

ЭКОНОМИКА РОССИИ И РЕГИОНОВ

УДК: 330.4

JEL: C00; C83, I10, I12

Методологические особенности эконометрического прогнозирования распространения уханьского коронавируса (SARS-CoV-2) в России: накопленный опыт*А.А. Афанасьев*, д.э.н., доцент<https://orcid.org/0000-0002-5680-7896>; SPIN-код (РИНЦ): 8863-3913

Scopus author ID: 57195593552, 57221616972

e-mail: aanton@cemi.rssi.ru**Для цитирования**

Афанасьев А.А. Методологические особенности эконометрического прогнозирования распространения уханьского коронавируса (SARS-CoV-2) в России: накопленный опыт // Проблемы рыночной экономики. – 2024. – № 3. – С. 19-33.

DOI: <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2024-3-19-33>**Аннотация**

Появление в конце 2019 года нового объекта в мировой экономической системе – уханьского коронавируса (SARS-CoV-2) – в значительной степени повлияло на протекающие в ней процессы и в определенной мере дезорганизовало ее функционирование. Для предвидения последствий распространения такого объекта и его влияния на экономику необходимо иметь эффективный инструментарий прогнозирования, в том числе на будущее. Автором представлена методология эконометрического прогнозирования распространения уханьского коронавируса в России, которая в условиях малой изученности нового коронавируса оказалась достаточно действенной на 1-ой фазе эпидемии (весна 2020 г.). Отличительными чертами авторской методологии являются (1) выбор функции Гаусса на основе изучения колоколообразных траекторий распространения родственного уханьскому коронавирусу SARS-CoV-1 в 2002–2003 гг., (2) последовательное МНК-оценивание параметров зависящих от времени нелинейных квадратичных экспонент Гаусса – сначала для Москвы, а потом для России, (3) стабилизация во времени как МНК-оценок параметров, так и значений прогнозных пиковых дат и пикового числа случаев заражения, (4) эндогенное определение этих пиковых значений, (5) достаточно низкие прогнозные ошибки наступления пиков, (6) отсутствие необходимости в перенастройке параметров функций Гаусса и корректировке прогнозов. Показано, что применение этой методологии позволило дать достаточно точные прогнозы наступления пиков уханьского коронавируса и последующего снижения его распространения. По мнению автора, предложенная методология может быть успешно использована для прогнозирования динамики распространения новых коронавирусов во время будущих эпидемий, в особенности на начальных фазах, и их влияния на развитие мировой и российской экономик.

Ключевые слова: *эконометрическое прогнозирование, SARS-CoV-1, SARS-CoV-2, уханьский коронавирус, методология, Россия, функция Гаусса*

Methodological features of econometric forecasting of the Wuhan Coronavirus (SARS-CoV-2) spread in Russia: cumulative experience*Anton A. Afanasiev*, Dr. of Sci. (Econ.), Professor<https://orcid.org/0000-0002-5680-7896>; SPIN-code (RSCI): 8863-3913

Scopus author ID: 57195593552, 57221616972

e-mail: aanton@cemi.rssi.ru

For citation

Afanasyev A.A. Methodological features of econometric forecasting of the Wuhan Coronavirus (SARS-CoV-2) spread in Russia: cumulative experience // Market economy problems. – 2024. – No. 3. – Pp. 19-33 (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2024-3-19-33>

Abstract

The emergence of a new object in the global economic system at the end of 2019 - the Wuhan coronavirus (SARS-CoV-2) - significantly affected processes and to a certain extent disorganized its functioning. To predict the consequences of the spread of such an object and its impact on the economy, it is necessary to have an effective forecasting toolkit, that may be also instrumental in future. The author presents a methodology for econometric forecasting of the spread of the Wuhan coronavirus in Russia, which, given the poor study of the new coronavirus, turned out to be quite effective in the 1st phase of the epidemic (spring 2020). The distinctive features of the author's methodology are the following: (1) selecting a Gaussian function based on the study of bell-shaped trajectories of the spread of the SARS-CoV-1 coronavirus related to the Wuhan coronavirus in 2002–2003, (2) consistent OLS estimation of parameters of time-dependent nonlinear quadratic Gaussian exponents - first for Moscow and then for Russia, (3) stabilization over time of both OLS estimates of parameters and values of predicted peak dates and peak number of cases of infection, (4) endogenous determination of these peak values, (5) sufficiently low predictive errors of peak occurrence, (6) no need to readjust the parameters of Gaussian functions and forecast corrections. The article demonstrates that the application of this methodology allows to give sufficiently accurate forecasts of the onset of peaks of the Wuhan coronavirus and the subsequent decrease in its spread. According to the author, the methodology developed in this article can be successfully used to forecast the dynamics of the spread of new coronaviruses in case of future epidemics, especially in the initial phases, and their impact on the development of the world and Russian economies.

Keywords: *econometric forecasting, SARS-CoV-1, SARS-CoV-2, Wuhan coronavirus, methodology, Russia, Gaussian function*

Введение

Эпидемия коронавируса, первая вспышка которого была зафиксирована в китайском городе Ухань в декабре 2019 г., в 2020 г. охватила весь земной шар, нарушила привычный ритм жизни людей во всех странах, привела на начальных стадиях к режиму массовой изоляции людей, к значительному повышению уровня смертности, негативно повлияла на многие социально-экономические и политические процессы. Новый коронавирус, который изначально был назван китайскими учеными уханьским (*Wuhan CoV, Wuhan Coronavirus*) (Xu, Chen, Wang, et al., 2020), а впоследствии переименован вирусологами в SARS-CoV-2 (*Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*), – это второй коронавирус тяжёлого острого респираторного синдрома, геном которого, как установлено вирусологами, на 80% схож с геномом его ближайшего родственника – SARS-CoV-1, или атипичной пневмонии, вспышка которой имела место в Китае в 2002–2003 гг. (Feng, Zong, Wang, & Ju, 2020).

О том, что эпидемия атипичной пневмонии может повториться, предупреждали еще китайские ученые в 2005 г.: «Эпидемия атипичной пневмонии (SARS) может повториться в любой момент в будущем либо из-за утечки вируса из лабораторных образцов, либо из-за изолятов SARS-CoV, эволюционировавшего из вируса, подобного SARS-CoV, у животных-хозяев» (Jiang, He, Liu, 2005). Фонд Рокфеллера прогнозировал на 2012 г. вспышку так называемого «гусиного гриппа», описав достаточно детально в своем докладе, по сути дела, все те ограничения и процессы, которые имели место во время эпидемии уханьского коронавируса (Rockefeller Foundation, 2010).

