УДК 330.4+338.14
https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-60-71

Математико-статистическая модель оценки влияния волн COVID-19 на региональную систему (на примере Кировской области)[1]

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2023

Караулова Л.В.,
Кировский государственный медицинский университет,
610998, Россия, Приволжский федеральный округ,
Кировская область, г. Киров,
ул. К. Маркса, д. 112

Караулов В.М.*,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, Приволжский федеральный округ,
Кировская область, г. Киров,
ул. Московская, д. 36

Вишняков А.В.,
Кировский государственный медицинский университет,
610998, Россия, Приволжский федеральный округ,
Кировская область, г. Киров,
ул. К. Маркса, д. 112

Аннотация

С момента первой вспышки в Китае и распространения в разных странах мира COVID-19 началось и интенсивно продолжается исследование математических моделей распространения эпидемии. Такие модели являются динамическими, и часто в их основе лежат дифференциальные или разностные уравнения. Как правило, эти модели требуют процедуру идентификации для определения неизвестных параметров. Но по ряду причин однозначная идентификации таких параметров не может быть выполнена. Например, подготовка статистических данных для процедуры идентификации может быть выполнена различными способами. Поэтому предпочтительным способом предобработки данных является аппроксимация их наиболее подходящей функциональной зависимостью.

Исследование показывает, что эпидемические кривые могут быть представлены суперпозицией нескольких локальных волн — вспышка эпидемии в том или ином регионе складывается из многих локальных волн, и некоторые из них могут сливаться в одну общую волну. В данной статье предлагается применять аналоги функции плотности нормального распределения для прогнозирования волн новых случаев заболеваемости COVID-19. Целью статьи явились разработка модели динамики общего числа заболевших и новых случаев заболеваемости COVID-19 с учетом волн эпидемии и оценка влияния на региональную социально-экономическую систему.

Исследование проводилось на основании данных о заболеваемости COVID-19 в регионах Кировской области[2] в 2020—2022 гг. Показано, что выбранная модель хорошо описывает статистические данные и позволяет делать реалистичные прогнозы для общего числа заболеваний и новых случаев заболеваний. Результаты исследования могут быть использованы для разработки превентивных мер по предупреждению распространения заболевания и позволяют оценивать влияние эпидемиологической ситуации на социально-экономическую систему региона.

Ключевые слова: математическое моделирование; суперпозиция эпидемиологических волн; прогнозирование.

[1] Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-5187.2022.2 для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации в рамках темы исследования «Разработка и обоснование концепции, комплексной модели резилиенс-диагностики рисков и угроз безопасности региональных экосистем и технологии ее применения на основе цифрового двойника».

[2] Статистика коронавируса в Кировской области // https://russian-trade.com/coronavirus-russia/kirovskaya-oblast/

Для цитирования: Караулова Л.В., Караулов В.М., Вишняков А.В. Математико-статистическая модель оценки влияния волн COVID-19 на региональную систему (на примере Кировской области) // Проблемы анализа риска. 2023. Т. 20. № 3. С. 60—71, https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-60-71

Вклад авторов:
Караулова Л. В. — развитие методологии; разработка прогнозов; написание исходного текста, итоговые выводы;
Караулов В. М. — научное руководство; концепция исследования; доработка исходного текста; итоговые выводы;
Вишняков А. В. — сбор статистических данных и предварительная обработка, выявление волн распространения COVID-19.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Mathematical and Statistical Model for Assessing the Impact of COVID-19 Waves on the Regional System (on the Example of the Kirov Region)[3]

Larisa V. Karaulova,
Kirov State Medical University,
K. Marx str., 112, Kirov,
610998, Volga Federal District,
Kirov Region, Russia

Vasily M. Karaulov*,
Vyatka State University,
Moscow str., 36, Kirov, 610000,
Volga Federal District,
Kirov Region, Russia

Alexey V. Vishnyakov,
Kirov State Medical University,
K. Marx str., 112, Kirov,
610998, Volga Federal District,
Kirov Region, Russia

Abstract

Since the first outbreak in China and the spread of COVID-19 in different countries of the world, the study of mathematical models of the spread of the epidemic has begun and is intensively continuing. Such models are dynamic and often based on differential or difference equations. As a rule, these models require an identification procedure to determine unknown parameters. But for a number of reasons, unambiguous identification of such parameters cannot be performed. For example, the preparation of statistical data for the identification procedure may be performed in various ways. Therefore, the preferred method of data preprocessing is to approximate them with the most appropriate functional dependence.

The study shows that epidemic curves may be represented by a superposition of several local waves — an outbreak of an epidemic in a particular region consists of many local waves and some of them may merge into one common wave. In this article, it is proposed to use analogs of the normal distribution density function to predict waves of new COVID-19 cases. The purpose of the article was to develop a model of the dynamics of the total number of cases and new cases of COVID-19, taking into account the waves of the epidemic and the impact on the regional socio-economic system.

The study was conducted on the basis of data on the incidence of COVID-19 in the Kirov region[4] in 2020—2022. It is shown that the chosen model describes statistical data well and allows making

[3] The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation NSH-5187.2022.2 for state support of leading scientific schools of the Russian Federation within the framework of the research topic "Development and substantiation of the concept, integrated model of resilience diagnostics of risks and threats to the security of regional ecosystems and technology of its application based on a digital twin".

[4] Coronavirus statistics in the Kirov region // https://russian-trade.com/coronavirus-russia/kirovskaya-oblast/

realistic forecasts for the total number of diseases and new cases of diseases. The results of the study may be used to develop preventive measures to prevent the spread of the disease and allow assessing the impact of the epidemiological situation on the socio-economic system of the region.

Keywords: mathematical modeling; superposition of epidemiological waves; forecasting.

