

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

© Асатрян М.Н., Герасимук Э.Р., Логунов Д.Ю., Семенов Т.А., Гинцбург А.Л., 2020



Прогнозирование динамики заболеваемости COVID-19 и планирование мероприятий по вакцинопрофилактике населения Москвы на основе математического моделирования

Асатрян М.Н.^{1✉}, Герасимук Э.Р.², Логунов Д.Ю.¹, Семенов Т.А.¹, Гинцбург А.Л.¹

¹ФГБУ «Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи», 123098, Москва, Россия;

²Государственный университет «Дубна», 141982, Дубна, Россия

Введение. Распространение вируса SARS-CoV-2 продолжается во всем мире. Большие надежды возлагаются на вакцины, которые разрабатываются во многих ведущих научных центрах мира, в том числе в России.

Цель исследования — с помощью разработанной эпидемиологической модели провести анализ и прогноз динамики заболеваемости COVID-19 на территории Москвы и определить основные подходы к организации противозидемических мероприятий (ПЭМ) с учетом вакцинации населения на сезон 2020/2021 г.

Материалы и методы. Эпидемиологическая модель разработана на базе отечественной теории математического моделирования эпидемий «Эпиддинамика». Прогнозную оценку на среднесрочный период проводили на основе прогнозных сценариев развития эпидемической ситуации при различных изменениях ПЭМ (по изоляции инфицированных и контактных лиц, прерыванию механизма передачи), в том числе с учетом различных объемов вакцинации населения Москвы.

Результаты и обсуждение. Вычислительные эксперименты показали, что существует вероятность подъема заболеваемости при ослаблении ПЭМ в отсутствие вакцинации населения. При этом высота пика ежедневной заболеваемости зависит от степени снижения ПЭМ и практически не зависит от времени начала их снижения. Проведение вакцинации на фоне ослабления ПЭМ позволяет снизить заболеваемость, однако степень влияния зависит от времени начала, объема и скорости охвата населения вакцинацией.

Заключение. Результаты вычислительных экспериментов показали, что для предотвращения значительного подъема заболеваемости COVID-19 на фоне проводимой вакцинации необходимо поддерживать остальные ПЭМ до достижения объема охвата вакцинацией около 2 млн человек. Оптимальным представляется сохранение мер по изоляции и прерыванию механизма передачи до достижения суммарного объема охвата вакцинацией 4 млн человек, после которого возможно значительное ослабление ограничительных мер; при охвате вакцинацией 50% населения Москвы возможна их полная отмена.

Ключевые слова: COVID-19; SARS-CoV-2; эпидемический процесс; эпидемиологическая модель; прогнозные сценарии; противозидемические мероприятия; прогнозно-аналитические исследования.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Асатрян М.Н., Герасимук Э.Р., Логунов Д.Ю., Семенов Т.А., Гинцбург А.Л. Прогнозирование динамики заболеваемости COVID-19 и планирование мероприятий по вакцинопрофилактике населения Москвы на основе математического моделирования. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2020; 97(4): 289–302.

DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2020-97-4-1>

Поступила 06.08.2020
Принята в печать 17.08.2020

Predicting the dynamics of Covid-19 incidence and planning preventive vaccination measures for Moscow population based on mathematical modeling

Marina N. Asatryan^{1✉}, Elita R. Gerasimuk², Denis Yu. Logunov¹,
Tatyana A. Semenenko¹, Aleksander L. Gintsburg¹

¹N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, 123098, Moscow, Russia;

²Dubna State University, 141982, Dubna, Russia

The results of the predictive analytical studies on Covid-19 incidence dynamics in Moscow, taking into account different changes in epidemic prevention measures, including vaccination coverage of the population, are presented.

Research Objective. Using the new epidemiological model for analysis and prediction of the Covid-19 incidence dynamics in Moscow and outlining main strategies in implementing epidemic prevention measures (EPMs), including vaccination in 2020/2021.

Materials and methods. The epidemiological model is based on the Russian approach to mathematical modeling of epidemics, known as Epidynamics. The medium-term forecasting incorporated probable scenarios of epidemic development with different EPMs (isolation of the infected and contacts, breaking the transmission chains), including different rates of vaccination coverage in Moscow.

Results and discussion. The computational simulations demonstrated that the incidence rate is likely to increase with scaling down EPMs and zero vaccination coverage. At the same time, the daily incidence rate depends on the degree of EPMs reduction and basically does not depend on the time when the reduction begins. With scaled-down EPMs, vaccination can decrease the incidence, though its effectiveness will depend on the time of its commencement, coverage and rate.

Conclusion. The computational simulations showed that the vaccination will be efficient for prevention of new surges in COVID-19 cases only if the other EPMs (isolation of the infected and contacts, breaking the transmission chains) are still in place until the vaccination coverage reaches about 2 million people. Ideally, the measures aimed at isolation and breaking of transmission chains should be continued until the total vaccination coverage reaches 4 million people, after which the restrictive measures can be scaled down significantly. With vaccination coverage of 50% of the population of Moscow, the restrictive measures can be completely discontinued.

Keywords: Covid-19, SARS-CoV-2, epidemic process, epidemiological model, potential scenarios, epidemic prevention measures, predictive analytical studies.

Acknowledgments. The study had no sponsorship.

Conflict of interest. The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Asatryan M.N., Gerasimuk E.R., Logunov D.Yu., Semenenko T.A., Gintsburg A.L. [Predicting the dynamics of Covid-19 incidence and planning preventive vaccination measures for Moscow population based on mathematical modeling]. *Journal of microbiology, epidemiology and immunobiology = Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*. 2020; 97(4): 289–302. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2020-97-4-1>

Received 6 August 2020

Accepted 17 August 2020

*Посвящается памяти
д.т.н. Боева Бориса Васильевича*

Введение

Проблема возникновения эпидемий и пандемий инфекционных заболеваний и поиск мер по их предотвращению никогда не потеряют свою актуальность. Об этом в 2005 г. писал заведующий лабораторией эпидемиологической кибернетики НИИЭМ им. Н.Ф. Гамалеи д.т.н. Б.В. Боев: «Согласно прогнозам, в первой половине текущего века в любой географической точке планеты следует ожидать эпидемии или вспышки как «новых», так и «старых» инфекционных заболеваний. В этих условиях особое значение приобретают опережающие научные исследования по анализу и прогнозу вероятных сценариев развития эпидемий опасных инфекционных заболеваний, которые могут появиться в результате чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [1].

После первых сообщений в декабре 2019 г. о вспышке заболеваний пневмонией в Ухане (КНР) новый коронавирус быстро распространился по всем странам и континентам. К началу августа 2020 г. количество зарегистрированных случаев инфицирования SARS-CoV-2 составило более 18 млн, погибло по причинам, связанным с коронавирусом, более 688 тыс. человек. В России, благодаря введенным противоэпидемическим мерам, удалось значительно уменьшить скорость распространения вируса. Тем не менее, по данным официальной статистики, к началу августа 2020 г. в России выявлено более 850 тыс. инфицированных SARS-CoV-2 и зафиксировано 14 тыс. летальных случаев. Однако зарегистрированное количество инфицированных лиц представляет собой лишь часть их реального числа. Доля невыявленных инфицированных лиц,

по оценкам различных исследований, может составлять от 11,6 до 35,8% [2–5].

Распространение вируса SARS-CoV-2 продолжается во всем мире. Большие надежды возлагаются на вакцины, которые разрабатываются во многих ведущих научных центрах мира, в том числе в России^{1,2}. Новая вакцина от коронавируса, разработанная в Национальном центре эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи, уже успешно прошла этап клинических испытаний, после которого планируется наладить промышленное производство и начать проведение вакцинации населения.

Применение адекватной эпидемиологической модели позволяет «восстановить» данные по заболеваемости и на их основе провести вычислительные эксперименты на компьютере по различным вариантам развития эпидемической ситуации. В этой связи представляется актуальным проведение прогнозно-аналитических исследований на основе разработанной математической модели распространения SARS-CoV-2 с целью поиска наиболее приемлемых сценариев противоэпидемических мероприятий (ПЭМ) с учетом вакцинации населения.

Цель исследования — с помощью эпидемиологической модели провести анализ и прогноз динамики заболеваемости COVID-19 на территории Москвы и определить основные подходы к организации ПЭМ с учетом вакцинации населения на сезон 2020/2021 гг.

Материалы и методы

При разработке эпидемиологической модели использованы доступные публикации об особенностях клиники, патогенеза и эпидемиологии COVID-19; статистические данные о регистрации заболеваемости COVID-19 и количестве летальных случаев в Москве за период наблюдения³; сведения Росстата о численности населения Москвы (12,678 млн человек)⁴.

Была применена детерминированная математическая модель, разработанная на базе теории «Эпиддинамика», которая позволяет на основе

данных о закономерностях развития инфекционного процесса (среди индивидуумов) получить представление о динамике эпидемического процесса в популяции [6]. На основе теории «Эпиддинамика» были успешно реализованы математические модели для изучения распространения значимых инфекционных и неинфекционных заболеваний [7–11].

