

ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА: АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РИСКА ЗДОРОВЬЮ

УДК 613; 614
DOI: 10.21668/health.risk/2023.2.01



Научная статья

ПРОСТРАНСТВЕННО-ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА COVID-19 В СУБЪЕКТАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (2020–2023 ГГ.)

Н.В. Зайцева, С.В. Клейн, М.В. Глухих

Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Россия, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82

Пандемия коронавирусной инфекции оказала значимое влияние на течение медико-демографических процессов и в мире в целом, и в России в частности. Течение эпидемического процесса сопровождалось последовательной сменой циркулирующих вариантов вируса SARS-CoV-2 с различными мутациями и нашло отражение в регистрируемых уровнях заболеваемости и смертности населения на фоне пространственной неоднородности социально-экономических факторов в регионах РФ.

Осуществлен анализ пространственно-динамической неоднородности течения эпидемического процесса COVID-19 в субъектах Российской Федерации за период 2020–2023 гг.

Проведен ретроспективный анализ показателей заболеваемости и смертности на национальном и региональном уровнях. Используются ведомственные статистические данные Роспотребнадзора, а также общедоступные данные, характеризующие интенсивные показатели эпидемического процесса COVID-19 и результаты секвенирования проб биоматериала на COVID-19 за период 2020–2023 гг.

За период 2020–2023 гг. выявлена последовательная смена пяти «волн» эпидемического процесса COVID-19, в рамках которых регионы РФ с разной скоростью достигали локальных пиков заболеваемости. По имеющимся данным установлено, что среди субъектов РФ наибольший уровень первичной заболеваемости в 2021–2022 гг. установлен в г. Санкт-Петербурге (12 821,8 и 17 341,2 случая на 100 тыс. населения), наибольший уровень смертности в 2021 г. отмечен в Тверской области (427 случая на 100 тыс. населения), в 2022 г. – в Архангельской области (350,9 случая на 100 тыс. населения). Наибольшее количество субъектов РФ с превышением среднегодового уровня заболеваемости по данной причине установлено в октябре, ноябре, декабре 2021 г. и феврале 2022 г. (51, 68, 51 и 82 субъекта соответственно).

Установленная пространственно-динамическая неоднородность течения эпидемического процесса может указывать, что данный эпидемиологический процесс во многом может определяться различиями в исходных социально-экономических и медико-демографических характеристиках субъектов РФ.

Ограничения исследования касаются использованных статистических данных регистрации заболеваемости, смертности, а также принятого в исследовании понятия эпидемиологической «волны».

Выявленные территориальные особенности течения эпидемического процесса COVID-19 необходимо учитывать при разработке оптимальных направлений регулирующих воздействий, в том числе с прогностической целью в отношении вероятных эмерджентных инфекций.

Ключевые слова: эпидемиологический процесс, COVID-19, эпидемиологические волны, заболеваемость, смертность, регионы России, эпидемиологический анализ.

© Зайцева Н.В., Клейн С.В., Глухих М.В., 2023

Зайцева Нина Владимировна – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель (e-mail: znv@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 233-11-25; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2356-1145>).

Клейн Светлана Владиславовна – профессор РАН, доктор медицинских наук, заведующий отделом системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга (e-mail: kleyn@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>).

Глухих Максим Владиславович – кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник отдела системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга (e-mail: gluhih@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4755-8306>).

По данным статистики ВОЗ, по состоянию на апрель 2023 г. в мире зарегистрировано 763 740 140 подтвержденных случаев заболеваний, а также 6 908 554 случая смерти по причине COVID-19¹, при этом в абсолютных значениях на европейский регион приходится 36,1 % (1-е ранговое место) всех случаев заболеваний и 32,2 % всех случаев смерти (2-е ранговое место). По этим же данным в европейском регионе Российская Федерация занимает 31-е (в мире – 55-е) ранговое место (5021,1 случая на 100 тысяч) по заболеваемости и 19-е место (32-е в мире) по смертности (90,7 случая на 100 тысяч населения) за период 2020–2022 гг. [1].

Согласно классификации, принятой Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [2], в настоящий момент (апрель 2023 г.) в мире отсутствуют варианты вируса, вызывающие обеспокоенность, и циркулируют только два варианта линии *Omicron*, вызывающие интерес, – *XBB.1.5* (так называемый «Кракен») и *XBB.1.16* (так называемый «Арктур»), которые потенциально способны привести к новым волнам эпидемического процесса в связи с улучшенной способностью вариантов-кандидатов эффективно уходить от иммунного ответа человеческого организма [3, 4]. При этом согласно имеющимся оценкам [3, 4], данные субварианты не имеют склонности к утяжелению течения болезни относительно других линий *Omicron* и обладают меньшей вирулентностью относительно предыдущих доминирующих штаммов, вызвавших первые эпидемиологические «волны».

Во время активного распространения инфекционного агента (*SARS-CoV-2*), его мутаций и вариаций по всему миру потребовались надежные прогнозы развития эпидемической ситуации, учитывающие, помимо некоторых характеристик нового инфекционного заболевания (индекс репродукции, инкубационный период, мутации вируса и др.), и реализуемые мероприятия в области общественного здравоохранения (вакцинация, социальная изоляция, использование масок и др.) [5, 6]. Повсеместное снижение активности эпидемического процесса побуждает исследователей все чаще обращаться к ретроспективным оценкам его течения, оценкам адекватности и своевременности проведенных мероприятий по контролю заболеваемости в рамках эпидемиологических «волн» с целью установления наиболее эффективных стратегий противодействия подобным угрозам в будущем [7]. Несмотря на отсутствие четкого определения термина «волна»², в России отмечают³ уже шесть волн COVID-19, каж-

дая из которых чаще всего обуславливалась своими вариантами вируса, пиками заболеваемости и смертности.

Анализ научных работ показал, что в России проводились оценки течения эпидемического процесса COVID-19 по «волнам» / периодам подъема заболеваемости и смертности, однако зачастую анализ проводился либо в целом по РФ [8–10], либо в рамках одного или нескольких субъектов / федеральных округов РФ [11–13]. Отдельные исследования были посвящены определению и сравнительному анализу геновариантов *SARS-CoV-2*, встречавшихся на территории России в различные периоды течения эпидемического процесса COVID-19 [14, 15]. По данным ряда исследований установлены региональные особенности и закономерности, заключающиеся в различиях по множеству факторов среды обитания, которые могли модифицировать течение эпидемического процесса, его интенсивность и продолжительность [16, 17].

Несмотря на наличие релевантных работ, в научной литературе представлено ограниченное количество данных об особенностях течения эпидемического процесса COVID-19 в регионах РФ, сравнительных межрегиональных оценок процесса с позиции концепции эпидемиологических волн в результате последовательной смены нескольких доминирующих штаммов вируса *SARS-CoV-2*.

Цель исследования – анализ пространственно-динамической неоднородности течения эпидемического процесса COVID-19 в субъектах Российской Федерации за период 2020–2023 гг.

Материалы и методы. Проведен ретроспективный эпидемиологический анализ показателей, связанных с течением эпидемического процесса COVID-19 (подтвержденные случаи заболеваний, смерти) за период 2020–2023 гг. на национальном (РФ) и региональном (субъекты РФ) уровнях, с использованием общедоступных источников информации⁴, а также ведомственной статистики Роспотребнадзора. Проанализированы показатели, непосредственно связанные с течением эпидемического процесса: результаты секвенирования генетических образцов COVID-19. Источником информации послужили открытые данные с web-ресурса *Our World In Data*⁴, специализирующегося на агрегировании официальных статистических данных на страновом уровне. Для анализа региональных данных по заболеваемости и смертности по причине COVID-19 за 2021–2022 гг. использованы данные формы федерального статистического наблюдения № 2 «Све-

¹ Данные за весь период пандемии COVID-19 по состоянию на апрель 2023 г.

² WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard [Электронный ресурс]. – Geneva: World Health Organization, 2020. – URL: <https://covid19.who.int/> (дата обращения: 20.04.2023).

³ Вирусолог Чепурнов предупредил о наступлении новой волны коронавируса [Электронный ресурс] // URA.RU: Информационное агентство. – URL: <https://ura.news/news/1052624187> (дата обращения: 20.04.2023).