For citation: Karaulova L.V., Karaulov V.M., Vishnyakov A.V. Mathematical and statistical model for assessing the impact of COVID-19 waves on the regional system (on the example of the Kirov region) // Issues of Risk Analysis. 2023;20(3):60-71, (In Russ.), https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-60-71

Contribution of the authors:
Karaulova L. V. — development of methodology; development of forecasts; writing of the source text, final conclusions;
Karaulov V. M. — scientific guidance; research concept; revision of the source text; final conclusions;
Vishnyakov A.V. — collection of statistical data and preliminary processing, detection of COVID-19 propagation waves.

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение
Основная часть
Заключение
Литература

Введение

Математическое моделирование распространения эпидемии COVID-19 в разных странах и регионах мира началось с момента первой вспышки болезни в Китае и интенсивно проводится в настоящее время.

К простейшим математическим моделям эпидемий относятся SIR и SEIR, в которых население делится на группы: восприимчивые (S), инфицированные (I) и вылеченные (R), контактировавшие с инфекцией (E). Данные модели содержат небольшое число параметров, что является весьма важным фактом в условиях недостатка исходных количественных данных. Однако эти модели не учитывают многие факторы (различные способы передачи инфекции, различную плотность населения, возможность выработки иммунитета, инкубационный период заболевания и т. п.), поэтому они постоянно дорабатываются. Помимо указанных групп вводятся дополнительные группы: бессимптомные заразные индивидуумы (A), помещенные в карантин (Q), умершие (D) и т. д. Динамика численности групп описывается системой из дифференциальных уравнений.

С 2020 г. было опубликовано большое количество статей, в которых модели SIR, SEIR и их модификации применяются для прогнозирования распространения COVID-19 во многих странах мира, в том числе в России. Отметим только некоторые из работ, в которых указанные модели использовались для

прогнозирования развития COVID-19 в России (в том числе в региональном разрезе). В работе В.Л. Соколовского и других [1] продемонстрировано, что простые SIR-модели дают возможность оценить параметры моделей (коэффициенты выздоровления и заболеваемости), которые могут использоваться в более сложных моделях, позволяющих учитывать неравномерное распределение населения и изменение мобильности населения. В работе Д.А. Томчина и др. [2] для прогнозирования распространения в России COVID-19 применяются простейшие модели эпидемий: SIR и SEIR, в работе В.А. Вербы и А.Г. Вовик [3] проводится сравнение результатов прогнозов распространения COVID-19 в Москве с помощью SIR-, SEIR- и SEIQR-моделей и показано, что прогноз с помощью SIR-модели хуже всего соответствовал реальности. В работе О.И. Криворотько и др. [4] прогнозирование распространения COVID-19 в Москве и Новосибирской области осуществляется с помощью модели SEIR-D (учитывающей число умерших) и модели SEIR-HCD (учитывающей число умерших и число госпитализированных, находящихся в критическом состоянии). В работе А.Н. Наркевич и др. [5] распространение инфекции COVID-19 на территории Красноярска прогнозируется с помощью модели SIRU, учитывающей число незарегистрированных лиц с симптомами инфекции (U). Отмечается отличительная особенность модели SIRU — возможность моделирования на начальном этапе развития инфекции на определенной территории при отсутствии воздействий извне. В работе В.Ф. Обеснюк [6] предложен модифицированный вариант SEIR-модели, учитывающей численность лиц с бессимптомным течением болезни (P) и допускающий, таким образом, возможность заражения как от бессимптомных носителей, так и от лиц с доказанной инфекцией.

Однако параметры SIR-моделей и их модификаций, определяемые на основе фактических данных о заболеваемости, на начальном этапе развития эпидемии не всегда хорошо известны. Поэтому для прогнозирования эпидемий представляется целесообразным использовать простые модели с минимальным количеством параметров. Часто в основе таких моделей лежат дифференциальные или разностные уравнения.

В простейшем классическом случае распространение эпидемии представляется логистическим отображением (одномерное отображение Фейгенбаума):

$$x_{n+1} = \alpha x_n \left(1 - \frac{x_n}{N}\right),$$

где x_n — общее число зараженных в n-й день; α — коэффициент скорости роста популяции; N — емкость или общая численность популяции. Логистический рост числа зараженных наблюдается при значениях параметра $1 < \alpha < 2$. Прогнозирование распространения COVID-19 с помощью дискретной логистической модели в Москве и нескольких странах представлено в работе Э. М. Кольцовой и др. [7], где рассмотрены четыре сценария распространения COVID-19 в Москве, для каждого из которых получены кривые увеличения числа инфицированных и графики увеличения общего числа случаев, изучена динамика распространения инфекции по дням, определены пиковые времена, периоды эпидемии, количество инфицированных на пике и их рост.

К одной из распространенных математических моделей динамики числа зараженных с начала эпидемии $x(t)$ относится логистическое уравнение Ферхюльста:

$$\frac{dx}{dt} = \lambda x \left(1 - \frac{x}{K}\right), \qquad x(t_0) = x_0.$$

Помимо классической модели может использоваться обобщенная логистическая модель и модель с запаздыванием (учитывающая продолжительность инкубационного периода) [8]. Прогнозирование распространения COVID-19 в шести странах с помощью обобщенной логистической модели продемонстрировано в работе М.В. Кокоулина и др. [9]. При этом отмечается, что, несмотря на то, что в среднем модель неплохо описывает фактические данные, для более точного прогноза целесообразно строить многофакторные модели, учитывающие деление населения на возрастные и социальные группы, плотность населения и т. п.

Распространение инфекции обычно представляет не одну «изолированную» волну, а суперпозицию волн. В работах [10], [11] предложена методика выявления локальных волн. Данная методика продемонстрирована для описания распространения COVID-19 в нескольких странах мира, а также в мегаполисе Москва.

