

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2022

Читать
онлайн
Read
onlineЗайцева Н.В.¹, Попова А.Ю.², Клейн С.В.¹, Летюшев А.Н.², Кирьянов Д.А.¹,
Чигвинцев В.М.¹, Глухих М.В.¹

Модифицирующее влияние факторов среды обитания на течение эпидемического процесса COVID-19

¹ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 614045, Пермь, Россия;²ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, 125993, Москва, Россия

Введение. Необходимость установления особенностей и закономерностей распространения заболеваемости COVID-19 требует продолжения исследований по формализации и пространственно-временному моделированию распространения инфекционного процесса. В статье рассматриваются вопросы определения факторов неинфекционной природы, модифицирующих течение эпидемического процесса, вызванного коронавирусом COVID-19, для обоснования системных решений в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения регионов Российской Федерации.

Материалы и методы. Исследование строилось на основе анализа закономерностей региональной дифференциации параметров математических моделей, отражающих ход эпидемического процесса в регионах Российской Федерации, в зависимости от модифицирующих факторов неинфекционной природы, полученных в результате моделирования динамики на примере распространения дельта-штамма вируса SARS-CoV-2. В качестве модифицирующих факторов выступали противоэпидемические мероприятия, санитарно-эпидемиологические, социально-демографические, экономические, погодные-климатические условия, показатели системы здравоохранения и образа жизни населения всех регионов Российской Федерации за 2020–2021 гг. Моделирование динамики эпидемического процесса выполняли с применением классической SIR-модели. Исследование зависимостей между параметрами модели эпидемического процесса с модифицирующими его региональными условиями проводили методами корреляционно-регрессионного анализа.

Результаты. По результатам моделирования определены приоритетные факторы риска, достоверно ($p < 0,05$) модифицирующие процессы распространения COVID-19 и объясняющие региональные различия в показателях интенсивности инфицирования, выздоровления и летальности. Установлено, что среди противоэпидемических мероприятий наибольшее достоверное положительное влияние на снижение индекса репродукции вируса (R_0) оказывает охват вакцинацией населения, особенно в возрастной группе 31–40 лет ($r = -0,37$). Повышение среднемесячных дневных температур в осенне-зимний период и в целом за год способствует увеличению скорости перехода восприимчивых лиц в категорию инфицированных ($r = 0,21-0,22$). Увеличение уровня солнечной инсоляции в течение года и особенно в летние месяцы обуславливает снижение скорости перехода восприимчивых лиц в категорию инфицированных: от $r = -0,02$ до $r = -0,23$. Из группы санитарно-эпидемиологических показателей достоверно усиливают скорость инфицирования ненормативные условия труда (физические факторы), качество атмосферного воздуха населённых мест по химическому и шумовому факторам ($r = 0,29-0,24$). На территориях со сравнительно более высоким потреблением алкогольной продукции удлинняется время выздоровления заболевших ($r = -0,32$).

Ограничения исследования. К ограничениям исследования относятся: моделирование эпидемического процесса с использованием стандартной SIR-модели; ограниченный набор показателей и период анализа.

Заключение. Наблюдаемая региональная дифференциация в развитии отдельных стадий эпидемического процесса распространения дельта-штамма COVID-19 обусловлена сложным взаимодействием и влиянием модифицирующих факторов, формирующих определённую многоуровневую и многокомпонентную систему, обладающую свойствами трансформировать течение эпидемического процесса, потенцируя или замедляя его.

Ключевые слова: эпидемический процесс; COVID-19; дельта-штамм, факторы среды обитания; факторы образа жизни; SIR-модель; скорость заражения; скорость выздоровления; летальность; вакцинация

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

Для цитирования: Зайцева Н.В., Попова А.Ю., Клейн С.В., Летюшев А.Н., Кирьянов Д.А., Чигвинцев В.М., Глухих М.В. Модифицирующее влияние факторов среды обитания на течение эпидемического процесса COVID-19. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(11): 1274–1282. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1274-1282> <https://elibrary.ru/zcwfvh>

Для корреспонденции: Клейн Светлана Владиславовна, доктор мед. наук, зав. отд. системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 614045, Пермь. E-mail: kleyn@fcrisk.ru

Участие авторов: Зайцева Н.В., Попова А.Ю. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Клейн С.В. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста, редактирование; Летюшев А.Н., Кирьянов Д.А. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста; Чигвинцев В.М., Глухих М.В. – сбор и обработка материала, написание 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: 06.09.2022 / Принята к печати: 03.10.2022 / Опубликована: 30.11.2022

Nina V. Zaitseva¹, Anna Yu. Popova², Svetlana V. Kleyn¹, Aleksandr N. Letyushev²,
Dmitry A. Kiryanov¹, Vladimir M. Chigvintsev¹, Maxim V. Glukhikh¹

Modifying impact of environmental factors on the course of an epidemic process

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

²The Russian Medical Academy for Continuous Occupational Learning of the RF Public Healthcare Ministry, Moscow, 125993, Russian Federation

Introduction. It is necessary to establish peculiarities and regularities of COVID-19 infection; this task requires further research on how to formalize and build spatial-temporal models of the infection spread. This article focuses on determining non-infectious factors that can modify the epidemic process caused by the COVID-19 coronavirus for further substantiation of integrated solutions that are necessary to ensure sanitary-epidemiological welfare of the RF population.

Materials and methods. Our study involved analyzing regularities of regional differentiation in parameters introduced into mathematical models. These models described how the epidemic process developed in RF regions depending on modifying non-infectious factors identified by modelling the dynamics of spread of SARS-CoV-2 delta strain. These modifying factors included anti-epidemic activities; sanitary-epidemiological, sociodemographic, and economic conditions in a region; weather and climate; public healthcare systems and people's lifestyles in RF regions over 2020–2021. The dynamics of the epidemic process was modelled by using the conventional SIR-model. Relationships between parameters introduced into the model of the epidemic process and modifying regional conditions were examined by using correlation-regression analysis.

Results. The modelling made it possible to identify priority risk factors that modified COVID-19 spread authentically ($p < 0.05$) and explained regional differences in intensity of contagion, recovery and lethality. We established that population coverage with vaccination, especially among people aged 31–40 years, had the greatest authentic positive influence on the decline of reproduction index (R_0) of the virus ($r = -0.37$). An increase in monthly average temperatures in autumn and winter as well as over a year made for people moving faster from the susceptible to infected category ($r = 0.21-0.22$). Growing sun insolation over a year, especially in summer, resulted in slower movement of susceptible people into the infected category ($r = -0.02-(-0.23)$). Next, several sanitary-epidemiological indicators authentically made the infection spread faster; they were improper working conditions (not conforming to the safety standards as per physical indicators) and ambient air quality in settlement not corresponding to the hygienic standards as per chemical indicators and noise ($r = 0.29-0.24$). Recovery took longer in regions where alcohol consumption was comparatively higher ($r = -0.32$).

Limitations. The limitations of the study include modelling the epidemic process using the standard SIR model; limited set of indicators and period of analysis.