⁴ Daily new confirmed COVID-19 cases per million people [Электронный ресурс] // Our World In Data: COVID-19 Data Explorer. – URL: <https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer?zoomToSelection=true&time=2020-03-01..latest&facet=none&country=-RUS&pickerSort=asc&pickerMetric=location&Metric=Confirmed+cases&Interval=7-day+rolling+average&Relative+to+Population=true&Color+by+test+positivity=false> (дата обращения: 20.04.2023).

дения об инфекционных и паразитарных заболеваниях»⁵.

В настоящем исследовании принята концепция, в которой эпидемиологический процесс COVID-19 характеризуется в динамике последовательной сменной эпидемиологических волн. Под термином «волна» понимается период циркулирования среди заболевших штамма, занимающего в структуре просеквенированных образцов биоматериалов долю свыше 50,0 %, сопровождающийся подъемом заболеваемости и / или смертности населения. Анализ внутриволновой динамики заболеваемости COVID-19 по регионам РФ осуществлялся посредством установления пиков заболеваемости в недельном осреднении и расчета количества недель, потребовавшихся для его достижения. Деление регионов РФ на группы осуществлялось относительно значения статистической моды количества недель, потребовавшихся для достижения пика заболеваемости в рамках анализируемой волны на уровне субъектов РФ. Субъекты со значениями количества недель, потребовавшихся для достижения пика заболеваемости, меньше значения моды считались территориями с «экстенсивным» (быстрым) ростом заболеваемости, больше – территориями с «замедленным» ростом заболеваемости, равные значению моды – территориями с «равномерным» ростом заболеваемости. Группирование субъ-

ектов РФ во вторую волну, характеризующуюся двумя последовательными подъемами заболеваемости COVID-19, осуществлялось на основе характера динамики двух подъемов заболеваемости: регионы с платообразной кривой первого подъема, регионы с превышением уровня первого подъема заболеваемости над уровнем второго и регионы с превышением уровня второго подъема заболеваемости над уровнем первого. Для расчета интенсивных показателей использовались данные Федеральной службы государственной статистики РФ по численности населения.

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

Результаты и их обсуждение. Согласно имеющимся данным^{4,5,6}, за период 2020–2022 гг. в целом на территории РФ зарегистрировано увеличение уровней заболеваемости COVID-19 (код по МКБ U 07.1) на 282,4 % (с 2157,1 до 8248,7 случая на 100 тысяч населения) и увеличение уровней смертности на 59,0 % (с 0,39 до 0,62 случая на 1 тысячу населения) по этой же причине (таблица). В структуре первичной заболеваемости доля COVID-19 в 2020 г. составляла 2,8 %, в 2021 г. – 7,2 %, в структуре общей смертности доля COVID-19 в 2020 г. составляла 2,7 %, в 2021 г. – 9,9 % и в 2022 г. – 4,8 %.

Отдельные статистические показатели общественного здоровья населения Российской Федерации за 2019–2022 гг.

Показатель	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Среднегодовая численность населения РФ ⁶ , абс.	146 764 655	146 459 795	146 575 531	146 713 743
Всего умерших от всех причин ⁷ , абс.	1 798 307	2 138 586	2 441 594	1 905 778*
Число впервые заболевших по всем классам болезней ⁸ , абс.	114 512 153	111 294 314	125 022 382	–**
Общая смертность всего населения, случаев на 1 тысячу	12,25	14,6	16,7	12,9
Первичная заболеваемость всего населения по всем классам болезней, случаев на 100 тысяч	78 024,3	75 989,7	85 295,5	–**
Число заболевших ⁹ COVID-19, абс.	–	3 159 297***	9 054 041	12 102 028
Число умерших ¹⁰ по причине COVID-19, абс.	–	57 019***	240 586	90 836
Заболеваемость COVID-19, случаев на 100 тысяч	–	2 157,1 (2,8 %) ****	6 177,1 (7,2 %)	8 248,7 (–)
Смертность по причине COVID-19, случаев на 1 тысячу	–	0,39 (2,7 %)	1,64 (9,9 %)	0,62 (4,8 %)

Примечание: * – по предварительным данным Росстата; ** – данные отсутствуют; *** – по данным веб-ресурса *Our World In Data*; **** – в скобках указана доля в структуре всей заболеваемости / смертности.

⁵ Об утверждении форм федерального статистического наблюдения с указаниями по их заполнению для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием субъекта Российской Федерации: Приказ Росстата от 30.12.2020 № 867 [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573324768> (дата обращения: 21.04.2023).

⁶ Демография [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (дата обращения: 19.04.2023); Распределение умерших по полу, возрастным группам и причинам смерти: Статистическая форма № 5 (табл. 51); Заболеваемость всего населения России с диагнозом, установленным впервые в жизни: статистические материалы за 2019–2021 гг. – М.: Минздрав РФ, 2022.

⁷ Распределение умерших по полу, возрастным группам и причинам смерти: Статистическая форма № 5 (табл. 51).

⁸ Заболеваемость всего населения России с диагнозом, установленным впервые в жизни: статистические материалы за 2019–2021 гг. – М.: Минздрав РФ, 2022.

⁹ Daily new confirmed COVID-19 cases per million people [Электронный ресурс] // Our World In Data: COVID-19 Data Explorer. – URL: <https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer?zoomToSelection=true&time=2020-03-01..latest&facet=none&country=-RUS&pickerSort=asc&pickerMetric=location&Metric=Confirmed+cases&Interval=7-day+rolling+average&Relative+to+Population=true&Color+by+test+positivity=false> (дата обращения: 20.04.2023).

¹⁰ Там же.

Среди субъектов РФ наибольший уровень первичной заболеваемости в 2021–2022 гг. установлен в г. Санкт-Петербурге (12 821,8 и 17 341,2 случая на 100 тысяч населения), наибольший уровень смертности в 2021 г. отмечен в Тверской области (427 случаев на 100 тысяч населения), в 2022 г. – в Архангельской области (350,9 случая на 100 тысяч населения) (рис. 1, 2).

На региональном уровне динамика заболеваемости и смертности за период 2021–2022 гг. варьировалась в значительных диапазонах: от -54,5 % (темпы прироста) в Республике Дагестан до 222,2 % (темпы прироста) в Новосибирской области по заболеваемости (среднерегionalный уровень – 43,4 %); и от -98,9 % в Ненецком автономном округе до 168,2 % в Нижегородской области (среднерегionalный уровень – -57,1 %) – по смертности.

На уровне РФ в структуре заболевших детское население (≤ 17 лет) занимало 10,1 % в 2021 г. и 15,7 % в 2022 г.; в региональном разрезе число заболевших детей в общей структуре заболевших находилось в 2021 г. в диапазоне от 1,8 % (Республика Татарстан) до 22,5 % (Республика Бурятия), в среднем – 10,5 %, в 2022 г. – от 8,3 % (Белгородская область) до 30,0 % (Ямало-Ненецкий автономный округ), в среднем – 16,2 %.

На уровне РФ заболеваемость городского населения была выше, чем сельского, как в 2021 г. (6759,8 и 4448,6 случая на 100 тысяч соответствующего населения), так и в 2022 г. (9 264,3 и 5 225,8 случая на 100 тысяч соответствующего населения), в 1,5–1,8 раза. На национальном уровне (РФ) случаи носительства возбудителя COVID-19 составляли 6,8 % в 2021 г. и 6,9 % – в 2022 г., при этом за данный период значительно снизилась доля случаев ковид-индуцированной пневмонии (с 18,3 до 3,7 %).

Анализ внутригодовой динамики заболеваемости и смертности по причине COVID-19 осложняется относительно небольшой продолжительностью эпидемического процесса, неравномерностью противоэпидемических мероприятий в мировом и страновом масштабах, частой сменой доминантного штамма, т.е. отсутствует стабильность социальных, природных и биологических факторов, позволяющая утверждать наличие внутригодовой сезонности и, тем более, многолетней цикличности. Несмотря на это, установлено превышение среднегодовой заболеваемости и смертности в октябре–декабре 2020–2021 гг., а также – за счет циркулирования более вирулентных (*Delta*) и контагиозных (*Omicron*) штаммов – в июле–сентябре 2021 г. и январе–марте 2022 г. (рис. 3).