В работе [12] приводится сравнительная характеристика методов прогнозирования и оценки распространения COVID-19: компартментные модели, методы машинного обучения, ГИС-моделирование и агент-ориентированное моделирование. Отмечается, что компартментные модели (SIR, SEIR, логистические модели и др.) не дают возможности оценить экономические последствия пандемии, для этой цели могут использовать методы машинного обучения (регрессия, нейронные сети). Например, в исследовании [13], [14] с помощью уравнения линейной регрессии прогнозируется число летальных исходов в зависимости от числа инфицированных и количества тяжелых случаев COVID-19.

Еще один подход к исследованию моделей распространения COVID-19 рассматривался авторами настоящей статьи на основе комплексной оценки уровня эпидемиологической безопасности в субъектах Приволжского федерального округа [15]. Модель базируется на четырех относительных показателях распространения заболевания. Данные показатели нормируются, и строится их обобщенная оценка. Полученная оценка принимает значения от нуля и до единицы, что позволяет ее интерпретировать как вероятность рисков и угроз распространения пандемии. Для качественной интерпретации состояния эпидемиологической безопасности в регионах предлагается использовать пороговые уровни безопасности.

Основная часть

Цель исследования — моделирование динамики распространения COVID-19 и оценка его влияния на социально-экономическую систему региона, в частности степени загрузки системы здравоохранения и уровня временного выбытия рабочей силы из производственного процесса. Для этого строится модель динамики числа зараженных на дату. Число зараженных может моделироваться и прогнозироваться с помощью SIR-модели и ее модификаций. Но в рамках данной работы предлагается использовать простую математическую модель, имеющую минимум параметров, — логистическое уравнение Ферхюльста:

$$\frac{dx}{dt} = \lambda x\left(1 - \frac{x}{K}\right), \qquad x\left(t_0\right) = x_0. \tag{1}$$

В данном уравнении K — это количество людей, которые точно будут заражены к концу эпидемии, и λ — коэффициент скорости распространения. Решением данного уравнения является функция, отражающая общее число зараженных с начала эпидемии:

$$x(t) = \frac{x_0 K}{x_0 + (K - x_0)\cdot \exp\left(-\lambda(t - t_0)\right)}. \tag{2}$$

С помощью построенной функции $x(t)$ предлагается оценивать число зараженных на дату.

Число новых случаев за день можно определить как разность общего числа зараженных в моменты t и $(t - 1)$:

$$x_{new}(t) = x_1(t) = x(t) - x(t-1). \tag{3}$$

Число новых случаев заражения $x_T(t)$ за промежуток времени $[t - T; t]$ длиной T определяется как разность:

$$x_T(t) = x(t) - x(t-T). \tag{4}$$

Если в качестве T взять среднюю продолжительность заболевания, то величину $x_T(t)$ можно рассматривать как оценку числа зараженных на момент времени t.

В работе предлагается моделировать число зараженных $x^z(t)$ на момент t как $x_T(t)$, где T определяется как средняя продолжительность заболевания. Иными словами, число зараженных $x_z(t)$ на дату t можно оценивать как сумму

$$\begin{aligned} x^z(t) = x_{new}\left(t - (T-1)\right) + x_{new}\left(t - (T-2)\right) + \ldots + \\ + x_{new}(t) = x_T(t) \end{aligned} \tag{5}$$

моделируемого числа новых случаев заражения x_{new} за промежуток времени $[t - T; t]$, где T — средняя продолжительность заболевания. Тогда $x^z(t)$ можно рассматривать как оценку загрузки системы здравоохранения.

Продолжительность COVID-19 при легком течении болезни составляет 1—2 недели, при средней тяжести (при наличии неосложненной пневмонии) — 3—4 недели, при тяжелой форме — 1—1,5 месяца. Поэтому предварительно выбрано значение для средней продолжительности заболевания 3 недели (21 день). На рис. 1 представлена информация о числе зараженных на дату[5] $x_z(t)$ и суммарном числе но-

[5] Статистика коронавируса в Кировской области // https://russian-trade.com/coronavirus-russia/kirovskaya-oblast/

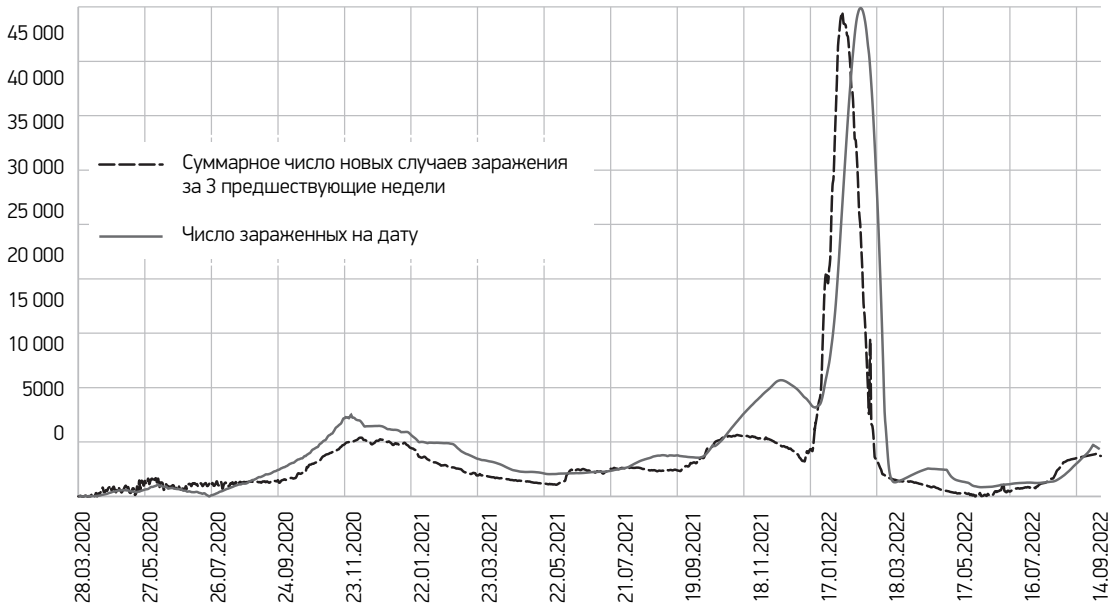

Рис. 1. Число зараженных на дату и суммарное число новых случаев заражения за последние три недели

Figure 1. The number of infected on the date and the total number of new cases of infection in the last three weeks

Источник: составлено авторами.

