

УДК: 303.2, 316.6

1.4. ОБЩИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПРОГНОЗЫ ДИНАМИКИ COVID-19

Грачёв И.Д., Ноакк Н.В.,
ЦЭМИ РАН, Москва, России.

Ожидание окончания эпидемии Covid-19 после сверхмощной омикрон-волны не оправдалось. Эпидемия продолжилась в квазипериодическом режиме. Вместе с тем особенности омикрон-волны после четырёх волн одного инновационного типа продемонстрировали стремление вируса Covid-19 задействовать все инновационные (мутационные) стратегии, среди которых пока не реализован вариант с одновременным обнулением иммунитета качественным ростом заразности и смертности одновременно. Опасность этого варианта велика, что делает необходимым построить хотя бы грубые оценки среднесрочной динамики эпидемии на будущее. В настоящей работе построены вариативные прогнозы эпидемии Covid-19 для Москвы на 1600 дней от начала с использованием разработанной нами двухтриггерной обобщённой SIR-модели с добавлением мутационных уравнений, учитывающих инновации двух типов. Модель уточнялась по параметрам с использованием дополнительной информации, полученной во время и после омикрон-волны. Работоспособность модели оценивалась для Москвы сравнением фактической и модельной динамики непосредственно и с использованием автокорреляционных функций. Модель отражает все основные особенности реального процесса и, следовательно, позволяет строить прогнозы на среднесрочную перспективу. Цифровое моделирование и эксперимент не дают оснований ожидать со значимой вероятностью окончания Covid-19.

Введение

Осторожные надежды на то, что после мощной омикрон-волны Covid-19 пойдет на спад, не оправдались. По факту пошли следующие волны эпидемии предположительно с той же периодичностью. В то же время вполне оправдались наши исходные [Грачёв И.Д. и др., 2020] оценки, что от Covid-19 погибнет порядка 10 млн человек. На сегодняшний момент ВОЗ, суммируя данные из разных стран, даёт цифру порядка 7 млн, что само по себе уже очень много. Но и она не вполне отражает ужас ситуации. Так, по России, которая вряд ли худшая по точности регистрации, ВОЗ фиксирует порядка 400 тыс. погибших. В то же время за ковидные годы в России число пенсионеров сократилось более чем на 2 миллиона.

Разумеется, из этого не следует прямого утверждения о том, что все они умерли от ковида, но эти события коррелированы. Мы вправе полагать, что какая-то их часть погибла от вторичных последствий Covid-19.

Не меньшие вопросы вызывает и надёжность регистрации бессимптомных и слабосимптомных переносчиков заразы.

Изложенное выше означает, что, в отличие от информационного и психологического поля, в реальной жизни острота проблемы сохраняется. Как минимум, нужны хотя бы грубые прогнозы динамики Covid-19 для конкретных городов и стран. В то же время из доступной литературы нам неизвестны модели, отражающие многоволновую динамику эпидемии до настоящего дня, кроме нашей двухтриггерной [Grachev, I.D., et, 2023].

Так, исследователи С. Avery, W. Bossert, A. Clark, G. Ellison and S.F. Ellison провели аналитический обзор моделей распространения COVID-19 [Avery et al., 2020]. Авторы определили два основных подхода к моделированию распространения пандемии COVID-19: «механистический» и «феноменологический». Эти подходы аналогичны структурным моделям и моделям поведения фирм в экономике. Механистические модели оказались более эффективными, т.к. они учитывали базовые процессы распространения пандемии. Эти модели можно рассматривать как аналог макроэкономических моделей.

SIR-модель («восприимчивый / инфекционный / выздоровевший») является наиболее распространённой моделью для исследования распространения COVID-19. Эта модель аналогична модели цепей Маркова с непрерывным временем и ограниченным числом переходов между состояниями. Все переходы между состояниями представлены экспоненциальными моделями, характеризующие периоды полураспада. В модель можно включить временные задержки. Так, наличие инкубационного периода для SARS-CoV-2 в 5-6 дней, позволяет расширить модель SIR до SEIR, включив в нее четвертое состояние «выявлено». Модель SAIR включает дополнительное «бессимптомное» инфицированное состояние («компарментная модель»).

