, вторая – Delta, третья – Omicron. Четвёртая волна носит обобщающий характер и в большей степени обусловлена циркулирующей субвариантами Omicron.

Для каждой волны выделены даты её начала, окончания и пика. Дата пика определялась как дата с максимальным числом новых заболевших в рамках одной волны. Всего в период с 06.09.2020 г. по 25.02.2023 г. выделено четыре эпидемические волны для каждого региона.

В качестве базовой модели эпидемического процесса использована модификация классической SIR-модели – SIR(+L)-модель, отражающая динамику переходов группы

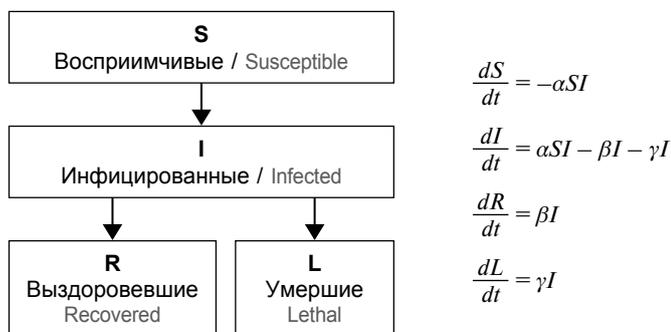


Рис. 1. Схема переходов между состояниями системы эпидемического процесса и уравнения SIR(+L)-модели.

Fig. 1. Transitions scheme between the states of the epidemic system and the equation of the SIR (+L) model.

населения (состояния), восприимчивой к действию вируса (S – susceptible), в группу инфицированных (I – infected), выздоровевших (R – recovered) или умерших (L – lethal). На рис. 1 приведена схема переходов между состояниями системы.

Модель, основанная на методе системной динамики, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, отражающих скорости изменения численности изучаемых групп населения. Все переменные, используемые в системе, являются безразмерными величинами, отнесёнными к численности населения *N*.

Параметры модели, отражающие интенсивность эпидемического процесса, являются размерными величинами, характеризующими скорости изменения переменных в единицу времени (в неделю), и имеют определённый биологический смысл:

α – коэффициент, характеризующий относительную скорость инфицирования населения (распространения инфекции), 1/нед;

β – коэффициент, характеризующий эффективность лечебных мероприятий, обратно пропорционален времени, затраченному на лечение, 1/нед;

γ – коэффициент, характеризующий тяжесть течения инфекции по доле летальных исходов в единицу времени, 1/нед.

Кроме того, одной из концептуальных динамических характеристик эпидемического процесса является индекс репродукции вируса (индекс заразности, или контагиозности), который определяется как отношение (1):

$$R_0 = \alpha / \beta, \tag{1}$$

Индекс репродукции вируса отражает среднее число людей, которых заражает активный инфицированный, попавший в полностью неиммунизированное окружение при отсутствии специальных эпидемических мер, направленных на предотвращение распространения болезни. По существу, индекс репродукции вируса является интегральным параметром, определяющим ход эпидемического процесса и способность его к неограниченному развитию или затуханию.

В качестве статистических материалов для проведения идентификации региональных моделей эпидемического процесса использовались данные ведомственной статистики Роспотребнадзора с понедельным осреднением, содержащие показатели приростов новых случаев заболевания коронавирусной инфекцией, числа выздоровевших и умерших. Все данные были подвергнуты предварительной обработке и согласованию по недельным временным интервалам.

Результаты

В результате построения SIR(+L)-моделей получена статистика по показателям эпидемического процесса (α , β , γ , R_0) для четырёх волн течения коронавирусной инфекции COVID-19 по каждому региону Российской Федерации, содержащая 340 наблюдений. На рис. 2 представлена графическая интерпретация динамики общей заболеваемости COVID-19 (перехода населения из группы восприимчивых к группе инфицированных) в разрезе регионов и в среднем по Российской Федерации.

По данным, представленным на рис. 2, можно выделить четыре основные волны COVID-19. Первая волна – с осе-

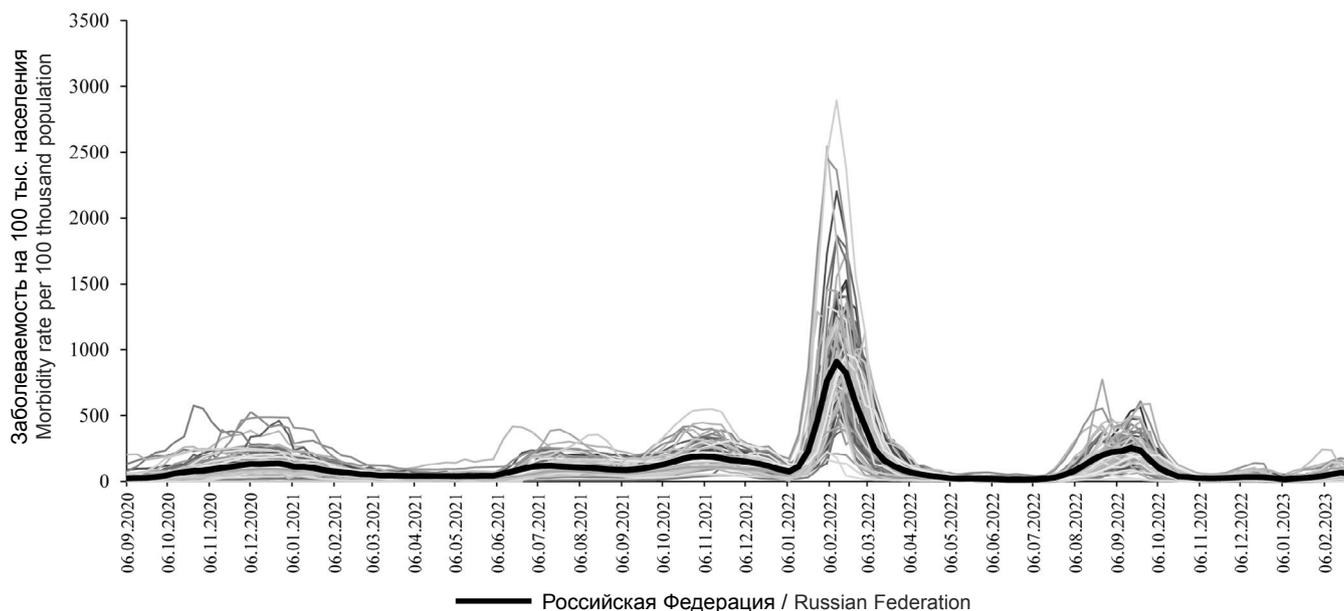


Рис. 2. Понедельная динамика заболеваемости COVID-19 в Российской Федерации на фоне динамики процесса в регионах, случаев на 100 тыс. населения.