вых случаев заболевания за последние три недели, предшествующие этой дате, в Кировской области за период с 28.03.2020 по 06.10.2022 (922 наблюдения).

Визуальное сравнение графиков показывает, что суммарное число новых заражений может отличаться от числа зараженных. Особенно это проявляется во второй половине исследуемого периода, в частности, из-за меняющейся средней продолжительности болезни при распространении штамма Омикрон, а также под влиянием других факторов. Это указывает на сложный характер процесса и необходимость корректировки параметров при построении модели числа зараженных.

Суточные эпидемические кривые имеют несколько локальных максимумов и содержат плато. Причина сложной динамики объясняется тем, что отдельные субъекты РФ являются открытыми неоднородными системами, в которых время от времени случайно возникают новые очаги эпидемии, порождающие новые цепочки передачи инфекции от инфицированных к восприимчивым. В неоднородных системах вспышки эпидемии случаются в разное время в разных местах и распространяются с разной скоростью. Все это приводит к возникновению локальных волн эпидемии, сдвинутых по времени. В результате вспышка эпидемии в том или ином регионе складывается из многих локальных волн. Некоторые из них могут сливаться в одну общую волну. Можно сделать вывод, что суточные эпидемические кривые $x_{new}(t)$ представляют собой суперпозицию нескольких локальных волн, возможно, с различной средней продолжительностью заболевания.

На рис. 2 наглядно продемонстрировано, что в Кировской области за период с 28.03.2020 по 06.10.2022 зафиксировано 7 пиков, поэтому выделено 7 волн, причем последняя волна рассматривается как незавершенная (на рис. 2 указаны участки наибольшей активности волн).

Особое внимание вызывает шестая волна с наибольшей активностью в начале 2022 г., связанная с появлением штамма COVID-10 — Омикрон. Его отличительной особенностью явились более высокая заразность и короткий инкубационный период. В связи с этим в январе 2022 г. в Кировской области наблюдались антирекорды заболеваемости — более 2000 заражений за сутки. Последняя седьмая волна приходится на осень 2022 г., причем к началу октября наблюдался подход к плато этой волны.

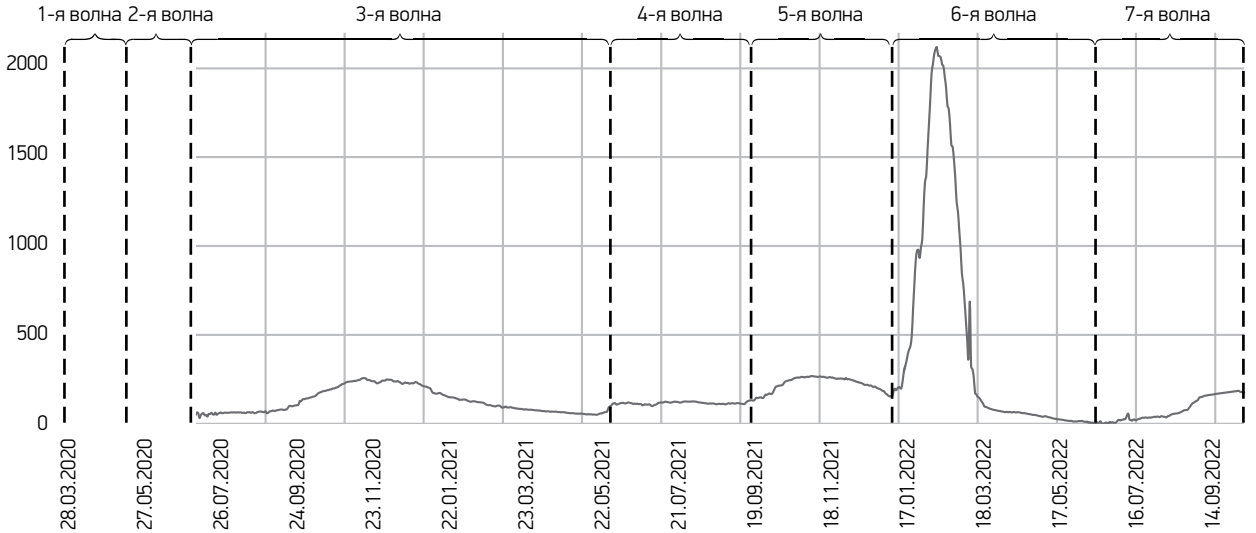

Рис. 2. Динамика волн новых случаев заражения COVID-19 в Кировской области за период с 28.03.2020 по 06.10.2022

Figure 2. Wave dynamics of new cases of COVID-19 infection in the Kirov region for the period from 28.03.2020 to 06.10.2022

Источник: составлено авторами.

В связи с этим динамика распространения COVID-19 на территории Кировской области была представлена в виде суперпозиции $x(t)$ семи волн моделей $x^1(t)$, $x^2(t)$, …, x^7(t) динамики общего числа зараженных с начала пандемии. Данная модель была использована для построения модели динамики числа зараженных на дату и оценки влияния COVID-19 на региональную экономику за период пандемии.