В [Acemoglu et al., 2020a] разработана модель SIR со множеством рисков (MR-SIR). Она учитывает возрастные различия по уровням инфицирования, госпитализации и смерти между однородными группами на примере США. Авторы определили, что снижение экономических потерь и смертности в модели может дать совокупность мер по снижению контактов между группами и усилению изоляции инфицированных лиц.

В исследовании [Brotherhood et al., 2020] было доказано, что регулярное тестирование снижает неопределённость ситуации в период пандемии. Стандартная эпидемиологическая модель SIR была дополнена временным параметром нахождения индивидуума вне дома в условиях пандемии и возрастным параметром. Показано, что несерьёзное отношение индивидуумов к противоэпидемическим мероприятиям и значительное время нахождения их вне дома способствует росту инфицирования. Тем не менее, в

[Cochrane, 2020] автор отмечал, что использование классической модели SIR для прогнозирования распространения пандемии Covid-19 может стать ошибочным. Стандартная модель SIR включает в качестве константы предположение о росте заражений в геометрической прогрессии. Ее следствием становится ограниченный во времени дальнейший рост заражений из-за уменьшения числа восприимчивых людей в популяции. Для исправления этой модели в [Fernandez-Villaverde, Jones, 2020] были добавлены три лага: D – мертвый, S – выздоровевший и иммунный, N – популяция. Это позволило использовать в модели экспоненциальное затухание, а не фиксированное запаздывание для определения времени.

Можно предположить, что на настоящее время адекватной моделью развития пандемии COVID-19 может стать стандартная модель SIR, дополненная множественными факторами, или объединение модели SIR с другими экономическими моделями, например, с вероятностной моделью смешанных экономик [Грачёв И.Д. и др, 2021b]. Это позволит одновременно учитывать эпидемические и экономические аспекты развития пандемии COVID-19. В нашем исследовании использованы статистические данные контактов больных и здоровых людей в различных разрезах [COVID-19: Statistics. (n.d.)]

В связи с тем, что этот юный вирус, мутируя вновь и вновь, добавляет нам экспериментальную информацию, необходима и её адаптация и уточнение, что и является основной целью настоящего исследования.

Начнем с вспомогательной таблицы 1, в которой представлены, по текущим данным ВОЗ, выборочные данные по странам с разных континентов.

Таблица 1. Данные по странам, заболевшие/выздоровевшие/умершие

Страны	Население (млн)	Заболевшие (млн)	Отношение б/в	Умерло (% от б)	Корректировка (% умерших)
США	302	104	3	1,1	0,6
Германия	84	38	2,2	0,4	0,3
Южная Корея	51	31	1,6	0,1	0,1
Россия	147	22	7	1,8	0,4
Австралия	26	12	2,2	0,2	0,15
Иран	87	8	11	1,9	0,3
Мексика	130	7	19	4,5	0,3
ЮАР	60	4	15	2,5	0,3

В таблице 1 сразу бросается в глаза чрезмерный разброс летальности от Южной Кореи (0,1%) до Мексики (4,5%). Довольно трудно предположить, что медицина Мексики находится в состоянии «хуже африканского». Скорее, мы должны выдвинуть гипотезу о том, что в Мексике зарегистрированы (7млн) далеко не все реальные заболевшие переносчики Covid-19. Кстати сказать, на самом старте эпидемии высказывалась и проверялась гипотеза о том, в некоторых вполне благополучных странах регистрируется порядка 10% реальных переносчиков заразы Covid-19. Гипотезе о частичной регистрации соответствует явная зависимость зарегистрированной летальности от обратной доли (б/в) числа заболевших (в) от общего населения (б).