Conclusions. The existing regional differentiation in development of specific stages in the epidemic process related to the COVID-19 delta strain occurs due to complex interactions and influence exerted by modifying factors that create a certain multi-level and multi-component system. This system is able to transform the epidemic process either potentiating it or slowing it down.

Keywords: epidemic process; COVID-19; Delta strain; environmental factors; SIR-model; speed of contagion; speed of recovery

Compliance with ethical standards. No approval by the committee on biomedical ethics was required to accomplish this study (it was based on free available data taken from the official statistical reports).

For citation: Zaitseva N.V., Popova A.Yu., Kleyn S.V., Letyushev A.N., Kiryanov D.A., Chigvintsev V.M., Glukhikh M.V. Modifying impact of environmental factors on the course of an epidemic process. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(11): 1274–1282. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1274-1282> <https://elibrary.ru/zcwfvh> (In Russian)

For correspondence: Svetlana V. Kleyn, MD, PhD, DSci., Head of the department of sanitary and hygienic analysis and monitoring of systemic methods Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation. E-mail: kleyn@fcrisk.ru

Information about authors:

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

Popova A.Yu., <https://orcid.org/0000-0003-2567-9032>

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

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

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

Chigvintsev V.M., <https://orcid.org/0000-0002-0345-3895>

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

Contribution: Zaitseva N.V., Popova A.Yu. – concept and design of the study, writing text, editing; Kleyn S.V. – concept and design of the study, collection and processing of the material, writing text, editing; Letyushev A.N., Kiryanov D.A. – concept and design of the study, collection and processing of the material, writing text; Chigvintsev V.M., Glukhikh M.V. – collection and processing of the material, writing 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: October 20, 2022 / Accepted: October 3, 2022 / Published: November 30, 2022

Введение

Согласно оперативным данным о распространении коронавирусной инфекции (далее COVID-19)¹, на территории Российской Федерации в марте – июне 2022 г. наблюдалось устойчивое снижение количества заболевших. Несмотря на текущую локальную во времени позитивную динамику изменения эпидемического процесса, в общемировом масштабе и на национальных уровнях COVID-19 уже нанес значительный ущерб во многих сферах жизнедеятельности людей [1, 2] и на данный момент квалифицируется² как заблуждение, представляющее опасность для окружающих и требующее³ проведения мероприятий по санитарной охране территории Российской Федерации. Так, по недавним оценкам избыточной смертности, реальное количество умерших от данной инфекции во всём мире за период с 01.01.2020 по 31.12.2021 г. может достигать 18,4 млн человек вместо официально зарегистрированных 5,94 млн [3–5]. С целью снижения имеющихся рисков, связанных с COVID-19, и повышения устойчивости к будущим угрозам Международный научный совет (ISC) при поддержке Управления ООН по снижению риска бедствий (UNDRR) и ВОЗ подготовили доклад с рассмотрением трёх возможных сценариев развития текущей пандемии на пятилетний прогноз [6]. По мнению экспертов, наиболее вероятный сценарий развития эпидемического процесса (Continuity scenario) включает в себя сохранение неравенства в доступности вакцинных препаратов, эволюцию SARS-CoV-2 с вероятным появлением более контагиозных штаммов с меньшей вирулентностью, умеренную нагрузку на системы здравоохранения и социального обеспечения [6]. Два других сценария являются проекцией ожиданий исхода развития эпидемического процесса: более оптимистичного (Collaboration Plus scenario) и более пессимистичного (Missed Recovery scenario) [6]. Национальные и межстрановые исследования, направленные на изучение бремени болезни COVID-19 на общественное здоровье путём оценки избыточной смертности и декомпозиционного анализа смертности населения, в большинстве своём показали повсеместное снижение ожидаемой продолжительности жизни при рождении, в ряде случаев существенное и беспрецедентное, при этом основную группу риска составляют мужчины старшего возраста с хроническими заболеваниями [1, 7–9]. В исследовании [10] показано, что COVID-19, являясь независимой причиной смерти, тем не менее требует при оценке медико-демографической ситуации учёта множественности взаимосвязей с другими причинами смерти и их факторами риска и так называемого эффекта «сбора урожая» (отсроченной смертности) [11]. В противном случае возможны недооценка или переоценка истинного влияния данного заболевания. По данным ряда исследований [3, 12] получены оценки достоверных региональных (внутри страны) различий в смертности по причине COVID-19 и причинам, косвенно с ним связанным, что может указывать на неравномерность воздействия факторов эпидемического процесса на ход его развития ввиду территориальной гетерогенности. В исследовании [13] авторами подчёркивается, что понимание детерминант вариации в коэффициентах инфицирования и летальности (Infection-Fatality ratio – IFR) имеет непосредственное значение для усилий, предпринимаемых в отношении клинической практики, немедикаментозных вмешательств (например,

физическое дистанцирование) и определения групп риска, нуждающихся в первоочередном доступе к вакцинации. В своей монографии [14] Б.Л. Черкасский задолго до развития пандемии COVID-19 настаивал на необходимости введения такого понятия, как глобальный эпидемический процесс, отвечающий пяти социально-экологическим законам эпидемиологии [15], при этом движущими силами эволюции эпидемического процесса являются изменения социальных условий жизни человеческого общества. В монографии подчёркивается, что для успешной реализации профилактических мероприятий требуется «комплексное изучение многообразия экологических и социально-экологических систем, изменяющихся под влиянием деятельности человека, с обязательным выявлением наиболее значимых детерминант их развития» [14].

Таким образом, исследования в области изучения закономерностей развития эпидемического процесса должны базироваться на системном подходе с выявлением многообразия типов связей факторов и параметров различного происхождения, с взаимно гармонизированными теоретическими и методологическими принципами. Последнее требует построения обобщённой системной модели, соответствующей теоретической гипотезе о влиянии факторов на эпидемический процесс и позволяющей адекватно рассчитывать взаимосвязи множества переменных для оценки реальной ситуации. В связи с этим изучение особенностей и закономерностей распространения заболевания COVID-19 актуально и требует продолжения исследований по формализации причинно-следственных связей между факторами и проявлениями эпидемического процесса на основе пространственно-временного моделирования его развития.

В предыдущей работе [16], посвящённой моделированию развития эпидемического процесса, вызванного вирусом SARS-CoV-2, на уровне регионов Российской Федерации, авторами показано, что динамика распространения COVID-19 среди населения нашей страны характеризуется наличием региональной дифференциации по показателю интенсивности инфицирования, выздоровления, летальности и другим характеристикам эпидемического процесса. На основе полученного результата можно выдвинуть гипотезу о существовании вариативности силы влияния факторов, участвующих в реализации эпидемического процесса.

Развитие пандемии COVID-19 ставит ряд аналитических задач, направленных как на изучение самого процесса распространения заболевания, так и на исследование причин и закономерностей дифференциации развития эпидемического процесса на уровне субъектов Российской Федерации с их индивидуальными особенностями. Решение задач такого уровня относится к категории сложных, требующих применения системного подхода, который позволит обосновывать адекватность и направленность управленческих мер.