Для выявления волн использовалась методика, разработанная в работе [10]. Локальные волны вводятся в модель последовательно, при этом добавление новой волны происходит тогда, когда расчетные данные начинают значительно отставать от фактических.

При построении модели $x(t)$ аппроксимации накопленных значений числа суточных заражений для различных волн использовались индивидуальные параметры. В частности, при выборе аппроксимирующей функции $x^i(t)$ волны i использовалось решение уравнения (1) за счет соответствующего подбора параметров λ_i, K_i, $i = 1, 2, \ldots, 7$. Полученная таким образом модель суперпозиции $x(t) = x^1(t) + x^2(t) + \ldots + x^7(t)$ достаточно хорошо описывает динамику числа зараженных в Кировской области с начала эпидемии, что позволяет использовать ее для прогнозирования общего числа заражений до конца седьмой волны (до конца 2022 г.) (рис. 3).

Средняя ошибка аппроксимации полученной модели составляет 3,4%, что свидетельствует о высоком качестве модели. Поэтому модель суперпозиции $x(t)$ может быть использована для моделирования числа новых суточных заражений $x_1(t) = x(t) - x(t-1)$ и прогнозирования до конца седьмой волны. Впоследствии полученные фактические значения подтвердили адекватность такого прогнозирования (рис. 4).

Средняя ошибка аппроксимации модели новых случаев заражения $x_1(t)$ составляет 5,3%, что также подтверждает высокое качество модели. Это позволяет применять модель суперпозиции $x(t)$ для оценки числа зараженных на дату $x^z(t)$. При этом в модель вводятся дополнительные параметры — средние продолжительности заболевания для каждой волны (рис. 5).

На пике заражения штаммом Омикрон количество зараженных превышало 40 тыс. населения. С учетом того, что, по данным Росстата, в этот год в регионе на каждые 10 тыс. населения приходилось в среднем около 90 коек (что ощутимо выше среднего показателя по РФ — около 80 коек), а численность населения на конец 2021 г. составляла 1234,78 тыс. чел., то в этот период в регионе имелось около 11 тыс. коек. Если из них до половины могут быть использованы для больных с COVID-19, то это всего лишь 16% от числа зараженных на пике

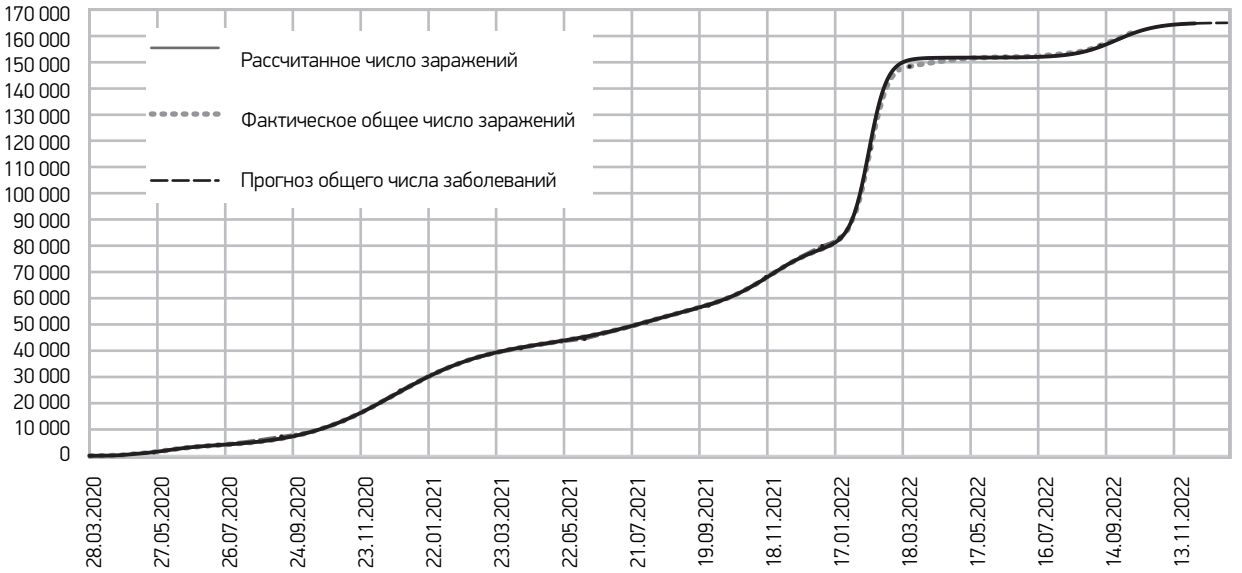

Рис. 3. Динамика общего числа заражений в Кировской области с начала эпидемии и модель суперпозиции волн

Figure 3. Dynamics of the total number of infections in the Kirov region since the beginning of the epidemic and the wave superposition model

Источник: составлено авторами.