Fig. 2. Trend in weekly COVID-19 incidence in the Russian Federation against the background of the trend in the process in the Russian Federation regions, cases per 100 thousand population.

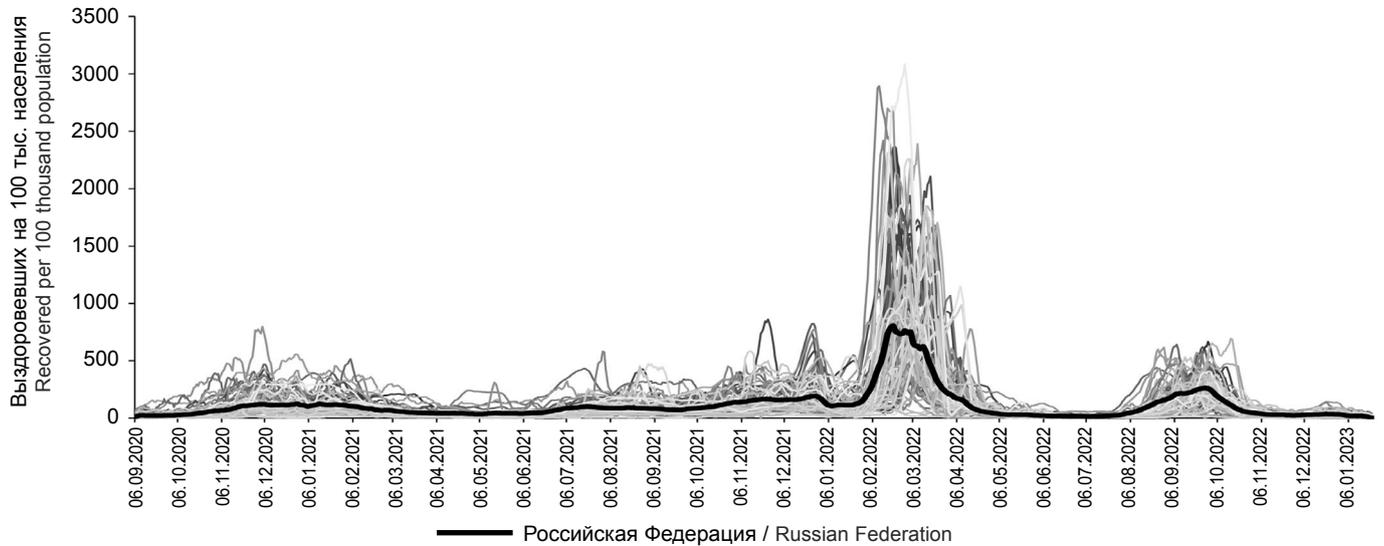
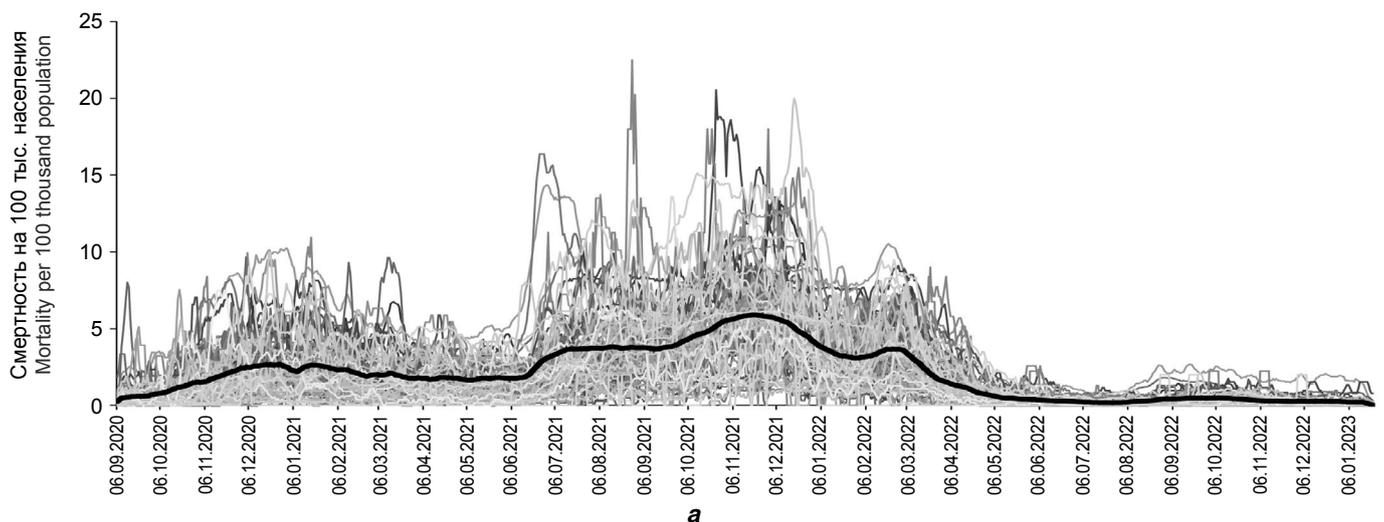
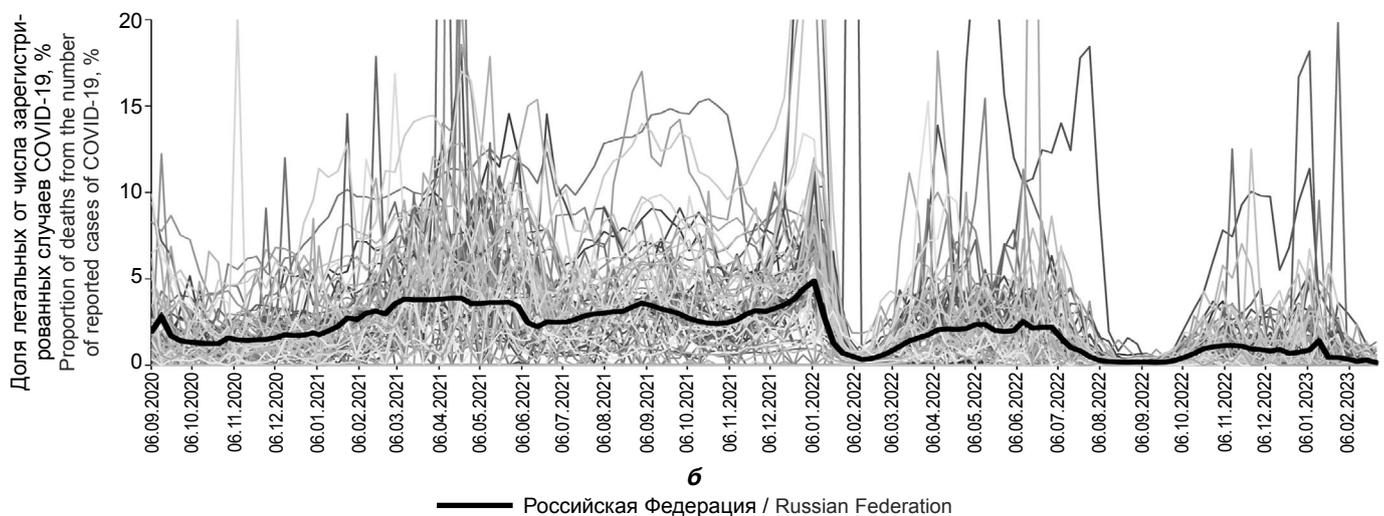