Оценка помесячной динамики заболеваемости COVID-19 по субъектам РФ в 2021 г. показала, что превышение среднегодового уровня (с учетом двух стандартных ошибок – $M \pm 2m$) заболеваемости РФ наблюдалось по всем месяцам года, кроме марта и апреля (рис. 4, а), в 2022 г. – кроме периодов апрель–июль и октябрь–декабрь (рис. 4, б). Наибольшее количество субъектов РФ с превышением среднегодового уровня (с учетом двух стандартных ошибок – $M \pm 2m$) заболеваемости по данной причине установлено в октябре (51 субъект), ноябре (68), декабре (51) 2021 г. и феврале (82 субъекта) 2022 г.

Согласно принятой в работе концепции эпидемиологических волн за период 2020–2023 гг. на основе проанализированных данных установлена последовательная смена пяти «волн» эпидемического процесса COVID-19, которые характеризуются сменой превалирования наиболее контагиозных штаммов SARS-CoV-2 с соответствующими увеличениями уровней заболеваемости (рис. 5).

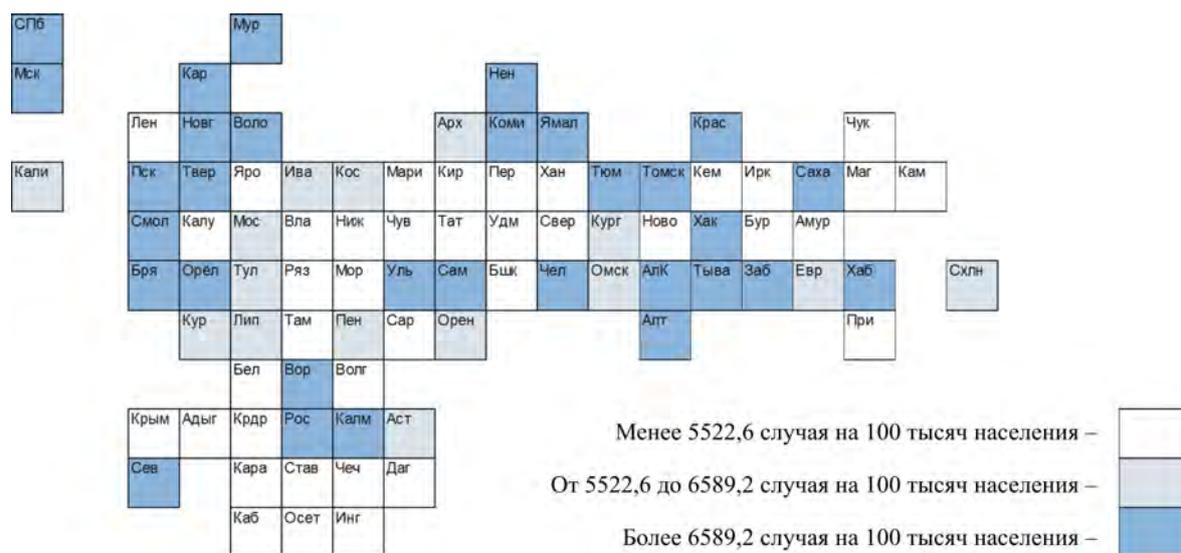


Рис. 1. Пространственное распределение заболеваемости COVID-19 по субъектам РФ за 2021 г., случаев на 100 тысяч всего населения

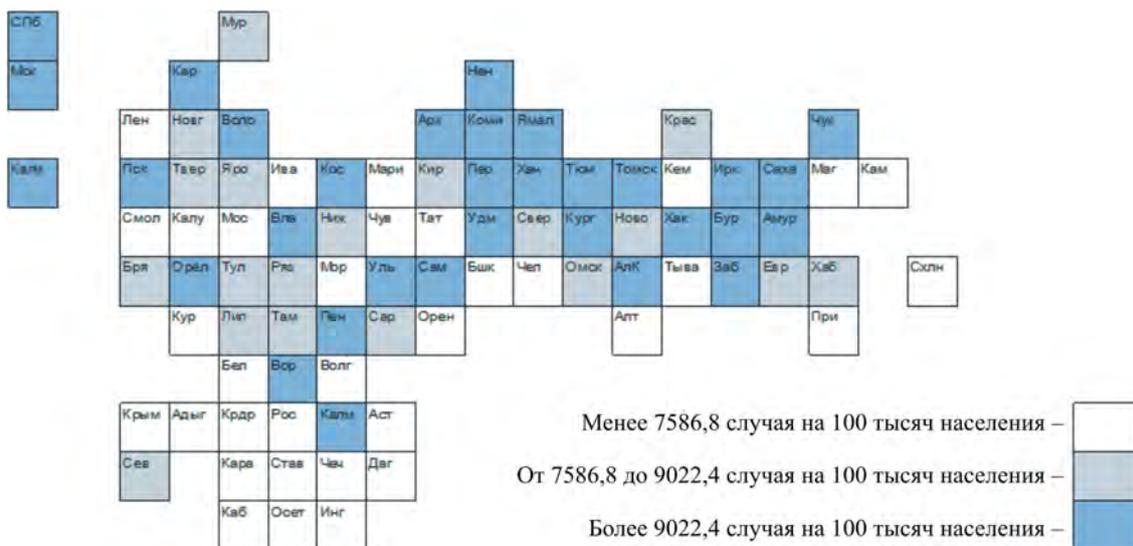


Рис. 2. Пространственное распределение заболеваемости COVID-19 по субъектам РФ за 2022 г., случаев на 100 тысяч всего населения

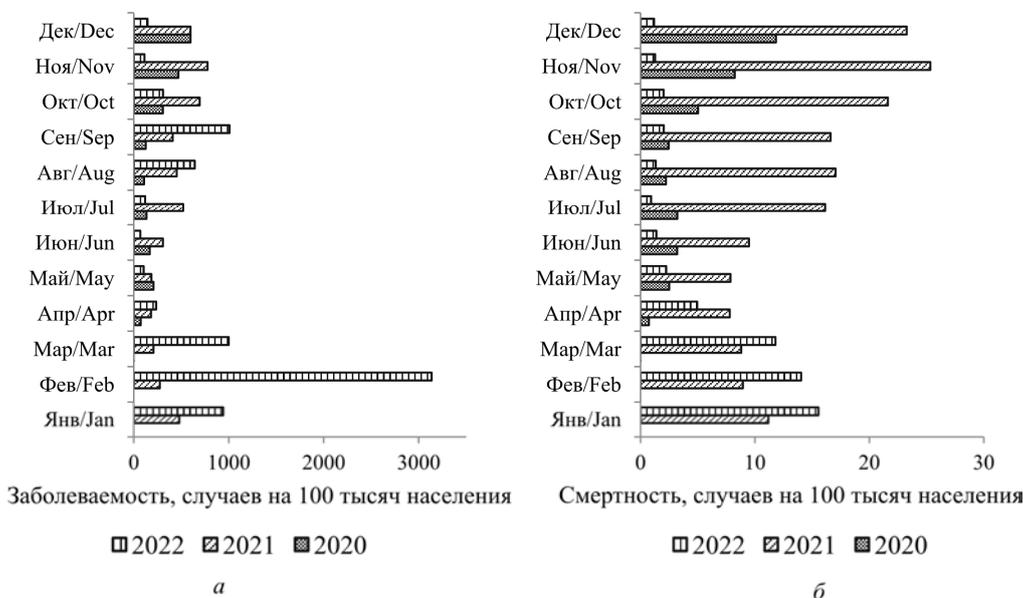


Рис. 3. Помесячная динамика заболеваемости (а) и смертности (б) по причине COVID-19 за 2020–2022 гг. в РФ, случаев на 100 тысяч всего населения