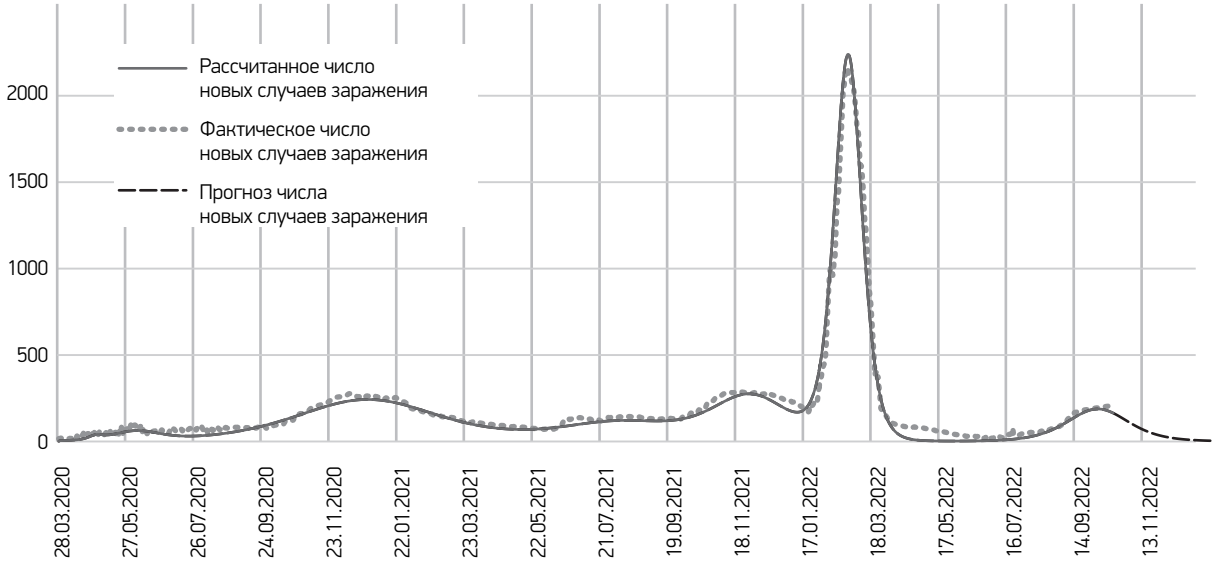

Рис. 4. Модель динамики и фактическое значение суточных заражений COVID-19 в Кировской области с начала эпидемии

Figure 4. Dynamics model and actual value of daily COVID-19 infections in the Kirov region since the beginning of the epidemic

Источник: составлено авторам на основе построенных моделей волн.

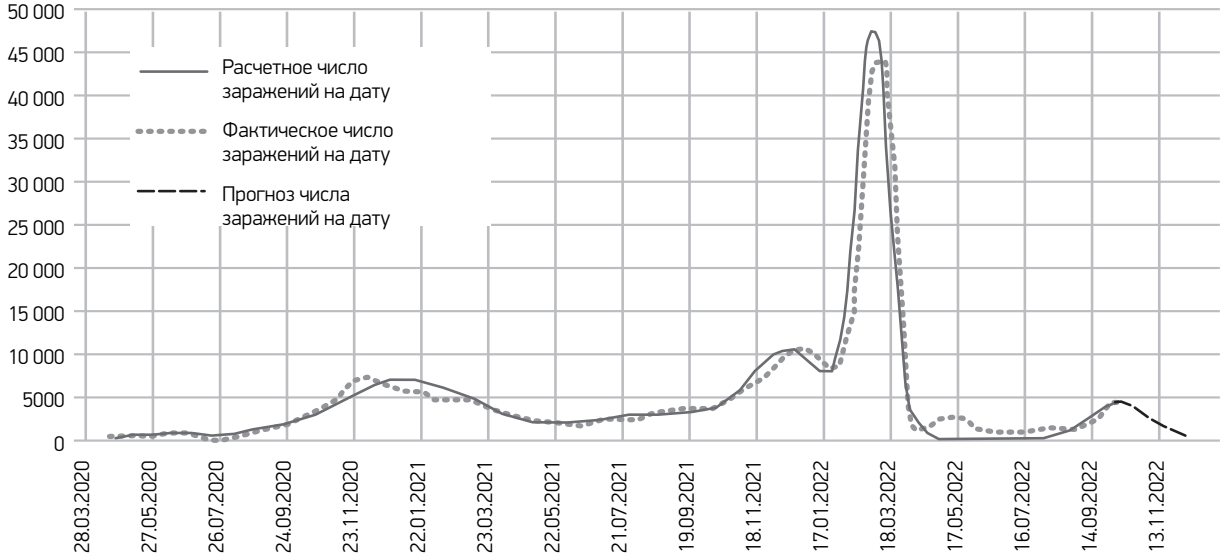

Рис. 5. Модель динамики и фактическое значение числа зараженных на дату в Кировской области с начала эпидемии

Figure 5. The dynamics model and the actual value of the number of infected on the date in the Kirov region since the beginning of the epidemic

Источник: составлено авторами на основе построенных моделей волн.

заболевания, что указывает на критическую загрузку системы здравоохранения в этот период.

Модель числа зараженных на дату также позволяет оценить временные потери трудовых ресурсов из-за распространения пандемии за период T путем суммирования всех значений $x^z(t)$ для $t \in T$. При оценке потерь использовалось предположение о равномерном распределении заболевания относительно возрастной структуры: доля заболевших среди занятых в экономике региона совпадает с долей всех занятых в общей численности населения региона — в Кировской области в исследуемом периоде это доля составляла около 45%, а численность занятых — около 555 тыс. населения. В таблице

Таблица. Оценка временных потерь занятого населения Кировской области в результате волн распространения COVID-19

Table. Estimation of temporary losses of the employed population of the Kirov region as a result of waves of COVID-19 spread

Волна	Период существенных заражений		Пик числа новых случаев	Временные потери среди занятого населения	
	начало	конец		максимальные суточные, %	в среднем за волну, %
1	23.04.2020	27.05.2020	Конец апреля 2020	0,05	0,01
2	24.04.2020	04.08.2020	Начало июня 2020	0,14	0,03
3	16.06.2020	21.07.2021	Конец декабря 2020	1,27	0,24
4	23.03.2021	28.12.2021	Конец июля 2021	0,52	0,11
5	09.08.2021	29.03.2022	Конец ноября 2021	1,81	0,34
6	24.12.2021	01.05.2022	Середина февраля 2022	8,24	1,10
7	07.07.2022	08.12.2022	Конец сентября 2022	0,80	0,17

Источник: расчеты авторов на основе построенных моделей волн.

