



Зайцева Н.В.<sup>1</sup>, Попова А.Ю.<sup>2</sup>, Алексеев В.Б.<sup>1</sup>, Кирьянов Д.А.<sup>1</sup>, Чигвинцев В.М.<sup>1</sup>

## Региональные особенности эпидпроцесса, вызванного вирусом SARS-COV-2 (COVID-19), и меры компенсации влияния модифицирующих факторов неинфекционного генеза

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 125993, Москва, Россия

**Введение.** Развитие пандемии SARS-COV-2 (COVID-19) ставит ряд аналитических задач, направленных как на изучение самого процесса распространения заболевания, так и на исследование причин и закономерностей эпидемии для различных условий. В статье рассматривается наименее изученная проблема, связанная с необходимостью выяснения особенностей течения и причин наблюдаемых различий при распространении коронавирусной инфекции в регионах Российской Федерации с различным социально-экономическим и социально-гигиеническим статусом, для обоснования системы мер по компенсации предотвратимого модифицирующего влияния внешних факторов среды обитания и образа жизни.

**Материалы и методы.** Исследование строили на основе анализа закономерностей региональной дифференциации параметров SIR-модели, отражающей эпидемический процесс в регионах Российской Федерации. В качестве базовой модели использовали модификацию классической SIR-модели. В исследовании использовали данные по более чем 250 различным показателям, отражающим уровень инфицирования населения, вакцинации, госпитализации и летальности для 85 субъектов Российской Федерации за 2020–2021 гг. с недельным осреднением.

**Результаты.** Получены оценки параметров математических моделей для регионов РФ, на основе которых выполнен анализ особенностей течения эпидемического процесса, выявлены основные закономерности территориального распределения параметров, характеризующих скорости инфицирования, вылечивания, летальности, а также индекса репродукции вируса.

**Ограничения исследования.** Результаты исследования ограничены региональным уровнем агрегации данных, упрощённой моделью развития эпидемического процесса, а также недостаточным охватом факторов среды обитания, отражающих особенности распространения инфекции, что является перспективным направлением дальнейших исследований.

**Заключение.** Проведённое исследование позволило проследить основные особенности и закономерности распространения заболевания, выделить регионы, в которых эпидемические процессы протекали наиболее остро и сопровождалась пиковыми нагрузками на региональные службы социальной сферы. Полученные тенденции и закономерности свидетельствуют, что наблюдаемая региональная дифференциация в развитии отдельных стадий эпидемического процесса распространения новой коронавирусной инфекции (COVID-19) штамма дельта обусловлена сложным взаимодействием и влиянием модифицирующих факторов, формирующих определённую многоуровневую и многокомпонентную систему.

**Ключевые слова:** эпидемия; COVID-19; заболеваемость; временные ряды; SIR-модель; скорость заражения; скорость выздоровления

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения».

**Для цитирования:** 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): 701–708. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-6-701-708> <https://www.elibrary.ru/yozsng>

**Для корреспонденции:** Чигвинцев Владимир Михайлович, науч. сотр. отд. математического моделирования систем и процессов, ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, 614045, Пермь. E-mail: cvm@fcrisk.ru

**Участие авторов:** Зайцева Н.В. — концепция и дизайн исследования, подготовка текста, редактирование; Попова А.Ю. — концепция и дизайн исследования, подготовка текста, редактирование; Алексеев В.Б. — концепция и дизайн исследования, подготовка текста; Кирьянов Д.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, подготовка текста; Чигвинцев В.М. — сбор и обработка материала, подготовка текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 11.04.2022 / Принята к печати: 08.06.2022 / Опубликована: 30.06.2022

Nina V. Zaitseva<sup>1</sup>, Anna Yu. Popova<sup>2</sup>, Vadim B. Alekseev<sup>1</sup>, Dmitriy A. Kiryanov<sup>1</sup>, Vladimir M. Chigvintsev<sup>1</sup>

## Regional peculiarities of the epidemiological process caused by SARS-COV-2 (COVID-19), compensation for the impact of modifying factors of non-infectious genesis

<sup>1</sup>Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation;

<sup>2</sup>Russian Medical Academy for Continuous Occupational Education, Moscow, 125993, Russian Federation

**Introduction.** The development of SARS-COV-2 (COVID-19) pandemic creates certain analytical challenges with respect to both examining the spread of the disease itself and investigating reasons and regularities in the epidemic propagation under different conditions. This article dwells on the least examined issue related to the necessity to establish peculiarities and reasons for occurring differences in the coronavirus infection spread in RF regions with different socioeconomic and social-hygienic status. This is necessary for substantiating relevant actions, which are to compensate for preventable modifying influence exerted by environmental factors and lifestyle-related ones.

**Materials and methods.** The study involved analyzing regularities in regional differentiation of parameters in a classic SIR model describing the epidemic process in RF regions. We analyzed data on more than two hundred fifty various indicators describing levels of infection, vaccination, hospital admission and mortality among population collected in 85 RF regions in 2020–2021. All the data were taken as average values over a week.

**Results.** We assessed parameters of mathematical models for RF regions. The assessments gave grounds for analyzing peculiar development of the epidemic process and for detecting basic regularities in the territorial distribution of parameters describing rates of infection, recovery and mortality rate and the basic reproductive number for SARS-COV-2 virus.

**Limitations.** The results are limited by data aggregation performed only at a regional level and a simplified model of the developing epidemic process applied in the present study. Another limitation is insufficient coverage of environmental factors reflecting peculiarities in the infection spread. The latter is considered a promising trend in future research.