В 2022 г. эпидемия уханьского коронавируса пошла на спад, но опасность появления и широкого распространения нового вируса, по мнению многих, осталась. «Угроза появления нового штамма, вызывающего новые вспышки заболеваний и смертей, сохраняется, как и угроза

появления другого патогена с ещё более смертоносным потенциалом», — заявил глава Всемирной организации здравоохранения доктор Тедрос Аданом Гебреисус 23 мая 2023 года (United Nations, 2023). Чуть ранее об опасности появления нового вируса предупреждал Билл Гейтс: «Вероятность того, что через 20 лет будет еще одна пандемия, составляет 50%» (Gates, 2022). На неизбежность новой эпидемии указал и президент США Джо Байден: «И даже работая над тем, чтобы покончить с COVID-19, мы продолжаем укреплять системы и учреждения здравоохранения и активизировать усилия по обеспечению всеобщего охвата услугами здравоохранения, чтобы быть лучше подготовленными к решению проблем здравоохранения, включая следующую пандемию. А она обязательно будет» (Biden, 2022).

В связи достаточно высокой вероятностью появления нового вируса и вспышки новой пандемии в будущем нам представляется актуальным поделиться накопленным опытом в аспекте методологических особенностей эконометрического прогнозирования распространения уханьского коронавируса (SARS-CoV-2) в России, особенно на 1-й фазе (весна 2020 г.). Дело в том, что многие модели распространения инфекций, в том числе широко использовавшиеся модели математической эпидемиологии, не смогли дать достаточно точных устойчивых прогнозов пиковых дат и пиковой численности инфицированных уханьским коронавирусом (SARS-CoV-2) жителей России, особенно на 1-й фазе весной 2020 г. Например, модели Сбербанка России для Москвы и России (ПАО Сбербанк, 2020а; ПАО Сбербанк, 2020b), Сингапурская модель (Luo, 2020; Luo, 2021), возрастающие и убывающие экспоненциальные трендовые модели, используемые профессором Ю.Н. Благовещенским (Благовещенский, 2020а; Благовещенский, 2020b), требовали периодической перенастройки параметров и корректировки прогнозов. Кроме того, многие модели математической эпидемиологии не смогли дать достоверные прогнозы по причине того, в 2020 г. отсутствовали точные данные о характеристиках вируса, а именно: о врожденном иммунитете к нему, о скорости и путях его передачи, о восприимчивости к нему организма различных групп людей и т.п. (Koenen, Balvert et al., 2021). Однако основная проблема многих исследователей состояла в том, что при выборе модели прогнозирования распространения уханьского коронавируса они не приняли во внимание довольно хорошо изученные законы распространения родственного уханьскому коронавирусу SARS-CoV-1 в 2002–2003 гг. Таким образом, в условиях недостаточной изученности коронавируса наряду с моделями математической эпидемиологии и линейными трендовыми моделями инерционные эконометрические модели, в особенности нелинейные трендовые модели, могут представлять собой дополнительный достаточно эффективный инструмент для описания законов и прогнозирования распространения уханьского коронавируса. Использование такого инструмента имеет свои методологические особенности и преимущества, о которых пойдет речь ниже.

Методологические особенности эконометрического прогнозирования распространения уханьского коронавируса (SARS-CoV-2) на 1-й фазе в России

Предлагаемая нами методология прогнозирования состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Выбор математического вида коронавирусной функции.

Этап 2. Оценка параметров выбранной функции методом наименьших квадратов в Москве на временных промежутках, начинающихся со дня регистрации первого случая инфицирования коронавирусом.

Этап 3. Прогнозирование суточной численности зараженных коронавирусом в Москве людей на временных промежутках, на которых, во-первых, параметры функции становятся такими, когда она имеет максимум, и во-вторых, они становятся стабильными во времени, т.е. при добавлении точки временного ряда параметры почти не изменяются.

Этап 4. Оценка параметров выбранной функции методом наименьших квадратов в России на временных промежутках, начинающихся со дня регистрации первого случая инфицирования коронавирусом.

Этап 5. Прогнозирование суточной численности зараженных коронавирусом в России людей на временных промежутках, на которых, во-первых, параметры функции становятся такими, когда она имеет максимум, и во-вторых, они становятся стабильными во времени, т.е. при добавлении точки временного ряда параметры почти не изменяются.

Опишем каждый из этапов предложенной методологии более подробно.

Этап 1. Выбор математического вида уханьской коронавирусной функции

На первой фазе появления и распространения уханьского коронавируса, когда его характеристики слабо исследованы и мало изучены, необходимо обратить внимание на траектории распространения его ближайшего родственника – атипичной пневмонии (SARS-CoV-1) в Китае в 2002–2003 гг. Как мы видим на рис. 1, во временном интервале с ноября 2002 по май 2003 гг. траектории распространения атипичной пневмонии в провинции Гуандун, в столице Пекине и остальных регионах КНР напоминают колокола. Из работы (Ma, 2020) известно, что начало многих эпидемий описывается возрастающей экспоненциальной функцией

$$y_t = e^{bt+c}, \quad (1)$$

где y_t – численность инфицированных вирусом людей за сутки t . Таким образом, если предположить, что после достижения пика инфицирования численность зараженных снижается по убывающей экспоненте, то тогда для описания колоколообразной траектории распространения коронавируса достаточно хорошо подходит квадратичная экспонента Гаусса

$$y_t = e^{at^2+bt+c}, \quad (2)$$

при помощи которой в работе (Tuli S., Tuli S., Tuli R., Sukhpal, 2020) было вполне адекватно смоделировано распространение атипичной пневмонии в 2003 г. в Гонконге (рис. 2).