Грубо говоря, мы вправе предположить, что в Южной Корее с её очень высоким уровнем цифровизации отслеживались и фиксировались почти все реальные контакты, а, следовательно, выявлялись почти все заболевшие, даже бессимптомные чего явно не было в других странах. Конкретно для России это статистическое утверждение вполне соответствует личному опыту авторов. Кроме того, гипотезе о том, что в каждой стране открыто или скрытно переболеет около двух третей населения (как в Южной Корее) высказывалась нами в самых первых публикациях на основе исторических встреч населения Земли с юными инновационными вирусами.

Эта гипотеза может (а по мнению авторов, должна) быть предметом отдельного статистического анализа, который однако сильно отклоняется от цели настоящей статьи.

Для последующего сравнения реальных и модельных данных Таблица 1 дает нам достаточно оснований считать возможной перенормировку числа заболевших «до Южной Кореи» при хорошем совпадении других параметров динамических кривых.

Ниже на рис. 1 представлены зафиксированные на март 2023 года данные о заболевших, выздоровевших, умерших в г. Москва. Выбор Москвы в качестве компактного базового объекта сбора баз данных по Covid-19 вполне оправдал наши ожидания, так как в Москве наблюдались отчётливо все (или, возможно, почти все) волны эпидемии без явных выпадений.

Предложенная нами ранее двухтриггерная мутационная модель неплохо справлялась с моделированием динамики эпидемии Covid-19 в Москве до окончания омикрон-волны с существенно более высокой заразностью $\beta_1 > \beta_0$ и пониженной летальностью. Далее в прогнозах имела место развилка, по которой у нас не было никакой экспериментальной информации. Вирус мог как закрепиться на новом уровне заразности β_1 , так и вернуться к ранее многократно опробованной β_0 . Из рисунка 1 следует, что с точностью до случайной составляющей реализован второй вариант $\beta = \beta_0$. Кроме того, экстремум омикрон-волны не выпадает из приближенного периода ранее наблюдаемого ряда, что позволяет предположить синхронизацию двух мутационных триггеров.

Эта дополнительная экспериментальная информация позволяет приступить к уточнению эпидемической части модели, чем мы и займёмся ниже.

Кроме того, мы считаем необходимым акцентировать внимание на некоторых отклонениях от классической SIR-модели, которые мы ранее упоминали вскользь в связи с тем, что они не играли большой роли на том этапе. Речь, прежде всего, о стохастическом описании заражений-выздоровлений-смертей, которое безусловно имеет место в жизни, но никак не отражено в классических SIR-моделях. Мы моделировали реальность ежедневным включением 25%-ой по коэффициенту вариаций случайной составляющей. Усложнение модели с учётом случайности всех её коэффициентов мы не считаем целесообразным с учётом реального опыта работы с большими ошибками.

Поскольку стохастические дифференциальные уравнения не слишком удобны для работы, имеет смысл записать их в исходных дискретных постановках, что кстати ближе к реальному дискретному характеру контактов, заражениям и т.д., хотя, конечно, суточный уровень дискретизации тоже является приближением.

С учётом вышеизложенного система дискретно непрерывных экономико-эпидемиологических уравнений имеет вид

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta(t) \times \frac{S(t) \times I(t)}{N}, \quad (1)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta(t) \times \frac{S(t) \times I(t)}{N} - \gamma \times I(t) - \alpha \times I(t), \quad (2)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma \times I(t), \quad (3)$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \alpha \times I(t), \quad (4)$$

$$\bar{A}_{i+1} = \bar{A}_i + \text{diag}(\bar{\xi}_i \cdot (\beta(t)) \times \bar{A}_i - \langle \bar{\xi}_i, P \rangle \times \bar{A}_i), \quad (5)$$

где:

$S(t)$ – индивидуумы, подверженные заражению; $S(0) = N \approx 3 \times 10^6$;

$I(t)$ – инфицированные и способные к передаче инфекции индивидуумы;

$R(t)$ – выздоровевшие индивидуумы;

$D(t)$ – умершие индивидуумы;

\bar{A}_i – вектор валовых производств (капитализаций) агентов экономической системы;

$\beta(t)$ – некоторая функция, которая зависит от карантинных мероприятий власти и уточняется по накопленным экспериментальным данным;

t – временной параметр.