За основу была взята модель типа SEIRF, которая описывает динамику «потока» лиц по соответствующим стадиям-состояниям: восприимчивые (S), в инкубационной стадии (E), в инфекционной стадии (I), с исходами болезни — реконвалесценция (R) или смерть (F). Для моделирования были определены следующие длительности стадий: инкубация — 2–14 дней, клиническая (инфекционная) стадия — 7–14 дней [12]. Вероятность перехода индивидуума в следующую стадию задается функциями: $\gamma(\tau)$ — функция развития периода инкубации; $\delta(\tau)$ — функция развития инфекционного периода. Математическая модель развития эпидемии имеет вид системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями [1]. Модель успешно верифицирована на статистических данных о заболеваемости (с учетом «восстановленных» данных). В модели не учитывались сезонные изменения вирулентности вируса, а также сделано предположение о том, что вирус существенно не мутирует за сезон 2020/2021 гг. При разработке прогнозных сценариев с учетом использования новой вакцины сделано предположение о 70% иммунологической эффективности.

Исследования проводились в несколько этапов:

1. Проведение процедуры «восстановления» данных о заболеваемости COVID-19 и выбор базового сценария.
2. Прогнозно-аналитические исследования, включающие:
 - 2.1. Анализ и прогноз текущей эпидемической ситуации (по базовому сценарию).
 - 2.2. Вычислительные эксперименты, проведенные по прогнозным сценариям.

На заключительном этапе проведена интерпретация полученных результатов и сделаны выводы.

Результаты и обсуждение

«Восстановление» данных о заболеваемости и выбор базового сценария

Особенностью новой коронавирусной инфекции является наличие случаев бессимптомного и легкого течения, что способствует передаче инфекции в популяции [13]. Если больные с тяжелым течением и средней тяжести регистрируются в связи с обращением в лечебные учреждения, то лица с легким и бессимптомным течением могут не обратиться за помощью. До проведения широкомас-

¹ Официальный сайт Министерства здравоохранения по COVID-19 в России. URL: <https://covid19.rosminzdrav.ru/mihail-murashko-17-vakczin-protiv-koronavirusa-pokazali-sebua-kak-perspektivnye/> (дата обращения 20.07.2020).

² ВОЗ. Временные рекомендации. Механизм для принятия решений при проведении кампаний массовой вакцинации в условиях COVID-19. 20.05.2020. URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/332159/WHO-2019-nCoV-Frame-work_Mass_Vaccination-2020.1-rus.pdf (дата обращения 20.07.2020).

³ Стопкоронавирус.рф. Отчеты Коммуникационного центра Правительства РФ по ситуации с коронавирусом. URL: <https://стопкоронавирус.рф/info/ofdoc/reports> (дата обращения 20.07.2020).

⁴ Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://gks.ru> (дата обращения 20.07.2020).

штабных сероэпидемиологических исследований лишь небольшая часть бессимптомных лиц могла быть выявлена при тщательном эпидемиологическом расследовании контактов [14]. Таким образом, количество зарегистрированных случаев представляет собой лишь «видимую часть айсберга», а для правильной трактовки эпидемической ситуации требуется иметь полную картину заболеваемости. Поэтому первый этап наших исследований заключался в проведении расчетов по «восстановлению» исходных данных.

«Восстановление» данных заболеваемости COVID-19 среди населения Москвы проведено на основании расчетов по двум показателям, которые затем сравнивали:

1) по оценке верхней и нижней границы летальности от COVID-19 (Infection-Fatality Rate — IFR);

2) по оценке иммунной прослойки населения Москвы, основанной на исследовании репрезентативной выборки.

По данным систематического обзора литературы и метаанализа результатов исследований Г. Meyerowitz-Katz и соавт. [15] был определен IFR. В отличие от показателя CFR (Case-Fatality Rate), который соответствует отношению количества летальных случаев к количеству зарегистрированных (выявленных) случаев заболевания, IFR вычисляется как отношение количества летальных случаев от инфекции к количеству всех инфицированных лиц (включая бессимптомные и легкие случаи инфекции). Показатель летальности IFR в европейских странах составил в среднем 0,64% с доверительным интервалом (ДИ) 0,50–0,78% [15].

Данные оперативного штаба о летальных случаях в Москве соответствуют количеству умерших с основной причиной смерти COVID-19⁵. В соответствии с международными методическими рекомендациями по удостоверению и кодированию COVID-19 в качестве причины смерти⁶ исходные данные были пересчитаны с учетом случаев, когда вирус SARS-CoV-2 оказал существенное влияние на развитие смертельных осложнений заболевания^{7,8}.

⁵ Официальный сайт Министерства здравоохранения по COVID-19 в России. URL: https://static-1.rosminzdrav.ru/system/attachments/attaches/000/050/527/original/27052020_MR_STAT_1.pdf (дата обращения 20.07.2020).

⁶ ВОЗ. Международные методические рекомендации по удостоверению и кодированию COVID-19 в качестве причины смерти. 20.04.2020. URL: https://www.who.int/classifications/icd/Guidelines_Cause_of_Death_COVID-19-20200420-RU.pdf?ua=1 (дата обращения 20.07.2020).

⁷ Официальный сайт Министерства здравоохранения по COVID-19 в России. URL: <https://mosgorzdrav.ru/professional/covid-19> (дата обращения 20.07.2020).

⁸ WHO. Media briefing on #COVID19 with @DrTedros. 10.06.2020. URL: <https://twitter.com/WHO/status/1270739116078981120> (дата обращения 20.07.2020).

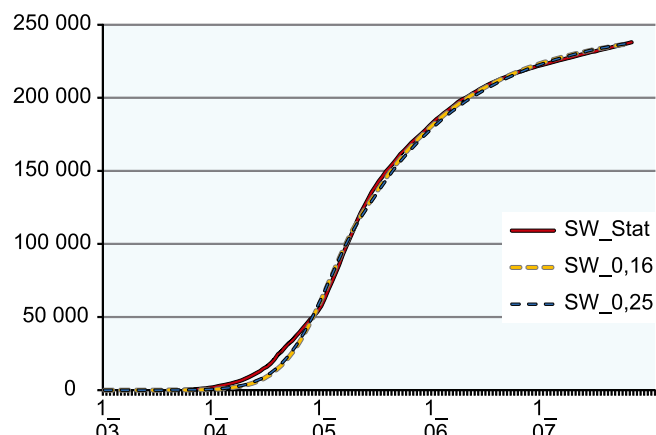


Рис. 1. Результат верификации модели — сравнение модельных (SW_0,16; SW_0,25) и статистических данных кумулятивной заболеваемости (выявленные случаи, SW_Stat).

Здесь и на рис. 2–10: по оси абсцисс — даты; по оси ординат — число случаев.

Fig. 1. The result of model verification is a comparison of models (SW_0,16; SW_0,25) and statistical data on cumulative morbidity (detected cases, SW_Stat).

Here and in Figs. 2–9: the horizontal axis shows the dates; the vertical axis shows the number of cases.

В результате расчетов в соответствии с данными Росстата⁹ получается, что количество летальных случаев за апрель 2020 г. составило 850 + 360 = 1165, за май 2020 г. — 2757 + 980 = 3737. С учетом того, что за март 2020 г. количество летальных случаев на несколько порядков ниже, чем в апреле и в мае (без относительного разделения на причины), для расчетов были взяты данные оперативного штаба в количестве 24 случаев. Таким образом, суммарное количество летальных случаев с момента официальной регистрации до 01.06.2020 составило 4926.

Взяв за основу количество летальных случаев на 01.06.2020, мы провели расчеты с помощью модели с целью поиска отношения числа выявленных случаев заболевания к «восстановленным», при которых расчетное (модельное) количество летальных случаев на 01.06.2020 будет наиболее близким к 4926. Для верхней границы показателя летальности (IFR = 0,78%) отношение выявленных (зарегистрированных) случаев по официальной статистике к «восстановленным» данным составляет примерно 25%, или 1 : 4. Например, кумулятивная заболеваемость на 01.06.2020 составляет по модели 718 687 человек, а данные официальной статистики — 183 088. Для нижней границы показателя летальности (IFR = 0,50%) отношение выявленных (общаемых) случаев по официальной статистике к

⁹ Естественное движение населения в разрезе субъектов Российской Федерации за январь–май 2020 года. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/yjmHZNUV/edn05-2020.htm> (дата обращения 20.07.2020).