**Conclusion.** The study made it possible to trace basic peculiarities and regularities in the spread of the disease and to spot out regions where the epidemic process was the most acute and accompanied with the highest burdens on regional social security services. These trends and regularities indicate to the occurring regional differentiation detected at various stages in the development of epidemic process of the new coronavirus infection (COVID-19) spread due to the Delta strain caused by complex interactions and influence exerted by modifying factors creating a certain multi-level and multi-component structure.

**Keywords:** epidemic; COVID-19; incidence; time series; SIR-model; contagion rate; recovery rate

**Compliance with ethical standards.** The study was approved by the local ethical committee of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies.

**For citation:** Zaitseva N.V., Popova A.Yu., Alekseev V.B., Kiryanov 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 Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2022; 101(6): 701-708. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-6-701-708> <https://elibrary.ru/yoysnr> (in Russian)

**For correspondence:** Vladimir M. Chigvintsev, MD, researcher at the Department for Mathematical Modeling of Systems and Processes, the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm 614045, Russian Federation. E-mail: [cvm@fcrisk.ru](mailto:cvm@fcrisk.ru)

#### Information about authors:

Popova A.Yu., <https://orcid.org/0000-0003-2567-9032> Zaitseva N.V., <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145> Alekseev V.B., <https://orcid.org/0000-0001-5850-7232> Kiryanov D.A., <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961> Chigvintsev V.M., <https://orcid.org/0000-0002-0345-3895>

**Contribution:** Zaitseva N.V. – the study concept and design, writing, editing; Popova A.Yu. – the study concept and design, writing, editing; Alekseev V.B. – the study concept and design, writing; Kiryanov D.A. – the study concept and design, data collection and analysis, writing; Chigvintsev V.M. – data collection and analysis, writing. 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: April 11, 2022 / Accepted: June 8, 2022 / Published: June 30, 2022

## Введение

Развитие пандемии SARS-COV-2 (COVID-19) ставит ряд аналитических задач, направленных как на изучение самого процесса распространения заболевания, так и на исследование причин и закономерностей эпидемии для различных условий. Динамика распространения эпидемии среди населения Российской Федерации показывает наличие региональной специфики интенсивности инфицирования, выздоровления, летальности, что позволяет предположить существование факторов, определяющих особенности течения эпидемического процесса.

Исходя из актуальности проблемы пандемии коронавирусной инфекции в глобальном масштабе практически все научные организации и исследовательские группы, развивающие фундаментальные и прикладные направления, в той или иной мере занимаются проблемой моделирования эпидемических процессов, используя оригинальные методические наработки. В обзоре, выполненном специалистами Сибирского отделения РАН (С.И. Кабанихин) и Новосибирского государственного университета (О.И. Криворотько) [1], приведён подробный анализ математических методов моделирования распространения COVID-19 применительно к Новосибирской области. В работе рассмотрены основные группы моделей, основанных на анализе временных рядов, дифференциальные, имитационные, а также их комбинации.

Одним из наиболее адекватных методов моделирования распространения инфекции в популяциях, не структурированных по группам населения (половым, возрастным, социальным), является представление процесса в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Дифференциальные модели основаны на законе сохранения масс и учитывают как особенности передачи инфекции и тяжесть течения заболевания, так и эффективность лечения [2].

Простейшими дифференциальными моделями, описывающими основные процессы распространения заболевания, являются камерные SIR-модели [3]. В этих моделях популя-

ция разделяется на группы восприимчивых к заболеванию, инфицированных и выздоровевших. Для большей детализации дополнительно учитывается число бессимптомных носителей, госпитализированных, критических случаев, требующих подключения аппарата искусственной вентиляции лёгких (ИВЛ), число лиц, помещённых на карантин, умерших и др. Это позволяет уточнить эпидемическую картину за счёт варьирования более широкого набора параметров модели.

Основными недостатками SIR-моделей являются: отсутствие возможности учёта изменений параметров во времени, появления новых мутаций и штаммов вируса, трудности учёта противоэпидемических мер, а также повышенные требования к статистическим данным, используемым для идентификации параметров. Кроме того, такие модели не предполагают учёта внешних факторов, определяющих особенности эпидпроцесса, к которым относятся природно-климатические условия, уровень развития социальной инфраструктуры, санитарно-гигиеническое состояние территорий, состояние здоровья проживающего населения, его этнический состав, образ жизни.

Вместе с тем камерные SIR-модели широко используются в научных исследованиях для описания и прогнозирования распространения инфекционных заболеваний [4, 5]. При этом большинство моделей такого класса ориентированы на популяции с высоким уровнем социальных контактов, то есть на лиц, проживающих в пределах населённых мест с высокой плотностью населения, прежде всего городских поселений [6, 7].

Ряд авторов используют SIR-модели для описания динамики эпидемического процесса на уровне регионов. Так, в исследовании Соколовского В.Л., Фурмана Г.Б. и соавт. [8] моделируется распространение эпидемического процесса COVID-19 на территории Израиля. В этой работе авторы помимо динамических характеристик процесса вводят пространственные координаты, позволяющие рассматривать закономерности распространения заболевания в условиях неравномерного проживания населения, его мобильности и социальных контактов.

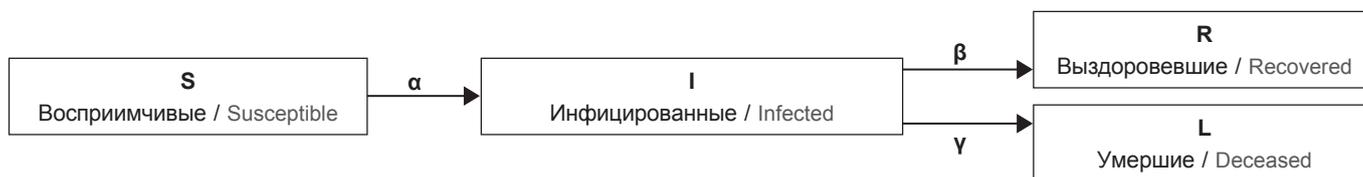


Рис. 1. Схема переходов между состояниями системы.