Цель исследования – определение факторов неинфекционной природы, модифицирующих течение эпидемического процесса, вызванного коронавирусом COVID-19, для обоснования системных решений в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения регионов Российской Федерации.

Цель исследования достигалась за счёт решения следующих задач:

- 1) сбора данных по показателям, характеризующим факторы региональных условий инфекционной и неинфекционной природы;
- 2) параметризации эпидемических моделей распространения коронавирусной инфекции в регионах Российской Федерации;
- 3) построения и анализа системы причинно-следственных связей между параметрами эпидемического процесса и модифицирующими факторами неинфекционной природы;
- 4) разработки и апробации методических подходов к оценке управляемости распространения коронавирусной инфекции в регионах Российской Федерации.

¹ Оперативные данные портала «Стопкоронавирус.рф» Доступно: <https://стопкоронавирус.рф/>

² Постановление Правительства Российской Федерации от 01.12.2004 г. № 715 (ред. от 31.01.2020 г.) «Об утверждении перечня социально значимых заболеваний, представляющих опасность для окружающих».

³ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 г. № 4 (ред. 25.05.2022 г.) «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 3.3686–21 «Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных заболеваний».

Материалы и методы

Формирование перечня показателей проводили на основе результатов релевантных научных исследований о причинно-следственных связях между факторами среды обитания и общественным здоровьем. В качестве модифицирующих факторов выступали показатели, характеризующие противоэпидемические мероприятия (24 ед.), санитарно-эпидемиологические (83 ед.), социально-демографические (67 ед.), экономические (22 ед.), погоднo-климатические (137 ед.) условия, показатели системы здравоохранения (17 ед.) и образа жизни населения (45 ед.) регионов Российской Федерации. Источниками данных по всем 85 субъектам за 2020–2021 гг. являлись статистические формы и информационные материалы Роспотребнадзора, Минздрава России, Росстата. В результате решения задачи сформирована матрица, содержащая 395 показателей, всего подлежало обработке более 1,5 млн единиц информации.

Исследование строили на основе анализа закономерностей региональной дифференциации параметров математических моделей, отражающих ход эпидемического процесса в регионах Российской Федерации (α – коэффициент, характеризующий относительную скорость инфицирования населения; β – коэффициент, характеризующий скорость выздоровления; γ – коэффициент, характеризующий тяжесть течения заболевания; R_0 – индекс репродукции вируса) в зависимости от модифицирующих факторов неинфекционной природы, полученных в результате исследования по моделированию динамики распространения дельта-штамма вируса. Моделирование динамики эпидемического процесса выполняли с применением классической SIR-модели, предложенной У.О. Кермаком и А.Г. Маккендриком [17, 18], отражающей динамику последовательных переходов групп населения: восприимчивой к действию вируса группы (S – susceptible) в группу инфицированных (I – infected) с последующей бифуркацией на выздоровевших (R – recovered) или умерших (L – lethal).

Исследование зависимостей между параметрами модели эпидемического процесса с модифицирующими его региональными условиями проводили методами корреляционно-регрессионного анализа. На первом шаге исследования проводили расчёт коэффициентов корреляции по Пирсону, выступающих в качестве меры линейной связи между зависимыми и независимыми показателями. В качестве зависимых показателей выступали параметры модели эпидемического процесса (α , β , γ , R_0), в качестве независимых – параметры, входящие в комплекс факторов различной природы, характеризующих региональные условия и особенности проживания населения. Полученные коэффициенты корреляции проверялись на достоверность с использованием t -критерия Стьюдента.

В рамках проведения системного анализа при исследовании зависимостей и для углублённой интерпретации результатов моделирования учитывались взаимные влияния модифицирующих факторов. Для анализа внутрисистемных связей выполнен факторный анализ с применением метода главных компонент, который позволил разделить исследуемые 395 показателей на 10 групп (главных компонент), отличающихся повышенной теснотой корреляционных связей.

При оценке управляемости эпидемического процесса использовали полученные регрессионные зависимости между параметрами SIR-модели и модифицирующими факторами (1):

$$\alpha(x) = a_0 + a_1x, \beta(x) = b_0 + b_1x, \gamma(x) = c_0 + c_1x, R_0(x) = r_0 + r_1x, \quad (1)$$

где α , β , γ , R_0 – параметры SIR-модели, отражающие интенсивность эпидемического процесса; x – значение модифицирующего (управляющего) фактора; a_0 , a_1 , b_0 , b_1 , c_0 , c_1 , r_0 , r_1 – коэффициенты регрессионных моделей.

В рамках проведения анализа управляемости течения эпидемического процесса в качестве одного из приоритет-

ных факторов управления выбран показатель доли охвата вакцинацией взрослого населения.

При проведении регрессионного анализа выполняли процедуру проверки статистических гипотез относительно коэффициентов и оценку адекватности моделей фактическим данным, сопровождаемую расчётом коэффициента детерминации (R^2) и уровня значимости (p). В результате отбирали только те модели, которые соответствовали критериям значимости ($p < 0,05$) и отвечали требованиям биологического правдоподобия.

На основе полученных зависимостей проводили вычисления региональных поправок параметров SIR-модели как отношения наблюдаемого значения к его оценке по регрессионной модели (2):

$$k_k^\alpha = \frac{\alpha_k}{\alpha(x)}, \quad k_k^\beta = \frac{\beta_k}{\beta(x)}, \quad k_k^\gamma = \frac{\gamma_k}{\gamma(x)}, \quad k_k^R = \frac{R_{0k}}{R_0(x)}, \quad (2)$$

где k_k^α , k_k^β , k_k^γ , k_k^R – поправочные коэффициенты параметров SIR-модели для k -го региона.

Исходя из регрессионных зависимостей и поправочных коэффициентов проводили расчёт изменения параметров SIR-модели в результате управляющего воздействия, выраженного в виде изменения значения модифицирующего фактора x на величину Δx (3):

$$\tilde{\alpha}_k = (k_k^\alpha (a_0 + a_1(x_k + \Delta x_k))), \quad \tilde{\beta}_k = (k_k^\beta (b_0 + b_1(x_k + \Delta x_k))), \\ \tilde{\gamma}_k = (k_k^\gamma (c_0 + c_1(x_k + \Delta x_k))), \quad \tilde{R}_{0k} = (k_k^R (r_0 + r_1(x_k + \Delta x_k))), \quad (3)$$

где $\tilde{\alpha}_k$, $\tilde{\beta}_k$, $\tilde{\gamma}_k$, \tilde{R}_{0k} – модифицированные значения параметров SIR-модели для k -го региона при изменении значения управляющего фактора на величину Δx .

Расчёт коэффициента управляемости проводили путём сопоставления изменений оценок количества переболевших (R) в регионе согласно SIR-модели при идентифицированных и модифицированных параметрах (4):

$$u_k = \frac{R(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k) - R(\tilde{\alpha}_k, \tilde{\beta}_k, \tilde{\gamma}_k)}{R(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k)}, \quad (4)$$

где u_k – коэффициент управляемости для k -го региона; $R(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k)$ – расчётная накопленная заболеваемость, полученная на основе идентифицированных параметров SIR-модели; $R(\tilde{\alpha}_k, \tilde{\beta}_k, \tilde{\gamma}_k)$ – расчётная накопленная заболеваемость, полученная с использованием параметров, изменённых за счёт действия факторов управления.