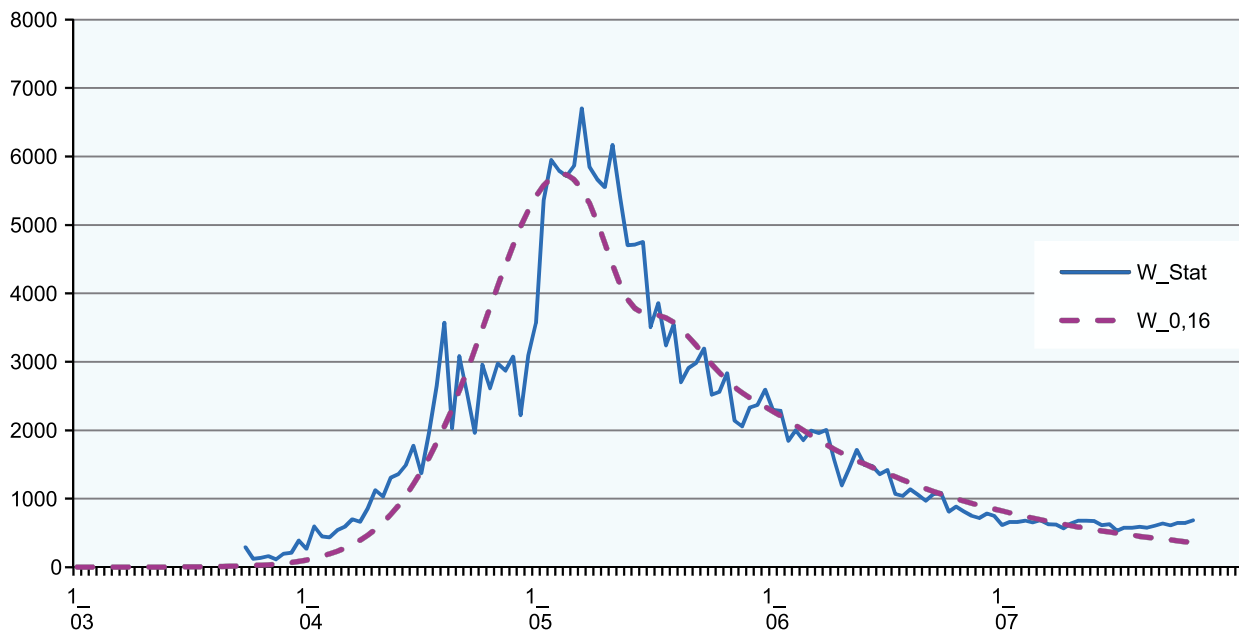


Рис. 2. Выявленные (зарегистрированные) случаи ежедневной заболеваемости. Статистические данные — W_Stat, модельные — W_0,16.

Fig. 2. Detected (reported) cases of daily incidence. Statistical data — W_Stat, model — W_0,16.

«восстановленным» с помощью модели данным — примерно 16%, или 1 : 6. Например, кумулятивная заболеваемость на 01.06.2020 составляет по модели 1 134 836 человек, а данные официальной статистики — 183 088.

Кривая верифицированной кумулятивной заболеваемости (выявленные случаи) для двух вариантов расчетов (1 : 6 и 1 : 4) хорошо совпадает с кривой официальной статистики (**рис. 1**).

Следующим этапом расчетов для обоснования и выбора «базового» сценария из двух верифицированных стал анализ результатов тестов на определение антител в рандомизированных выборочных исследованиях, которые проводились в Москве с 15 по 23 мая 2020 г. Согласно официальным источникам и сообщениям пресс-службы Правительства Москвы, по результатам этого исследования вируснейтрализующие антитела к SARS-CoV-2 были определены у 12,5% населения города¹⁰ [16]. С учетом информации о специфичности и чувствительности использованных тест-систем был получен «расчетный» показатель доли инфицированного населения. Для этого из заявленной доли 12,5% были вычтены возможные ложноположительные случаи (3,8%) и добавлены ложноотрицательные случаи (0,2%), в итоге получилось 8,9% населения Москвы, или

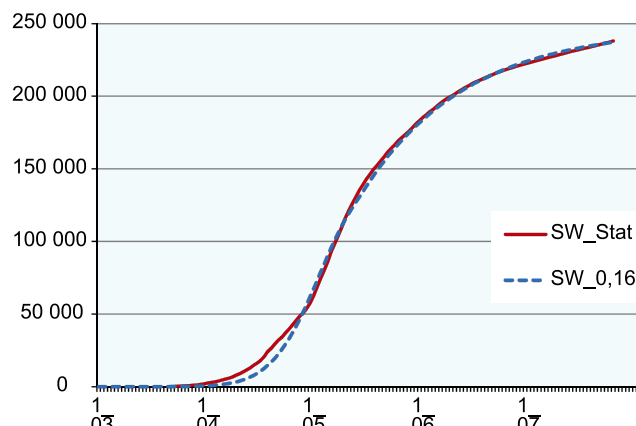


Рис. 3. Выявленные (зарегистрированные) случаи кумулятивной заболеваемости.

Статистические данные — SW_Stat, модельные — SW_0,16.
Fig. 3. Detected (reported) cases of cumulative incidence. Statistical data — SW_Stat, model — SW_0,16.

1130 тыс. человек¹¹. Эта оценка близка к результатам расчетов отношения выявленных случаев к «восстановленным» данным по кумулятивной заболеваемости, которая составляет 1 : 6 (IFR = 0,50%).

Таким образом, для дальнейших исследований в качестве «базового» выбран сценарий с показателем летальности 0,50%, который был обозначен как сценарий C0. На **рис. 2, 3** приведены графики со-

¹⁰ Официальный портал Мэра и Правительства Москвы. Иммуитет к коронавирусу формируется у 12,5 процента москвичей. URL: <https://www.mos.ru/news/item/74512073/> (дата обращения 20.07.2020).

¹¹ SARS-CoV-2 IgM. URL: <https://keul.de/wp-content/uploads/2020/04/IFU-SARS-CoV-2-IgM-CLIA-1.0.pdf> (дата обращения 20.07.2020).

ответствия модельных и статистических данных по зарегистрированной ежедневной и кумулятивной заболеваемости.

В соответствии с результатом расчетов отношение выявленных случаев к «восстановленным» данным по кумулятивной заболеваемости составило 1 : 6. На **рис. 4** представлены результаты моделирования динамики «восстановленной» кумулятивной заболеваемости и для сравнения приведен график выявленных (зарегистрированных) случаев. Дальнейшие исследования проводились на основе «восстановленных» данных по базовому сценарию C0.

Прогнозно-аналитические исследования

Анализ и прогноз текущей эпидемической ситуации по базовому сценарию (сценарий 1 : 6)

Использование математической модели позволяет «проиграть» (на компьютере) различные сценарии развития эпидемии, которые дают возможность ответить как на естественный для исследователя

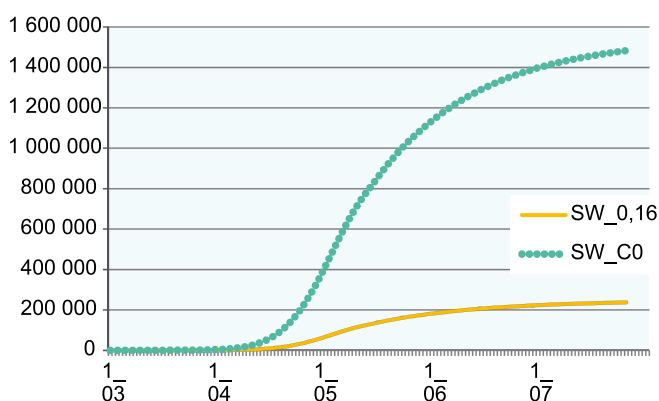


Рис. 4. Выявленная (зарегистрированные случаи) (SW_0,16) и «восстановленная» кумулятивная заболеваемость в соответствии с выбранным базовым сценарием C0 (SW_C0).

Fig. 4. Detected (reported cases) (SW_0,16) and «recovered» cumulative incidence in accordance with the selected baseline scenario C0 (SW_C0).

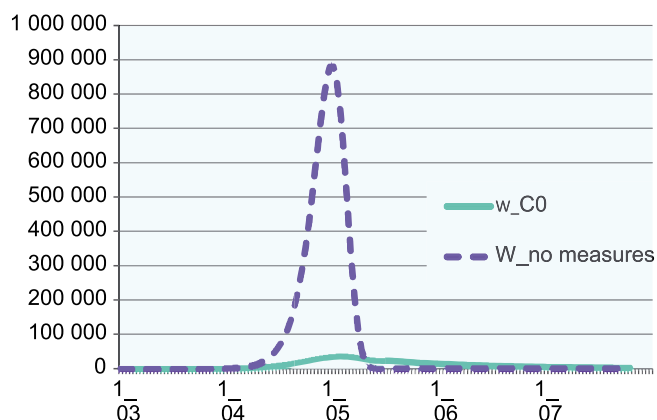


Рис. 5. Сравнение текущей ежедневной заболеваемости (W_C0) и гипотетической (без мер, W_no measures).

Fig. 5. Comparison of the current daily morbidity (W_C0) and the hypothetical (without measures, W_no measures).

вопрос: «что будет, если...», так и на риторический вопрос: «что было бы, если...». Последний вопрос оказывается тоже полезным, т.к. позволяет оценить предпринятые системой здравоохранения меры и сравнить текущую ситуацию с гипотетически вероятным сценарием развития эпидемии без предпринятых мер.

На **рис. 5** представлены графики ежедневной заболеваемости без введения мер противодействия и при реализованных ПЭМ. Введенные вовремя меры по изоляции инфицированных лиц (включая самоизоляцию населения) и социальному дистанцированию позволили существенно снизить ежедневную заболеваемость (примерно в 25 раз) и сохранить десятки тысяч жизней.