Fig. 1. Scheme of transitions between system states.

Введение пространственной координаты в уравнения и учёт дискретной пространственной неоднородности позволяют переходить к классу математических моделей «реакции – диффузии». Это позволяет более точно моделировать эпидемию от очага распространения (крупного города в стране, регионального центра) при известных начальных условиях [9]. Однако такое усложнение модели предполагает существенное расширение исходной информации, необходимой для идентификации параметров, что далеко не всегда возможно при решении масштабных прикладных задач, особенно в условиях дефицита информации и времени. Кроме того, моделирование распространения инфекции также затруднено при волнообразном характере эпидемического процесса, возникающего при появлении мутаций вируса, который требует учёта дополнительных условий по заносу и замещению старых штаммов новыми [8].

Из этого следует, что излишнее усложнение моделей не всегда рационально с точки зрения их практического использования при решении задач прогнозирования распространения заболевания как во времени, так и в пространстве. Такое утверждение подтверждается низким уровнем адекватности прогнозных оценок развития эпидемии по разработанным моделям в 2022 г., характеризующейся появлением нового омикрон-штамма, который отличается повышенной contagiозностью и появлением новых групп риска среди населения.

Следует отметить также, что большинство авторов, особенно представляющих фундаментальные направления наук, совершенно правомерно ставят задачу построения модели, наиболее качественно отражающей наблюдаемую картину распространения эпидемии, за счёт усложнения как самой модели, так и ввода дополнительных параметров, описывающих состояние и динамику процессов. При этом вопросы, связанные с объяснением причин именно такого или иного течения эпидемии, анализа закономерностей и связей с внешними условиями неинфекционной природы, рассматриваются значительно реже. Вместе с тем с точки зрения принятия управленческих решений на уровне страны, регионов, отдельных населённых пунктов понимание и математическое описание таких проблем представляется весьма важным, а ряд факторов неинфекционного генеза может входить в число приоритетных.

Исходя из этого в настоящем исследовании концептуально и методически рассматривается недостаточно изученная проблема, связанная с необходимостью выяснения особенностей течения и причин наблюдаемых различий в ходе распространения коронавирусной инфекции в различных регионах Российской Федерации, для обоснования стратегий управления эпидемией. В качестве углубления исследования в ближайшей перспективе поставлена задача определения и параметризации модифицирующего влияния на ход эпидемического процесса внешних факторов неинфекционной природы, а также оценка управляемости процессом за счёт внедрения комплекса санитарно-гигиенических мероприятий.

**Цель исследования** – определить региональные особенности эпидемического процесса, вызванного коронавирусом SARS-COV-2 (COVID-19), для обоснования системы мер по компенсации предотвратимого модифицирующего влияния внешних факторов среды обитания и образа жизни на распространение инфекции.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- 1) концептуальная постановка, разработка методологии и дизайна исследования региональных особенностей распространения коронавирусной инфекции;
- 2) сбор из различных источников, согласование и предварительный анализ данных по показателям распространения коронавирусной инфекции;
- 3) параметризация эпидемических моделей распространения коронавирусной инфекции в регионах Российской Федерации;
- 4) обобщение результатов и определение направлений дальнейших исследований.

## Материалы и методы

Исследование строили на основе анализа закономерностей региональной дифференциации параметров математической модели, отражающей ход эпидемического процесса в регионах Российской Федерации.

В качестве базовой модели использовали модификацию классической SIR-модели, предложенной У.О. Кермаком и А.Г. Маккендриком [10, 11], отражающей динамику переходов группы населения (состояния), восприимчивой к действию вируса (S-susceptible), в группу инфицированных (I-infected), выздоровевших (R-recovered) и умерших (L-lethal). На рис. 1 приведена схема переходов между состояниями системы.

Модель, разработанная методом системной динамики, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, отражающих скорости изменения численности исследуемых групп населения:

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha \frac{SI}{N}, \quad \frac{dI}{dt} = \alpha \frac{SI}{N} - \beta I - \gamma I, \quad \frac{dR}{dt} = \beta I, \quad \frac{dL}{dt} = \gamma I, \quad (1)$$