Анализ региональной дифференциации по коэффициенту управляемости проводили при изменении управляющего фактора во всех регионах на одинаковую величину – 1%.

Обработку и анализ статистической информации осуществляли с применением стандартных пакетов программ (Statistica 10, Microsoft Excel 2010, RStudio).

Результаты

По результатам моделирования причинно-следственных связей между факторами среды обитания и параметрами эпидемического процесса определены приоритетные факторы риска, модифицирующие процессы распространения COVID-19 и объясняющие региональные различия в показателях интенсивности инфицирования, выздоровления и летальности.

Противоэпидемические мероприятия. Анализ этапа эпидемического процесса, связанного с интенсивностью инфицирования (показатель α), выявил, что на территориях с высокой долей инфицирования в медицинских организациях наблюдается и более высокая скорость распространения инфекции (α : $r = 0,30$; $p = 0,01$) и на этих же территориях наблюдается более высокая скорость выздоровления (β : $r = 0,27$; $p = 0,01$).

Среди всех реализуемых в период манифестации коронавирусной инфекции противоэпидемических мероприятий

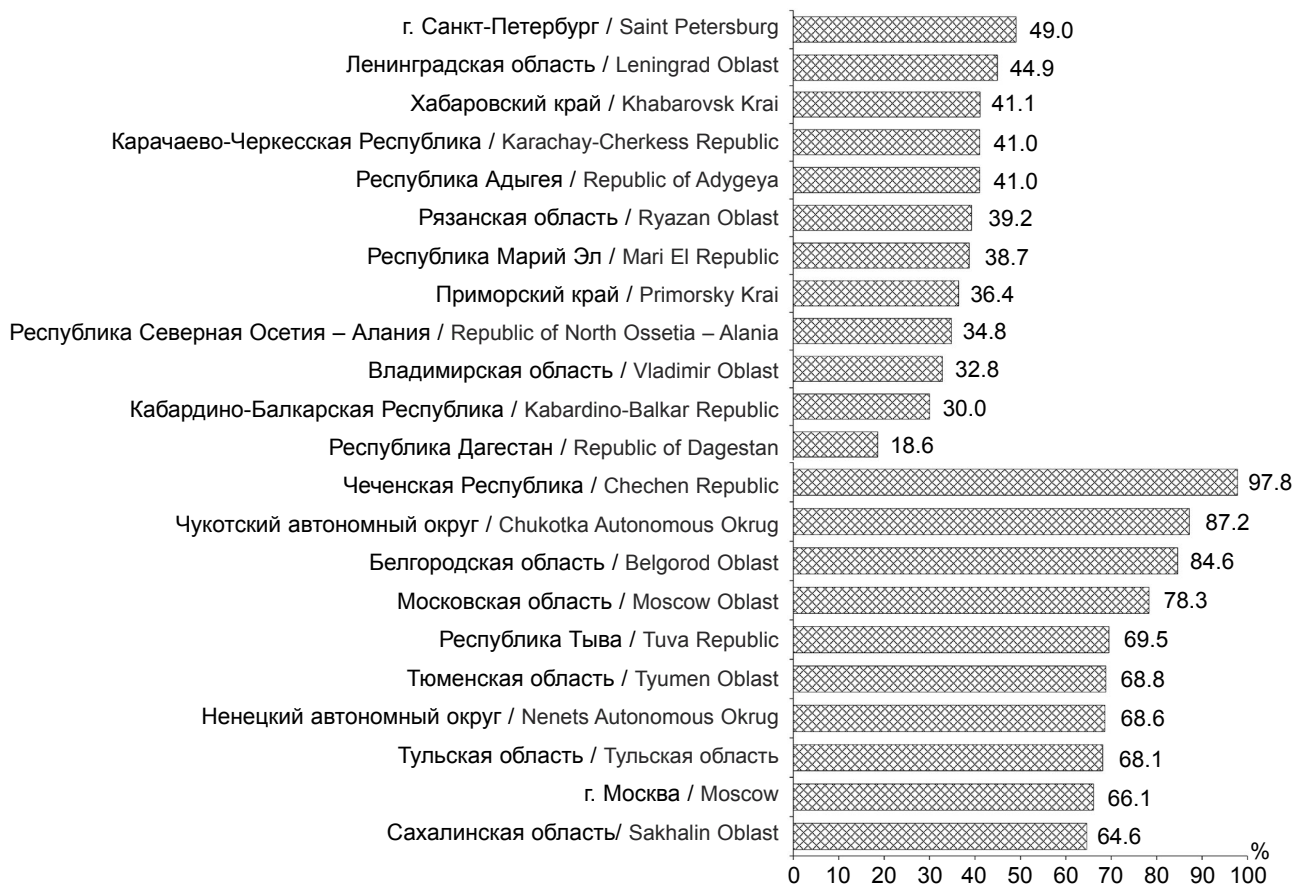


Рис. 1. Ранжированные значения показателя «Охват вакцинацией против COVID-19 подлежащих взрослых за 6 месяцев до начала распространения дельта-штамма» по субъектам Российской Федерации, %.

Fig. 1. Ranked values of the indicator "Coverage with vaccination against COVID-19 scheduled adults over 6 months before the delta strain spread" in RF subjects, %.

наибольшее достоверное положительное влияние на снижение индекса репродукции вируса (R_0) оказывает охват вакцинацией населения во всех возрастных группах (R_0): от $r = -0,30$ до $r = -0,37$; $p = 0,00-0,05$. Наиболее сильная достоверная корреляция между охватом вакцинацией и индексом репродукции вируса (R_0 : $r = -0,37$; $p = 0,00$) выявлена в возрастной группе 31–40 лет. Ранжированное распределение отдельных субъектов Российской Федерации по показателю охвата вакцинацией до начала распространения дельта-штамма представлено на рис. 1.

Для периода манифестации дельта-штамма не установлено четкой взаимосвязи между охватом населения тестированием (на 100 тыс. населения) и темпами инфицирования (α : $r = -0,08$; $p = 0,46$), что может быть связано с достижением всеобщей доступности процедуры тестирования на коронавирусную инфекцию COVID-19 во всех регионах страны. Также не установлено четкой зависимости между возвышенными случаями заболевания коронавирусной инфекцией, скоростью инфицирования и индексом репликации вируса (α : $r = 0,12$; $p = 0,29$; R_0 : $r = -0,03$; $p = 0,76$).

Погодно-климатические факторы. Анализ закономерностей региональной дифференциации параметров математической модели, отражающей ход эпидемического процесса в регионах Российской Федерации и динамику переходов группы населения, восприимчивой к действию вируса (S – susceptible), в группу инфицированных (I – infected), выраженную коэффициентом α , показал, что из 137 анализируемых погодно-климатических показателей выраженное достоверное влияние оказали 32 показателя. Так, потепление в виде повышения среднемесячных дневных температур в осенне-зимний период (с сентября по февраль) и в целом

за год способствует увеличению скорости перехода восприимчивых лиц в категорию инфицированных в декабре – январе (α : $r = 0,21-0,22$; $p = 0,05$), связи с другими месяцами недостоверны ($p = 0,13-0,52$), диапазон коэффициента корреляции $r = 0,19-0,21$.