Проведенная идентификация параметров модели показала, что для сценария C0, обозначенного как «базовый», ПЭМ, достигнутые к 12.06.2020, соответствуют следующим показателям: меры по изоляции на уровне 67% (доля от всех лиц в инфекционной (заразной) стадии); меры, направленные на прерывание механизма передачи (гигиенические мероприятия на всех социально значимых объектах, социальное дистанцирование, ношение масок и перчаток, личная гигиена) снизили вероятность передачи вируса до 14% от максимального значения (вероятность передачи до введения ограничительных мер). В соответствии с осуществлением этапов снятия ПЭМ (с сохранением социального дистанцирования и ношения масок) и предположением о повышении деловой активности в сентябре 2020 г. при моделировании мы сделали допущение о незначительном (и постепенном) ослаблении мер в период с 12 июня до 25 сентября 2020 г.^{12,13} Дата 25.09.2020 определена условно как вероятное начало проведения вакцинации населения г. Москвы¹⁴. При условии сохранения в дальнейшем уровня мер противодействия, достигнутого к 25.09.2020, ежедневная заболеваемость будет снижаться, составив лишь единичные случаи после января 2021 г. (**рис. 6**). Кумулятивное количество инфицированных лиц может составить 1,558 млн человек, а ку-

¹² Методические рекомендации от 08.05.2020 № МР 3.1.0178-20 «Определение комплекса мероприятий, а также показателей, являющихся основанием для поэтапного снятия ограничительных мероприятий в условиях эпидемического распространения COVID-19». URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/upload/MP_поэтапное%20снятие%20огранич._08.05.2020.pdf (дата обращения 20.07.2020).

¹³ Сайт Сергея Собянина. Возвращение к нормальной жизни. Образование, театры, кино и детские развлекательные центры. URL: <https://www.sobyanin.ru/otmena-ogranicheniy-obrazovaniya-i-detskie-tsentry> (дата обращения 20.07.2020).

¹⁴ Умеренное снижение мер одновременно с началом вакцинации, например, с 25.11.2020, показывает аналогичные результаты моделирования.

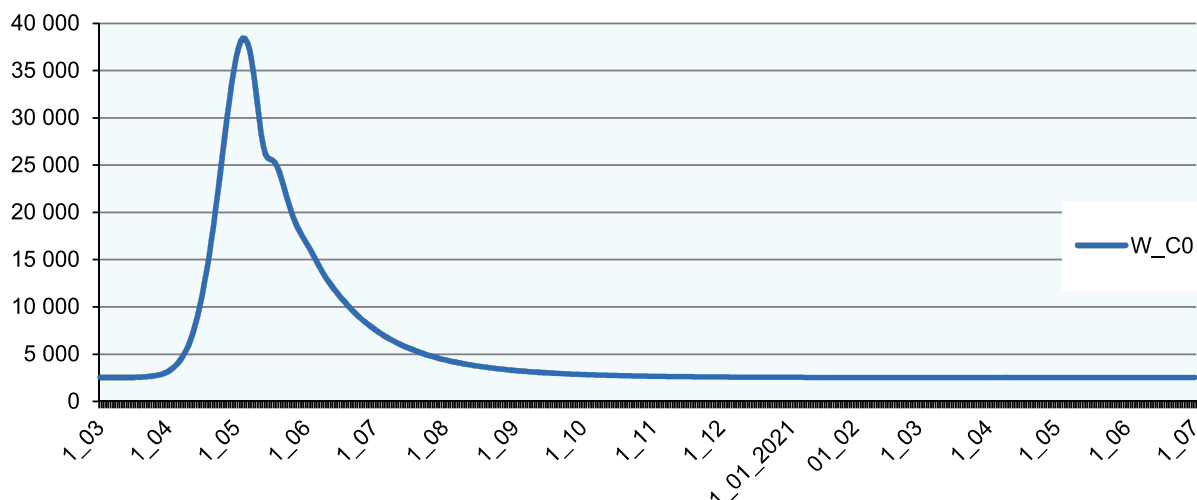


Рис. 6. Динамика ежедневного количества инфицированных лиц по базовому сценарию C0 (W_CO).
Fig. 6. Dynamics of the daily number of infected cases according to the C0 baseline scenario (W_CO).

мультипликативное количество смертельных случаев при таком сценарии не превышает 8 тыс.

Сценарий C0 показывает, что при сохранении достигнутых ПЭМ в течение продолжительного времени заболеваемость можно удерживать на достаточно низком уровне. Но что будет, если при достижении низкого уровня заболеваемости ослабить меры? Для ответа на этот вопрос мы провели вычислительные эксперименты по прогнозным сценариям.

Вычислительные эксперименты по прогнозным сценариям

Для ограничения распространения инфекции основные ПЭМ должны быть направлены на 3 фактора (движущие силы) эпидемического процесса:

- источник инфекции (изоляция больных в заразной стадии);
- механизм передачи инфекции (прерывание основных путей передачи, включающее гигиенические мероприятия на всех социально значимых объектах, социальное дистанцирование, ношение масок и перчаток, усиление личной гигиены);
- восприимчивых лиц (плановая вакцинация, экстренная профилактика)¹⁵ [17].

Реальная ситуация складывалась таким образом, что основные меры до разработки новой вакцины были направлены на 2 фактора — источник инфекции и механизм передачи. Как показывает моделирование, введенные вовремя ограничитель-

ные меры позволили значительно снизить заболеваемость (рис. 5).

Успешно проведенные клинические испытания новой отечественной вакцины на добровольцах позволяют с уверенностью планировать меры с учетом вакцинации населения. Можно ли при этом ослаблять меры противодействия, в каком объеме и какими темпами следует проводить вакцинацию? При каких условиях можно снижать меры без риска резкого подъема заболеваемости? Для ответа на поставленные вопросы мы разработали прогнозные сценарии развития эпидемической ситуации COVID-19 при различных изменениях ПЭМ, в том числе с учетом проведения различных объемов вакцинации населения Москвы (с началом вакцинации с 25.09.2020), и провели вычислительные эксперименты с моделью (табл. 1).

Уровни ослабления мер противодействия в таблице определены терминами: «незначительное», «умеренное» и «значительное», которые соответствуют следующим показателям:

- незначительное снижение мер — в среднем на 2% от достигнутого к 12.06.2020 уровня;
- умеренное снижение мер — в среднем на 13% от достигнутого к 25.09.2020 уровня;
- значительное снижение мер — в среднем на 50% от достигнутого к 25.09.2020 уровня.

Прогнозные сценарии с различным уровнем снижения ПЭМ без вакцинации населения

Результаты моделирования по прогнозным сценариям C1.0, C2.0, C3.0 (без вакцинации) представлены на рис. 7.

Сценарий C1.0 иллюстрирует ситуацию, когда на фоне единичных случаев заболевания (практически могут не регистрироваться даже единичные случаи к концу февраля) к завершению подъема заболеваемости сезонными ОРВИ снимаются

¹⁵ Методические рекомендации МР 3.1.0170-20 «Эпидемиология и профилактика COVID-19» (в редакции МР 3.1.0175-20 «Изменения № 1 в МР 3.1.0170-20 «Эпидемиология и профилактика COVID-19», утв. Роспотребнадзором 30.04.2020). URL: https://www.rosпотребнадзор.ru/upload/iblock/070/metod_recomend_3.1.0170_20_v_1.pdf (дата обращения 20.07.2020).

Таблица 1. Прогнозные сценарии — варианты комплекса ПЭМ**Table 1.** Forecast scenarios — options for a complex of anti-epidemic measures