Векторы \bar{P} и $\bar{\xi}_i$ характеризуют цены и индивидуальную экономическую эффективность агентов.

Каждый коэффициент имеет следующий диапазон значений:

$\beta_0 = (0,2-0,3)$ – коэффициент интенсивности контактов индивидов с последующим инфицированием;

$\gamma_0 = (1/10-1/14)$ – коэффициент интенсивности выздоровления инфицированных индивидов;

$\alpha_0 = (0,02-0,05)$ – коэффициент смертности заболевших индивидов.

Суточные случайные колебания заражений и их регистраций оценены коэффициентом вариации $CV_0=0,25$.

Простейшим вариантом моделирования появления новых штаммов и учета их влияния на развитие пандемии Covid-19 является включение в цифровую модель (1)-(5) триггера (6).

$$\begin{cases} K_1 = K_1 + \Delta K_1 \\ \text{с изменением } \alpha(K), \beta(K), \gamma(K), \\ S = S + \Delta S(K), \end{cases} \quad (6)$$

$$K_1(0) = 0, \text{ если } K_1(i) > 1, \text{ то иммунитет обнуляется,}$$

и триггера K_2

$$K_2 = + \Delta K_2 \quad (7)$$

$$K_2(0) = 0, \text{ если } 1,1 > K_2(i) > 1, \text{ то } \beta(i) = \beta_1.$$

В соответствии с вышеизложенными уточнениями к формулам (1)–(7) к $I(i)$ по дискретному алгоритмическому представлению (2) на каждом шаге добавлялась случайная величина с коэффициентом вариации примерно 0,25.

Для конкретных модельных вычислений, представленных рисунками (2)–(8), использовалось

$$\Delta K_1 = 0,012 \times (0,5 + 5 \times RAND(1)) \quad (8)$$

$$\Delta K_2 = 0,003 \times RAND(1), \quad (9),$$

что позволило в рамках одной модели по инновациям первого типа получить адекватные реализации не только для Москвы, но и для большинства случайно выбранных стран.

ΔK_1 и ΔK_2 синхронизированы в среднем по (8) и (9). Следует заметить, что для волн типа «омикрон» (инновации второго типа) пока нет достаточной информации.

На рисунке 2 представлена одна из реализаций модельных цифровых вычислений по (1)–(9), которая отражает все особенности реализации эпидемии Covid-19 в г. Москва.

Учитывая отсутствие априорных оснований полагать неизменность среднего периода эпидемического процесса, на рис. 3 и рис. 4 представлены автокорреляционные функции, посчитанные для Covid-19

в г. Москва в начале эпидемии и на настоящий момент. Расчёты пока не дают оснований полагать наличие значимых изменений этой интегральной характеристики случайного эпидемического процесса. Для сравнения на рис. 5 представлена автокорреляционная функция «модельной эпидемии» (рис. 2).

Для демонстрации возможности расширения области применения модели (1)-(9), адаптированной по параметрам для Москвы, с сильно вариативной ΔK_1 , на рис. 6 представлена автокорреляционная функция для Covid-19 в Италии. Аналогичные расчёты выполнены и для других стран.

С учётом реальных расхождений автокорреляционных функций для Москвы в разное время и для Москвы с контрольной страной модельная по (1)-(3) автокорреляционная функция отражает все основные особенности динамики Covid-19.

Совокупность численных экспериментов по цифровой двухтриггерной модификации классической SIR-модели (1)-(9), частично представленной рисунками 1-6, позволяет считать её работоспособной и, следовательно, строить вероятностные прогнозы на будущее. Две из множества реализаций цифровых экспериментов для г. Москва представлены рис. 7 и рис. 8. Хотя они и демонстрируют большой разброс вариантов продолжения эпидемии, все они дают основание утверждать, что адекватное моделирование экспериментальных фактов, имевших место до сегодняшнего дня, не дает основание надеяться на прекращение эпидемии. Опасно возможное накопление волны (рис. 7) на высокую летальность.