Повышение уровня инсоляции (по показателю среднемесячной горизонтальной солнечной радиации при любых условиях неба) в течение года и особенно в летние месяцы обуславливает снижение скорости перехода восприимчивых лиц в категорию инфицированных. В июле α : $r = -0,23$; $p = 0,04$, в остальные месяцы тенденция сохраняется, но связь не показала приемлемого уровня достоверности (α : от $r = -0,02$ до $r = -0,2$; $p = 0,07-0,83$). При этом пространственное распределение данного показателя не имеет четкого градиента, так как зависит и от других метеорологических характеристик.

Санитарно-эпидемиологическое состояние территорий. Показателями, характеризующими санитарно-эпидемиологическое состояние территории и достоверно оказывающими неблагоприятное влияние и усиливающими скорость перехода группы населения, восприимчивой к действию вируса, в группу инфицированных, являются не соответствующие гигиеническим требованиям условия труда (по физическим факторам), качество атмосферного воздуха населенных мест по химическому и шумовому факторам (α : $r = 0,29-0,24$; $p = 0,01-0,03$). В отношении показателя «Доля рабочих мест, не соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям, на промышленных предприятиях (по электромагнитным полям (ЭМП)), %» отмечается благоприятная тенденция показателя β , характеризующего скорость выздоровления. При этом, согласно результатам

факторного анализа, позволяющего выявить скрытые переменные факторов, отвечающих за наличие статистических корреляций, наблюдается прямая зависимость между данным фактором и качеством среды на рабочих местах по таким факторам, как шум, микроклимат, химическое загрязнение воздуха рабочей зоны, вибрация, освещённость.

Обратная тенденция в отношении санитарно-эпидемиологических показателей наблюдается по показателю «Категория риска объекта (объекты чрезвычайно высокого риска), %». На территориях с более высокой долей объектов чрезвычайно высокого риска для здоровья отмечается снижение интенсивности процесса инфицирования (α : $r = -0,22$; $p = 0,04$), но при этом удлиняется процесс выздоровления заболевших (β : $r = -0,24$; $p = 0,03$) и отмечается благоприятная тенденция снижения скорости летальных исходов заболевших (γ : $r = -0,13$; $p = 0,22$). Данный показатель, характеризующий долю объектов чрезвычайно высокого риска для здоровья, по результатам факторного анализа имеет прямую корреляцию с количеством выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников и параметрами качества атмосферного воздуха территорий (концентрациями веществ).

Приоритетными факторами, оказывающими прямое достоверное влияние на индекс репродукции вируса (индекс заразности, R_0), являются не соответствующие гигиеническим требованиям показатели качества атмосферного воздуха как на территориях городских, так и сельских населённых пунктов (R_0 : $r = 0,23-0,26$; $p = 0,02-0,04$), что подтверждает гипотезу о влиянии загрязнения атмосферного воздуха на динамический показатель эпидемического процесса (R_0).

Система оказания медицинской помощи. По результатам математического моделирования установлено, что показатели, характеризующие уровень системы здравоохранения в регионах, не оказывают достоверно значимого влияния на скорость протекания процессов инфицирования. При этом отмечается обратная достоверная зависимость между количеством больничных организаций и показателем летальности заболевших (коэффициентом γ , характеризующим тяжесть течения заболевания по доле летальных исходов в единицу времени, $r = -0,23$; $p = 0,03$), а также количеством амбулаторно-поликлинических организаций и индексом репродукции вируса (R_0 : $r = -0,2$; $p = 0,06$). По результатам факторного анализа показатель «Число амбулаторно-поликлинических организаций на 100 000 населения» напрямую коррелирует с другими показателями здравоохранения, характеризующими доступность и уровень медицинской помощи (число больничных коек, мощность амбулаторно-поликлинических организаций, численность среднего медицинского персонала и численность врачей).

Социально-демографическая сфера. Показатели социально-демографической сферы косвенно отражают исходное «качество» самого населения, его демографическую структуру, а также социальную атмосферу на территории. Из всех показателей данной группы наиболее выраженное влияние на течение эпидемического процесса дельта-штамма оказывает показатель «Население моложе трудоспособного возраста, %». Более высокая доля населения моложе трудоспособного возраста на территориях обуславливает более низкий индекс репродукции вируса (R_0 : $r = -0,23$; $p = 0,03$), что можно объяснить особенностями самого дельта-штамма и низкой восприимчивостью детского и подросткового населения к заражению.

Показатели образа жизни. Анализ закономерностей региональной дифференциации параметров математической модели показал, что из всех анализируемых показателей образа жизни влияние на скорость инфицирования населения могут оказать показатели, относительно характеризующие частоту контакта людей. Так, на территориях с большим количеством спортивных объектов и сооружений наблюдается тенденция к росту скорости перехода восприимчивых лиц в категорию инфицированных, но связь не обладает приемлемым уровнем достоверности (α : $r = 0,12$; $p = 0,26$).

Кроме того, отмечается достоверная прямая зависимость между показателями потребления жиров животного происхождения, общей калорийности рациона от продуктов животного происхождения, потребления молока и молочных продуктов и индексом репродукции вируса (R_0 : $r = 0,23-0,25$; $p = 0,02-0,04$). Аналогичная зависимость установлена и с показателем потребления пива и пивных продуктов (R_0 : $r = 0,30$; $p = 0,01$). Факторный анализ подтверждает прямую корреляцию между показателем потребления пива и пивных напитков и показателями потребления другой алкогольной продукции (вино, коньяк, водка и пр.), а также потреблением хлеба и овощей.

Анализ модифицирующего влияния анализируемых показателей на длительность течения заболевания (коэффициент β) показал, что на территориях со сравнительно более высоким потреблением алкогольной продукции удлиняется время выздоровления заболевших, то есть достоверно уменьшается скорость перехода инфицированных и больных лиц в категорию выздоровевших (β : $r = -0,32$; $p = 0,00$).

Важно, что на территориях со сравнительно более высоким уровнем потребления овощей, бахчевых и картофеля достоверно регистрируется более высокий уровень летальности заболевших, характеризуемый коэффициентом γ (γ : $r = 0,22-0,31$; $p = 0,00-0,04$), при этом наблюдается обратная зависимость коэффициента γ от уровня потребления рыбы, яиц, мяса и мясных продуктов (γ : от $r = -0,05$ до $r = -0,20$; $p = 0,06-0,40$).

Экономические показатели. На территориях со сравнительно низким удельным весом населения, имеющего расходы на продукты питания свыше 50%, и более низкой долей расходов на покупку продуктов питания в потребительских расходах домашних хозяйств наблюдается достоверно более низкая скорость распространения инфекции (α : $r = 0,22-0,33$; $p = 0,00-0,04$), но при этом более длительный период выздоровления (β : $r = 0,26$; $p = 0,00-0,02$).