Рис. 3. Понедельная динамика выздоровлений от COVID-19 в Российской Федерации на фоне динамики процесса в регионах, случаев на 100 тыс. населения.

Fig. 3. Trend in COVID-19 weekly recovery in the Russian Federation against the background of the trend of the process in the Russian Federation regions, cases per 100 thousand population.



а



б

Рис. 4. Понедельная динамика смертности (а) и летальности (б) от COVID-19 в Российской Федерации на фоне динамики процесса в регионах, случаев на 100 тыс. населения (а) и % (б)

Fig. 4. Trend in COVID-19 weekly mortality (a) and lethality (b) in the Russian Federation against the background of the trend in the process in the Russian Federation regions, cases per 100 thousand population (a) and % (b).

Original article

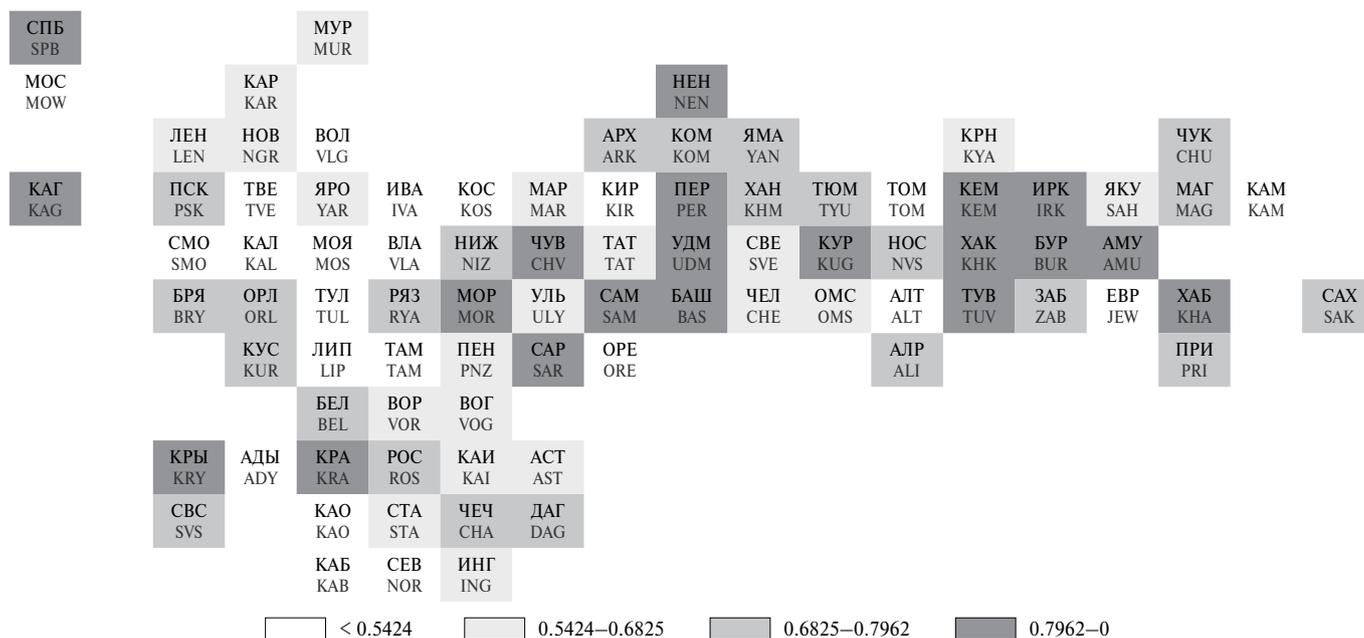


Рис. 5. Распределение параметра α по регионам Российской Федерации в четвёртую волну COVID-19.