представлено влияние волн распространения COVID-19 на социально-экономическую систему региона. В качестве начала существенных заражений очередной волны принималась дата, когда суточные заражения моделируемой волны впервые превышают 10 человек.

Заключение

Исследование показало, что распространение заболеваемости COVID-19 неплохо моделируется при помощи суперпозиции нескольких локальных волн, которые, в частности, могут описывать распространение различных штаммов COVID-19. Число всех зараженных с начала волны может описываться с помощью SIR-модели в форме двухпараметрического логистического уравнения Ферхюльста. На базе этой модели моделируется и прогнозируется количество суточных заражений и число зараженных на дату. В последнем случае в модель вводится дополнительный параметр — средняя продолжительность заболевания в моделируемой волне. Исследование показало возможность адекватного прогнозирования распространения заболевания и оценки социально-экономических последствий. В частности, на пике волны заболевания возможен критический уровень загрузки коечного фонда системы здравоохранения, а временное выбытие из-за заболевания рабочей силы может в разы превышать уровень безработицы.

Литература [References]

1. Пространственно-временное моделирование эпидемии COVID-19 / В.Л. Соколовский, Г.Б. Фурман, Д.А. Полянская, Е.Г. Фурман // Анализ риска здоровью. 2021. № 1. С. 23—37.
DOI: 10.21668/health.risk/2021.1.03 [Sokolovsky V.L., Furman G.B., Polyanskaya D.A., Furman E.G. Spatio-temporal modeling of COVID-19 epidemic // Health Risk Analysis, 2021, no. 1, pp. 23–37, (In Russ.). DOI: 10.21668/health.risk/2021.1.03.eng]
2. Томчин Д.А., Ситчихина М.С., Ананьевский М.С., Свенцицкая Т.А., Фрадков А.Л. Прогноз динамики пандемии COVID-19 по России на основе простых математических моделей эпидемий. Информационно-управляющие системы, 2021. № 6. С. 31—41, doi: 10.31799/1684-8853-2021-6-31-41 [Tomchin D.A., Sitchikhina M.S., Ananievsky M.S., Sventsitskaya T.A., Fradkov A.L. Prediction of COVID-19 pandemic dynamics in Russia based on simple mathematical models of epidemics // Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]. 2021;(6):31–41, (In Russ.), doi: 10.31799/1684-8853-2021-6-31-41]
3. Верба В.А., Вовик А.Г. Разработка модели, прогнозирующей распространение инфекций на основе исторических данных на примере COVID-19 // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции: в 3 ч., Санкт-Петербург, 13—14 октября 2021 г. Том Часть 3. СПб.: Политех-Пресс, 2021. С. 555—569.
DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-412 [Verba V.A., Vovik A.G. Development of a model predicting the spread of infections based on historical data on the example of COVID-19 // System analysis in design and management: collection of scientific papers of the XXV International Scientific and educational-practical conference: in 3 parts, St. Petersburg, October 13-14, 2021. Vol. Part 3. St. Petersburg: Polytech Press, 2021. P. 555—569, (In Russ.).
DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-412]
4. Криворотько О.И., Кабанихин С.И., Зятьков Н.Ю. и др. Математическое моделирование и прогнозирование COVID-19 в Москве и Новосибирской области // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23. № 4. С. 395—414. DOI: 10.15372/SJNM20200404 [Krivorotko O.I., Kabanikhin S.I., Zyatkov N.Y. et al. Mathematical modeling and forecasting of COVID-19 in Moscow and the Novosibirsk region // Siberian Journal of Computational Mathematics. 2020;23(4):395-414, (In Russ.). DOI: 10.15372/SJNM20200404]
5. Наркевич А.Н., Шадрин К.В., Виноградов К.А. Моделирование распространения коронавирусной инфекции на территории города Красноярска // Сибирское медицинское обозрение. 2020. № 2(122). С. 111—116. DOI: 10.20333/2500136-2020-2-111-116 [Narkevich A.N., Shadrin K.V., Vinogradov K.A. Modeling of coronavirus infection spread among the residents of Krasnoyarsk city // Siberian Medical Review. 2020;(2(122)):111-116, (In Russ.). DOI: 10.20333/2500136-2020-2-111-116]
6. Обеснюк В.Ф. Динамика локальной эпидемической вспышки COVID-19 через призму компартмент-моделирования // Анализ риска здоровью. 2020. № 2. С. 83—91. DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.09 [Obesnyuk, V.F. Dynamics of local epidemic COVID-19 outbreak through the prism of compartment modeling // Health Risk Analysis. 2020;(2):83-91, (In Russ.).
DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.09]