Индекс репродукции вируса также относительно более низок на территориях с высоким уровнем валового регионального продукта на душу населения, инвестиций в основной капитал на душу населения, среднедушевыми денежными доходами населения (R_0 : от $r = -0,07$ до $r = -0,10$); $p = 0,36-0,55$). При этом скорость репродукции вируса напрямую коррелирует с долей расходов населения на здравоохранение (R_0 : $r = 0,31$; $p = 0,00$).

Сравнительно более высокая скорость выздоровления отмечается на территориях с высокими показателями валового регионального продукта на душу населения (β : $r = 0,22$; $p = 0,04$). Аналогичная тенденция отмечается и в отношении других показателей, характеризующих экономическое благополучие территории, хотя по данным зависимостям не установлено приемлемых уровней достоверности: инвестиции в основной капитал (β : $r = 0,21$; $p = 0,05$), среднедушевые денежные доходы (β : $r = 0,14$; $p = 0,19$), потребительские расходы (β : $r = 0,10$; $p = 0,34$) и др. На территориях с более высокой долей потребительских расходов населения на здравоохранение (β : $r = -0,28$; $p = 0,01$) наблюдается более длительный процесс излечения заболевших. Сравнительно более низкая летальность регистрируется на экономически развитых территориях с более высокими показателями валового регионального продукта, инвестиций в основной капитал, среднедушевых денежных доходов и потребительских расходов (γ : от $r = -0,10$ до $r = -0,16$; $p = 0,14-0,37$). Факторный анализ подтвердил, что показатели, характеризующие уровень среднедушевых денежных доходов и потребительских расходов, имеют прямую (положительную) корреляцию с коэффициентом Джини и обратную корреляцию с коэффициентом демографической нагрузки. Кроме того, в регионах с благоприятной экономической обстановкой отмечается более высокая доля объектов чрезвычайно высокого риска для здоровья и больший объём выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Исследование корреляций между параметрами моделей и модифицирующими факторами даёт возможность судить о

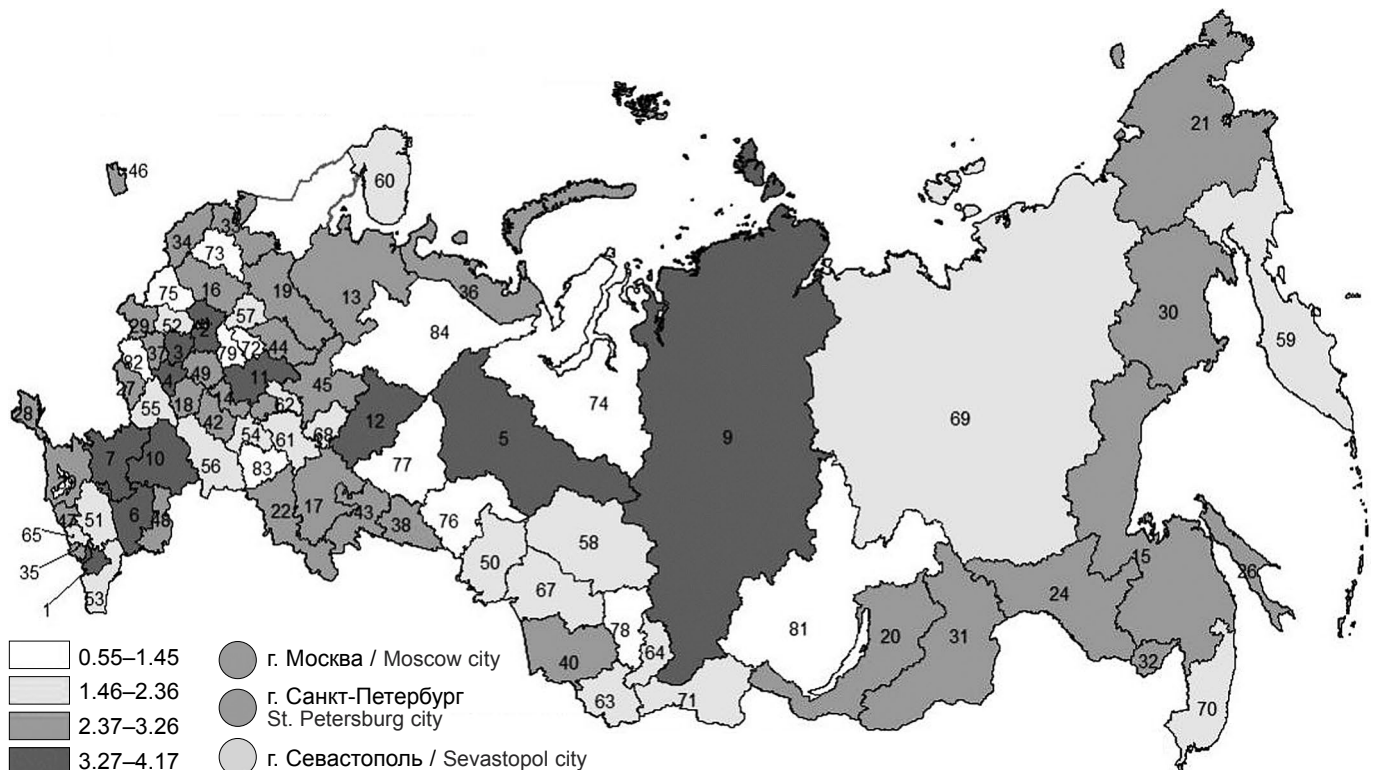


Рис. 2. Карта-схема региональной дифференциации субъектов Российской Федерации, ранжированных по доле (проценту) сокращения общего количества инфицированных (взрослых) за счёт увеличения на 1% охвата взрослого населения прививками.

Fig. 2. The base map of the regional differentiation of RF subjects ranked by per a share (per cent) of the reduction in the total number of infected (adults) due to a 1% increment in coverage of adult population with vaccination.

причинах региональной дифференциации распространения инфекции на территории Российской Федерации и оценивать управляемость эпидемического процесса. Методами корреляционно-регрессионного анализа установлена связь и формализована модель зависимости между индексом репродуктивности вируса (R_0), параметром, характеризующим заразность инфекционного заболевания COVID-19, и уровнем вакцинации взрослого населения: $y = -0,0065x + 1,6255$ ($r = -0,34$; $p < 0,05$), позволяющая выполнить оценку управления интенсивностью распространения коронавирусной инфекции за счёт вакцинопрофилактики.

На рис. 2 приведена карта-схема региональной дифференциации субъектов Российской Федерации по доле (проценту) сокращения общего количества инфицированных (взрослых) за счёт увеличения на 1% охвата взрослого населения прививками против COVID-19.

Наиболее светлым цветом на карте обозначены регионы (13 субъектов) с низким уровнем управляемости, для которых резервы снижения уровня инфицирования населения за счёт мер вакцинопрофилактики практически исчерпаны: сокращение общего количества инфицированных составило до 1,45%. К таким регионам относятся Владимирская, Иркутская, Кемеровская, Курская, Самарская, Смоленская, Тюменская области, Республика Адыгея, Республика Коми и др. Указанные регионы характеризуются высоким уровнем вакцинации населения, приближающимся к 100%.