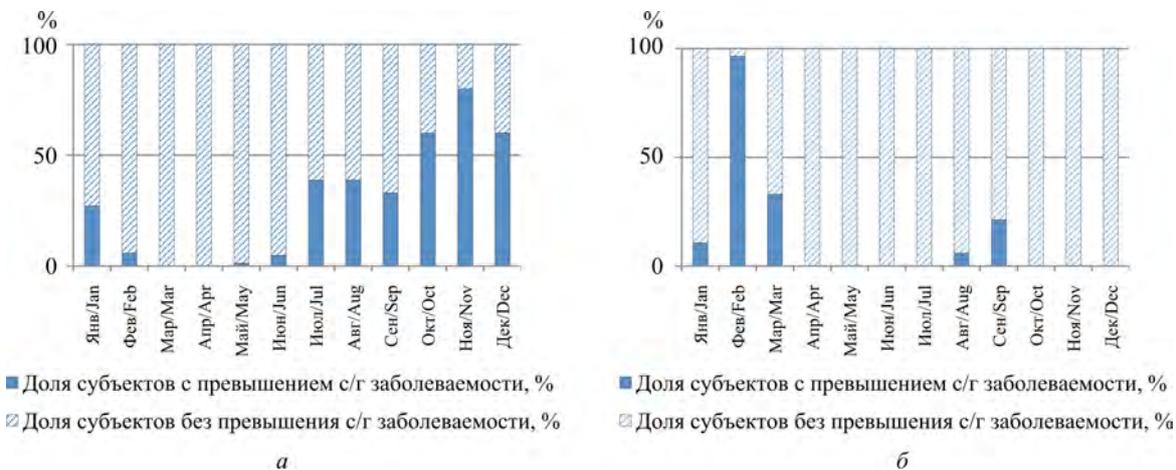


Рис. 4. Доля субъектов РФ с превышением среднегодовой заболеваемости COVID-19 в 2021 г. (а) и 2022 г. (б), %

Первая волна длительностью 73 недели началась с первой декады марта 2020 г. и закончилась в конце мая 2021 г., сопровождаясь генетическим разнообразием вируса с широким распространением (до 30 %) штамма *Alpha* в конце волны (рис. 5, 6). Вторая волна длительностью 32 недели – с конца мая 2021 г. и до начала января 2022 г., характеризовалась доминированием штамма *Delta* (см. рис. 5, 6). В данную волну установлены наибольшие уровни недельной смертности (до 6 ‰) всего населения по причине COVID-19 (см. рис. 6). Длительность третьей волны составила 24 недели – с начала января 2022 г. до начала июля 2022 г. и характеризовалась сменой сразу двух доминантных субвариантов штамма *Omicron* – «*BA.1*» и «*BA.2*» (см. рис. 5, 6). Появление варианта «*BA.1*» штамма *Omicron* обусловило «взрывной» рост заболеваемости и начало снижения уровня общей смертности по причине COVID-19 (см. рис. 5, 6). Четвертая волна коронавирусной инфекции, охватывающая период с начала июля 2022 г. до начала января 2023 г., в совокупности длилась 27 недель (см. рис. 5, 6). В данную волну превалирование варианта «*BA.5*» штамма *Omicron* вызвало очередной подъем уровня недельной заболеваемости (до 240 ‰) и небольшой рост уровня смертности (до 0,5 ‰). Пятая волна началась по-

сле установившегося доминирования одного из вариантов линии *Omicron* – «*XBB*» с середины января 2023 г. по настоящее время (апрель 2023 г.) и характеризовалась сравнительно низкими уровнями заболеваемости и смертности по причине еще более низкой контагиозности и вирулентности превалирующего штамма (см. рис. 5, 6).

На территориях субъектов РФ течение эпидемического процесса в рамках описанных волн характеризовалось своими особенностями. Анализ данных ведомственной статистики Роспотребнадзора по недельной заболеваемости на уровне субъектов РФ (с сентября 2020 г.) позволил выделить три группы регионов с разной скоростью достижения максимума заболеваемости COVID-19 в **первую** волну: субъекты с замедленным ростом заболеваемости (18 субъектов); субъекты с равномерным ростом заболеваемости (19 субъектов); субъекты с экстенсивным ростом заболеваемости (47 субъектов) (рис. 7). При этом во всех группах присутствовали субъекты, заболеваемость в которых не превышала среднероссийский уровень (12, 21 и 16 субъектов соответственно). Максимальный уровень заболеваемости пришелся на 52-ю неделю (конец декабря) 2020 г. – 136,4 случая на 100 тысяч населения.

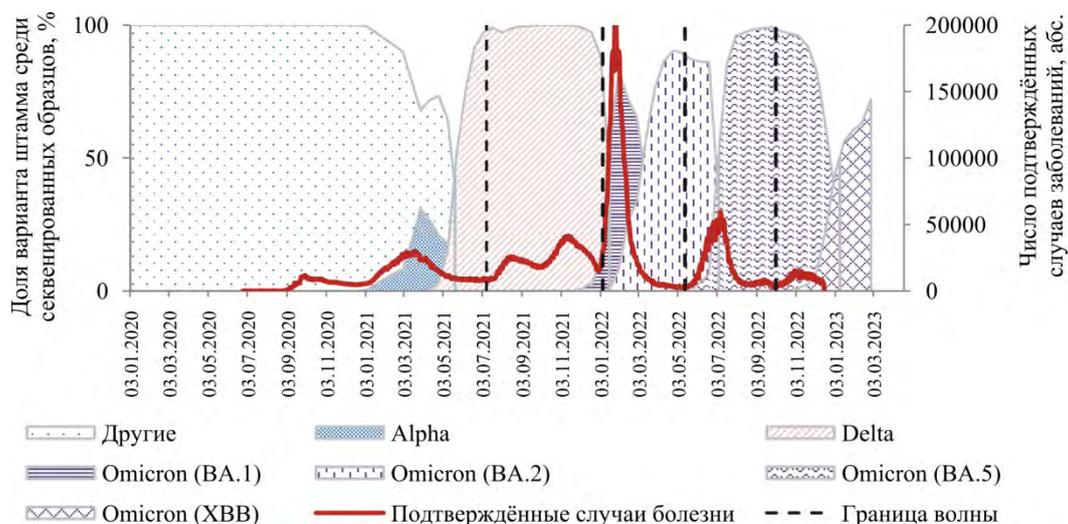


Рис. 5. Динамика подтвержденных случаев¹¹ заболеваний COVID-19 и доля доминантных штаммов SARS-CoV-2 среди секвенированных¹² образцов за 2020–2023 гг.

¹¹ Daily new confirmed COVID-19 cases per million people [Электронный ресурс] // Our World In Data: COVID-19 Data Explorer. – URL: <https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer?zoomToSelection=true&time=2020-03-01..latest&facet=none&country=~RUS&pickerSort=asc&pickerMetric=location&Metric=Confirmed+cases&Interval=7-day+rolling+average&Relative+to+Population=true&Color+by+test+positivity=false> (дата обращения: 20.04.2023).

¹² SARS-CoV-2 sequences by variant, Russia, Apr 24, 2023 [Электронный ресурс] // Our World In Data: COVID-19 Data Explorer. – URL: <https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer?zoomToSelection=true&time=2020-03-01..latest&facet=none&country=~RUS&pickerSort=asc&pickerMetric=location&Metric=Variants&Interval=7-day+rolling+average&Relative+to+Population=true&Color+by+test+positivity=false> (дата обращения: 20.04.2023).

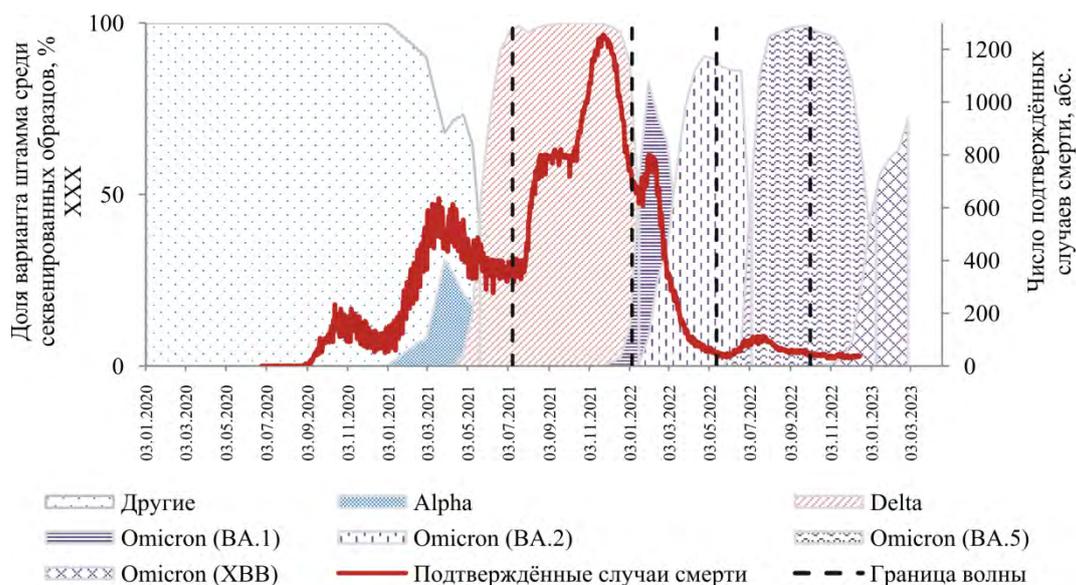


Рис. 6. Динамика подтвержденных случаев смерти по причине COVID-19 и доля доминантных штаммов SARS-CoV-2 среди секвенированных¹³ образцов за 2020–2023 гг.