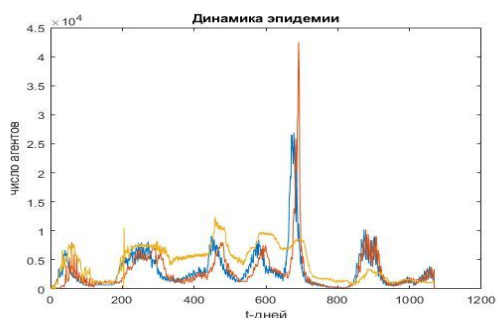


Рис. 1 Динамика эпидемии. Москва 01.03.2023
(источник: составлено авторами)

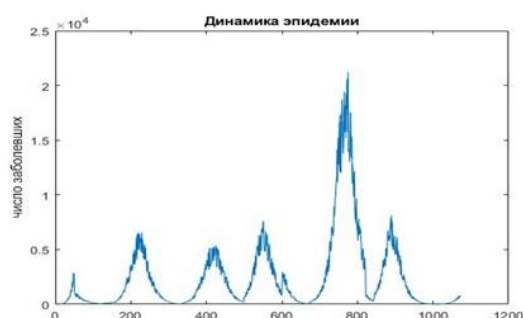


Рис. 2 Модельная динамика 1.03.2023
(источник: составлено авторами).

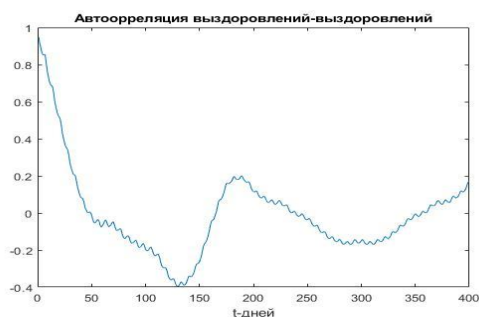


Рис. 3 Автокорреляция
Москва 11.11.2021
(источник: составлено авторами).

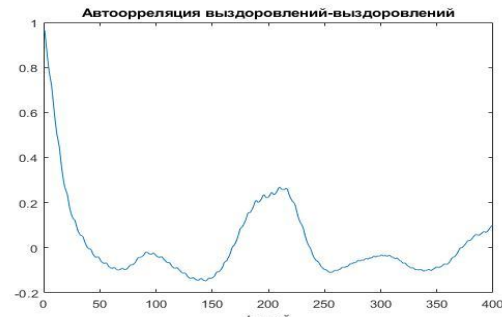


Рис. 4 Автокорреляция
Москва 01.03.2023
(источник: составлено авторами).

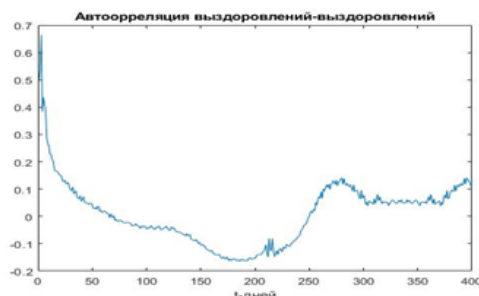


Рис. 5 Модельная автокорреляция заболевших
Москва 01.03.2023
(источник: составлено авторами).

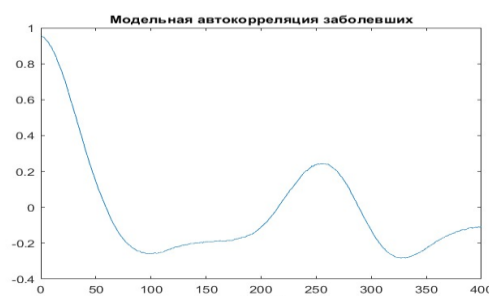


Рис. 6 Автокорреляция выздоровлений
Италия 01.11.2021
(источник: составлено авторами).