Распространение коронавирусной инфекции в большинстве центральных областей Российской Федерации имеет пониженный уровень управляемости, при этом в ряде отдалённых регионов возможности управления за счёт вакцинации остаются.

Ряд регионов (на карте обозначены более тёмными цветами) обладает значительными резервами управления эпидемической ситуацией за счёт активизации прививочной

кампании. Наибольшие резервы управления наблюдаются в наиболее отдалённых субъектах Российской Федерации, расположенных на Дальнем Востоке, Северном Кавказе, Алтае и в Прибайкалье, а также на северо-западе страны (2,37–4,17%). Наиболее управляемой ситуацией можно считать в Чеченской Республике (сокращение общего количества инфицированных на 4,17%).

Обсуждение

Исследование комплекса разнородных факторов среды обитания показало, что развитие эпидемического процесса на примере дельта-штамма COVID-19 во многом зависит от влияния множества независимых факторов, и при негативных тенденциях их изменения на отдельных территориях Российской Федерации может привести к ухудшению состояния здоровья населения, активизации репликации вируса и более длительному течению заболевания.

Комплексное, нелинейное влияние факторов среды обитания на развитие эпидемического процесса с пространственной неоднородностью подтверждается в работе W. Li и соавт. [19], в которой показано, что городская экономика, социальная и жилищная среда взаимодействуют с пространственной неоднородностью COVID-19 и обладают большой объяснительной силой, особенно в многомерном неравенстве. При этом взаимодействие факторов применительно к инфицированию человека в основном проявляет нелинейный эффект усиления, то есть совместное влияние двух и более факторов сильнее по сравнению с суммой их прямых влияний.

Данные, полученные S.A. Meo с соавт. [20], свидетельствуют, что погодноклиматические факторы ассоциированы со смертностью по причине COVID-19, в частности увеличение температуры воздуха связано с ростом числа смертей от COVID-19 ($r = 0,062$; $p = 0,013$). Вероятно, смяг-

чение погодных-климатических условий может способствовать изменению поведенческих характеристик населения в сторону увеличения социальных контактов между группами восприимчивых и инфицированных людей, облегчая механизм передачи возбудителя инфекции и его репликации. Кроме того, гипотетически повышение уровня инсоляции может влиять на механизм передачи возбудителя инфекции в части действия бактерицидного спектра ультрафиолетового излучения, приводящего к снижению уровня выживаемости вируса в объектах внешней среды, а также способствовать повышению общей неспецифической резистентности организма. Обнаружено, что на территориях со сравнительно низким уровнем инсоляции, более низкими значениями температуры воздуха отмечается тенденция к большему количеству потребления алкогольной продукции и выявляются высокие значения индекса репродукции вируса R_0 . Это подтверждается результатами исследования влияния погодных-климатических факторов на течение эпидемического процесса в других работах [21, 22].

Полученные в исследовании зависимости и обнаруженные тенденции свидетельствуют, что доступность амбулаторно-поликлинической и стационарной помощи снижает активность популяционного процесса репродукции вируса и уровень летальности заболевших людей.

Значимое влияние на течение эпидемического процесса COVID-19 оказывают и показатели образа жизни, что подтверждается результатами многочисленных релевантных исследований в данной области. Сбалансированное потребление продуктов питания может обеспечивать доступ к рациональному набору питательных веществ, макро- и микронутриентов для поддержания приемлемого уровня здоровья. В то же время чрезмерное потребление пищевых продуктов и их дисбаланс могут приводить на индивидуальном уровне к хроническим сердечно-сосудистым, эндокринным и другим заболеваниям, удлиняющим сроки выздоровления или приводящим к летальным исходам, а на популяционном уровне вызывать увеличение заболеваемости, смертности, снижение ожидаемой продолжительности жизни. Занятия физической культурой и спортом (при явном оздоровляющем эффекте) часто сопряжены с тесным социальным взаимодействием, способствующим передаче возбудителя инфекции восприимчивым лицам [23].

Комплексная оценка влияния экономических факторов на все этапы течения эпидемического процесса новой коронавирусной инфекции (COVID-19), вызываемой дельта-штаммом, показала, что в целом экономическое благополучие на территориях формирует благоприятные тенденции в развитии эпидемического процесса, напрямую или опосредованно сдерживая активность процесса инфицирования населения, ускоряя процессы выздоровления и снижая долю летальных исходов среди заболевших [24].

На большинстве территорий Российской Федерации резервы управления только за счёт интенсификации мер вакцинопрофилактики имеют определённые ограничения, при этом на первый план должны выходить меры управления в области социально-экономического развития и санитарно-эпидемиологического благополучия [24–26] с сохранением мероприятий государственного контроля за

эпидемиологической ситуацией, которые зарекомендовали себя как эффективное средство по сдерживанию распространения COVID-19 [27].

Реализация системного подхода в анализе множественности причинно-следственных связей между всей совокупностью показателей эпидемического процесса и модифицирующими факторами неинфекционной природы показала вероятностные интерпретируемые оценки степени управления эпидемическим процессом, на основе которых можно разрабатывать системные стратегические решения в области сохранения здоровья населения и уровня его безопасности в масштабе регионов и страны в целом.

К ограничениям исследования следует отнести: моделирование эпидемического процесса с использованием стандартной SIR-модели; ограничения набора показателей и периода анализа, определённый штамм вируса — дельта-штамм COVID-19.

Заключение

Проведённое исследование, базирующееся на параметризации эпидемических процессов, протекающих в отдельных регионах Российской Федерации, позволило проследить основные региональные особенности и закономерности распространения COVID-19, интенсивности выздоровления и летальности при модифицирующем влиянии факторов неинфекционной природы. Системный подход, используемый для проведения настоящего исследования, позволяет обосновывать адекватность и направленность управленческих мер. Представленный пример оценки управляемости эпидемической ситуацией иллюстрирует только незначительную часть возможных вариантов изыскания резервов в обосновании и принятии управленческих решений.

Выявленные тенденции и закономерности свидетельствуют о том, что наблюдаемая региональная дифференциация в развитии отдельных стадий эпидемического процесса 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.

Перспективами научного развития данного исследования являются: расширение модели по перечню показателей эпидемиологического процесса, уточнение перечня модифицирующих факторов, учёт половозрастных, социальных характеристик населения и степени тяжести заболевания и ряд других направлений, что позволит расширить понимание множественности влияния факторов среды обитания на условия развития эпидемического процесса.

В качестве прикладных направлений исследования закономерностей распространения эпидемических процессов, в том числе коронавирусной инфекции, авторы рассматривают совершенствование методической базы в рамках риск-ориентированной модели санитарно-гигиенического и эпидемиологического надзора, а также построение оптимальных моделей управления санитарно-эпидемиологической ситуацией.