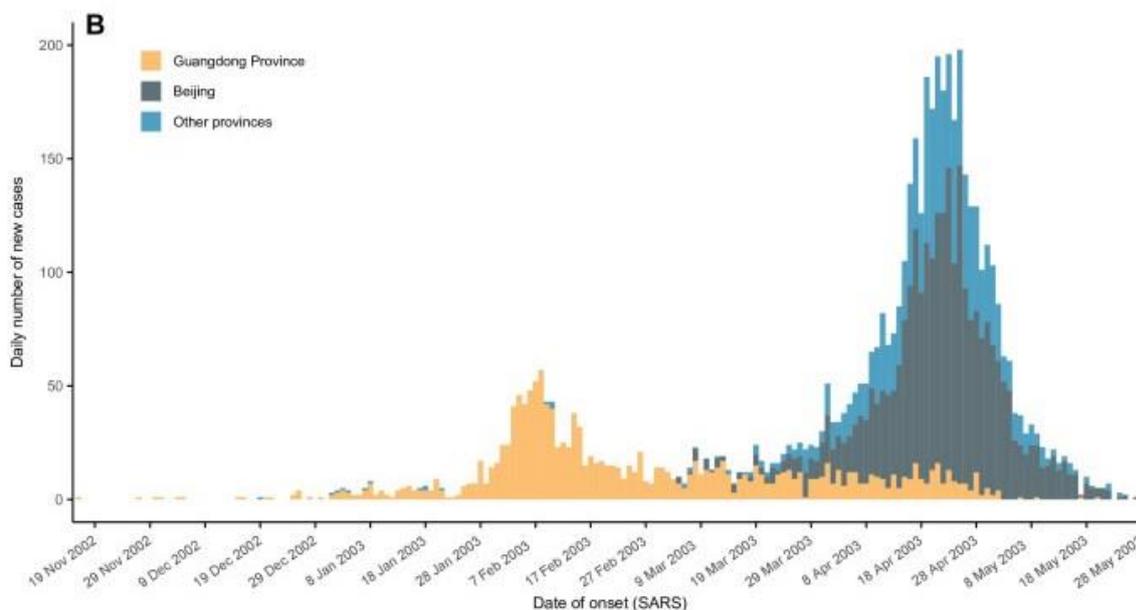


Рис. 1. / Fig. 1. Суточные статистические данные о распространении коронавируса атипичной пневмонии (SARS-CoV-1) в Китае в ноябре 2002 – мае 2003 гг. /

Daily statistics on the SARS-CoV-1 spread in China in November 2002 – May 2003.

Источник / Source: (Zhao, Feng D, Ye, et al, 2020)

Этап 2. Оценка параметров коронавирусной функции Гаусса методом наименьших квадратов для Москвы

Параметры коронавирусной функции (2) для Москвы были вычислены методом наименьших квадратов на основе статистических данных (табл. 1), во временных промежутках с 12 марта 2020 г., поскольку за более ранние даты у нас не было точной статистики (Афанасьев, 2020а). Результаты вычислений приведены в таблице 2. Следует обратить внимание на то, что коэффициент при квадрате времени a функции (2) является положительным или близким к нулю во временных интервалах с 12 марта до 5 апреля 2020 г., т.е. в этих временных промежутках процесс инфицирования коронавирусом в Москве адекватно описывается, по сути, возрастающей экспонентой (1). Однако начиная с 6 апреля этот коэффициент становится

отрицательным (т.е. функция имеет экстремум в виде максимума), а с 13 апреля – еще и статистически отличным от нуля по критерию Стьюдента. Таким образом, квадратичная экспоненциальная функциональная зависимость числа зараженных уханьским коронавирусом жителей Москвы от времени наметилась с 6 апреля, а относительная стабилизация параметров во времени этой зависимости – с 13 апреля. В самом деле, функции 1.3 и 1.9, 1.4 и 1.11, 1.5 и 1.10, 1.6 и 1.7, 1.8 и 1.12, 1.13 и 1.14 имеют очень близкие МНК-оценки (табл. 2). По этой причине они прогнозируют, по сути, одинаковые пиковые даты и очень близкие значения пиковой численности инфицированных уханьским коронавирусом жителей. В ситуации относительной и чередующейся во времени стабильности параметров коронавирусной функции (1) при прогнозировании стоит учитывать и прогнозы по функциям 1.1 и 1.2 как пограничные (Афанасьев, 2020а).

Data for SARS-CoV-1 for Hong Kong (Special Administrative Region), China Source: World Health Organization

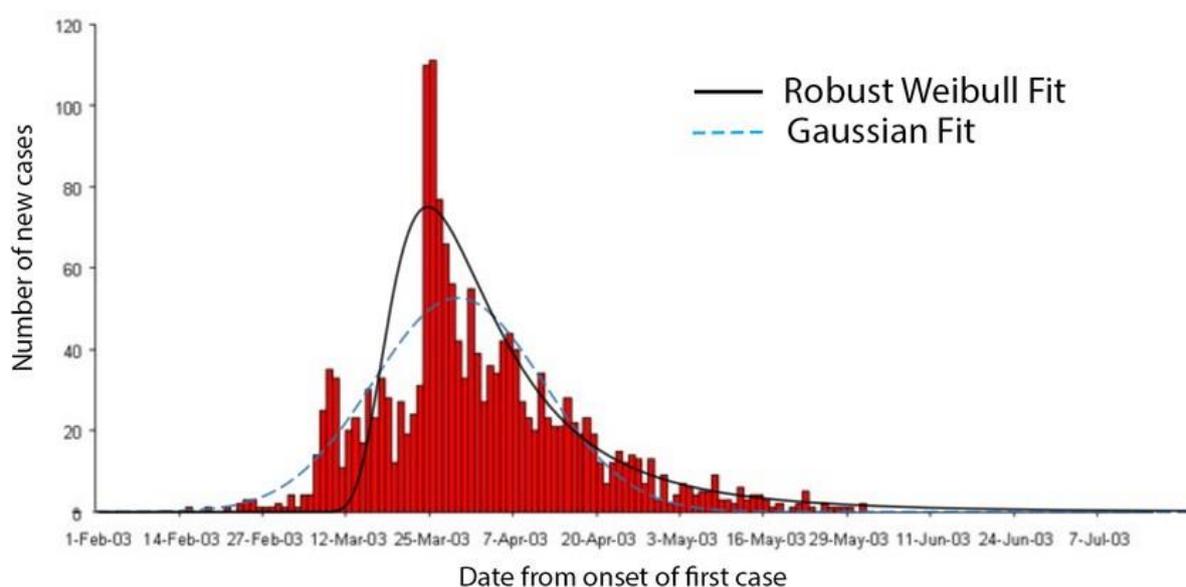


Рис. 2. / Fig. 2. Моделирование распространения коронавируса SARS-CoV-1 в Гонконге в 2003 г. на основе функций Гаусса и Вейбулла / Modeling the spread of SARS-CoV-1 in Hong Kong in 2003 using Gaussian and Weibull functions