7. Кольцова Э.М. Куркина Е.С., Васецкий А.М. Математическое моделирование распространения эпидемии коронавируса COVID-19 в Москве // Computational Nanotechnology. 2020. Т. 7. № 1. С. 99—105. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-1-99-105 [Koltsova E.M., Kurkina E.S., Vasetsky A.M., Mathematical modeling of the spread of the COVID-19 in Moscow // Computational Nanotechnology. 2020;7(1):99-105, (In Russ.). DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-1-99-105]
8. Куркин А.А., Куркина О.Е., Пелиновский Е.Н. Логистические модели распространения эпидемий // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 2(129). С. 9—18. DOI: 10.46960/1816-210X_2020_2_9 [Kurkin A.A., Kurkina O.E., Pelinovsky E.N. Logistic models of epidemic growth // Proceedings of the R.E. Alekseev NSTU. 2020;(2(129)):9-18, (In Russ.). DOI: 10.46960/1816-210X_2020_2_9]
9. Кокоулина М.В., Епифанова А.С., Пелиновский Е.Н. и др. Анализ динамики распространения коронавируса с помощью обобщенной логистической модели // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3(130). С. 28—41. DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_28 [Kokoulina M.V., Epifanova A.S., Pelinovsky E.N. et al. Analysis of coronavirus dynamics using the generalized logistic model // Proceedings of the R.E. Alekseev NSTU. 2020;(3(130)):28-41, (In Russ.). DOI: 10.46960/1816-210X_2020_3_28]
10. Куркина Е.С., Кольцова Э.М. Математическое моделирование распространения волн эпидемии коронавируса COVID-19 в разных странах мира // Прикладная математика и информатика. М.: МАКС Пресс. 2021. С. 46—79. [Kurkina E.S., Koltsova E.M. Mathematical modeling of the spread of waves of the COVID-19 coronavirus epidemic in different countries of the world // Applied mathematics and Computer science. Moscow: MAX Press LLC, 2021. P. 46—79, (In Russ.)]
11. Куркина Е.С., Зинченко Д.И., Кольцова Е.М. Математическое моделирование и прогнозирование распространения COVID-19: многоволновая модель развития эпидемии в Великобритании // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 5-й Международной конференции (3—4 февраля 2022 г., Москва). М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2022. С. 182—192, https://keldysh.ru/future/2022/16.pdf, https://doi.org/10.20948/future-2022-16 [Kurkina E.S., Zinchenko D.I., Koltsova E.M. Mathematical modeling and forecasting of the spread of COVID-19: a multi-wave model of epidemic development in the UK // Designing the future. Problems of digital reality: proceedings of the 5th International Conference (February 3—4, 2022, Moscow). M.: M.V. Keldysh IPM, 2022. C. 182—192, https://keldysh.ru/future/2022/16.pdf, (In Russ.), https://doi.org/10.20948/future-2022-16]
12. Наумов И.В., Отмахова Ю.С., Красных С.С. Методологический подход к моделированию и прогнозированию воздействия пространственной неоднородности процессов распространения COVID-19 на экономическое развитие регионов России // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13. № 3. С. 629—648. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-3-629-648 [Naumov I.V., Otmakhova Yu.S., Krasnykh S.S. Methodological approach to modeling and forecasting the impact of the spatial heterogeneity of the COVID-19 spread on the economic development of Russian Regions // Computer Research and Modeling. 2021;13(3):629-648, (In Russ.). DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-3-629-648]
13. Melik-Huseynov D.V., Karyakin N.N., Blagonravova A.S. et al. Regression models predicting the number of deaths from the new coronavirus infection // Modern Technologies in Medicine. 2020;12(2):6-13. DOI: 10.17691/stm2020.12.2.01
14. Карякин Н.Н., Саперкин Н.В., Баврина А.П. и др. Модернизация прогностических регрессионных моделей для оценки количества летальных исходов при новой коронавирусной инфекции // Современные технологии в медицине. 2020. Т. 12. № 4. С. 6—12. DOI: 10.17691/stm2020.12.4.01 [Karyakin N.N., Saperkin N.V., Bavrina A.P., Drugova O.V., Klimko V.I., Blagonravova A.S., Kovalishena O.V. Modernization of Regression Models to Predict the Number of Deaths from the New Coronavirus Infection // Sovremennye tehnologii v medicine. 2020;12(4):6, (In Russ,), https://doi.org/10.17691/stm2020.12.4.01]
15. Караулов В.М., Караулова Л.В., Каранина Е.В. Математическая модель обобщенной оценки рейтинга сходных объектов на основе статистических данных с позиций эпидемиологической безопасности (на примере заболеваемости COVID-19 в регионах ПФО) // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 5. С. 58—71, https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-5-58-71 [Karaulov V.M., Karaulova L.V., Karanina E.V. Mathematical Model of Generalized Assessment of the Rating of Similar Objects Based on Statistical Data from the Standpoint of Epidemiological Safety (on the Example of the Incidence of COVID-19 in the Regions of the Volga Federal District) // Issues of Risk Analysis. 2021;18(5):58-71, (In Russ.), https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-5-58-71]

Сведения об авторах

Караулова Лариса Владимировна: кандидат педагогических наук, доцент кафедры информатики и физики ФГБОУ ВО Кировский ГМУ Минздрава России
Количество публикаций: более 60
Область научных интересов: математическая статистика, математическое моделирование, математическое моделирование социально-экономических процессов
ORCID: 0000-0003-4618-8443
Контактная информация:
Адрес: 610998, Приволжский федеральный округ, Кировская область, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112
krabot1@mail.ru

Караулов Василий Михайлович: кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры финансов и экономической безопасности ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
Количество публикаций: более 70, в т. ч. монографий и учебных изданий
Область научных интересов: социально-экономическое развитие, региональная экономика, качество жизни, анализ экономических рисков, экономическая безопасность, прогнозирование
Scopus Author ID: 57194595826
ORCID: 0000-0002-9599-3740
Контактная информация:
Адрес: 610000, Приволжский федеральный округ, Кировская область, г. Киров, ул. Свободы, д. 122, каб. 115, 218
vm_karaulov@vyatsu.ru

Вишняков Алексей Васильевич: студент ФГБОУ ВО Кировский ГМУ Минздрава России
Область научных интересов: математическая статистика, математическое моделирование
Контактная информация:
Адрес: 610998, Приволжский федеральный округ, Кировская область, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112
mishakrossingover@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 02.05.2023
Одобрена после рецензирования: 12.05.2023
Принята к публикации: 16.05.2023
Дата публикации: 30.06.2023

The article was submitted: 02.05.2023
Approved after reviewing: 12.05.2023
Accepted for publication: 16.05.2023
Date of publication: 30.06.2023