Сценарии Scenarios	Изоляция инфицированных лиц и прерывание механизма передачи (гигиенические мероприятия на всех социально значимых объектах, социальное дистанцирование, ношение масок и перчаток, усиление личной гигиены) Isolation of infected persons and interruption of the transmission mechanism (hygiene measures at all socially significant facilities, social distancing, wearing masks and gloves, strengthening of personal hygiene)	Объем и скорость вакцинации* (суммарный объем, достигнутый на дату 01.01.21 — 01.04.21 — 21.10.21) Vaccination volume and rate* (total volume reached on the date 01.01.21 — 01.04.21 — 21.10.21)
Сценарий С0 «базовый» (рис. 6) Scenario C0 «Basic» (Fig. 6)	Незначительное снижение ПЭМ с 12 июня до сентября 2020 г. с последующим поддержанием их на достигнутом уровне <i>A slight decrease in measures from June 12 to September 2020, followed by their maintenance at the achieved level</i>	Вакцинация не проводится No vaccination
Сценарий С1.0 (рис. 7) Scenario C1.0 (Fig. 7)	Значительное снижение ПЭМ с марта 2021 г. <i>Significant reduction in measures from March 2021</i>	Вакцинация не проводится No vaccination
Сценарий С1.1 (рис. 8) Scenario C1.1 (Fig. 8)	Значительное снижение ПЭМ с марта 2021 г. <i>Significant reduction in measures from March 2021</i>	2 млн — 4 млн — 6,5 млн 2M — 4M — 6.5M
Сценарий С1.2 (рис. 8) Scenario C1.2 (Fig. 8)	Значительное снижение ПЭМ с марта 2021 г. <i>Significant reduction in measures from March 2021</i>	300 тыс. — 2 млн — 6,5 млн 300k — 2M — 6.5M
Сценарий С2.0 (рис. 7) Scenario C2.0 (Fig. 7)	Умеренное снижение ПЭМ с сентября 2020 г.* <i>Moderate reduction in measures from September 2020*</i>	Вакцинация не проводится No vaccination
Сценарий С2.1 (рис. 9) Scenario C2.1 (Fig. 9)	Умеренное снижение ПЭМ с сентября 2020 г.* <i>Moderate reduction in measures from September 2020*</i>	2 млн — 4 млн — 6,35 млн 2M — 4M — 6.35M
Сценарий С2.2 (рис. 9) Scenario C2.2 (Fig. 9)	Умеренное снижение ПЭМ с сентября 2020 г.* <i>Moderate reduction in measures from September 2020*</i>	300 тыс. — 2 млн — 4,3 млн 300k — 2M — 4.3M
Сценарий С3.0 (рис. 7) Scenario C3.0 (Fig. 7)	Значительное снижение ПЭМ с сентября 2020 г.* <i>Significant reduction in measures from September 2020*</i>	Вакцинация не проводится No vaccination
Сценарий С3.1 (рис. 10) Scenario C3.1 (Fig. 10)	Значительное снижение ПЭМ с сентября 2020 г.* <i>Significant reduction in measures from September 2020*</i>	2 млн — 2,3 млн — 2,3 млн 2M — 2.3M — 2.3M

Примечание. *Начало изменения ПЭМ совпадает с началом вакцинации — 25.09.2020.

Note. *The beginning of the change in measures coincides with the beginning of vaccination — 25.09.2020.

ограничительные меры, например, начиная с марта 2021 г., что равнозначно значительному снижению ПЭМ. При таких условиях и отсутствии вакцинации имеется высокая вероятность нового подъема заболеваемости с пиком (380 тыс.) к середине августа 2021 г. (рис. 7, W_C1.0).

Сценарий С2.0 иллюстрирует вероятность подъема заболеваемости (с пиком 65 тыс. в середине июня 2021 г.) при умеренном снижении ПЭМ с конца сентября по январь 2021 г. и отсутствии вакцинации (рис. 7, W_C2.0).

Сценарий С3.0 иллюстрирует вероятность подъема заболеваемости (с пиком 360 тыс. в первых числах января 2021 г.) при значительном снижении ПЭМ с конца сентября по январь 2021 г. и отсутствии вакцинации (рис. 7, W_C3.0).

Таким образом, вычислительные эксперименты показали, что существует вероятность подъема заболеваемости при ослаблении ПЭМ в отсутствие вакцинации населения. При этом высота пика ежедневной заболеваемости зависит от степени снижения ПЭМ и практически не зависит от времени начала снижения мер. Следующий этап исследований

связан с поиском объема и скорости охвата вакцинацией населения для предотвращения резкого подъема заболеваемости.

Прогнозные сценарии с различным объемом охвата вакцинацией населения

Сценарий С1.1 соответствует проведению вакцинации населения с 25.09.2020 на фоне сохранения достигнутого уровня мер до начала марта 2021 г. и с последующим значительным снижением ПЭМ. При постепенном увеличении объема охвата вакцинацией населения до 2 млн человек к 01.01.2021, затем увеличивая объем до 4 млн к началу апреля 2021 г. и постепенно достигая объема 6,5 млн к концу августа 2021 г., удастся предотвратить экспоненциальный рост заболеваемости, наблюдаемый при отсутствии вакцинации по сценарию С1.0 (рис. 8, W_C1.1).

Сценарий С1.2 — на фоне значительного ослабления мер по изоляции и прерыванию механизма передачи с марта 2021 г. и при снижении объема охвата вакцинацией (с 25.09.2020) до 300 тыс. человек к 01.01.2021 и до 2 млн к началу апреля 2021 г.,

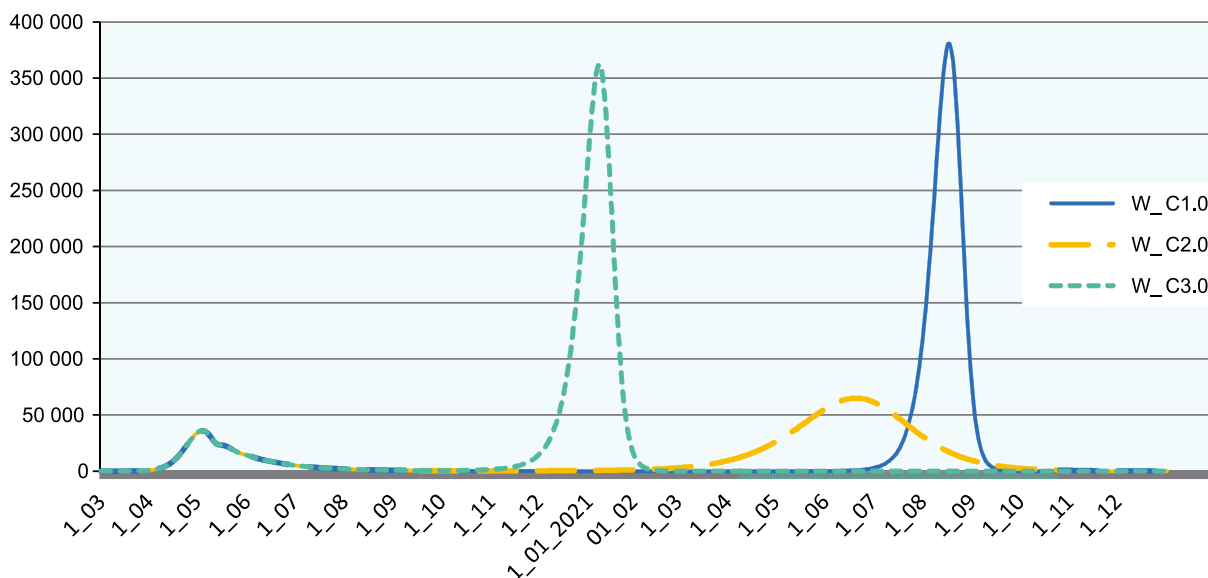


Рис. 7. Результаты моделирования динамики ежедневной заболеваемости по прогнозным сценариям C1.0, C2.0, C3.0 без вакцинации.

Fig. 7. The modeling of the daily incidence dynamics under scenarios C1.0, C2.0, and C3.0 without vaccination.

снижении темпа достижения суммарного объема вакцинации 6,5 млн человек к середине октября 2021 г. полностью предотвратить подъем не удастся и наблюдается появление небольшой второй волны заболеваемости с пиком (11 387 случаев) в середине декабря 2021 г. (рис. 8, W_C1.2).

Таким образом, для предотвращения значительного подъема заболеваемости на фоне проводимой вакцинации необходимо поддерживать остальные ПЭМ (по изоляции инфицированных лиц и прерыванию механизма передачи) до достижения объема охвата вакцинацией по крайней мере 2 млн человек. Сохранение мер (по изоляции и прерыванию меха-

низма передачи) до достижения суммарного охвата вакцинацией 4 млн человек позволяет практически предотвратить появление так называемой второй волны. После достижения объема охвата населения 4 млн человек возможно значительное снижение ПЭМ. При условии дальнейшего продолжения проведения вакцинации до достижения объема охвата 50% населения Москвы возможна полная отмена ПЭМ.

Сценарий C2.1 — при умеренном снижении ПЭМ с конца сентября по январь 2021 г. и проведении вакцинации (с 25.09.2020) с объемом 2 млн человек к 01.01.2021, 4 млн к 01.03.2021 и 6,35 млн к 01.11.2021 наблюдается низкая заболеваемость до

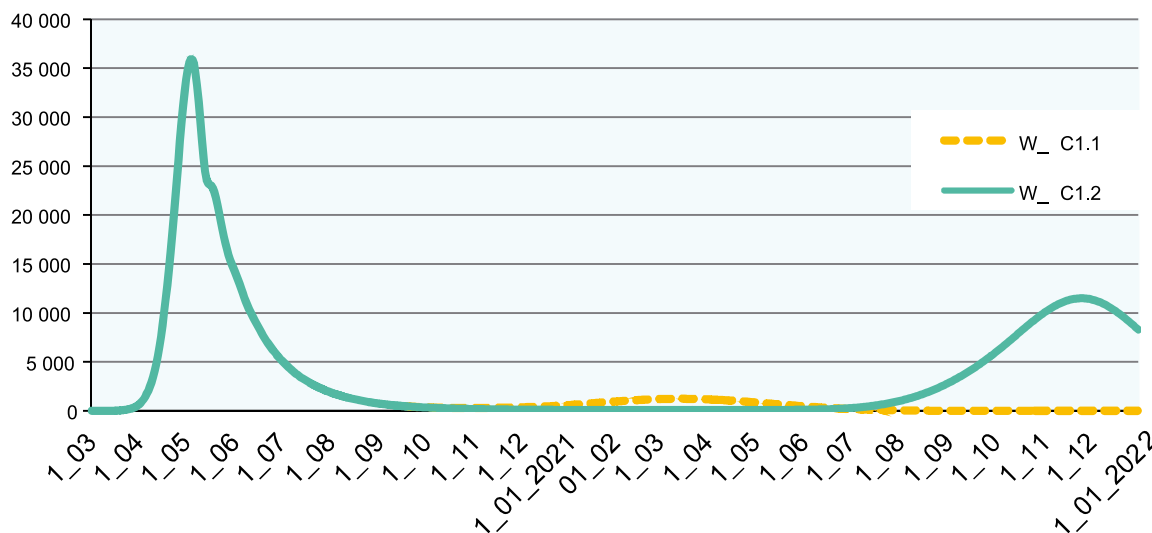


Рис. 8. Сравнение динамики ежедневной заболеваемости по сценариям значительного снижения мер (по изоляции и прерыванию механизма передачи) с марта 2021 г. с разными темпами вакцинации.