Источник / Source: (Tuli, S., & Tuli, S., Tuli, R., and Gill, S. S., 2020)

Таблица 1 / Table 1

Статистические данные о численности инфицированных уханьским коронавирусом жителей города Москвы весной 2020 г. / Statistical data on the daily number of Moscow residents infected with the Wuhan coronavirus in the spring of 2020

Сутки	Численность зараженных, чел.	Сутки	Численность зараженных, чел.	Сутки	Численность зараженных, чел.
12.03.2020	9	08.04.2020	660	05.05.2020	5714
13.03.2020	4	09.04.2020	857	06.05.2020	5858
14.03.2020	5	10.04.2020	1124	07.05.2020	6703
15.03.2020	9	11.04.2020	1030	08.05.2020	5846
16.03.2020	20	12.04.2020	1306	09.05.2020	5667
17.03.2020	1	13.04.2020	1355	10.05.2020	5551
18.03.2020	31	14.04.2020	1489	11.05.2020	6169
19.03.2020	12	15.04.2020	1774	12.05.2020	5392
20.03.2020	33	16.04.2020	1370	13.05.2020	4703

21.03.2020	6	17.04.2020	1959	14.05.2020	4712
22.03.2020	54	18.04.2020	2649	15.05.2020	4748
23.03.2020	71	19.04.2020	3570	16.05.2020	3505
24.03.2020	28	20.04.2020	2026	17.05.2020	3855
25.03.2020	120	21.04.2020	3083	18.05.2020	3238
26.03.2020	136	22.04.2020	2548	19.05.2020	3545
27.03.2020	157	23.04.2020	1959	20.05.2020	2699
28.03.2020	114	24.04.2020	2957	21.05.2020	2913
29.03.2020	197	25.04.2020	2612	22.05.2020	2988
30.03.2020	212	26.04.2020	2971	23.05.2020	3190
31.03.2020	387	27.04.2020	2871	24.05.2020	2516
01.04.2020	267	28.04.2020	3075	25.05.2020	2560
02.04.2020	595	29.04.2020	2220	26.05.2020	2830
03.04.2020	448	30.04.2020	3093	27.05.2020	2140
04.04.2020	434	01.05.2020	3561	28.05.2020	2054
05.04.2020	536	02.05.2020	5358	29.05.2020	2332
06.04.2020	591	03.05.2020	5948	30.05.2020	2367
07.04.2020	697	04.05.2020	5795	31.05.2020	2595

Источник / Source: отчеты Коммуникационного центра Правительства РФ по ситуации с коронавирусом (<https://смонкоронавирус.рф/ofdoc/reports/>), данные с сайтов <https://coronavirus-online.moscow/> (с 15 марта по 24 марта 2020 г.); <https://coronavi.ru/> (до 14 марта 2020 г.); (Афанасьев, 2020a); (Афанасьев, 2020b); (Афанасьев, 2020c) / reports from the Communications Center of the Government of the Russian Federation on the situation with coronavirus (<https://смонкоронавирус.рф/ofdoc/reports/>), data from websites <https://coronavirus-online.moscow/> (from March 15 to March 24, 2020); <https://coronavi.ru/> (before March 14, 2020); (Afanasyev, 2020a); (Afanasyev, 2020b); (Afanasyev, 2020c)

Этап 3. Прогнозирование суточной численности зараженных коронавирусом в Москве людей

Таким образом, как нами показано в работе (Афанасьев, 2020b), для Москвы можно выделить в качестве наиболее достоверных три вида прогнозов распространения уханьского коронавируса: *максимальный* по функции 1.1 с пиковой датой 6 мая и пиковой численностью зараженных в 5821 чел., *средний* по функции 1.3 с пиковой датой 3 мая и пиковой численностью в 4418 чел. и *минимальный* по функции 1.15 с пиковой датой 29 апреля и пиковой численностью в 3080 чел. (табл. 2). По факту наиболее точным оказался максимальный прогноз: фактическая пиковая дата наступила 7 мая (ошибка прогноза составила 1 сутки), а фактическая пиковая численность оказалась на уровне 6703 чел. (ошибка прогноза – 13,2%) (Афанасьев, 2020c; Afanasyev, Ropomareva, 2020) (рис. 3). Достоверность максимального прогноза объясняется, по-видимому, не совсем точными и заниженными данными за последнюю декаду апреля 2020 г. (рис. 4): именно в то время возник недостаток лабораторных инструментов для тестов ПЦР (Коммерсантъ, 2020) и большая загрузка медицинских лабораторий, так что лаборанты и врачи, не успевавшие обработать все тесты, относили, по некоторым сведениям, результаты неотработанных тестов к отрицательным. Из-за заниженных данных пришлось рассматривать минимальный и средний варианты прогноза (функции 1.3 и 1.15 на рис. 4) с более близкими пиковыми датами и меньшей пиковой численностью зараженных.

Этапы 4 и 5. Оценка параметров коронавиральной функции Гаусса методом наименьших квадратов для России и прогнозирование на ее основе суточной численности зараженных коронавирусом

После относительной стабилизации параметров и прогнозных пиков распространения уханьского коронавируса у функции (2) по Москве можно переходить к оценке ее параметров по России в целом на основе статистических данных таблицы 3. Оценки ее параметров на более ранних интервалах времени с марта по начало-середину апреля 2020 г. приводят к недостоверным прогнозам, поскольку на многих из этих временных интервалов функция (2) имеет отрицательный коэффициент при квадрате времени, но распространение коронавируса в регионах не еще набрало должных оборотов. Параметры коронавиральной функции (1) по России

стабилизируются во времени, начиная с временного промежутка 2 марта – 30 апреля и далее до 10 мая (Афанасьев, 2020с). Действительно, как видно из таблицы 4, на всех этих одиннадцати временных интервалах МНК-оценки параметров коронавирусной функции (2) являются почти одинаковыми, а поэтому на этих интервалах функция прогнозирует почти одни и те же пиковые даты (на десяти интервалах – 14 мая, на оставшемся – 13 мая) и очень близкие друг к другу значения пиков числа инфицированных уханьским коронавирусом – от 11618 до 12201 тыс. чел. (Афанасьев, 2020с).