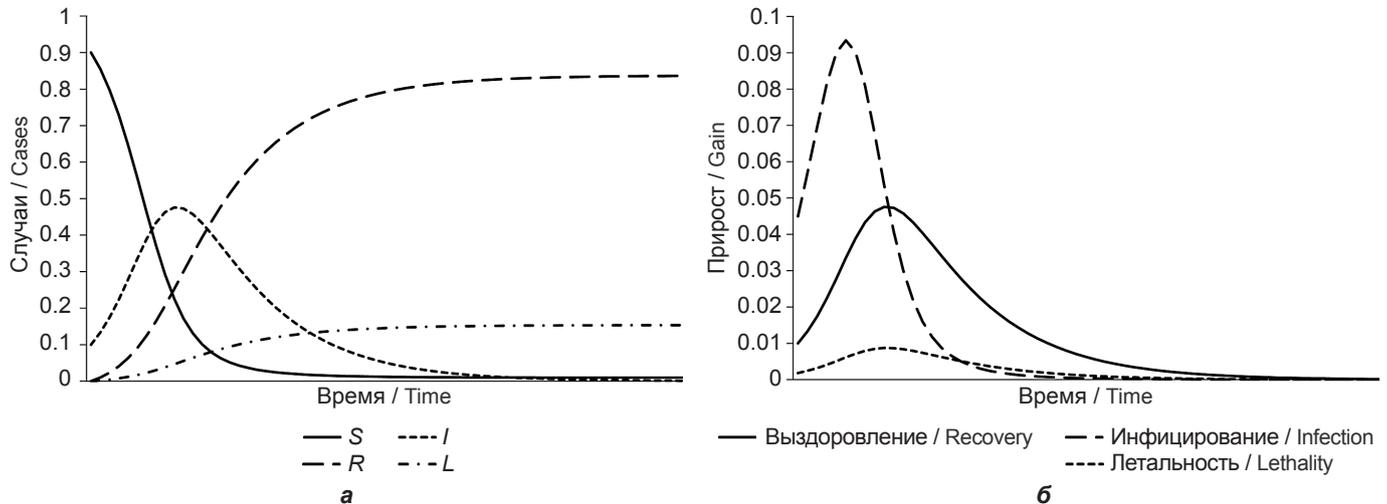
где  $S$  – количество населения, восприимчивого к действию вируса (количество непереболевших);  $I$  – количество инфицированных (болеющих);  $R$  – количество выздоровевших;  $N$  – численность населения;  $\alpha, \beta, \gamma$  – параметры модели, отражающие интенсивность эпидемического процесса.

Параметры модели, отражающие интенсивность эпидемического процесса, являются безразмерными величинами, при этом имеют определённый биологический смысл:  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий относительную скорость инфицирования населения (распространения инфекции);  $\beta$  – коэффициент, характеризующий эффективность оказания медицинской помощи, обратно пропорционален количеству времени, затраченному на лечение;  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий тяжесть течения заболевания по доле летальных исходов в единицу времени.

На рис. 2 приведено качественное представление динамики показателей согласно предложенной модификации классической SIR-модели как для абсолютных случаев инфицирования, выздоровления и смерти, так и для их приростов в единицу времени.

Одной из концептуальных динамических характеристик эпидемического процесса является индекс репродукции вируса (индекс заразности, или contagiозности), который определяется как отношение:

$$R_0 = \alpha / \beta \quad (2)$$



**Рис. 2.** Качественное представление динамики показателей согласно предложенной модификации классической SIR-модели: *а* – абсолютное количество восприимчивых, инфицированных, выздоровевших и умерших; *б* – приросты в единицу времени числа инфицированных, выздоровевших и умерших.

**Fig. 2.** Qualitative presentation of the trend according to suggested modification of the classic SIR model: *a* – an absolute number of susceptible, infected, recovered and deceased; *b* – gains in a number of infected, recovered and deceased per a unit of time.

Индекс репродукции вируса определяется как среднее количество людей, которых заражает активный инфицированный, попавший в полностью неиммунизированное окружение, при отсутствии специальных противозидемических мер, направленных на предотвращение распространения заболевания.

По существу, индекс репродукции вируса является интегральным параметром, определяющим ход эпидемического процесса и способность его к неограниченному развитию или затуханию.

Следует отметить, что представленная модификация SIR-модели является значительным упрощением реального эпидемического процесса и не позволяет описывать ряд наблюдаемых эффектов, а именно волнообразный характер суточных приростов количества инфицированных, различия по длительности времени ремиссии процесса инфицирования. 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.

В качестве основного статистического материала для проведения идентификации региональных моделей эпидемического процесса использовались данные с понедельным осреднением, содержащие показатели приростов новых случаев заболеваний коронавирусной инфекцией и количества умерших. Данные предоставлены центральным аппаратом Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Дополнительно использованы открытые данные посуточной регистрации случаев инфицирования населения, количества выздоровевших и умерших в разрезе регионов Российской Федерации интернет-портала «GOGOV – о главном в России без политики» (<https://gogov.ru/articles/covid-19>). Все данные подвергнуты предварительной обработке и согласованию по недельным временным интервалам.

Для проведения процедуры идентификации параметров региональных модифицированных SIR-моделей выполнена выкопировка необходимой информации из общего массива данных. Идентификацию проводили методом максимального правдоподобия, который предусматривал построение оценок параметров на каждом временном промежутке с по-

следующим осреднением. Всего построено и исследовано 85 (по числу регионов Российской Федерации) моделей эпидемического процесса.