Fig. 8. Comparison between the daily incidence dynamics under the scenario of a significant reduction in measures (isolation and breaking chains of transmission) from March 2021 and different rates of vaccination.

01.01.2021, затем незначительный подъем заболеваемости с пиком (1120 человек) в середине марта 2021 г. (рис. 9, W_C2.1).

Сценарий С2.2 — при умеренном снижении ПЭМ с конца сентября по январь 2021 г. и объемом охвата вакцинацией 300 тыс. до 01.01.2021, 2 млн к 01.04.2021 и далее до 4,3 млн к 01.10.2021 приводит к более значимому подъему ежедневной заболеваемости с пиком (18 302 человека) в конце апреля 2021 г. (рис. 9, W_C2.2).

Проведение вакцинации на фоне умеренного ослабления ПЭМ (по изоляции инфицированных лиц и прерыванию механизма передачи) позволяет снизить заболеваемость, однако степень влияния зависит от времени начала, объема и скорости охвата населения вакцинацией.

Сценарий С3.1 — при значительном снижении ПЭМ с конца сентября по январь 2021 г. требуются очень высокие темпы наращивания объема вакцинации в достаточно короткий срок, до начала подъема заболеваемости, т.е. к 300-му дню (01.01.2021). Достижение объема 2 млн человек к 01.01.2021 не позволяет предотвратить экспоненциальный рост заболеваемости с пиком второй волны (220 тыс. человек) к 20.01.2021, такой объем дает возможность лишь снизить пик заболеваемости (с 360 тыс. до 220 тыс. человек) (рис. 10).

Таким образом, значительное ослабление ПЭМ одновременно с началом вакцинации не позволяет избежать существенного роста заболеваемости.

Сводные результаты вычислительных экспериментов по прогнозным сценариям представлены в табл. 2.

При сравнении сценариев С0 и С1.0 вычислительные эксперименты проиллюстрировали ситуацию, когда, казалось бы, эпидемия уже сошла на нет, но при значительном снижении ПЭМ (начиная с марта 2021 г.) при отсутствии вакцинации имеется высокая вероятность значительного подъема заболеваемости с пиком 380 тыс. человек в середине августа 2021 г.

При сравнении сценариев С1.0 и С1.1 вычислительные эксперименты показали, что проведение вакцинации с началом в конце сентября 2020 г. и достижением объема 4 млн человек до начала значительного снижения ПЭМ предотвращает появление второй волны заболеваемости.

При сравнении сценариев С1.0 и С1.2 вычислительные эксперименты показали, что на фоне низкой заболеваемости начало проведения вакцинации в конце сентября 2020 г. с суммарным объемом 6,5 млн человек и более низким начальным темпом вакцинации (300 тыс. — 2 млн — 6,5 млн) не позволяет полностью предотвратить подъем ежедневной заболеваемости с пиком 11 387 случаев в середине декабря 2021 г.

При сравнении сценариев С0 и С2.0 вычислительные эксперименты показали, что на фоне умеренного снижения ПЭМ в сентябре 2020 г. без вакцинации наблюдается низкая заболеваемость до середины ноября 2020 г., затем подъем заболеваемости с пиком 65 300 случаев в середине июня 2021 г.

При сравнении сценариев С2.0 и С2.1 вычислительные эксперименты показали, что на фоне умеренного снижения ПЭМ в сентябре начало про-

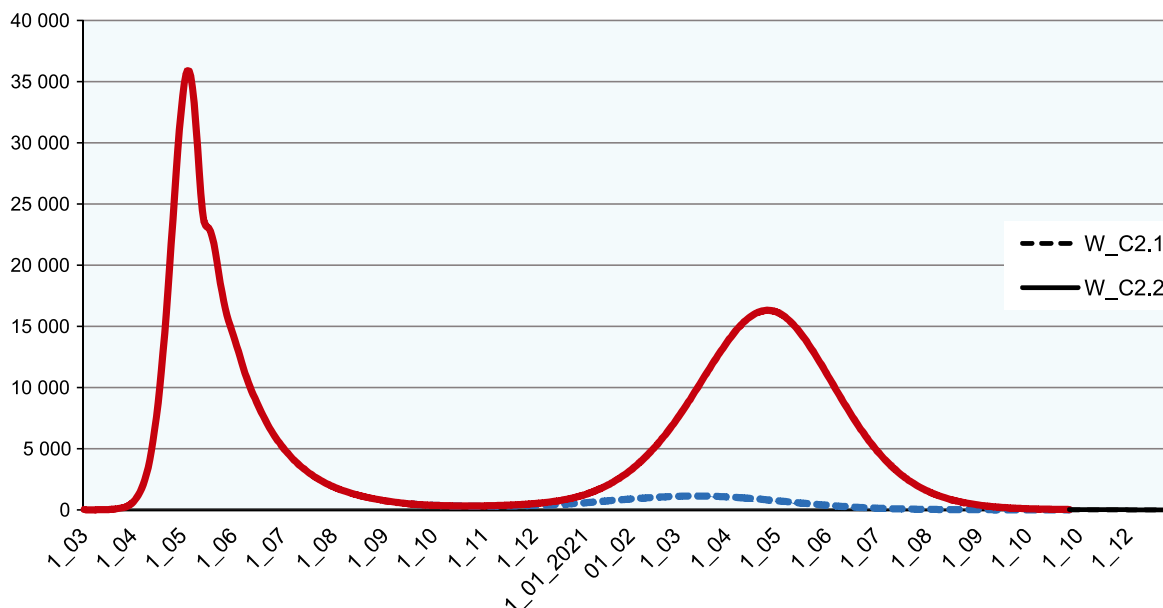


Рис. 9. Сравнение динамики ежедневной заболеваемости по сценариям умеренного снижения ПЭМ с конца сентября по январь 2021 г. с разным темпом проведения вакцинации.

Fig. 9. Comparison between the daily incidence dynamics under the scenario of a moderate reduction in EPMs from the end of September to January 2021 and different rates of vaccination.

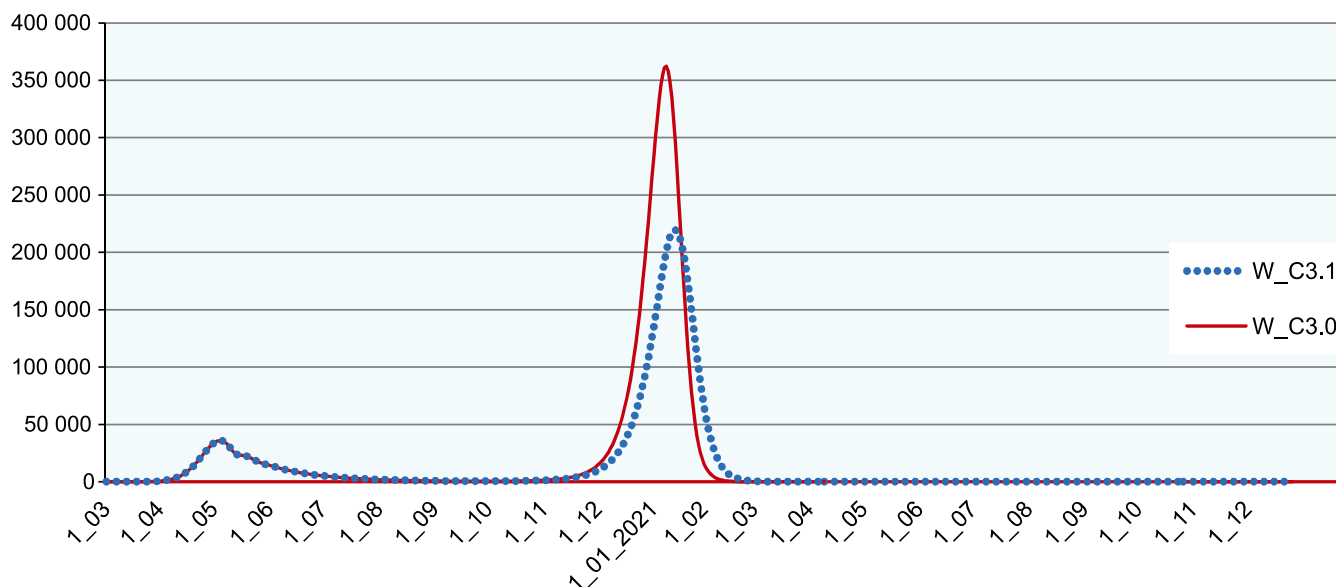


Рис. 10. Сравнение динамики ежедневной заболеваемости по сценарию значительного снижения ПЭМ с конца сентября по январь 2021 г. без вакцинации (W_C3.0) и при проведении вакцинации (W_C3.1).