Fig. 5. Distribution of the parameter α by regions of the Russian Federation in the fourth wave of COVID-19.

ни 2020 г. до весны 2021 г., вторая волна с двумя пиками – с лета 2021 г. до конца 2021 г., третья волна с максимальными значениями заболеваемости за всё время – начало 2022 г., четвёртая волна – осень 2022 г. Волнообразный характер процесса распространения коронавирусной инфекции наблюдался во всех регионах. Важно, что при наблюдаемых различиях в уровнях региональной заболеваемости смещение пиков волн по времени отсутствует. Подобная волнообразная картина наблюдается и в отношении интенсивных показателей выздоровления населения (рис. 3), и летальных исходов по причине заболевания COVID-19 (рис. 4).

Волнообразный характер числа выздоровевших (см. рис. 3) позволяет проследить фазовый сдвиг во времени, соответствующий средней длительности лечения (порядка 14 дней), при этом наблюдается сглаживание процесса с общей тенденцией к снижению, обусловленной уменьшением количественных показателей заболеваемости.

Динамика числа умерших (летальность) (см. рис. 4) практически теряет волнообразный характер и характеризуется существенным изменением тенденций при смене штамма вируса с Delta на Omicron. После изменения штамма, произошедшего на рубеже 2021–2022 гг., при увеличении числа заболевших летальность по причине коронавирусной инфекции начала заметно снижаться и в конце 2022 г. достигла минимальных значений (менее 1%).

Диапазоны варьирования параметра α , характеризующего относительную скорость инфицирования населения (распространения инфекции), в первую волну составили от 0,146 до 1,036, во вторую – от 0,126 до 1,272, в третью – от 0,131 до 0,906, в четвёртую – от 0,12 до 1,76. Максимальные значения параметра α наблюдаются в первую и четвёртую волну в таких регионах, как Кемеровская область, Республика Коми, Ярославская область, Санкт-Петербург, Алтайский край, Курганская область, Пермский край,

Показатели эпидемического процесса на территориях с максимальными значениями параметра α

Epidemic process indicators in territories with maximum " α " parameter

Регион Region	Номер волны Wave number	α	β	γ	R_0	Дата начала волны Starting date of the wave	Дата конца волны Ending date of the wave	Дата пика волны Date of peak incidence
Кемеровская область / Kemerovo region	1	0.924	0.841	0.027	1.10	15.04.2021	15.10.2021	06.08.2021
Республика Коми / Republic of Komi	1	0.921	0.905	0.025	1.02	10.09.2020	13.06.2021	16.11.2020
Ярославская область / Yaroslavl region	1	1.036	0.973	0.014	1.06	21.09.2020	13.03.2021	14.02.2021
Санкт-Петербург / Saint Petersburg	2	1.272	1.075	0.040	1.18	09.07.2021	14.01.2022	15.11.2021
Алтайский край / Altai territory	4	0.970	0.938	0.005	1.03	21.06.2022	05.01.2023	10.09.2022
Курганская область / Kurgan region	4	0.929	0.848	0.007	1.10	19.08.2022	22.01.2023	24.09.2022
Пермский край / Perm region	4	1.039	0.897	0.007	1.16	21.06.2022	17.01.2023	25.09.2022
Республика Башкортостан / Republic of Bashkortastan	4	0.940	0.845	0.004	1.11	22.07.2022	18.01.2023	02.10.2022
Республика Мордовия / Republic of Mordovia	4	1.760	1.648	0.001	1.07	29.07.2022	19.01.2023	19.09.2022
Хабаровский край / Khabarovsk territory	4	1.162	1.055	0.000	1.10	17.07.2022	17.01.2023	12.09.2022