## Результаты

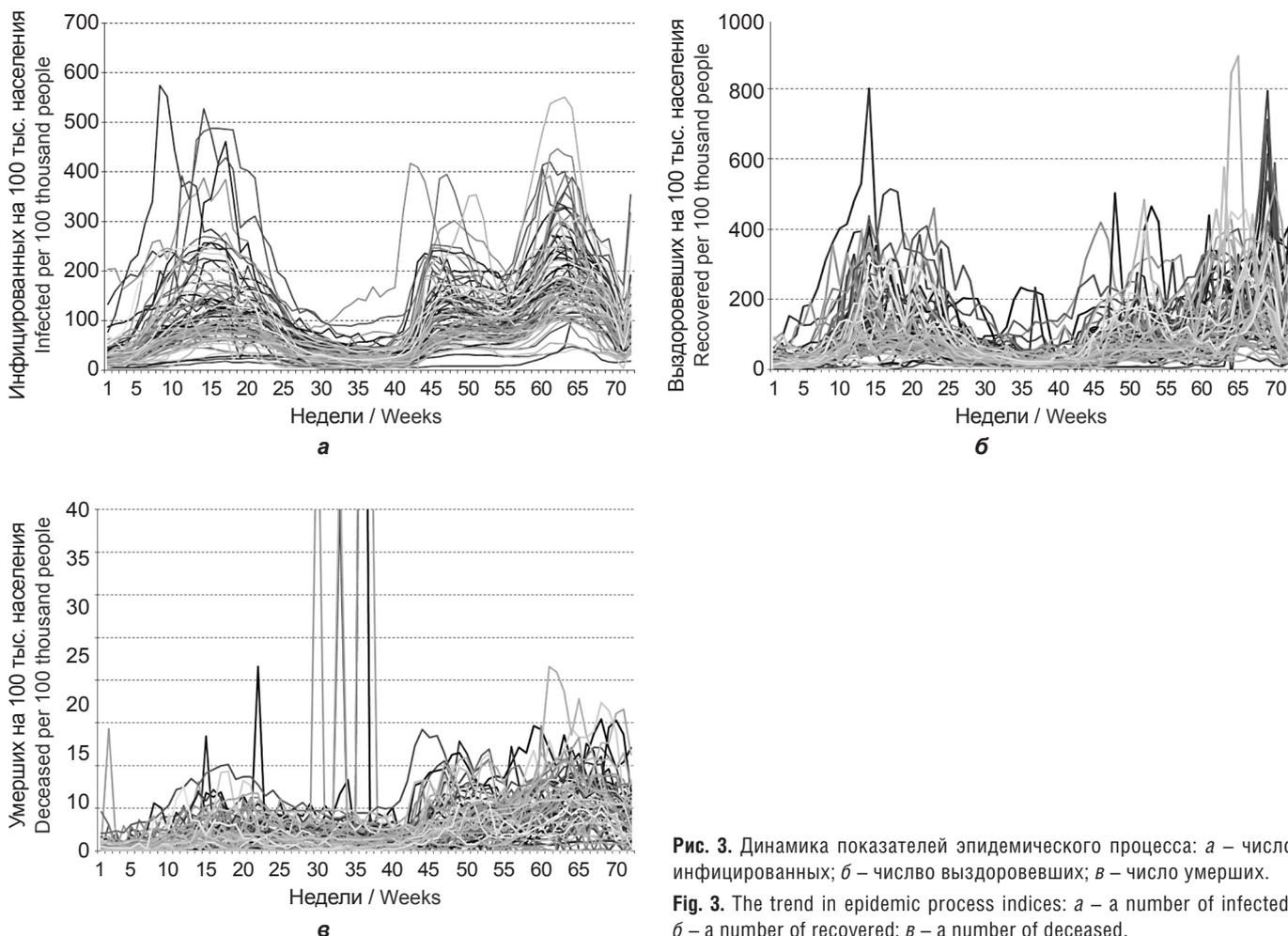
Статистические данные по характеристике эпидемического процесса распространения заболеваний коронавирусной инфекцией в регионах Российской Федерации накапливаются с марта 2020 г. Данные динамики с недельным осреднением соответствуют периоду времени, равному 71 нед. На рис. 3 приведены недельные приросты числа инфицированных, выздоровевших и умерших для всех регионов Российской Федерации.

На рис. 3, *а* отчетливо прослеживаются три волны эпидемии: 1–35-я, 36–55-я, 54–69-я 70–71-я недели соответствует началу новой волны, связанной с доминированием омикрон-штамма. По существу, каждая волна может быть представлена в виде отдельного эпидемического процесса, который описывается предлагаемой моделью и различается как по его параметрам, так и по региональным особенностям.

Следует отметить, что волнообразный характер количества выздоровевших (рис. 3, *б*) позволяет проследить фазовый сдвиг во времени, соответствующий средней длительности лечения (порядка 14 дней), при этом наблюдается сглаживание процесса с общей тенденцией к нарастанию. Количество умерших (летальность) (рис. 3, *в*) практически теряет волнообразный характер и характеризуется стабильным ростом, особенно выраженным в течение последних трёх месяцев.

Согласно оценкам специалистов в области эпидемиологии, на середину 2021 г. в Российской Федерации сложились условия достаточной доступности как средств диагностики коронавирусной инфекции у населения, так и оказания необходимой медицинской помощи в случае выявления заболевания. Во всех субъектах Российской Федерации разработаны и внедрены порядки действий по организации противозидемических мероприятий в случае превышения пороговых значений распространения инфекции.

Организационные меры и накопленный опыт по противодействию распространению инфекции определили сбалансированную работу и готовность всех служб к ликвидации угроз, связанных с эпидемией. Это касается и сбора



**Рис. 3.** Динамика показателей эпидемического процесса: а – число инфицированных; б – число выздоровевших; в – число умерших.

**Fig. 3.** The trend in epidemic process indices: а – a number of infected; б – a number of recovered; в – a number of deceased.

статистических данных, которые с середины 2021 г. систематически агрегируются и обрабатываются на ведомственных (с ограниченным доступом) и открытых информационных ресурсах. В связи с этим для моделирования и проведения корректного аналитического исследования выбран временной период, соответствующий второй половине 2021 г., характеризующийся устойчивым доминированием дельта-штамма и отсутствием резких всплесков показателей эпидемического процесса, возникающих по труднообъяснимым причинам.

На основе данных о недельной заболеваемости населения, количестве выздоровевших и умерших проведена оценка параметров модифицированной SIR-модели для каждого региона Российской Федерации. На рис. 4 приведена картографическая интерпретация распределения параметров моделей по регионам.