Fig. 10. Comparison between the daily incidence dynamics under the scenario of a significant reduction in EPMs from late September to January 2021 without vaccination (W_C3.0) and with vaccination (W_C3.1).

ведения вакцинации в конце сентября 2020 г. с суммарным объемом 6,35 млн человек и умеренным темпом вакцинации (2 млн — 4 млн — 6,35 млн) позволит практически предотвратить вторую волну в конце апреля 2021 г. Наблюдается небольшой подъем заболеваемости (1120 случаев) в середине марта 2021 г.

При сравнении сценариев С2.0 и С2.2 вычислительные эксперименты показали, что на фоне умеренного ослабления ПЭМ начало проведения вакцинации в конце сентября с суммарным объемом 4,3 млн человек и более низким начальным темпом вакцинации (300 тыс. — 2 млн — 4,3 млн) позволит снизить заболеваемость. Наблюдается небольшой подъем заболеваемости с пиком (18 302 случая) в конце апреля 2021 г.

При сравнении сценариев С0 и С3.0 вычислительные эксперименты показали, что на фоне значительного снижения ПЭМ в сентябре без вакцинации наблюдается низкая заболеваемость до 01.11.2020, затем экспоненциальный рост ежедневной заболеваемости с пиком (360 тыс. случаев) в начале января 2021 г.

При сравнении сценариев С3.0 и С3.1 вычислительные эксперименты показали, что на фоне значительного снижения ПЭМ в сентябре начало проведения вакцинации в конце сентября с умеренным начальным темпом (2 млн — 2,3 млн — 2,3 млн) и максимально возможным суммарным объемом 2,3 млн не может предотвратить появление второй волны. Вакцинация способствует уменьшению пика ежедневной заболеваемости с 360 тыс. до 220 тыс. человек.

Выводы

Существует высокая вероятность подъема заболеваемости при ослаблении ПЭМ в отсутствие вакцинации населения. При этом высота пика ежедневной заболеваемости зависит от степени снижения ПЭМ и практически не зависит от времени начала ослабления мер.

Значительное снижение ПЭМ одновременно с началом вакцинации не позволяет избежать существенного роста заболеваемости.

Проведение вакцинации на фоне ослабления ПЭМ (по изоляции инфицированных лиц и прерыванию механизма передачи) позволяет снизить заболеваемость, однако степень влияния зависит от времени начала, объема и скорости охвата населения вакцинацией.

Для предотвращения значительного подъема заболеваемости COVID-19 на фоне проводимой вакцинации необходимо поддерживать остальные ПЭМ (по изоляции инфицированных лиц и прерыванию механизма передачи) до достижения объема охвата вакцинацией около 2 млн человек. Оптимальным представляется сохранение вышеуказанных ПЭМ до достижения суммарного охвата вакцинацией 4 млн человек, после чего возможно значительное снижение ПЭМ. При охвате вакцинацией 50% населения Москвы возможна полная отмена ПЭМ.

Заключение

Целью моделирования не было точное предсказание развития эпидемической ситуации в Москве. Наши исследования по прогнозным сценари-

Таблица 2. Результаты моделирования по прогнозным сценариям**Table 2.** Simulation results for forecast scenarios

Сценарии Scenarios	Вакцинация Vaccination	Динамика ежедневной заболеваемости, пик Dynamics of daily morbidity, peak	Кумулятивное количество инфицированных (на 01.02.2021) Cumulative number of infected (as of 01.02.2021)	Кумулятивное количество летальных случаев (на 01.02.2021) Cumulative deaths (as of 01.02.2021)
Сценарий C0 «базовый» (рис. 6) Scenario C0 «Basic» (Fig. 6)	Не проводится No vaccination	Ежедневная заболеваемость — единичные случаи после 01.01.2021 Daily morbidity — isolated cases after 01.01.2021	1 557 718	7789
Сценарий C1.0 (рис. 7) Scenario C1.0 (Fig. 7)	Не проводится No vaccination	Пик второй волны 380 тыс. человек на 530-й день (в середине августа 2021 г.) The peak of the second wave of 380,000 people on day 530 (mid-August 2021)	10 737 123	53 686
Сценарий C1.1 (рис. 8) Scenario C1.1 (Fig. 8)	Проводится Vaccinate	Нет подъема заболеваемости No rise in incidence	1 568 972	7832
Сценарий C1.2 (рис. 8) Scenario C1.2 (Fig. 8)	Проводится Vaccinate	Подъем заболеваемости с пиком 11 387 человек на 662-й день (середина декабря 2021 г.) Rise in incidence with a peak of 11,387 people on day 662 (mid-December 2021)	2 691 315	13 082
Сценарий C2.0 (рис. 7) Scenario C2.0 (Fig. 7)	Не проводится No vaccination	Пик второй волны 65 000 человек на 430-й день (в середине июня 2021 г.) The peak of the second wave of 65,000 people on day 430 (mid-June 2021)	7 678 221	38 391
Сценарий C2.1 (рис. 9) Scenario C2.1 (Fig. 9)	Проводится Vaccinate	Подъем заболеваемости 1120 человек на 378-й день (середина марта 2021 г.) The increase in the incidence of 1120 people on day 378 (mid-March 2021)	1 717 293	8586
Сценарий C2.2 (рис. 9) Scenario C2.2 (Fig. 9)	Проводится Vaccinate	Пик 18 302 случаев на 417-й день (конец апреля 2021 г.) Peak 18,302 cases on day 417 (end of April 2021)	3 610 443	18 052
Сценарий C3.0 (рис. 7) Scenario C3.0 (Fig. 7)	Не проводится No vaccination	Пик 360 тыс. случаев на 310-й день (к 20.01.2021) Peak 360,000 cases on day 310 (20 January 2021)	10 728 363	53 642
Сценарий C3.1 (рис. 10) Scenario C3.1 (Fig. 10)	Проводится Vaccinate	Пик 220 тыс. случаев на 320-й день (к 20.01.2021) Peak 220,000 cases on day 320 (20 January 2021)	8 356 263	41 781

ям имели своей целью поиск возможностей управления эпидемической ситуацией при различных вариантах ее развития. Как показывают результаты вычислительных экспериментов, в настоящее время существует возможность избежать появления так называемой второй волны эпидемии COVID-19 при рациональной стратегии комплекса противоэпидемических мероприятий, включающего вакцинацию