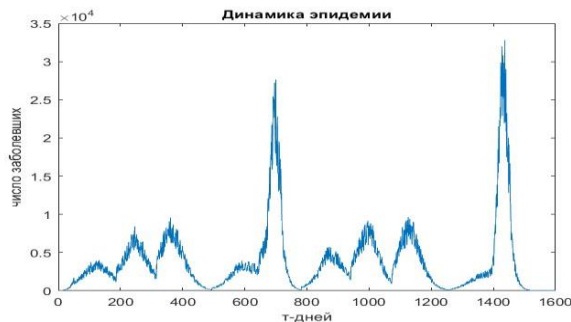


Рис. 7. Прогноз динамики Москва 1600 дней вар. 1 (источник: составлено авторами).

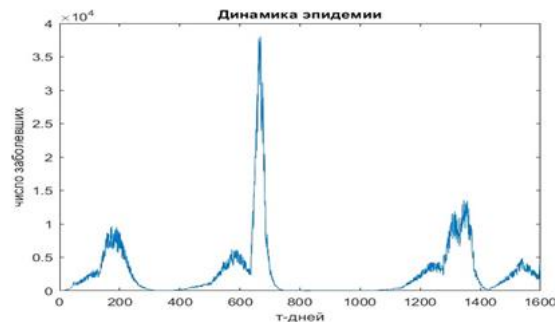


Рис. 8. Прогноз динамики Москва 1600 дней, вар. 2 (источник: составлено авторами).

Заключение

Весь набор экспериментальных данных показывает, что человечеству скорее всего придётся долго сосуществовать с вирусом К-19. Для минимизации потерь от этого сосуществования необходимо иметь хотя бы многовариантные сценарные оценки его динамики на будущее.

В работе на основе двухтриггерной мутационной модели, расширяющей SIR-модель, проанализирована текущая экспериментальная информация по г. Москва и некоторым другим субъектам и построены вероятностные сценарные прогнозы на 1600 дней от начала эпидемии.

Литература

1. Грачёв И.Д., Грачёв Д.И., Ларин С.Н., Ноак Н.В. Оценка экономических результатов различных вариантов карантинных с использованием комбинированной цифровой экономико-эпидемиологической модели // Экономика и предпринимательство, 2020. Вып.14. №2(115). С.902-909. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.115.2.182>
2. Грачёв И.Д., Ноак Н.В. Оценка инновационных стратегий вируса Covid-19 и людей по массовым цифровым данным // Цифровая экономика. 2021а. №3(15). С.63-69. <https://doi.org/10.34706/DE-2021-03-04>.
3. Грачёв, И.Д., Ларин С.Н., Ноак Н.В. Оптимизация управления противоэпидемиологическими мероприятиями на основе цифровой социально-экономической модели // Экономика и предпринимательство, 2021б. Вып.15. №3(128). С.67-74. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.115.2.175>
4. Acemoglu D., Chernozhukov V., Werning I., Whinston M. D. A multi-risk SIR model with optimally targeted lockdown // NBER Working Paper 27102, 2020. <https://doi.org/10.1920/wp.cem.2020.1420>
5. Acemoglu, D., Makhdoumi, A., Malekian, A., & Ozdaglar, A. (2020b). Testing, voluntary social distancing and the spread of an infection. National bureau of economic research. DOI: 10.3386/w27483.
6. Avery C., Bossert W., Clark A., Ellison G., Ellison S.F. Policy implications of models of the spread of coronavirus: Perspectives and opportunities for economists // NBER Working Paper 27007, 2020. DOI: 10.3386/w27007
7. Brotherhood L., Kircher P., Santos C., Tertilt M. An economic model of the Covid-19 epidemic: The importance of testing and age-specific policies // CESifo Working Paper, 2020. [Электронный ресурс]. URL – https://www.cesifo.org/DocDL/cesifo1_wp8316.pdf.
8. Cochrane, J.C. (2020). An SIR model with behavior. Retrieved from <https://johnhcochrane.blogspot.com/2020/05/an-sir-model-with-behavior.html>.
9. COVID-19: Statistics. (n.d.). Retrieved from https://yandex.ru/covid19/stat?utm_source=main_graph&utm_source=main_notif&geoid=225.
10. Fernandez-Villaverde, J. and C. I. Jones (2020, May). Estimating and Simulating a SIRD Model of COVID-19 for Many Countries, States, and Cities. Working Paper 27128, National Bureau of Economic Research.
11. Grachev, I.D., Grachev, D.I., Larin, S.N., Noack, N.V. and Baranova, N.M. (2023). Modelling the Sustainable Socio-Economic Development of Russia and Other Countries via the Digital Model Toolkit of the Quasi-Periodic Dynamics of the COVID-19 Pandemic", Popkova, E.G. (Ed.) Game Strategies for Business Integration in the Digital Economy (Advances in Business Marketing and Purchasing, Vol. 27), Emerald Publishing Limited, Bingley, pp. 171-180. <https://doi.org/10.1108/S1069-096420230000027018>.