По факту прогнозная пиковая дата наступила 11 мая (ошибка прогноза составила 2-3 суток), а фактическая пиковая численность достигла уровня 11656 тыс. чел. (ошибки прогноза расположились в диапазоне от 0,3% до 4,7%). Наименьшие ошибки прогнозов пиковой даты (1 день) и пиковой численности инфицированных (0,3%) имеет функция (1), исследованная со 2 марта по 1 мая. Кроме того, она дает достаточно приемлемую среднюю прогнозную ошибку на 2–31 мая, равную 10,4% (Afanasiev and Ponomareva, 2020).

В результате уточнения статистических данных о суточной численности инфицированных уханьским коронавирусом жителей России (табл. 3) на основе информации Роспотребнадзора (в изначально используемых нами данных за некоторые сутки была использована суммарная численность за несколько суток, а в другие дни предполагалась нулевая численность), коронавирусная функция Гаусса по России была переоценена во временных промежутках со 2 марта по 30 апреля – 10 мая 2020 г. Результаты переоценки ее параметров методом наименьших квадратов приведены в таблице 5.

Как можно видеть, на всех одиннадцати временных интервалах значения МНК-оценок параметров коронавирусной функции (2) являются очень близкими друг к другу (рис. 5). Более того, прогнозные пиковые даты (13 мая) стали ближе к фактической дате (11 мая) на одни сутки, а максимальная ошибка прогноза пиковой численности снизилась почти в 2 раза до 2,4% (против 4,7% до переоценки). Прогнозные значения пиковой численности расположились в диапазоне от 11373 до 11895 тыс. чел. (рис. 6). Средние ошибки *ex-post* прогноза до 31 мая снизились, диапазон их изменения составил от 10,1% до 13,2%, причем минимальную прогнозную до 31 мая среднюю ошибку в 10,1% функция (2) имеет по выборке со 2 марта по 1 мая 2020 г.

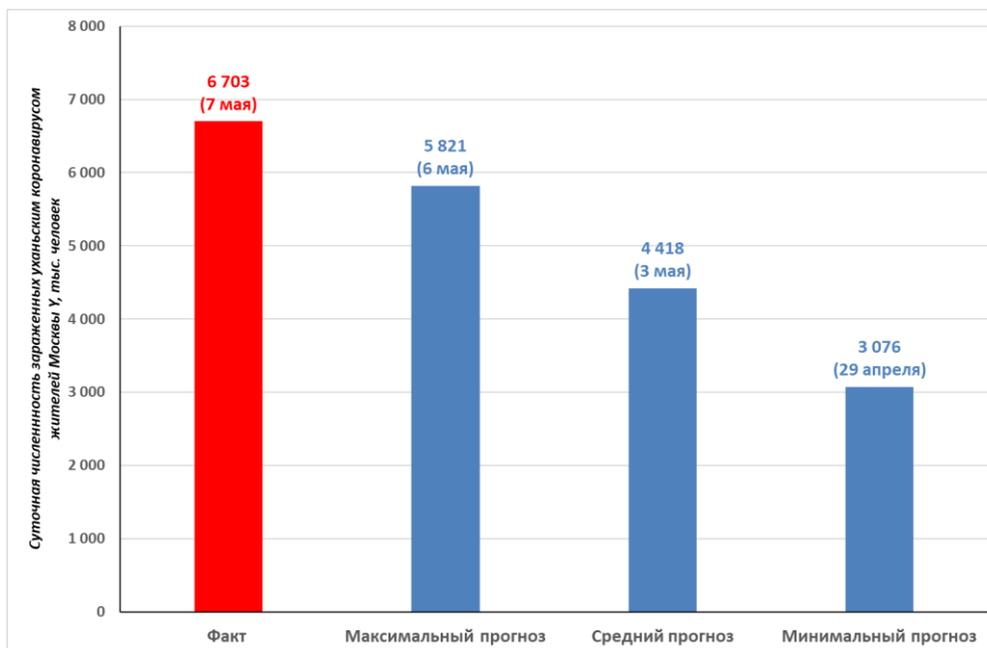


Рис. 3. / Fig. 3. Фактический и прогнозные по функциям 1.1, 1.3 и 1.15 пики числа случаев заражения уханьским коронавирусом (SARS-CoV-2) в Москве с 12 апреля по 30 мая 2020 г. / Actual and forecasted peaks number of cases of Wuhan coronavirus (SARS-CoV-2) infection in Moscow from April 12 to May 30, 2020 for functions 1.1, 1.3 and 1.15

Источник / Source: расчеты автора по функции (1) на основе данных таблицы 1 / (author's calculations basing on function (1) data from table 1.

Таблица 2/ Table 2

Результаты эконометрического исследования коронавирусной функции Гаусса (2) для Москвы с 12 марта по 11 – 25 апреля 2020 г. /
Results of an econometric study of the Gaussian coronavirus function (2) for Moscow from March 12 to April 11–25, 2020

№ п/п	Временной промежуток	Коэффициенты (t-статистики)			R^2	DW	Прогноз пика суточного заражения		Прогноз нулевого (единичного) суточного заражения	
		a	b	c			Дата	число зараженных, чел. (средняя ошибка ex-post прогноза APE)	Дата	общее число зараженных с начала эпидемии, тыс. чел.
1.1	12/III–11/IV	–0,0025 (–1,43)	0,2788 (5)	0,8896 (2,23)	0,88	2,70	6/V	5821 (33%)	7/VII	206,5
1.2	12/III–12/IV	–0,0026 (–1,62)	0,2805 (5)	0,8822 (2,29)	0,89	2,70	5/V	5200 (31%)	4/VII	182,1
1.3	12/III–13/IV	–0,0027 (–1,85)	0,2833 (6)	0,8698 (2,33)	0,89	2,70	3/V	4418 (26%)	1/VII	151,6
1.4	12/III–14/IV	–0,0027 (–2,09)	0,2855 (6)	0,8598 (2,38)	0,90	2,70	2/V	3945 (24%)	29/VI	133,4
1.5	12/III–15/IV	–0,0028 (–2,28)	0,2857 (6)	0,8592 (2,46)	0,90	2,70	2/V	3919 (26%)	28/VI	132,4
1.6	12/III–16/IV	–0,0030 (–2,67)	0,2918 (7)	0,8296 (2,44)	0,91	2,69	29/IV	3038 (17%)	23/VI	99,0
1.7	12/III–17/IV	–0,0030 (–3)	0,2918 (7)	0,8302 (2,52)	0,91	2,70	29/IV	3050 (19%)	23/VI	99,5
1.8	12/III–18/IV	–0,0028 (–3)	0,2880 (8)	0,8489 (2,65)	0,92	2,69	1/V	3484 (22%)	26/VI	116,1
1.9	12/III–19/IV	–0,0026 (–3)	0,2818 (8)	0,8802 (3)	0,92	2,67	3/V	4415 (32%)	1/VII	152,6
1.10	12/III–20/IV	–0,0028 (–3)	0,2862 (8)	0,8576 (3)	0,92	2,68	2/V	3747 (24%)	28/VI	126,5
1.11	12/III–21/IV	–0,0027 (–4)	0,2847 (9)	0,8657 (3)	0,92	2,69	2/V	3946 (30%)	29/VI	134,2
1.12	12/III–22/IV	–0,0028 (–4)	0,2868 (9)	0,8544 (3)	0,93	2,69	1/V	3693 (30%)	27/VI	124,3
1.13	12/III–23/IV	–0,0029 (–4)	0,2922 (10)	0,8236 (3)	0,93	2,67	30/IV	3173 (8%)	24/VI	104,3
1.14	12/III–24/IV	–0,0029 (–5)	0,2920 (10)	0,8250 (3)	0,93	2,68	30/IV	3192 (15%)	24/VI	105,0
1.15	12/III–25/IV	–0,0030 (–5)	0,2935 (11)	0,8158 (3)	0,93	2,68	29/IV	3080	23/VI	100,6