населения. Оптимальным представляется сохранение мер (на достигнутом уровне) по изоляции и прерыванию механизма передачи до достижения суммарного объема охвата вакцинацией 4 млн человек, после чего возможно значительное ослабление противоэпидемических мероприятий. При охвате вакцинацией 50% населения Москвы возможна их полная отмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боев Б.В. *Прогнозно-аналитические модели эпидемий (оценка последствий техногенных аварий и природных катастроф)*. Лекция. М.; 2005.
2. Wu Z., McGoogan J.M. Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in China: summary of a report of 72,314 cases from the Chinese Center for Disease Control and Prevention. *JAMA*. 2020; 323(13): 1239-42. DOI: <http://doi.org/10.1001/jama.2020.2648>
3. Mizumoto K., Kagaya K., Zarebski A., Chowell G. Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020. *Euro Surveill*. 2020; 25(10): 2000180. DOI: <http://doi.org/10.2807/1560-7917.es.2020.25.10.2000180>
4. Pollán M., Pérez-Gómez B., Pastor-Barriuso R., Oteo J., Hernán M.A., Pérez-Olmeda M., et al. Prevalence of SARS-CoV-2 in Spain (ENE-COVID): a nationwide, population-based seroepidemiological study. *Lancet*. 2020; S0140-6736(20)31483-5. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31483-5](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31483-5)
5. Stringhini S., Wisniak A., Piumatti G., Azman A.S., Lauer S.A., Baysson H., et al. Seroprevalence of anti-SARS-CoV-2 IgG antibodies in Geneva, Switzerland (SEROCoV-POP): a population-based study. *Lancet*. 2020; 396(10247): 313-9. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31304-0](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31304-0)
6. Бароян О.В., Рвачев Л.А., Иванников Ю.Г. *Моделирование и прогнозирование эпидемий гриппа для территории СССР*. М.; 1977.
7. Боев Б.В. Модель развития эпидемии гриппа А(H1N1) в России в сезон 2009–2010 годов. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2010; (1): 52-8.
8. Боев Б.В., Салман Э.Р., Асатрян М.Н. Применение компьютерного инструментария для прогнозирования водных вспышек гепатита А техногенного характера с оценкой эффективности мер противодействия. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2010; (3): 57-62.
9. Асатрян М.Н., Салман Э.Р., Киликковский В.В., Киселев К.В., Сипачева Н.Б., Семенов Т.А. Изучение процессов распространения мутантных вариантов «вакцинального бегства» вируса гепатита В среди населения с помощью компьютерной модели эпидемического процесса гепатита В. *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы*. 2013; (6): 34-8.
10. Салман Э.Р. *Прогнозирование эпидемии ВИЧ-инфекции среди потребителей внутривенных наркотиков*: Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. М.; 2005.
11. Салман Э.Р., Асатрян М.Н., Гайдаренко А.Д., Ершов И.Ф., Семенов Т.А. Прогнозная оценка предотвратимой смертности, ассоциированной с хроническим гепатитом С. *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы*. 2016; (6): 40-7.
12. Linton N.M., Kobayashi T., Yang Y., Hayashi K., Akhmetzhanov A.R., Jung S.M., et al. Incubation period and other epidemiological characteristics of 2019 novel coronavirus infections with right truncation: a statistical analysis of publicly available case data. *J. Clin. Med.* 2020; 9(2): 538. DOI: <http://doi.org/10.3390/jcm9020538>
13. Luo Y., Trevathan E., Qian Z., Li Y., Li J., Xiao W., et al. Asymptomatic SARS-CoV-2 Infection in Household Contacts of a Healthcare Provider, Wuhan, China. *Emerg. Infect. Dis.* 2020; 26(8): 1930-3. DOI: <http://doi.org/10.3201/eid2608.201016>
14. Epidemiology Working Group for NCIP Epidemic Response, Chinese Center for Disease Control and Prevention. The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19) in China. *Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi*. 2020; 41(2): 145-51. DOI: <http://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2020.02.003> (in Chinese)
15. Meyerowitz-Katz G., Merone L. A systematic review and meta-analysis of published research data on COVID-19 infection-fatality rates. *medRxiv*. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1101/2020.05.03.20089854>
16. Акимкин В.Г., Кузин С.Н., Шипулина О.Ю., Яцышина С.Б., Тиванова Е.В., Каленская А.В. и др. Эпидемиологическое значение определения РНК SARS-CoV-2 среди различных групп населения Москвы и Московской области в период эпидемии COVID-19. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2020; 97(3): 197-201. DOI: <http://doi.org/10.36233/0372-9311-2020-97-3-1>
17. Беляков В.Д., Яфаев Р.Х. *Эпидемиология*. М.: Медицина; 1989.

REFERENCES

1. Boev B.V. *Predictive and Analytical Models of Epidemics (Assessment of the Consequences of Man-Made Accidents and Natural Disasters)*. Lecture. Moscow; 2005. (in Russian) <https://www.armscontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf>
2. Wu Z., McGoogan J.M. Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in China: summary of a report of 72,314 cases from the Chinese Center for Disease Control and Prevention. *JAMA*. 2020; 323(13): 1239-42. DOI: <http://doi.org/10.1001/jama.2020.2648>
3. Mizumoto K., Kagaya K., Zarebski A., Chowell G. Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020. *Euro Surveill*. 2020; 25(10): 2000180. DOI: <http://doi.org/10.2807/1560-7917.es.2020.25.10.2000180>
4. Pollán M., Pérez-Gómez B., Pastor-Barriuso R., Oteo J., Hernán M.A., Pérez-Olmeda M., et al. Prevalence of SARS-CoV-2 in Spain (ENE-COVID): a nationwide, population-based seroepidemiological study. *Lancet*. 2020; S0140-6736(20)31483-5. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31483-5](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31483-5)
5. Stringhini S., Wisniak A., Piumatti G., Azman A.S., Lauer S.A., Baysson H., et al. Seroprevalence of anti-SARS-CoV-2 IgG antibodies in Geneva, Switzerland (SEROCoV-POP): a population-based study. *Lancet*. 2020; 396(10247): 313-9. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31304-0](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31304-0)
6. Baroyan O.V., Rvachev L.A., Ivannikov Yu.G. *Modeling and Forecasting Influenza Epidemics for the Territory of the USSR [Modelirovanie i prognozirovanie epidemiy grippa dlya territorii SSSR]*. Moscow; 1977. (in Russian)
7. Boev B.V. Modeling of the epidemic of influenza A(H1N1) in Russia season 2009–2010. *Epidemiologiya i vaksino profilaktika*. 2010; (1): 52-8. (in Russian)
8. Boev B.V., Salman E.R., Asatryan M.N. Application of computer tools for the prediction of water outbreaks of hepatitis A man-made with assessing the effectiveness of counteraction. *Epidemiologiya i vaksino profilaktika*. 2010; (3): 57-62. (in Russian)
9. Asatryan M.N., Salman E.R., Kilikovskiy V.V., Kiselev K.V., Sypacheva N.B., Semenenko T.A. Investigation of the spread of a vaccine-induced escape mutant of hepatitis B virus, by using a computer-based epidemiological model. *Epidemiologiya i infektsionnye bolezni. Aktual'nye voprosy*. 2013; (6): 34-8. (in Russian)
10. Salman E.R. *Forecasting the HIV epidemic among intravenous drug users*: Diss. Moscow; 2005. (in Russian)
11. Salman E.R., Asatryan M.N., Gaydarenko A.D., Ershov I.F., Semenenko T.A. Predictive estimate of preventable mortality associated with chronic hepatitis C. *Epidemiologiya i infektsionnye bolezni. Aktual'nye voprosy*. 2016; (6): 40-7. (in Russian)
12. Linton N.M., Kobayashi T., Yang Y., Hayashi K., Akhmetzhanov A.R., Jung S.M., et al. Incubation period and other epidemiological characteristics of 2019 novel coronavirus infections with right truncation: a statistical analysis of publicly available case data. *J. Clin. Med.* 2020; 9(2): 538. DOI: <http://doi.org/10.3390/jcm9020538>

13. Luo Y., Trevathan E., Qian Z., Li Y., Li J., Xiao W., et al. Asymptomatic SARS-CoV-2 Infection in Household Contacts of a Healthcare Provider, Wuhan, China. *Emerg. Infect. Dis.* 2020; 26(8): 1930-3. DOI: <http://doi.org/10.3201/eid2608.201016>
14. Epidemiology Working Group for NCIP Epidemic Response, Chinese Center for Disease Control and Prevention. The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19) in China. *Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi.* 2020; 41(2): 145-51. DOI: <http://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2020.02.003> (in Chinese)
15. Meyerowitz-Katz G., Merone L. A systematic review and meta-analysis of published research data on COVID-19 infection-fatality rates. *medRxiv.* 2020. DOI: <http://doi.org/10.1101/2020.05.03.20089854>
16. Akimkin V.G., Kuzin S.N., Shipulina O.Yu., Yatsyshina S.B., Tivanova E.V., Kalenskaya A.V., et al. Epidemiological significance of detection of SARS-CoV-2 RNA among different groups of population of Moscow and Moscow Region during the COVID-19 outbreak. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii.* 2020; 97(3): 197-201. DOI: <http://doi.org/10.36233/0372-9311-2020-97-3-1> (in Russian)
17. Belyakov V.D., Yafaev R.Kh. *Epidemiology [Epidemiologiya]*. Moscow: Meditsina; 1989. (in Russian)

Информация об авторах:

Асатрян Марина Норайровна — к.м.н., с.н.с. отд. эпидемиологии ФГБУ «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи», 123098, Москва, Россия.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6273-8615>.
E-mail: masatryan@gamaleya.org

Герасимук Элита Русиндапутри — к.м.н., доц., ГУ «Дубна», 141982, Дубна, Россия.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7364-163X>.

Логунов Денис Юрьевич — д.б.н., член-корр. РАН, зам. директора по научной работе ФГБУ «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи», 123098, Москва, Россия.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4035-6581>.

Семененко Татьяна Анатольевна — д.м.н., проф., акад. РАЕН, рук. отдела эпидемиологии ФГБУ «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи», 123098, Москва, Россия.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6686-9011>.

Гинцбург Александр Леонидович — д.б.н., проф., акад. РАН, директор ФГБУ «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи», 123098, Москва, Россия.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1769-5059>.

Участие авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors:

Marina N. Asatryan — PhD (Med.), senior researcher, Department of Epidemiology, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, 123098, Moscow, Russia.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6273-8615>.
E-mail: masatryan@gamaleya.org

Elita R. Gerasimuk — PhD (Med.), Assoc. Prof., Dubna State University, 141982, Dubna, Russia.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7364-163X>.

Denis Yu. Logunov — D. Sci. (Biol.), Corresponding Member of RAS, Deputy Director for research, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, 123098, Moscow, Russia.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4035-6581>.

Tatyana A. Semenenko — D. Sci. (Med.), Prof., Full Member of RAS, Head, Department of Epidemiology, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, 123098, Moscow, Russia.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6686-9011>.

Aleksander L. Gintsburg — D. Sci. (Biol.), Prof., Full Member of RAS, Director, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, 123098, Moscow, Russia.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1769-5059>.

Contribution: the authors contributed equally to this article.