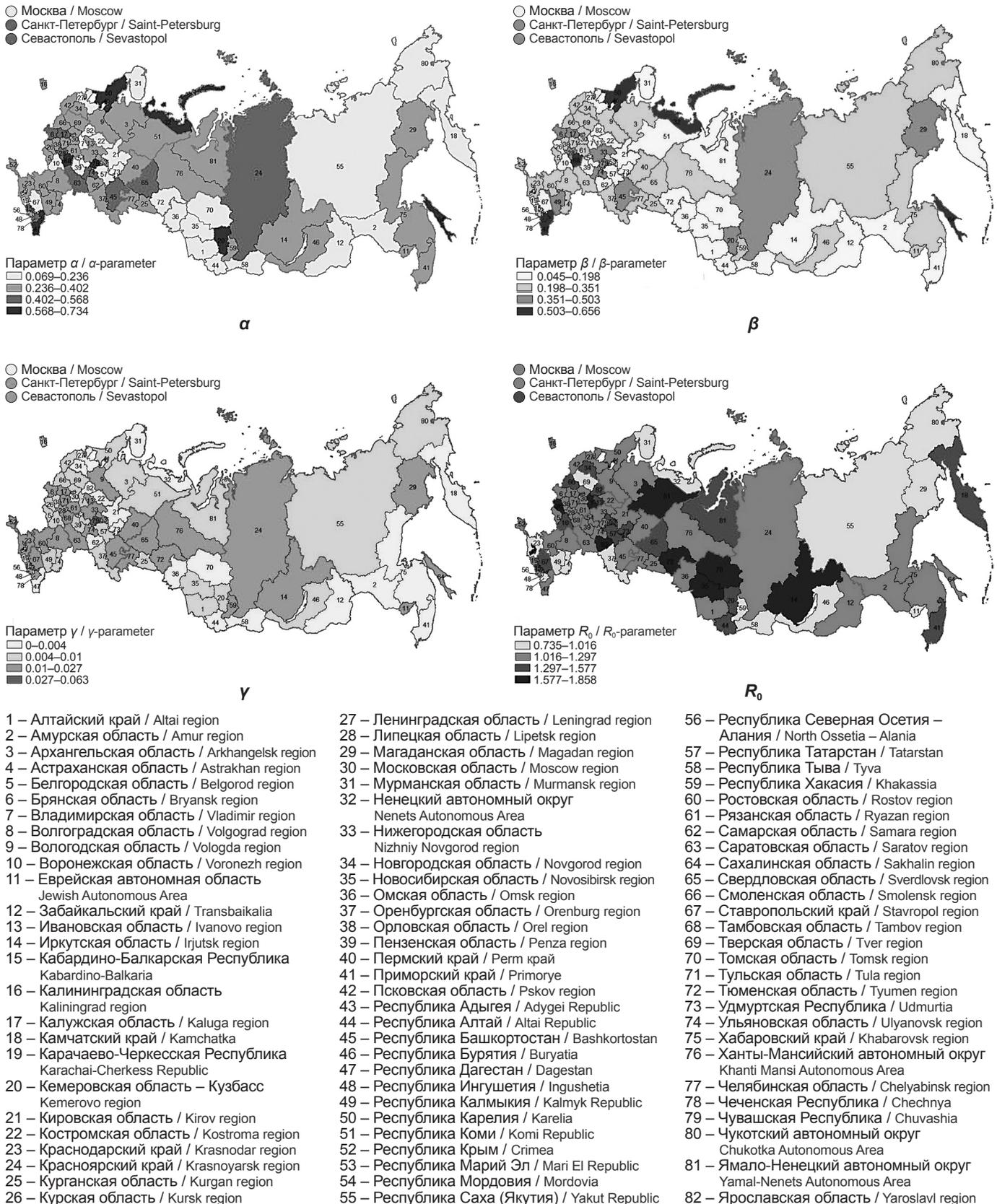
## Обсуждение

Полученные результаты значительно расширяют аналитические возможности исследований, основанных на применении модификаций SIR-модели [3, 5–6, 9–11], ориентированной в основном на исследование в рамках одной территории. Существующие подходы к пространственно-временному моделированию распространения инфекции [7–8] отражают ход эпидемического процесса в масштабе, учитывающем взаимодействие отдельных индивидов, и позволяют определять приоритетные направления по локализации распространения эпидемии. При этом задачи поиска закономерностей и мер противодействия на уровне популяций решаются не в полной мере.

Полученные в настоящем исследовании оценки параметров математических моделей для регионов Российской Федерации позволили выполнить анализ особенностей течения эпидпроцесса, выявить основные закономерности территориального распределения параметров, характеризующих скорости инфицирования, вылечивания, летальности, а также индекса репродукции вируса.

Параметр  $\alpha$ , характеризующий относительную интенсивность процесса инфицирования населения региона, имеет выраженную тенденцию к росту на периферии Российской Федерации. В частности, наблюдались максимумы значений параметра в Сахалинской и Тамбовской областях, Республике Дагестан, Ненецком автономном округе, Кемеровской области, Чувашской Республике. В этих регионах процесс инфицирования протекал максимально быстро, захватывая значительную долю населения регионов. Такие тенденции возможны при низкой эффективности противоэпидемических мер, недостаточности организационных мероприятий среди населения, направленных на снижение социальных контактов, проведение прививочной кампании, и других средств индивидуальной профилактики.

С другой стороны, минимальные значения параметров наблюдались в основном в регионах центральной части Европейской России и Сибирского федерального округа, в том числе в крупнейшем мегаполисе – Москве. Низкие значения параметра  $\alpha$  указывают на пологий характер распространения инфекции относительно численности населения. Одной из возможных предпосылок, выделяющих указанные территории, является развитость инфраструктуры, позволяющей создавать условия для разрыва социальных контактов и внедрения других мер профилактики инфекционных заболеваний.