Источник / Source: (Афанасьев, 2020a), расчеты автора на основе данных таблицы 1 / (Afanasiev, 2020a), author's calculations based on data in Table 1

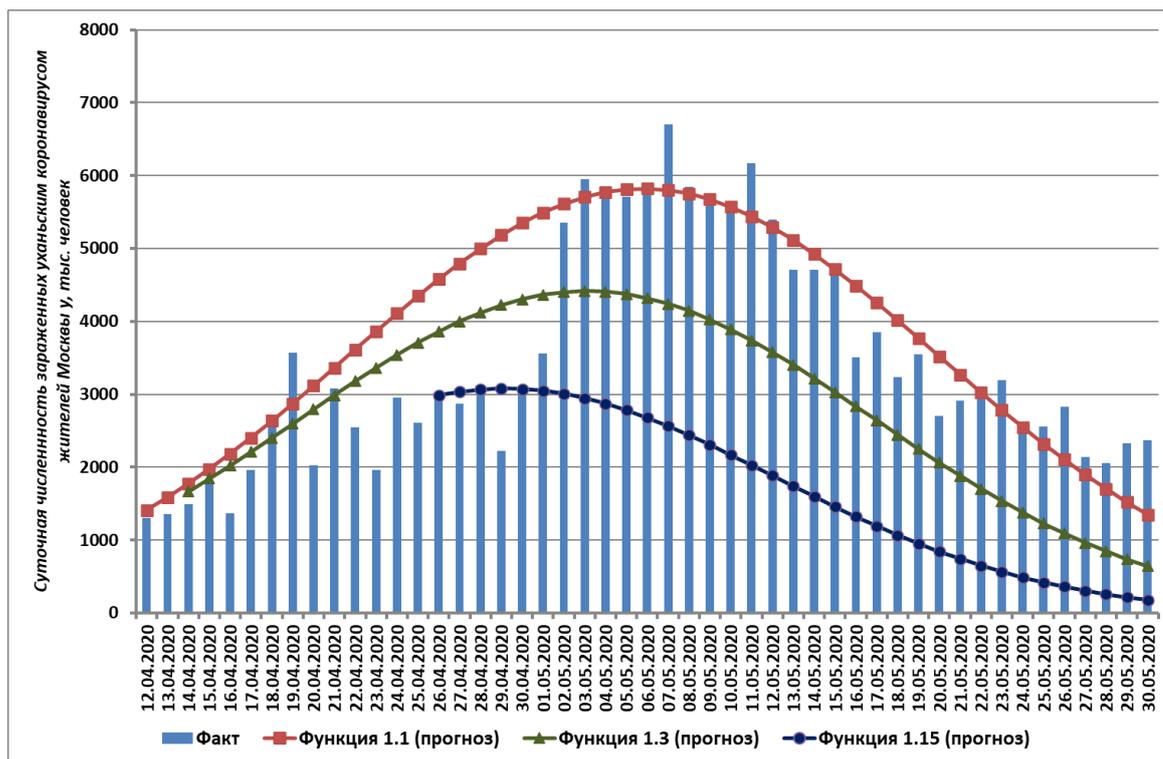


Рис. 4. / Fig. 4. Фактическая и прогнозная по функциям 1.1, 1.3 и 1.15 число случаев заражения уханьским коронавирусом (SARS-CoV-2) в Москве с 12 апреля по 30 мая 2020 г./ Actual and forecasted number of cases of Wuhan coronavirus (SARS-CoV-2) infection in Moscow from April 12 to May 30, 2020 for functions 1.1, 1.3 and 1.15

Источник / Source: расчеты автора по функции (1) на основе данных таблицы 1 / (author's calculations basing on function (1) data from table 1.

Таблица 3 / Table 3

Статистические данные о численности инфицированных уханьским коронавирусом жителей России весной 2020 г. / Statistical data on the daily number of Russia residents infected with the Wuhan coronavirus in the spring of 2020

Сутки	Численность зараженных, чел.	Сутки	Численность зараженных, чел.	Сутки	Численность зараженных, чел.
02.03.2020	1	01.04.2020	440	01.05.2020	7933
03.03.2020	1	02.04.2020	771	02.05.2020	9623
04.03.2020	0	03.04.2020	601	03.05.2020	10633
05.03.2020	0	04.04.2020	582	04.05.2020	10581
06.03.2020	6	05.04.2020	658	05.05.2020	10102
07.03.2020	0/4*	06.04.2020	954	06.05.2020	10559
08.03.2020	0/3*	07.04.2020	1154	07.05.2020	11231
09.03.2020	0/3*	08.04.2020	1175	08.05.2020	10699
10.03.2020	0	09.04.2020	1459	09.05.2020	10817
11.03.2020	0/8*	10.04.2020	1786	10.05.2020	11012
12.03.2020	14/6*	11.04.2020	1667	11.05.2020	11656
13.03.2020	11	12.04.2020	2186	12.05.2020	10899
14.03.2020	14	13.04.2020	2558	13.05.2020	10028
15.03.2020	14	14.04.2020	2774	14.05.2020	9974
16.03.2020	30	15.04.2020	3388	15.05.2020	10598