Литература

(п.п. 1–13, 17–24, 27 см. References)

- Черкасский Б.Л. *Глобальная эпидемиология*. М.: 2008.
- Черкасский Б.Л. Эпидемический процесс как система. Сообщение 1. Структура эпидемического процесса. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии*. 1985; 62(3): 45–51.
- Зайцева Н.В., Попова А.Ю., Алексеев В.Б., Кирьянов Д.А., Чигвинцев В.М. Региональные особенности эпидемического процесса, 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>
- Зайцева Н.В., Клейн С.В., Глухих М.В., Кирьянов Д.А., Камалудинов М.Р. Прогноз потенциала роста ожидаемой продолжительности жизни населения Российской Федерации на основе сценарного изменения социально-гигиенических детерминант с использованием искусственной нейронной сети. *Анализ риска здоровью*. 2022; (2): 4–16. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.2.01>
- Попова А.Ю., Зайцева Н.В., Онищенко Г.Г., Клейн С.В., Глухих М.В., Камалудинов М.Р. Санитарно-эпидемиологические детерминанты и ассоциированный с ними потенциал роста ожидаемой продолжительности жизни населения Российской Федерации. *Анализ риска здоровью*. 2020; (1): 1–17. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.1.01>

References

- WHO. World Health Statistics 2022: Monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals; 2022.
- UNDP. Special Report on Human Security. New Threats to Human Security in the Anthropocene: Demanding Greater Solidarity; 2022. <https://doi.org/10.18356/9789210014007>
- COVID-19 Excess Mortality Collaborators. Estimating excess mortality due to the COVID-19 pandemic: a systematic analysis of COVID-19-related mortality, 2020–21. *Lancet*. 2022; 399(10334): 1513–36. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02796-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02796-3)
- The Economist. The pandemic's true death toll. Available at: <https://www.economist.com/graphic-detail/coronavirus-excess-deaths-estimates>
- Our World in Data. Total confirmed COVID-19 deaths. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/covid-deaths-income>
- International Science Council. *Unprecedented & Unfinished: COVID-19 and Implications for National and Global Policy*. Paris; 2022. <https://doi.org/10.24948/2022.03>
- Aburto J.M., Schöley J., Kashnitsky I., Zhang L., Rahal C., Missov T.I., et al. Quantifying impacts of the COVID-19 pandemic through life-expectancy losses: a population-level study of 29 countries. *Int. J. Epidemiol.* 2022; 51(1): 63–74. <https://doi.org/10.1093/ije/dyab207>
- Aburto J.M., Kashyap R., Schöley J., Angus C., Ermisch J., Mills M.C., et al. Estimating the burden of the COVID-19 pandemic on mortality, life expectancy and lifespan inequality in England and Wales: a population-level analysis. *J. Epidemiol. Community Health*. 2021; 75(8): 735–40. <https://doi.org/10.1136/jech-2020-215505>
- Yadav S., Yadav P.K., Yadav N. Impact of COVID-19 on life expectancy at birth in India: a decomposition analysis. *BMC Public Health*. 2021; 21(1): 1906. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11690-z>
- Castro M.C., Gurzenda S., Turra C.M., Kim S., Andrasfay T., Goldman N. COVID-19 is not an independent cause of death. *medRxiv*. 2022; 2022.06.01.22275878. Preprint. <https://doi.org/10.1101/2022.06.01.22275878>
- Schwartz J. Harvesting and long-term exposure effects in the relation between air pollution and mortality. *Am. J. Epidemiol.* 2000; 151(5): 440–8. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a101228>
- Chan E., Cheng D., Martin J. Impact of COVID-19 on excess mortality, life expectancy, and years of life lost in the United States. *PLoS One*. 2021; 16(9): e0256835. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256835>
- COVID-19 Forecasting Team. Variation in the COVID-19 infection-fatality ratio by age, time, and geography during the pre-vaccine era: a systematic analysis. *Lancet*. 2022; 399(10334): 1469–88. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02867-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02867-1)
- Cherkasskiy B.L. *Global Epidemiology [Global'naya epidemiologiya]*. Moscow; 2008. (in Russian)
- Cherkasskiy B.L. The epidemic process as a system. Message 1. The structure of the epidemic process. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*. 1985; 62(3): 45–51. (in Russian)
- 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 Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(6): 701–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-6-701-708> (in Russian)
- McKendrick A. Applications of Mathematics to Medical Problems. *Proc. Edinburgh Math. Soc.* 1925; 44: 98–130. <https://doi.org/10.1017/S0013091500034428>
- Kermack W.O., McKendrick A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc. Royal Soc. London*. 1927; A115: 700–21. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
- Li W., Zhang P., Zhao K., Zhao S. The geographical distribution and influencing factors of COVID-19 in China. *Trop. Med. Infect. Dis.* 2022; 7(3): 45. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed7030045>
- Meo S.A., Abukhalaf A.A., Alomar A.A., Sumaya O.Y., Sami W., Shafi K.M., et al. Effect of heat and humidity on the incidence and mortality due to COVID-19 pandemic in European countries. *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* 2020; 24(17): 9216–25. https://doi.org/10.26355/eurrev_202009_22874
- Khalis M., Toure A.B., El Badiy I., Khomsi K., Najmi H., Bouaddi O., et al. Relationship between Meteorological and Air Quality Parameters and COVID-19 in Casablanca Region, Morocco. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022; 19(9): 4989. <https://doi.org/10.3390/ijerph19094989>
- Islam M.M., Noor F.M. Correlation between COVID-19 and weather variables: A meta-analysis. *Heliyon*. 2022; 8(8): e10333. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10333>
- Chu D.K., Akl E.A., Duda S., Solo K., Yaacoub S., Schünemann H.J. Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Lancet*. 2020; 395(10242): 1973–87. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31142-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31142-9)
- Zhu J., Yan W., Zhu L., Liu J. COVID-19 pandemic in BRICS countries and its association with socio-economic and demographic characteristics, health vulnerability, resources, and policy response. *Infect. Dis. Poverty*. 2021; 10(1): 97. <https://doi.org/10.1186/s40249-021-00881-w>
- Zaytseva N.V., Kleyn S.V., Glukhikh M.V., Kir'yanov D.A., Kamaltdinov M.R. Regional peculiarities of the epidemiological process caused by SARS-COV-2 (COVID-19), compensation for the impact of modifying factors of non-infectious genesis. *Analiz riska zdorov'yu*. 2022; (2): 4–16. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.2.01.eng>
- Popova A.Yu., Zaytseva N.V., Onishchenko G.G., Kleyn S.V., Glukhikh M.V., Kamaltdinov M.R. Sanitary-epidemiologic determinants and potential for growth in life expectancy of the population in the Russian Federation taking into account regional differentiation. *Analiz riska zdorov'yu*. 2020; (1): 4–17. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.1.01.eng>
- Wilt F., Chong A.L.C., Selvachandran G., Kotecha K., Ding W. Generalized Susceptible-Exposed-Infectious-Recovered model and its contributing factors for analysing the death and recovery rates of the COVID-19 pandemic. *Appl. Soft Comput.* 2022; 123: 108973. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108973>