References in Cyrillics

1. Grachyov I.D., Grachyov D.I., Larin S.N., Noack N.V. Ocenka e`konomicheskix rezul'tatov razlichny`x variantov karantinov s ispol'zovaniem kombinirovannoj cifrovoj e`konomiko-e`pidemicheskoy modeli // E`konomika i predprinimatel'stvo, 2020. Vy`p.14. №2(115). S.902-909. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.115.2.182>

2. Grachyov I.D., Noakk N.V. Ocenka innovacionny`x strategij virusa Covid-19 i lyudej po mas-sovy`m cifrovy`m danny`m // Cifrovaya e`konomika. 2021a. №3(15). S.63-69. <https://doi.org/10.34706/DE-2021-03-04>.
3. Grachyov, I.D., Larin S.N., Noakk N.V. Optimizaciya upravleniya protivoe`pidemicheskimi me-ropriyatiyami na osnove cifrovoj social`no-e`konomicheskoj modeli // E`konomika i pred-prinimatel`stvo, 2021b. Vy`p.15. №3(128). S.67-74. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.115.2.175>.

*Грачев Иван Дмитриевич – д.э.н., к.ф.-м.н., главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Центральный экономико-математический институт Российской академии наук г. Москва, Россия;
ORCID 0000-0003-1815-5898*

ldg@mail.ru

*Ноакк Наталья Вадимовна – к.психол.н., ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Центральный экономико-
математический институт Российской академии наук г. Москва, Россия.
ORCID 0000-0001-8696-5767*

n.noakk@mail.ru

Ключевые слова

эпидемия Covid-19, моделирование квазипериодичности, инновации двух типов, двухтриггерное обобщение SIR-модели, среднесрочный прогноз Covid-19 для Москвы.

Ivan Grachev, Natalia Noakk General probabilistic forecasts of Covid-19 dynamics

Keywords

Covid-19 epidemic, quasi-periodicity modeling, two types of innovations, two-trigger generalization of the SIR model, Covid-19 medium-term forecast for Moscow

DOI: 10.34706/DE-2023-02-04

JEL classification: C61 – методы оптимизации, модели программирования, динамический анализ

Abstract.

The expectation of the end of the Covid-19 epidemic after the super-powerful omicron wave did not materialize. The epidemic continued in a quasi-periodic mode. At the same time, the features of the omicron wave after four waves of the same innovative type demonstrated the desire of the Covid-19 virus to use all innovative (mutational) strategies, among which the option with simultaneous zeroing of immunity with a qualitative increase in contagion and mortality at the same time has not yet been implemented. The danger of this option is great, which makes it necessary to build at least rough estimates of the medium-term dynamics of the epidemic for the future. In this paper, variable forecasts of the Covid-19 epidemic for Moscow for 1600 days from the beginning are constructed using a two-trigger generalized SIR model developed by us with the addition of mutational equations that take into account two types of innovations. The model was refined by parameters using additional information obtained during and after the omicron wave. The performance of the model was evaluated for Moscow by comparing the actual and model dynamics directly and using autocorrelation functions. The model reflects all the main features of the real process and, therefore, allows you to make forecasts for the medium-term perspective. Digital modeling and experiment do not give grounds to expect the end of Covid-19 with a significant probability.