Рис. 7. Динамика недельной заболеваемости COVID-19 по группам субъектов РФ за период первой волны

Вторая эпидемиологическая волна COVID-19 характеризовалась двумя последовательными подъемами заболеваемости, вызванными штаммом *Delta* (рис. 8). Дифференцированный анализ данного периода также позволил выделить три группы регионов РФ по характеру роста в первый подъем заболеваемости: субъекты с платообразной кривой в первый подъем заболеваемости (52 субъекта); субъекты с быстрым ростом и спадом уровня заболеваемости, не превышающим уровень второго подъема заболеваемости (21 субъект); субъекты с быстрым ростом и спадом уровня заболеваемости, превышающим уровень второго подъема заболеваемости (12 субъектов). Во всех выделенных группах присутствовали субъекты, заболеваемость в которых не превышала

среднероссийский уровень второй волны (32, 9 и 3 субъекта соответственно). В 44-ю неделю 2021 г. (начало ноября) установлен наибольший уровень заболеваемости (191,0 случая на 100 тысяч населения) с превалярованием штамма *Delta*.

В **третью** волну, характеризующуюся превалярованием штамма *Omicron*, с наиболее высокими уровнями заболеваемости и темпами ее роста среди субъектов РФ не установлено выраженной асинхронности по достижению максимума заболеваемости за волну. Данная волна характеризуется коротким (6 недель) периодом превышения среднероссийского уровня заболеваемости и быстрым (за 6–7 недель) достижением пика заболеваемости за волну по большинству (68) субъектов РФ. Третья волна

¹² SARS-CoV-2 sequences by variant, Russia, Apr 24, 2023 [Электронный ресурс] // Our World In Data: COVID-19 Data Explorer. – URL: <https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer?zoomToSelection=true&time=2020-03-01..latest&facet=none&country=~RUS&pickerSort=asc&pickerMetric=location&Metric=Variants&Interval=7-day+rolling+average&Relative+to+Population=true&Color+by+test+positivity=false> (дата обращения: 20.04.2023).

характеризуется выраженными различиями между субъектами по величине отклонения регионального уровня заболеваемости над среднероссийским уровнем (рис. 9). Максимальный уровень заболеваемости третьей волны отмечен в 6-ю неделю 2022 г. (середина февраля) – 907,6 случая на 100 тысяч населения.

Четвертая волна коронавирусной инфекции, вызванная вариантом «BA.5» штамма *Omicron*, ха-

рактеризуется сравнительно высоким уровнем заболеваемости относительно двух первых волн, но при этом сравнительно низким уровнем смертности (см. рис. 5, 6). По течению эпидемического процесса она напоминает первую волну ввиду наличия асинхронности нарастания пиков заболеваемости по регионам РФ (рис. 10). В рамках волны выделено три группы субъектов: субъекты с замедленным ростом заболеваемости (5 субъектов); субъекты с равномерным



Рис. 8. Динамика недельной заболеваемости COVID-19 по группам субъектов РФ за период второй волны

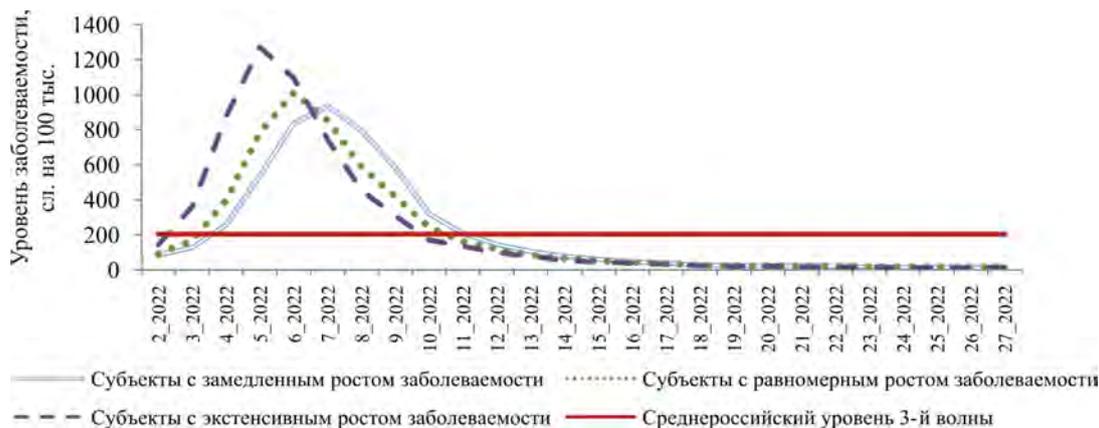


Рис. 9. Динамика недельной заболеваемости COVID-19 по группам субъектов РФ за период третьей волны



Рис. 10. Динамика недельной заболеваемости COVID-19 по группам субъектов РФ за период четвертой волны

ростом заболеваемости (52 субъекта); субъекты с экстенсивным ростом заболеваемости (28 субъектов). Наибольший уровень заболеваемости в четвертую волну установлен в 37-ю неделю 2022 г. (конец сентября) – 253,1 случая на 100 тысяч населения.

На момент проведения исследования (апрель 2023 г.) полноценный анализ пятой волны распространения COVID-19, несмотря на явное наличие доминирующего штамма (субвариант *Omicron* – *XBB*) и имеющийся пик заболеваемости, нецелесообразен по причине продолжающегося эпидемического процесса.

Установленная пространственно-динамическая неоднородность течения эпидемического процесса за период существования пандемии указывает, что интенсивность данного процесса зависит не только от непостоянства биологического фактора (смена штаммов) и вводимых ограничительных мероприятий, но и от начальных (исходных) социально-экономических, медико-демографических характеристик субъектов РФ. По данным ряда исследований установлено, что уровни заболеваемости COVID-19 различаются в зависимости от возрастного состава населения, его социально-экономических условий, в том числе в рамках разных эпидемиологических волн заболеваемости, сопровождаемых разной степенью реализуемых мероприятий немедицинского характера [18, 19].

В структуре заболеваемости COVID-19 среди регионов РФ преобладало население трудоспособного и старше трудоспособного возрастов, однако постепенно за период 2021–2022 гг. заболеваемость детского населения увеличивалась в структуре и достигла 16,0 % в 2022 г. Вероятной причиной изменения структуры могла являться смена доминирующих штаммов вируса *SARS-CoV-2* с улучшенной способностью «ухода» от иммунного ответа человеческого организма [3, 4, 20].

По территориальному признаку заболеваемость COVID-19 городского населения превышала аналогичный показатель сельского населения весь наблюдаемый до настоящего времени период эпидемиологического процесса в 1,5–1,8 раза (2021–2022 гг.). В ряде исследований показано, что такие факторы, как высокая плотность населения, высокая частота социальных контактов, наличие достопримечательностей, в большей степени характерные для городских агломераций, способствуют увеличению интенсивности эпидемического процесса COVID-19 независимо от проводимых ограничительных мероприятий [21–24].

Наибольшее влияние на показатели общественного здоровья в структуре заболеваемости и смертности населения по причине COVID-19 пришлось на конец 2021 г. – начало 2022 г., несмотря на принимаемые ограничительные мероприятия и объемы вакцинации: высокая степень контагиозности и вирулентности вариантов *Delta* и *Omicron* [20] способствовали широкому распространению

инфекции во всех регионах РФ. Также на 2021 г. пришлось наибольшая доля (18,3 %) ковид-индуцированной пневмонии среди общего числа заболевших, что подтверждает информацию [25] о высокой вирулентности штамма *Delta*, при этом случаи носительства возбудителя COVID-19 находились примерно на одинаковом уровне как в 2021 г., так и в 2022 г. – около 7,0 %.