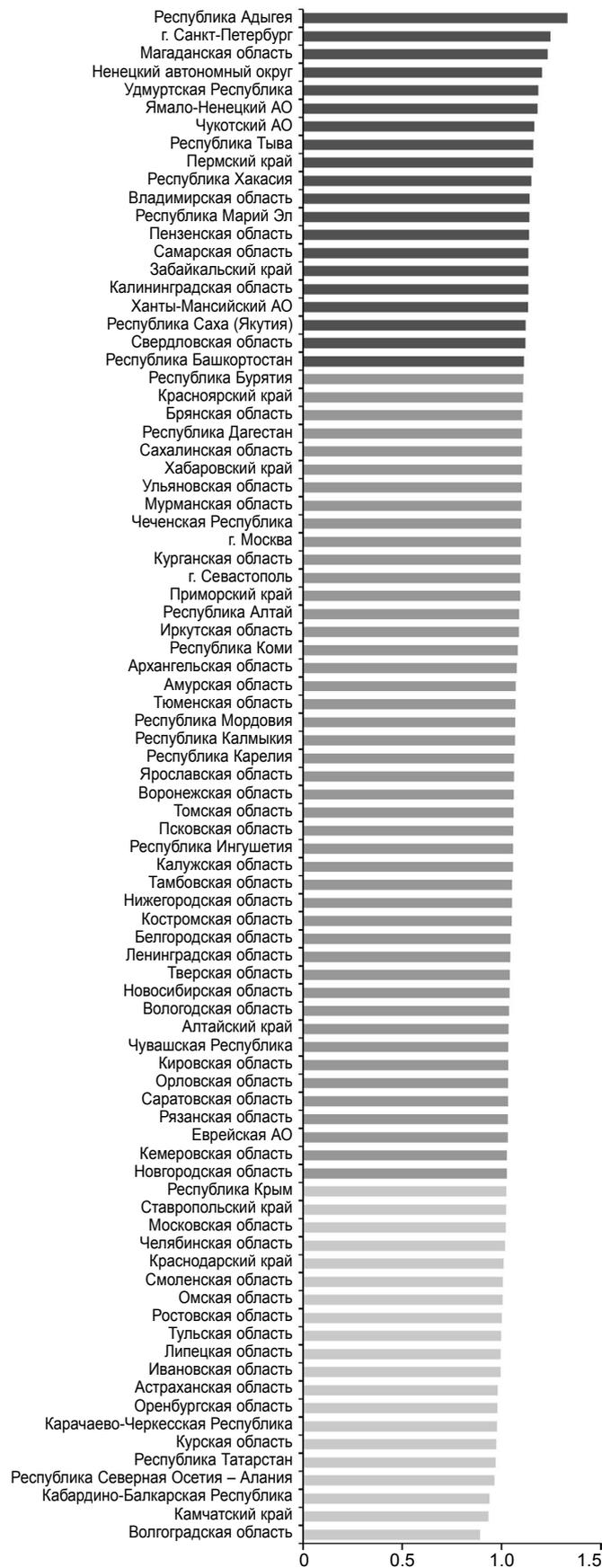


Рис. 6. Регионы с максимальными и минимальными значениями параметра R_0 (4-я волна, вариант Omicron).

Fig. 6. Regions with maximum and minimum « R_0 » parameter values (wave 4, Omicron variant).

Республика Башкортостан, Республика Мордовия, Хабаровский край (α от 0,92 до 1,76) (рис. 5; см. таблицу).

Следует обратить внимание на то, что при максимальных значениях параметра α наблюдаются также высокие значения параметра β , характеризующего эффективность лечебных мероприятий, а индекс репродукции вируса (R_0 , индекс заразности или контагиозности) выше 1. При этом значения коэффициента γ , характеризующего тяжесть течения болезни по доле летальных исходов, существенно различаются по регионам Российской Федерации. Максимальные значения параметра α , характеризующего относительную интенсивность процесса инфицирования населения региона, в четвертую волну распространения коронавируса (вариант Omicron) наблюдаются в основном в регионах Приволжского федерального округа (Пермский край, Республика Удмуртия, Самарская область, республики Башкортостан, Мордовия, Чувашия, Саратовская область), Сибирского федерального округа (Иркутская область, республики Бурятия, Хакасия, Тыва, Алтай). В указанных регионах процесс инфицирования протекает максимально быстро, захватывая значительную долю населения.

В свою очередь минимальные значения параметров α наблюдаются преимущественно в регионах центрально-европейской части России, в том числе в Москве и прилегающих территориях. Низкие значения параметра α указывают на пологий характер распространения инфекции (относительно численности населения).

Диапазоны варьирования параметра β , характеризующего эффективность лечебных мероприятий, в первую волну составили от 0,104 до 0,973, во вторую – от 0,048 до 1,075, в третью – от 0,115 до 1,094, в четвертую – от 0,109 до 1,648. Низкие значения параметра β (от 0,048 до 0,152) наблюдаются в различных регионах преимущественно во вторую волну (Алтайский, Камчатский, Краснодарский края, Мурманская, Новосибирская, Пензенская области, Республика Татарстан, Томская область), при этом наблюдаются также низкие значения параметра α . Следует отметить, что индекс репродукции вируса (индекс заразности, или контагиозности) на данных территориях существенно выше 1. Максимальная эффективность выздоровления в четвертую волну распространения коронавируса (вариант Omicron) наблюдается в Республике Мордовия, Алтайском, Хабаровском, Пермском краях, Архангельской области и др., то есть в указанных регионах наблюдалось наиболее короткое время течения заболевания.

Диапазоны варьирования параметра γ , характеризующего тяжесть течения заболевания по доле летальных исходов, в первую волну составили от 0,001 до 0,054, во вторую – от 0,002 до 0,059, в третью – от 0,000 до 0,029, в четвертую – от 0,000 до 0,015. Максимальные значения γ (от 0,029 до 0,059) наблюдаются преимущественно в первую и вторую волну COVID-19 (Воронежская область, Севастополь, Самарская и Тульская области, Чувашская Республика, Санкт-Петербург, Иркутская область, Ненецкий автономный округ, Нижегородская, Свердловская и Брянская области). При этом наблюдаются также высокие значения параметра α и R_0 . К наиболее проблемным регионам в четвертую волну распространения коронавируса (вариант Omicron) по данному показателю относятся западные территории Российской Федерации (Калининградская, Псковская, Смоленская, Брянская, Мурманская области, Санкт-Петербург). В четвертую волну наиболее выражен процесс нарастания летальных исходов заболевания в Кемеровской области и Севастополе ($\gamma = 0,015$).

Диапазоны варьирования индекса репродукции вируса (параметр R_0 , индекс заразности, или контагиозности) в первую волну составили от 0,75 до 1,41, во вторую – от 0,779 до 2,595, в третью – от 0,598 до 1,18, в четвертую – от 0,892 до 1,332. Максимальные значения индекса репродукции вируса наблюдаются во вторую волну COVID-19 в таких регионах, как Псковская область, Алтайский, Камчатский края, Карачаево-Черкесская Республика, Краснодарский край,

Мурманская и Новосибирская области, республики Адыгея, Алтай, Коми, Самарская область, Ставропольский край, Чукотский автономный округ, где значения индекса варьируются от 1,41 до 2,59.

Считается, что показатель соотношения интенсивности процессов инфицирования и выздоровления (R_0) наиболее адекватно отражает характер эпидемии. При этом чем выше значение R_0 , тем более выражен процесс, что создаёт дополнительную нагрузку на социальную инфраструктуру и существенно отражается на экономике региона. На рис. 6 представлена дифференциация регионов по данному показателю в четвёртую волну.

Наибольшие значения показателя R_0 (вариант Omicron, четвёртая волна) наблюдаются в Республике Адыгея, Санкт-Петербурге, Магаданской области, Чукотском, Ханты-Мансийском, Ненецком и Ямало-Ненецком автономных округах, Республике Удмуртия (см. рис. 6). К регионам с индексом репродукции меньше 1 относятся республики Татарстан, Северная Осетия – Алания и Кабардино-Балкарская, Камчатский край, Волгоградская область и др.