**Рис. 4.** Картографическое представление распределения параметров модифицированной SIR-модели по регионам Российской Федерации:  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий относительную скорость инфицирования населения;  $\beta$  – коэффициент, характеризующий эффективность оказания медицинской помощи;  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий тяжесть течения заболевания;  $R_0$  – индекс репродукции вируса.

**Fig. 4.** Cartographic representation of the distribution of parameters in the modified SIR model by RF regions ( $\alpha$  is the coefficient which characterizes relative rate of population infection rate;  $\beta$  is the coefficient which characterizes effectiveness of medical care;  $\gamma$  is the coefficient which characterizes the disease severity;  $R_0$  is the virus reproduction index).

Параметр  $\beta$  модифицированной SIR-модели позволяет судить об эффективности оказания медицинской помощи в регионе, а также о тяжести состояний заболевших. По существу, параметр  $\beta$  пропорционален среднему времени одного законченного случая заболевания, что позволяет оценивать его большие значения как положительную характеристику региона, а низкие — как отрицательную.

Максимальные величины параметра  $\beta$  наблюдаются в Ненецком автономном округе, Сахалинской и Тамбовской областях, Республике Дагестан, что свидетельствует о минимальном времени вылечивания в этих регионах. Одной из причин быстрого «завершения» случая заболевания могла являться высокая потребность в увеличении оборота коечного фонда и мощностей амбулаторно-поликлинического приёма в регионе из-за их недостаточности.

Следует обратить внимание, что лидеры среди регионов по параметру  $\beta$  те же, что и по параметру  $\alpha$ . Этот факт свидетельствует об остро протекающем характере распространения инфекции в этих регионах, определяющем необходимость немедленно принимать адекватные управленческие решения исходя из динамики эпидпроцесса, наличия мощностей и ресурсов.

Параметр  $\gamma$ , выступающий в качестве меры вероятности возникновения летальных исходов заболевания, характеризует тяжесть состояния заболевших коронавирусной инфекцией. К наиболее проблемным регионам с этой точки зрения относятся Чувашская Республика, Тамбовская область, Республика Северная Осетия — Алания, Чеченская Республика, Брянская область. При этом процесс нарастания летальных исходов заболевания наиболее выражен в Чувашской Республике.

Высокие значения параметра  $\gamma$  могут быть обусловлены как проблемами в системе оказания медицинской помощи, так и особенностями проживающего населения: его половой и возрастной структурой, состоянием здоровья.

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 выраженно протекает процесс, создавая дополнительную нагрузку на социальную инфраструктуру, что существенно отражается на экономике региона. Наибольшие значения показателя ( $R_0 > 1,5$ ) наблюдались в Новосибирской области, Республике Коми, Тюменской области, Республике Адыгея, Самарской, Курской, Иркутской, Владимирской областях.

В регионах, где наблюдаются высокие значения индекса репродукции вируса, эпидемические процессы протекают наиболее остро и сопровождаются пиковыми нагрузками на систему здравоохранения, сферу социального обеспечения и другие региональные службы.

При значениях показателя менее 1 процесс распространения заболевания можно считать управляемым, и даже высокие значения интенсивности заражения при этом компенсируются повышенной скоростью выздоровления. К таким регионам относятся Республика Тыва, Республика Саха (Якутия), Республика Хакасия, Астраханская область.

Распространение коронавирусной инфекции в условиях мегаполисов, предельных в настоящем исследовании городами федерального значения (Москва, Санкт-Петербург, Севастополь), характеризуется средними темпами приростов основных показателей — инфицированных и выздоровевших. При высоких абсолютных значениях, обусловленных высокой численностью проживающего населения, относительные скорости нарастания эпидемического процесса не принимают приоритетных значений, что может свидетельствовать о хорошей управляемости и достаточном ресурсном обеспечении.

Вместе с тем следует отметить, что эпидситуация в Санкт-Петербурге и Севастополе более проблемная, чем в Москве. Принимая во внимание, что указанные регионы находятся в различных климатических зонах и на различных широтах, можно объяснить этот факт наличием мор-

ского побережья, обуславливающего повышенные значения влажности и ветровую нагрузку, особенно в условиях зимнего сезона.

Тяготение проблемных регионов с точки зрения развития эпидемии к прибрежным зонам отчётливо прослеживается на картах-схемах (см. рис. 4), где наблюдаются максимумы при приближении к морским акваториям Чёрного, Каспийского, Балтийского морей и Тихоокеанского побережья.

Следует отметить, что полученные в ходе исследования результаты носят характер среднерегionalных оценок, требующих более глубокого анализа как с точки зрения географии, так и использования более сложных моделей, описывающих эпидемический процесс. Кроме того, в рамках развития исследования особый интерес представляет анализ закономерностей и особенностей распространения SARS-COV-2 в условиях комплекса модифицирующих факторов среды обитания и образа жизни населения. Указанные обстоятельства являются ограничениями при переносе результатов исследования на другие пространственно-временные масштабы рассмотрения проблемы распространения инфекции на территории России и одновременно перспективным направлением продолжения исследования.

## Заключение

Проведённое исследование, базирующееся на параметризации эпидемических процессов, протекающих в отдельных регионах Российской Федерации, позволило проследить основные особенности и закономерности распространения заболевания, интенсивности выздоровления и летальности. По результатам выполненных исследований можно сделать вывод, что относительная интенсивность процесса инфицирования населения региона имеет выраженную тенденцию к росту на периферии Российской Федерации (Сахалинская и Тамбовская области, Республика Дагестан, Ненецкий автономный округ), где процесс инфицирования протекает максимально быстро, захватывая значительную долю населения.