По причине относительно небольшой продолжительности эпидемического процесса, неравномерности противоэпидемических мероприятий в разрезе регионов, частой смены доминантного штамма не установлено выраженных закономерностей внутригодовой динамики заболеваемости. Вместе с тем по результатам исследования прослеживаются некоторые тенденции формирования повышенных уровней заболеваемости в осенне-зимний период. Так, наибольшее количество субъектов РФ с превышением среднегодовой заболеваемости установлено в октябре (51), ноябре (68), декабре (51) 2021 г. и феврале (82) 2022 г., т.е. в период наступления осенне-зимнего режима погоды с пониженными температурами и ростом сезонной заболеваемости других инфекционных заболеваний с аэрогенным механизмом передачи [23, 26].

В литературе анализ эпидемиологических волн COVID-19 зачастую сопряжен с использованием компартментных моделей, основанных на дифференциальных уравнениях скоростей перехода групп, участвующих в эпидемическом процессе (восприимчивые, зараженные, выздоровевшие) [5, 27]. В настоящем исследовании для установления региональных особенностей течения эпидемического процесса использовалась ретроспективная оценка темпов прироста заболеваемости в установленных временных границах начала и окончания эпидемиологических волн в сочетании с анализом распространенности того или иного штамма.

Ограничения исследования. К ограничениям исследования можно отнести используемые статистические данные, касающиеся результатов секвенирования и построенного на их основе графика смены превалирующих штаммов коронавируса: реальная структура штаммов могла быть искажена выполненными объемами секвенирования с сосредоточением возможностей лабораторной диагностики на конкретных штаммах в определенные периоды времени, чувствительностью использованных тест-систем. Неопределенность вносит понятие «волны», по которому пока не найден консенсус среди специалистов в области эпидемиологии, общественного здравоохранения, в связи с чем исследуемые в настоящей работе периоды волн носят условный характер, что могло повлиять на итоговый результат оценки темпов прироста заболеваемости по регионам РФ. Для лучшего понимания различий в течении эпидемического процесса по регионам РФ в перспективе необходима дополнительная оценка степени влияния факторов раз-

личной природы на регистрируемые уровни заболеваемости и смертности.

Выводы. По результатам проведенного исследования установлены региональные особенности течения эпидемического процесса COVID-19 за период 2020–2023 гг. среди регионов РФ. Установлено, что на территориях субъектов Российской Федерации достижение пиков заболеваемости населения коронавирусной инфекцией в рамках каждой эпидемической волны происходило с разной скоростью, что могло быть связано с неоднородностью воздействующих факторов среды обитания на

звенья эпидемического процесса. Выявленные территориальные особенности течения эпидемического процесса COVID-19 необходимо учитывать при разработке оптимальных направлений регулирующих воздействий, в том числе с прогностической целью в отношении вероятных эмерджентных инфекций.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. SARS-CoV-2 Variants of Interest and Concern naming scheme conducive for global discourse / F. Konings, M.D. Perkins, J.H. Kuhn, M.J. Pallen, E.J. Alm, B.N. Archer, A. Barakat, T. Bedford [et al.] // *Nat. Microbiol.* – 2021. – Vol. 6, № 7. – P. 821–823. DOI: 10.1038/s41564-021-00932-w
2. XBB.1.5 Updated Risk Assessment, 24 February 2023 [Электронный ресурс] // WHO. – URL: https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/22022024xbb.1.5ra.pdf?sfvrsn=7a92619e_3 (дата обращения: 20.04.2023).
3. XBB.1.16 Initial Risk Assessment, 17 April 2023 [Электронный ресурс] // WHO. – URL: https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/21042023xbb.1.16ra-v2.pdf?sfvrsn=84577350_1 (дата обращения: 20.04.2023).
4. A Second Wave? What Do People Mean by COVID Waves? – A Working Definition of Epidemic Waves / S.X. Zhang, F. Arroyo Marioli, R. Gao, S. Wang // *Risk Manag. Healthc. Policy.* – 2021. – Vol. 14. – P. 3775–3782. DOI: 10.2147/RMHP.S326051
5. COVID-19 epidemic prediction and the impact of public health interventions: A review of COVID-19 epidemic models / Y. Xiang, Y. Jia, L. Chen, L. Guo, B. Shu, E. Long // *Infect. Dis. Model.* – 2021. – Vol. 6. – P. 324–342. DOI: 10.1016/j.idm.2021.01.001
6. Dutta A. COVID-19 waves: variant dynamics and control // *Sci. Rep.* – 2022. – Vol. 12. – P. 9332. DOI: 10.1038/s41598-022-13371-2
7. Five consecutive epidemiological waves of COVID-19: a population-based cross-sectional study on characteristics, policies, and health outcome / R. Amin, M.-R. Sohrabi, A.-R. Zali, K. Hannani // *BMC Infect. Dis.* – 2022. – Vol. 22, № 1. – P. 906. DOI: 10.1186/s12879-022-07909-y
8. Анализ эпидемиологической ситуации по COVID-19: вторая волна / Т.Е. Попова, О.Г. Тихонова, А.Н. Романова, А.А. Тапшахов, М.Е. Андреев // *Якутский медицинский журнал.* – 2021. – № 1 (73). – С. 61–64. DOI: 10.25789/YMJ.2021.73.17
9. Анализ эпидемиологической ситуации по COVID-19: третья и четвертая волны / Т.Е. Попова, О.Г. Тихонова, А.Н. Романова, А.А. Тапшахов, М.Е. Андреев, Э.Э. Конникова // *Якутский медицинский журнал.* – 2021. – № 4 (76). – С. 72–75. DOI: 10.25789/YMJ.2021.76.17
10. Сравнение первых трех волн пандемии COVID-19 в России (2020–2021 гг.) / Л.С. Карпова, К.А. Столяров, Н.М. Поповцева, Т.П. Столярова, Д.М. Даниленко // *Эпидемиология и вакцинопрофилактика.* – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 4–16. DOI: 10.31631/2073-3046-2022-21-2-4-16
11. Характеристика эпидемиологической ситуации по COVID-19 в Санкт-Петербурге / В.Г. Акимкин, С.Н. Кузин, Е.Н. Колосовская, Е.Н. Кудрявцева, Т.А. Семенов, А.А. Плоскирева, Д.В. Дубоделов, Е.В. Тиванова [и др.] // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии.* – 2021. – Т. 98, № 5. – С. 497–511. DOI: 10.36233/0372-9311-154
12. Особенности эпидемического процесса COVID-19 в каждую из пяти волн заболеваемости в России / Л.С. Карпова, А.Б. Комиссаров, К.А. Столяров, Н.М. Поповцева, Т.П. Столярова, М.Ю. Пелих, Д.А. Лиознов // *Эпидемиология и вакцинопрофилактика.* – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 23–36. DOI: 10.31631/2073-3046-2023-22-2-23-36
13. Махова В.В., Малецкая О.В., Куличенко А.Н. Особенности эпидемического процесса и эпидемические риски COVID-19 в субъектах Северного Кавказа // *Эпидемиология и вакцинопрофилактика.* – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 74–81. DOI: 10.31631/2073-3046-2023-22-1-74-81
14. Genomic epidemiology of the early stages of the SARS-CoV-2 outbreak in Russia / A.B. Komissarov, A.V. Fadeev, M.V. Sergeeva, A.A. Ivanova, D.M. Danilenko, D. Lioznov, K.R. Safina, G.A. Bazykin [et al.] // *Nat. Commun.* – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 649. DOI: 10.1038/s41467-020-20880-z
15. Сравнительный анализ разнообразия линий SARS-CoV-2, циркулирующих в Омской области в 2020–2022 годах / Е.А. Градобоева, Ж.С. Тюлько, А.В. Фадеев, А.Г. Василенко, В.В. Якименко // *Эпидемиология и вакцинопрофилактика.* – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 24–33. DOI: 10.31631/2073-3046-2022-6-24-33
16. Uncovering COVID-19 infection determinants in Portugal: towards an evidence-based spatial susceptibility index to support epidemiological containment policies / A. Alves, N. Marques da Costa, P. Morgado, E. Marques da Costa // *Int. J. Health Geogr.* – 2023. – Vol. 22. – P. 8. DOI: 10.1186/s12942-023-00329-4
17. Модифицирующее влияние факторов среды обитания на течение эпидемического процесса COVID-19 / Н.В. Зайцева, А.Ю. Попова, С.В. Клейн, А.Н. Летюшев, Д.А. Кирьянов, М.В. Глухих, В.М. Чигвинцев // *Гигиена и санитария.* – 2022. – Т. 101, № 11. – С. 1274–1282. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-11-1274-1282
18. Socioeconomic inequalities in COVID-19 in a European urban area: Two waves, two patterns / M. Marí-Dell'olmo, M. Gotsens, M.I. Pasarin, M. Rodríguez-Sanz, L. Artazcoz, P. Garcia de Olalla, C. Rius, C. Borrell // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2021. – Vol. 18, № 3. – P. 1256. DOI: 10.3390/ijerph18031256
19. Importance of collecting data on socioeconomic determinants from the early stage of the COVID-19 outbreak onwards / S. Khalatbari-Soltani, R.C. Cumming, C. Delpierre, M. Kelly-Irving // *J. Epidemiol. Community Health.* – 2020. – Vol. 74, № 8. – P. 620–623. DOI: 10.1136/jech-2020-214297