Обсуждение

На основе анализа данных по результатам исследования удалось построить модифицированную SIR-модель, параметризованную для каждого из регионов Российской Федерации, по каждой из четырёх выделенных волн, согласно практике проведения математического моделирования эпидемического процесса в аналогичных исследованиях [3–5]. Модификация модели с включением дополнительного компартмента (L – умершие) наряду с динамикой изменения скорости заболевания и выздоровления позволила в региональном разрезе проследить скорость перехода из группы заболевших к группе умерших, зафиксировав максимальные значения параметра γ для второй волны (период доминирования варианта Delta).

Снижение летальности (скорости перехода из группы заболевших в группу умерших) во время смены преобладающего штамма с Delta на Omicron может объясняться сложившимися условиями достаточной доступности для населения средств диагностики коронавирусной инфекции и расширением возможностей оказания необходимой медицинской помощи. Оказал влияние и биологический фактор, ослабивший вирулентность при смене штамма [1].

Сочетание высоких значений по параметрам α , β , R_0 , характерное для некоторых регионов, может свидетельствовать о низкой эффективности противоэпидемических мер, недостаточности организационных мероприятий, направленных на снижение социальных контактов среди населения, проведение прививочной кампании и других средств индивидуальной профилактики на момент распространения инфекции. Вместе с тем на ряде территорий значения параметра α имели минимальные значения, указывая на относительную развитость инфраструктуры, позволяющую создавать условия для разрыва социальных контактов и внедрения других мер профилактики инфекционных болезней. На отдельных территориях к моменту распространения варианта Omicron установлены максимальные значения параметра β , свидетельствующие об увеличении оборота коечного фонда и мощностей амбулаторно-поликлинического приёма вследствие их недостаточности в предшествующие волны. В ряде регионов, где значения параметра R_0 имели значения выше 1, эпидемический процесс протекал наиболее остро и сопровождался пиковыми нагрузками на систему здравоохранения, сферу социального обеспечения и другие региональные службы. При значениях показателя R_0 менее 1 процесс распространения инфекций можно считать управляемым, и даже высокие значения параметра интенсивности заражения (α) компенсируются активным выздоровлением (высокое значение параметра β).

Ограничения исследования. Используемая в настоящем исследовании модель является значительным упрощением реального эпидемического процесса и не позволяет описывать ряд наблюдаемых эффектов, а именно волнообразный характер суточных приростов числа инфицированных, различия по длительности времени ремиссии процесса инфицирования и т. д. Вместе с тем применение модели на отдельных временных промежутках и исследование причин изменчивости параметров модели позволит выделить основные факторы, объясняющие различие динамических характеристик распространения инфекции, наблюдаемое в регионах Российской Федерации.

Заключение

Проведённое исследование, базирующееся на параметризации эпидемических процессов, протекающих в отдельных регионах Российской Федерации, позволило проследить основные особенности и закономерности распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19, интенсивности выздоровления и летальности. На основе динамического анализа рядов данных по заболеваемости COVID-19 с недельным периодом осреднения выделены временные диапазоны активизации эпидемического процесса в виде случаев заболевания в регионах Российской Федерации, соответствующие волнам доминирования определённых штаммов вируса. Несмотря на быстрые мутации вируса SARS-CoV-2, фактическая динамика регистрации заболеваний в стране позволила проследить и проанализировать закономерности эпидемического процесса только по четырём основным штаммам, которые проявились в виде отдельных волн.

Исследование пространственно-временных закономерностей показателей распространения коронавирусной инфекции в целом по Российской Федерации и по отдельным регионам позволило выявить, что контагиозность и вирулентность коронавирусной инфекции (на момент анализа) имела выраженную тенденцию к снижению, что подтверждается снижением уровня смертности и летальности в результате заболевания. Анализ параметров SIR-моделей эпидемических процессов по регионам Российской Федерации позволил установить ряд характерных тенденций и получить поддающиеся интерпретации направления воздействия на эпидемический процесс, на основе которых можно разрабатывать системные стратегические решения для сохранения здоровья населения, поддержания уровня эпидемиологической безопасности в масштабе регионов и страны в целом.

Проведённое исследование концептуально базируется на упрощённой модели эпидемического процесса. В действительности население, участвующее в эпидемическом процессе, имеет более сложную структуру, которая предполагает деление на половые и возрастные группы, группировку по территориальному и социальному принципу, выделение латентной заболеваемости, деление по тяжести и т. д. Все эти обстоятельства являются основанием для совершенствования самой модели эпидемического процесса, добавления в неё новых параметров, обладающих более тонкими и чувствительными связями с внешней средой. Совершенствование модели с включением в неё новых параметров приводит к необходимости проведения детального динамического мониторинга показателей эпидемического процесса в отношении взаимодействия групп населения во время эпидемии, их реакций на управляющие воздействия со стороны органов власти, а также формализации и измерения самих управляющих воздействий. В качестве прикладных направлений исследования закономерностей распространения коронавирусной инфекции в частности и эпидемических процессов в целом предлагается совершенствование методической базы в рамках риск-ориентированной модели санитарно-эпидемиологического надзора, а также построение оптимальной системы управления санитарно-эпидемиологической ситуацией.