Анализ индекса репродукции вируса позволил определить регионы, в которых эпидемические процессы протекают наиболее остро и сопровождаются пиковыми нагрузками на систему здравоохранения, сферу социального обеспечения и другие региональные службы (Новосибирская область, Республика Коми, Тюменская область, Республика Адыгея, Самарская, Курская, Иркутская, Владимирская области).

Выявленные тенденции и закономерности свидетельствуют о том, что наблюдаемая региональная дифференциация в развитии отдельных стадий эпидемического процесса распространения новой коронавирусной инфекции (COVID-19) на примере дельта-штамма обусловлена сложным взаимодействием и влиянием модифицирующих факторов, формирующих определённую многоуровневую и многокомпонентную систему (совокупность условий), обладающую свойствами трансформировать течение эпидемического процесса, потенцируя или замедляя его. Анализ влияния модифицирующих факторов неинфекционной природы на ход эпидемического процесса и оценка его управляемости являются основными направлениями дальнейших исследований. Решение задач такого уровня относится к категории сложных, требующих применения системного подхода, который позволит обосновывать адекватность и направленность управленческих мер.

При реализации системного подхода, ориентированного на принципы множественности и нелинейности причинно-следственных связей между всей совокупностью показателей эпидемического процесса и модифицирующими факторами неинфекционной природы, можно получить поддающиеся интерпретации оценки степени управления за счёт тех или иных мер воздействия на эпидемический процесс, разрабатывать системные стратегические решения по сохранению здоровья населения, уровня его безопасности в масштабе регионов и страны в целом.

## Литература

1. Криворотко О.И., Кабанихин С.И. Математические модели распространения COVID-19. *arXiv*. Препринт. 2021; arXiv:2112.05315. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.05315>
2. Ефимова Т.А., Тимошенко И.А., Абрашина-Жадаева Н.Г. Дробно-дифференциальная модель распространения COVID-19. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2021; 3: 40–8.
3. Тарутин А. Моделирование вирусных эпидемий. *Инновации. Наука. Образование*. 2021; (27): 930–8.
4. Янчевская Е.Ю., Меснянкина О.А. Математическое моделирование и прогнозирование в эпидемиологии инфекционных заболеваний. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина*. 2019; 23(3): 328–34. <https://doi.org/10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334>
5. Акимов В.А., Диденко С.Л., Олтян И.Ю. Моделирование биологически-социальных чрезвычайных ситуаций с использованием эпидемиологической модели SIR. *Технологии гражданской безопасности*. 2020; (4): 4–8.
6. Контаров Н.А., Архарова Г.В., Гришунина Ю.Б., Гришунина С.А., Юминова Н.В. Оценка и прогноз заболеваемости ОРВИ-гриппом с помощью математической модели SIR+а на территории Москвы в 2016 году. *Инфекция и иммунитет*. 2019; 9(3–4): 583–8. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-2019-3-4-583-588>
7. Разумов Т.Е. Модель эпидемии SIR с учетом пространственной неоднородности расположения индивидов. *Политехнический молодежный журнал*. 2019; (6): 5. <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-6-490>
8. 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>
9. Dos Santos I.F.F., Almeida G.M.A., De Moura F.A.B.F. Adaptive SIR model for propagation of SARS-CoV-2 in Brazil. *Physica A*. 2021; 569: 125773. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125773>
10. McKendrick A.G. Applications of mathematics to medical problems. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*. 1925; 44: 98–130. <https://doi.org/10.1017/S0013091500034428>
11. Kermack W.O., McKendrick A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc. R. Soc. Lond.* 1927; 115(772): 700–21. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>

## References

1. Krivorotko O.I., Kabanikhin S.I. Mathematical models of the COVID-19 spread. *arXiv*. Preprint. 2021; arXiv:2112.05315. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.05315>
2. Efimova T.A., Timoshchenko I.A., Abrashina-Zhadaeva N.G. Fractional differential model of the spread of COVID-19. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2021; 3: 40–8.
3. Tarutin A. Modeling of virus epidemics. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2021; (27): 930–8. (in Russian)
4. Yanchevskaya E.Yu., Mesnyankina O.A. Mathematical modelling and prediction in infectious disease epidemiology. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Meditsina*. 2019; 23(3): 328–34. <https://doi.org/10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334> (in Russian)
5. Akimov V.A., Didenko S.L., Oltyan I.Yu. Biological and social emergencies modeling using the SIR epidemiological model. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2020; (4): 4–8. (in Russian)
6. Kontarov N.A., Arkharova G.V., Grishunina Yu.B., Grishunina S.A., Yuminova N.V. SIR+а mathematical model for evaluating and predicting 2016–2017 ARVI-influenza incidence by using on the Moscow territory. *Infektsiya i immunitet*. 2019; 9(3–4): 583–8. <https://doi.org/10.15789/2220-7619-2019-3-4-583-588> (in Russian)
7. Razumov T.E. SIR epidemic model taking into account the spatial heterogeneity of the location of individuals. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*. 2019; (6): 5. <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-6-490> (in Russian)
8. Sokolovskiy V.L., Furman G.B., Polyanskaya D.A., Furman E.G. Spatio-temporal modeling of Covid-19 epidemic. *Analiz riska zdorov'yu*. 2021; (1): 23–37. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.1.03> (in Russian)
9. Dos Santos I.F.F., Almeida G.M.A., de Moura F.A.B.F. Adaptive SIR model for propagation of SARS-CoV-2 in Brazil. *Physica A*. 2021; 569: 125773. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125773>
10. McKendrick A.G. Applications of mathematics to medical problems. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*. 1925; 44: 98–130. <https://doi.org/10.1017/S0013091500034428>
11. Kermack W.O., McKendrick A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc. R. Soc. Lond.* 1927; 115(772): 700–21. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>