20. Kumar S., Karuppanan K., Subramaniam G. Omicron (BA.1) and sub-variants (BA.1.1, BA.2, and BA.3) of SARS-CoV-2 spike infectivity and pathogenicity: A comparative sequence and structural-based computational assessment // *J. Med. Virol.* – 2022. – Vol. 94, № 10. – P. 4780–4791. DOI: 10.1002/jmv.27927
21. Correlation between Population Density and COVID-19 Cases during the Third Wave in Malaysia: Effect of the Delta Variant / N.H. Md Iderus, S.S. Lakha Singh, S. Mohd Ghazali, C.Y. Ling, T.C. Vei, A.S.S. Md Zamri, N.A. Jaafar, Q. Ruslan [et al.] // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2022. – Vol. 19, № 12. – P. 7439. DOI: 10.3390/ijerph19127439
22. Sy K.T.L., White L.F., Nichols B.E. Population density and basic reproductive number of COVID-19 across United States counties // *PLoS One.* – 2021. – Vol. 16, № 4. – P. e0249271. DOI: 10.1371/journal.pone.0249271
23. Temperature and population density influence SARS-CoV-2 transmission in the absence of nonpharmaceutical interventions / T.P. Smith, S. Flaxman, A.S. Gallinat, S.P. Kinoshian, M. Stemkovski, H.J.T. Unwin, O.J. Watson, C. Whittaker [et al.] // *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* – 2021. – Vol. 118, № 25. – P. e2019284118. DOI: 10.1073/pnas.2019284118
24. Hamidi S., Hamidi I. Subway Ridership, Crowding, or Population Density: Determinants of COVID-19 Infection Rates in New York City // *Am. J. Prev. Med.* – 2021. – Vol. 60, № 5. – P. 614–620. DOI: 10.1016/j.amepre.2020.11.016
25. Enhanced fusogenicity and pathogenicity of SARS-CoV-2 Delta P681R mutation / A. Saito, T. Irie, R. Suzuki, T. Maemura, H. Nasser, K. Urie, Y. Kosugi, K. Shirakawa [et al.] // *Nature.* – 2022. – Vol. 602, № 7896. – P. 300–306. DOI: 10.1038/s41586-021-04266-927
26. Association between temperature and COVID-19 transmission in 153 countries / M. Liu, Z. Li, M. Liu, Y. Zhu, Y. Liu, M.W. Nzoyoum Kuetche, J. Wang, X. Wang [et al.] // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* – 2022. – Vol. 29, № 11. – P. 16017–16027. DOI: 10.1007/s11356-021-16666-528
27. The starting dates of COVID-19 multiple waves / P.R. de Lima Gianfelice, R. Oyarzabal, A. Cunha Jr., J.M. Vicensi Grzybowski, F. da Conceição Batista, E.E.N. Macau // *Chaos.* – 2022. – Vol. 32, № 3. – P. e031101. DOI: 10.1063/5.0079904

Зайцева Н.В., Клейн С.В., Глухих М.В. Пространственно-динамическая неоднородность течения эпидемического процесса COVID-19 в субъектах Российской Федерации (2020–2023 гг.) // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 2. – С. 4–16. DOI: 10.21668/health.risk/2023.2.01

UDC 613; 614

DOI: 10.21668/health.risk/2023.2.01.eng



Research article

SPATIAL-DYNAMIC HETEROGENEITY OF THE COVID-19 EPIDEMIC PROCESS IN THE RUSSIAN FEDERATION REGIONS (2020–2023)

N.V. Zaitseva, S.V. Kleyn, M.V. Glukhikh

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies,
82 Monastyrskaya Str., Perm, 614045, Russian Federation

The coronavirus pandemic has produced considerable effects on medical and demographic processes worldwide and in Russia in particular. The epidemic process involved a sequence of circulating SARS-CoV-2 virus strains with different mutations and this reflected in registered levels of incidence and mortality against spatial heterogeneity of socioeconomic factors in different RF regions.

The aim of this study was to analyze spatial-dynamic heterogeneity of the COVID-19 epidemic process in the RF regions in 2020–2023.

© Zaitseva N.V., Kleyn S.V., Glukhikh M.V., 2023

Nina V. Zaitseva – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Director (e-mail: znv@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-34; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2356-1145>).

Svetlana V. Kleyn – Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Head of the Department for Systemic Procedures of Sanitary-Hygienic Analysis and Monitoring (e-mail: kleyn@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>).

Maxim V. Glukhikh – Candidate of Medical Sciences, Junior Researcher at the Department for Systemic Procedures of Sanitary-Hygienic Analysis and Monitoring (e-mail: gluhih@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4755-8306>).

We performed retrospective analysis of incidence and mortality at the national and regional levels. The analysis relied on departmental statistical data provided by Rospotrebnadzor as well as public data that described the intensive indicators of the COVID-19 epidemic process and results obtained by sequencing of biomaterial samples to identify COVID-19 in them in 2020–2023.

In 2020–2023 we identified five ‘waves’ of the COVID-19 epidemic processes that interchanged sequentially. Within these waves, RF regions reached local peaks in incidence with different speed. According to available data, the highest primary incidence among all the RF regions in 2021–2022 was established in Saint Petersburg (12,821.8 cases and 17,341.2 cases per 100 thousand people); the highest mortality in 2021 was detected in the Tver region (427 cases per 100 thousand people) and in the Arkhangelsk region in 2022 (350.9 cases per 100 thousand people). The greatest number of the RF regions where the incidence due to the disease was higher than its average annual level was established in October, November, December 2021 and February 2022 (51, 68, 51 and 82 RF regions accordingly).

The established spatial-dynamic heterogeneity of the epidemic process may indicate that this process can be largely determined by differences in the initial socioeconomic, medical and demographic characteristics of the RF regions.

Limitations of the study are related to the used statistical data on registered incidence and mortality as well as the concept of the epidemiological ‘wave’ accepted in it.

The identified territorial differences in the COVID-19 epidemic process should be considered when developing optimal regulatory impacts including those aimed at predicting probable emergent infections.

Keywords: epidemiological process, COVID-19, epidemiological waves, incidence, mortality, RF regions, epidemiological analysis.