Литература

(п.п. 1–3, 5–9, 11–14, 16, 17, 19, 20, 22–26 см. References)

4. Чигарев А.В., Журавков М.А., Чигарев В.А. Детерминированные и стохастические модели распространения инфекции и тестирование в изолированном контингенте. *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика.* 2021; (3): 57–67. <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2021-3-57-67>
10. Кудряшов Н.А., Чмыхов М.А. Приближенные решения SIR-модели для описания коронавируса. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».* 2020; 9(5): 404–11. <https://doi.org/10.1134/S2304487X20050089> <https://elibrary.ru/ztflfw>
15. Звягинцев А.И. О нелинейной дифференциальной системе, моделирующей динамику пандемии COVID-19. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2022; (7–1): 115–21. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.121.7.016>
18. Игнатов А.М., Тригер С.А., Чернявский Е.Б. Влияние запаздывания на эволюцию эпидемий. *Теплофизика высоких температур.* 2021; 59(6): 960–3. <https://doi.org/10.31857/S0040364421060065> <https://elibrary.ru/ktfvttq>
21. Крылов В.С., Сейдаметова С., Валиева Э.С. Модели и инструменты для оценки экономической эффективности мер, связанных с пандемией COVID-19. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета.* 2020; (3): 105–11. <https://elibrary.ru/kbvovn>
27. Виницкий С.И., Гусев А.А., Дербов В.Л., Красовицкий П.М., Пеньков Ф.М., Чулуунбаатар Г. Редуцированная модель SIR пандемии COVID-19. *Журнал вычислительной математики и математической физики.* 2021; 61(3): 400–12. <https://doi.org/10.31857/S0044466921030169> <https://elibrary.ru/wkilhy>
28. Томчин Д.А., Ситчихина М.С., Ананьевский М.С., Свенцицкая Т.А., Фрадков А.Л. Прогноз динамики пандемии COVID-19 по России на основе простых математических моделей эпидемий. *Информационно-управляющие системы.* 2021; (6): 31–41. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-31-41>
29. Захаров В.В., Балыкина Ю.Е. Балансовая модель эпидемии COVID-19 на основе процентного прироста. *Информатика и автоматизация.* 2021; 20(5): 1034–64. <https://doi.org/10.15622/20.5.2> <https://elibrary.ru/zczxuw>
30. Баран В.И., Баран Е.П. Имитационное моделирование процессов развития пандемии. *Вестник Российского университета кооперации.* 2021; (3): 9–13. <https://doi.org/10.52623/2227-4383-3-45-2> <https://elibrary.ru/unlgrb>
31. Соколовский В.Л., Фурман Г.Б., Полянская Д.А., Фурман Е.Г. Пространственно-временное моделирование эпидемии COVID-19. *Анализ риска здоровью.* 2021; (1): 23–37. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.03> <https://elibrary.ru/tzwalb>
32. Степанов В.С. Зависимость уровня смертности в регионах от распространенности активных носителей SARS-CoV-2 и ресурсов организаций здравоохранения. *Анализ риска здоровью.* 2020; (4): 12–22. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.4.02> <https://elibrary.ru/arnvre>
33. Зайцева Н.В., Попова А.Ю., Алексеев В.Б., Кирьянов Д.А., Чигвинцев В.М. Региональные особенности эпидпроцесса, вызванного вирусом SARS-CoV-2 (COVID-19), и меры компенсации влияния модифицирующих факторов неинфекционного генеза. *Гигиена и санитария.* 2022; 101(6): 701–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-6-701-708> <https://elibrary.ru/yozsnr>
34. Зайцева Н.В., Попова А.Ю., Клейн С.В., Летюшев А.Н., Кирьянов Д.А., Глухих М.В. и др. Модифицирующее влияние факторов среды обитания на течение эпидемического процесса COVID-19. *Гигиена и санитария.* 2022; 101(11): 1274–82. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1274-1282> <https://elibrary.ru/zcwfvh>