17.03.2020	21	16.04.2020	3448	16.05.2020	9200
18.03.2020	33	17.04.2020	4070	17.05.2020	9709
19.03.2020	52	18.04.2020	4785	18.05.2020	8926
20.03.2020	54	19.04.2020	6060	19.05.2020	9263
21.03.2020	53	20.04.2020	4268	20.05.2020	8764
22.03.2020	61	21.04.2020	5642	21.05.2020	8849
23.03.2020	71	22.04.2020	5236	22.05.2020	8894
24.03.2020	57	23.04.2020	4774	23.05.2020	9434
25.03.2020	163	24.04.2020	5849	24.05.2020	8599
26.03.2020	182	25.04.2020	5966	25.05.2020	8946
27.03.2020	196	26.04.2020	6361	26.05.2020	8915
28.03.2020	228	27.04.2020	6198	27.05.2020	8338
29.03.2020	270	28.04.2020	6411	28.05.2020	8371
30.03.2020	302	29.04.2020	5841	29.05.2020	8572
31.03.2020	501	30.04.2020	7099	30.05.2020	8952

*После косой черты указаны уточненные Роспотребнадзором данные, а перед ней – неуточненные исходные, используемые в работе (Афанасьев, 2020с) для оценки функции Гаусса по России (табл. 4). На 31 мая суточная численность инфицированных людей составила 9268 чел.

Источник / Source: отчеты Коммуникационного центра Правительства РФ по ситуации с коронавирусом (<https://стопкоронавирус.рф/ofdoc/reports/>), данные с сайта Роспотребнадзора (<https://rospotrebnadzor.ru/>) / reports from the Communications Center of the Government of the Russian Federation on the situation with coronavirus (<https://стопкоронавирус.рф/ofdoc/reports/>), data from the Rospotrebnadzor website (<https://rospotrebnadzor.ru/>)

Таблица 4/ Table 4

Результаты эконометрического исследования коронавирусной функции Гаусса (2) для России со 2 марта по 30 апреля – 10 мая 2020 г. / Results of an econometric study of the Gaussian coronavirus function (2) for Russia from March 2 to April 30 – May 10, 2020

№ п/п	Временной промежуток	Коэффициенты (t-статистики)			R^2	DW	Прогноз пика суточного заражения		Прогноз нулевого (единичного) суточного заражения	
		a	b	c			дата	число зараженных, чел. (средняя ошибка экспост прогноза APE до 11/V)	дата	общее число зараженных с начала эпидемии, тыс. чел.
1	2/III–30/IV	–0,0018 (–13)	0,2640 (29)	–0,3576 (–2,68)	0,99	1,08	14/V	12027 (5,1%)	29/VII	504,1
2	2/III–1/V	–0,0018 (–14)	0,2648 (31)	–0,3659 (–2,79)	0,99	1,07	13/V	11618 (3,8%)	28/VII	484,9
3	2/III–2/V	–0,0018 (–15)	0,2645 (32)	–0,3626 (–2,82)	0,99	1,08	14/V	11767 (3,8%)	28/VII	492,0
4	2/III–3/V	–0,0018 (–15)	0,2638 (32)	–0,3558 (–2,82)	0,99	1,07	14/V	12073 4,1%)	29/VII	506,5
5	2/III–4/V	–0,0018 (–16)	0,2635 (34)	–0,3528 (–2,84)	0,99	1,08	14/V	12201 (4,7%)	29/VII	512,7
6	2/III–5/V	–0,0018 (–17)	0,2638 (35)	–0,3556 (–2,92)	0,99	1,07	14/V	12089 (4,2%)	29/VII	507,3

7	2/III-6/V	-0,0018 (-18)	0,2639 (36)	-0,3570 (-2,99)	0,99	1,08	14/V	12034 (4,4%)	29/VII	504,6
8	2/III-7/V	-0,0018 (-19)	0,2638 (37)	-0,3560 (-3)	0,99	1,08	14/V	12072 (5,3%)	29/VII	506,4
9	2/III-8/V	-0,0018 (-19)	0,2642 (38)	-0,3596 (-3)	0,99	1,08	14/V	11947 (4,3%)	28/VII	500,5
10	2/III-9/V	-0,0018 (-20)	0,2645 (39)	-0,3633 (-3)	0,99	1,07	14/V	11831 (2,6%)	28/VII	495,0
11	2/III-10/V	-0,0018 (-21)	0,2648 (41)	-0,3662 (-3)	0,99	1,07	14/V	11743 (0,4%)	28/VII	490,8

Источник / Source: (Афанасьев, 2020с), расчеты автора на основе данных таблицы 1 / (Afanasiev, 2020с), author's calculations based on data in Table 1

Таблица 5/ Table 5

Результаты эконометрического исследования коронавирусной функции Гаусса (2) для России со 2 марта по 30 апреля – 10 мая 2020 г. по уточненным данным/
Results of an econometric study of the Gaussian coronavirus function (2) for Russia from March 2 to April 30 – May 10, 2020 based on updated data

№ п/п	Временной промежуток	Коэффициенты (t-статистики)			R ²	DW	Прогноз пика суточного заражения		Прогноз нулевого (единичного) суточного заражения	
		a	b	c			дата	число зараженных, чел. (средняя ошибка экспост прогноза APE до 11/V)	дата	общее число зараженных с начала эпидемии, тыс. чел.
1	2/III-30/IV	-0,0019 (-11)	0,2724 (25)	-0,5711 (-4)	0,99	1,65	13/V	11768 (3,5%)	26/VII	482,2
2	2/III-1/V	-0,0019 (-12)	0,2732 (26)	-0,5785 (-4)	0,99	1,64	13/V	11373 (3,3%)	25/VII	464,1
3	2/III-2/V	-0,0019 (-12)	0,2729 (27)	-0,5759 (-4)	0,99	1,65	13/V	11502 (2,9%)	25/VII	470,0
4	2/III-3/V	-0,0019 (-13)	0,2723 (28)	-0,5702 (-4)	0,99	1,64	13/V	11776 (2,5%)	26/VII	482,7
5	2/III-4/V	-0,0019 (-14)	0,2720 (29)	-0,5677 (-4)	0,99	1,64	13/V	11895 (2,5%)	26/VII	488,4
6	2/III-5/V	-0,0019 (-14)	0,2722 (30)	-0,5659 (-4)	0,99	1,64	13/V	11799 (1,8%)	26/VII	483,8
7	2/III-6/V	-0,0019 (-15)	0,2723 (31)	-0,5708 (-4)	0,99	1,64	13/V	11758 (1,6%)	26/VII	481,9
8	2/III-7/V	-0,0019 (-16)	0,2722 (32)	-0,5697 (-4)	0,99	1,64	13/V	11804 (1,5%)	26/VII	484,1
9	2/III-8/V	-0,0019 (-16)	0,2725 (33)	-0,5723 (-4)	0,99	1,64	13/V	11705 (0,9%)	26/VII	479,4
10	2/III-9/V	-0,0019 (-17)	0,2728 (34)	-0,5749 (-4)	0,99	1,64	13/V	11614 (0,4%)	26/VII	475,2
11	2/III-10/V	-0,0019 (-18)	0,2730 (35)	-0,5767 (-5)	0,99	1,64	13/V	11550 (0,1%)	25/VII	472,2