References

1. Konings F., Perkins M.D., Kuhn J.H., Pallen M.J., Alm E.J., Archer B.N., Barakat A., Bedford T. [et al.]. SARS-CoV-2 Variants of Interest and Concern naming scheme conducive for global discourse. *Nat. Microbiol.*, 2021, vol. 6, no. 7, pp. 821–823. DOI: 10.1038/s41564-021-00932-w
2. XBB.1.5 Updated Risk Assessment, 24 February 2023. WHO. Available at: https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/22022024xbb.1.5ra.pdf?sfvrsn=7a92619e_3 (April 20, 2023).
3. XBB.1.16 Initial Risk Assessment, 17 April 2023. WHO. Available at: https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/21042023xbb.1.16ra-v2.pdf?sfvrsn=84577350_1 (April 20, 2023).
4. Zhang S.X., Arroyo Marioli F., Gao R., Wang S. A Second Wave? What Do People Mean by COVID Waves? – A Working Definition of Epidemic Waves. *Risk Manag. Healthc. Policy*, 2021, vol. 14, pp. 3775–3782. DOI: 10.2147/RMHP.S326051
5. Xiang Y., Jia Y., Chen L., Guo L., Shu B., Long E. COVID-19 epidemic prediction and the impact of public health interventions: A review of COVID-19 epidemic models. *Infect. Dis. Model*, 2021, vol. 6, pp. 324–342. DOI: 10.1016/j.idm.2021.01.001
6. Dutta A. COVID-19 waves: variant dynamics and control. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, pp. 9332. DOI: 10.1038/s41598-022-13371-2
7. Amin R., Sohrabi M.-R., Zali A.-R., Hannani K. Five consecutive epidemiological waves of COVID-19: a population-based cross-sectional study on characteristics, policies, and health outcome. *BMC Infect. Dis.*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 906. DOI: 10.1186/s12879-022-07909-y
8. Popova T.E., Tikhonova O.G., Romanova A.N., Tappakhov A.A., Andreev M.E. Analysis of the epidemiological situation on COVID-19: a second wave. *Yakutskii meditsinskii zhurnal*, 2021, no. 1 (73), pp. 61–64. DOI: 10.25789/YMJ.2021.73.17 (in Russian).
9. Popova T.E., Tikhonova O.G., Romanova A.N., Tappakhov A.A., Andreev M.E., Konnikova E.E. Analysis of the epidemiological situation on COVID-19: third and fourth waves. *Yakutskii meditsinskii zhurnal*, 2021, no. 4 (76), pp. 72–75. DOI: 10.25789/YMJ.2021.76.17 (in Russian).
10. Karpova L.S., Stolyarov K.A., Popovtseva N.M., Stolyarova T.P., Danilenko D.M. Comparison of the first three waves of the COVID-19 pandemic in Russia in 2020–21. *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 4–16. DOI: 10.31631/2073-3046-2022-21-2-4-16 (in Russian).
11. Akimkin V.G., Kuzin S.N., Kolosovskaya E.N., Kudryavtseva E.N., Semenenko T.A., Ploskireva A.A., Dubodelov D.V., Tivanova E.V. [et al.]. Assessment of the COVID-19 epidemiological situation in St. Petersburg. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*, 2021, vol. 98, no. 5, pp. 497–511. DOI: 10.36233/0372-9311-154 (in Russian).
12. Karpova L.S., Komissarov A.B., Stolyarov K.A., Popovtseva N.M., Stolyarova T.P., Pelikh M.Yu., Lioznov D.A. Features of the COVID-19 Epidemic Process in Each of the of the Five Waves of Morbidity in Russia. *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika*, 2023, vol. 22, no. 2, pp. 23–36. DOI: 10.31631/2073-3046-2023-22-2-23-36 (in Russian).
13. Makhova V.V., Maletskaya O.V., Kulichenko A.N. Features of the epidemic process and epidemic risks of COVID-19 in the subjects of the Northern Caucasus. *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 74–81. DOI: 10.31631/2073-3046-2023-22-1-74-81 (in Russian).
14. Komissarov A.B., Fadeev A.V., Sergeeva M.V., Ivanova A.A., Danilenko D.M., Lioznov D., Safina K.R., Bazykin G.A. [et al.]. Genomic epidemiology of the early stages of the SARS-CoV-2 outbreak in Russia. *Nat. Commun.*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 649. DOI: 10.1038/s41467-020-20880-z
15. Gradoboeva E.A., Tyulko Zh.S., Fadeev A.V., Vasilenko A.G., Yakimenko V.V. Comparative analysis of the diversity of SARS-CoV-2 lines circulating in Omsk region in 2020–2022. *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika*, 2022, vol. 21, no. 6, pp. 24–33. DOI: 10.31631/2073-3046-2022-6-24-33 (in Russian).

16. Alves A., Marques da Costa N., Morgado P., Marques da Costa E. Uncovering COVID-19 infection determinants in Portugal: towards an evidence-based spatial susceptibility index to support epidemiological containment policies. *Int. J. Health Geogr.*, 2023, vol. 22, pp. 8. DOI: 10.1186/s12942-023-00329-4
17. Zaitseva N.V., Popova A.Yu., Kleyn S.V., Letyushev A.N., Kiryanov D.A., Glukhikh M.V., Chigvintsev V.M. Modifying impact of environmental factors on the course of an epidemic process. *Gigiena i sanitariya*, 2022, vol. 101, no. 11, pp. 1274–1282. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-11-1274-1282 (in Russian).
18. Mari-Dell'olmo M., Gotsens M., Pasarín M.I., Rodríguez-Sanz M., Artazcoz L., Garcia de Olalla P., Rius C., Borrell C. Socioeconomic inequalities in COVID-19 in a European urban area: Two waves, two patterns. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 1256. DOI: 10.3390/ijerph18031256
19. Khalatbari-Soltani S., Cumming R.C., Delpierre C., Kelly-Irving M. Importance of collecting data on socioeconomic determinants from the early stage of the COVID-19 outbreak onwards. *J. Epidemiol. Community Health*, 2020, vol. 74, no. 8, pp. 620–623. DOI: 10.1136/jech-2020-214297
20. Kumar S., Karuppanan K., Subramaniam G. Omicron (BA.1) and sub-variants (BA.1.1, BA.2, and BA.3) of SARS-CoV-2 spike infectivity and pathogenicity: A comparative sequence and structural-based computational assessment. *J. Med. Virol.*, 2022, vol. 94, no. 10, pp. 4780–4791. DOI: 10.1002/jmv.27927
21. Md Iderus N.H., Lakha Singh S.S., Mohd Ghazali S., Ling C.Y., Vei T.C., Md Zamri A.S.S., Jaafar N.A., Ruslan Q. [et al.]. Correlation between Population Density and COVID-19 Cases during the Third Wave in Malaysia: Effect of the Delta Variant. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no. 12, pp. 7439. DOI: 10.3390/ijerph19127439
22. Sy K.T.L., White L.F., Nichols B.E. Population density and basic reproductive number of COVID-19 across United States counties. *PLoS One*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. e0249271. DOI: 10.1371/journal.pone.0249271
23. Smith T.P., Flaxman S., Gallinat A.S., Kinoshian S.P., Stemkovski M., Unwin H.J.T., Watson O.J., Whittaker C. [et al.]. Temperature and population density influence SARS-CoV-2 transmission in the absence of nonpharmaceutical interventions. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 2021, vol. 118, no. 25, pp. e2019284118. DOI: 10.1073/pnas.2019284118
24. Hamidi S., Hamidi I. Subway Ridership, Crowding, or Population Density: Determinants of COVID-19 Infection Rates in New York City. *Am. J. Prev. Med.*, 2021, vol. 60, no. 5, pp. 614–620. DOI: 10.1016/j.amepre.2020.11.016
25. Saito A., Irie T., Suzuki R., Maemura T., Nasser H., Uriu K., Kosugi Y., Shirakawa K. [et al.]. Enhanced fusogenicity and pathogenicity of SARS-CoV-2 Delta P681R mutation. *Nature*, 2022, vol. 602, no. 7896, pp. 300–306. DOI: 10.1038/s41586-021-04266-9
26. Liu M., Li Z., Liu M., Zhu Y., Liu Y., Nzoyoum Kuetche M.W., Wang J., Wang X. [et al.]. Association between temperature and COVID-19 transmission in 153 countries. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2022, vol. 29, no. 11, pp. 16017–16027. DOI: 10.1007/s11356-021-16666-5
27. de Lima Gianfelice P.R., Oyarzabal R., Cunha A. Jr., Vicensi Grzybowski J.M., da Conceição Batista F., Macau E.E.N. The starting dates of COVID-19 multiple waves. *Chaos*, 2022, vol. 32, no. 3, pp. e031101. DOI: 10.1063/5.0079904

Zaitseva N.V., Kleyn S.V., Glukhikh M.V. Spatial-dynamic heterogeneity of the COVID-19 epidemic process in the Russian Federation regions (2020–2023). *Health Risk Analysis*, 2023, no. 2, pp. 4–16. DOI: 10.21668/health.risk/2023.2.01.eng

Получена: 25.04.2023

Одобрена: 20.06.2023

Принята к публикации: 25.06.2023