References

1. Okafor L., Yan E. COVID-19 vaccines, rules, deaths, and tourism recovery. *Ann. Tour. Res.* 2022; 95: 103424. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2022.103424>
2. Rahimi I., Chen F., Gandomi A.H. A review on COVID-19 forecasting models. *Neural Comput. Appl.* 2021; 4: 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05626-8>
3. Salimpour A., Mehraban T., Ghafour H.S., Arshad N.I., Ebadi M.J. SIR model for the spread of COVID-19: A case study. *Oper. Res. Perspect.* 2023; 10: 100265. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2022.100265>
4. Chigarev A.V., Zhuravkov M.A., Chigarev V.A. Deterministic and stochastic models of infection spread and testing in an isolated contingent. *J. Belarus. State Uni. Math. Inform.* 2021; (3): 57–67. <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2021-3-57-67> (in Russian)
5. Comunian A., Gaburro R., Giudici M. Inversion of a SIR-based model: A critical analysis about the application to COVID-19 epidemic. *Physica D.* 2020; 413: 132674. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2020.132674>
6. Pájaro M., Fajar N.M., Alonso A.A., Otero-Muras I. Stochastic SIR-model predicts the evolution of COVID-19 epidemics from public health and wastewater data in small and medium-sized municipalities: A one year study. *Chaos Solitons Fractals.* 2022; 164: 112671. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112671>
7. McKendrick A.G. Applications of mathematics to medical problems. *Proc. Edinburgh Math. Soc.* 1925; 44: 98–130. <https://doi.org/10.1017/S0013091500034428>
8. Kermack W.O., McKendrick A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc. Royal Soc. London A.* 1927; 115(772): 700–21. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
9. Moein S., Nickaeen N., Rooiantan A., Borhani N., Heidary Z., Javanmard S.H., et al. Inefficiency of SIR models in forecasting COVID-19 epidemic: a case study of Isfahan. *Sci. Rep.* 2021; 11(1): 4725. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84055-6>
10. Kudryashov N.A., Chmykhov M.A. Approximate solutions of the SIR-model for describing the coronavirus. *Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"*. 2020; 9(5): 404–11. <https://doi.org/10.1134/S2304487X20050089> <https://elibrary.ru/ztflfw> (in Russian)
11. Kalachev L., Landguth E.L., Graham J. Revisiting classical SIR modelling in light of the COVID-19 pandemic. *Infect. Dis. Model.* 2023; 8(1): 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2022.12.002>
12. Chen Y.C., Lu P.E., Chang C.S., Liu T.H. A time-dependent SIR model for COVID-19 with undetectable infected persons. *IEEE Trans. Neww. Sci. Eng.* 2020; 7(4): 3279–94. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2020.3024723>
13. Alshammari F.S. Analysis of SIRVI model with time dependent coefficients and the effect of vaccination on the transmission rate and COVID-19 epidemic waves. *Infect. Dis. Model.* 2023; 8(1): 172–82. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2023.01.002>
14. Meyer J.F.C.A., Lima M. Relevant mathematical modeling efforts for understanding COVID-19 dynamics: an educational challenge. *ZDM.* 2023; 55(1): 49–63. <https://doi.org/10.1007/s11858-022-01447-2>
15. Zvyagintsev A.I. On a nonlinear differential system simulating the dynamics of the COVID-19 pandemic. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal.* 2022; (7–1): 115–21. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.121.7.016> (in Russian)
16. Colombo R.M., Garavello M., Marcellini F., Rossi E. An age and space structured SIR model describing the COVID-19 pandemic. *J. Math. Ind.* 2020; 10(1): 22. <https://doi.org/10.1186/s13362-020-00090-4>
17. Djenina N., Ouannas A., Batiha I.M., Grassi G., Oussaeif T.E., Momani S. A novel fractional-order discrete SIR model for predicting COVID-19 behavior. *Mathematics.* 2022; 10(13): 2224. <https://doi.org/10.3390/math10132224>
18. Ignatov A.M., Triger S.A., Chernyavskiy E.B. The effect of lag on the evolution of epidemics. *Teplofizika vysokikh temperatur.* 2021; 59(6): 960–3. <https://doi.org/10.31857/S0040364421060065> <https://elibrary.ru/ktfvttq> (in Russian)
19. Khalaf S.L., Flayyih H.S. Analysis, predicting, and controlling the COVID-19 pandemic in Iraq through SIR model. *Res. Control Optim.* 2023; 10: 100214. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100214>
20. Martín-Moreno J.M., Alegre-Martínez A., Martín-Gorgojo V., Alfonso-Sánchez J.L., Torres F., Pallares-Carratala V. Predictive models for forecasting public health scenarios: practical experiences applied during the first wave of the COVID-19 pandemic. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19(9): 5546. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095546>
21. Krylov V.S., Seydametova S., Valieva E.S. Models and tools for evaluating the economic effectiveness of measures related to the COVID-19. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta.* 2020; (3): 105–11. <https://elibrary.ru/kbvovn> (in Russian)
22. Kudryashov N.A., Chmykhov M.A., Vigdorowitsch M. Analytical features of the SIR model and their applications to COVID-19. *Appl. Math. Model.* 2021; 90: 466–73. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.057>
23. AlQadi H., Bani-Yaghub M. Incorporating global dynamics to improve the accuracy of disease models: Example of a COVID-19 SIR model. *PLoS One.* 2022; 17(4): e0265815. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265815>
24. Cooper I., Mondal A., Antonopoulos C.G. A SIR model assumption for the spread of COVID-19 in different communities. *Chaos Solitons Fractals.* 2020; 139: 110057. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110057>
25. Ghosh K., Ghosh A.K. Study of COVID-19 epidemiological evolution in India with a multi-wave SIR model. *Nonlinear Dyn.* 2022; 109(1): 47–5. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07471-x>
26. Cakir Z., Sendur A. A note on epidemiological models: SIR modeling of the COVID-19 with variable coefficients. *Bull. Karaganda Uni. Math. Ser.* 2022; (1): 43–51. <https://doi.org/10.31489/2022M1/43-51>
27. Vinititskiy S.I., Gusev A.A., Derbov V.L., Krasovitskiy P.M., Pen'kov F.M., Chuluunbaatar G. Reduced SIR model of COVID-19 pandemic. *Comp. Math. Math. Phys.* 2021; 61(3): 400–12. <https://doi.org/10.31857/S0044466921030169> <https://elibrary.ru/bxdryl>
28. Tomchin D.A., Sitchikhina M.S., Anan'evskiy M.S., Svetsitskaya T.A., Fradkov A.L. Prediction of COVID-19 pandemic dynamics in Russia based on simple mathematical models of epidemics. *Informatsionno-upravlyayushchie*

Original article

- sistemy*. 2021; (6): 31–41. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-31-41> (in Russian)
29. Zakharov V.V., Balykina Yu.E. Balance model of COVID-19 epidemic based on percentage growth rate. *Informatika i avtomatizatsiya*. 2021; 20(5): 1034–64. <https://doi.org/10.15622/20.5.2> <https://elibrary.ru/zczxuw> (in Russian)
30. Baran V.I., Baran E.P. Simulation of pandemic development processes. *Vestnik Rossiyskogo universiteta kooperatsii*. 2021; (3): 9–13. <https://doi.org/10.52623/2227-4383-3-45-2> <https://elibrary.ru/unlgrb> (in Russian)
31. Sokolovskiy V.L., Furman G.B., Polyanskaya D.A., Furman E.G. Spatio-temporal modeling of COVID-19 epidemic. *Health Risk Analysis*. 2021; (1): 23–37. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.03> <https://elibrary.ru/ssgyjp>
32. Stepanov V.S. Dependence between mortality in regions and prevalence of active SARS-CoV2 carriers and resources available to public healthcare organizations. *Health Risk Analysis*. 2020; (4): 12–23. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.4.02> <https://elibrary.ru/uaynfb>
33. Zaytseva N.V., Popova A.Yu., Alekseev V.B., Kir'yanov D.A., Chigvintsev V.M. Regional peculiarities of the epidemiological process caused by SARS-CoV-2 (COVID-19), compensation for the impact of modifying factors of non-infectious genesis. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(6): 701–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-6-701-708> <https://elibrary.ru/yozsnr> (in Russian)
34. Zaytseva N.V., Popova A.Yu., Kleyn S.V., Letyushev A.N., Kir'yanov D.A., Glukhikh M.V., et al. Modifying impact of environmental factors on the course of an epidemic process. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(11): 1274–82. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1274-1282> <https://elibrary.ru/zcwfvh> (in Russian)
-