Источник / Source: расчеты автора на основе данных таблицы 1 / author's calculations based on data in Table 1

Оценка влияния распространения коронавируса на народное хозяйство

Зная с достаточно высокой точностью прогнозную траекторию распространения коронавируса, описываемую функцией (2) можно оценить и спрогнозировать его влияние на экономику. Рассмотрим модификацию вида производственной функции, представленной в работе (Afanasiev, Ponomareva, 2020):

$$Y_t = e^{\alpha} (n_t Z_t)^{\beta} V_t^{1-\beta} (\tau_t T_t)^{\gamma} (\sigma_t C_t)^{\delta},$$

где Y_t – выпуск продукции в народном хозяйстве в периоде t , Z_t – все основные средства в периоде t , n_t – уровень использования всех основных средств в периоде t , V_t – труд в периоде t , T_t – транспортные основные средства в периоде t , τ_t – уровень использования транспортных основных средств в периоде t , C_t – основные средства связи в периоде t , σ_t – уровень использования основных средств связи в периоде t . Тогда уровни использования основных средств можно рассматривать как кусочно-линейные функции либо непосредственно от численности зараженных коронавирусом людей u_t , либо от численности госпитализированных с SARS-подобными симптомами людей h_t , которую, в свою очередь можно рассматривать как функцию $h_t = h(u_t)$, возрастающую по численности зараженных (Afanasiev, Ponomareva, 2020). Особо отметим, что уровень использования основных средств и уровень использования транспортных основных средств будут убывать по пороговой численности зараженных или госпитализированных людей, а уровень использования основных средств связи – возрастать, ибо в периоды эпидемии уханьского коронавируса нагрузка на информационно-коммуникационную инфраструктуру резко возрастает, а на транспортную и остальную народнохозяйственную инфраструктуру – падает (Afanasiev, Ponomareva, 2020).

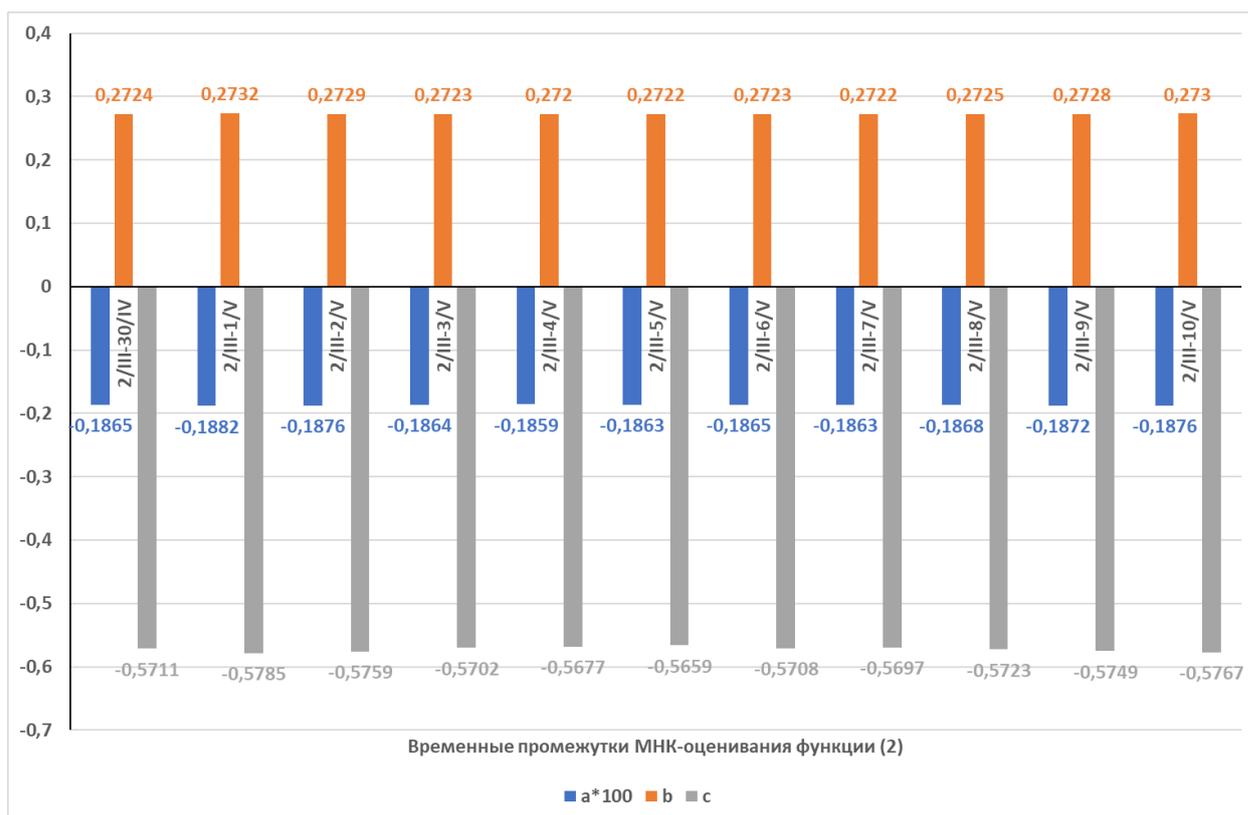


Рис. 5. / Fig. 5. МНК-оценки параметров функции (2) по России с 02.03.2020 по 30.04.2020 – 10.05.2020 на основе уточненных данных / OLS estimates of the parameters of function (2) for Russia from 02.03.2020 to 30.04.2020 – 10.05.2020 based on revised data

Источник / Source: таблица 5 / table 5

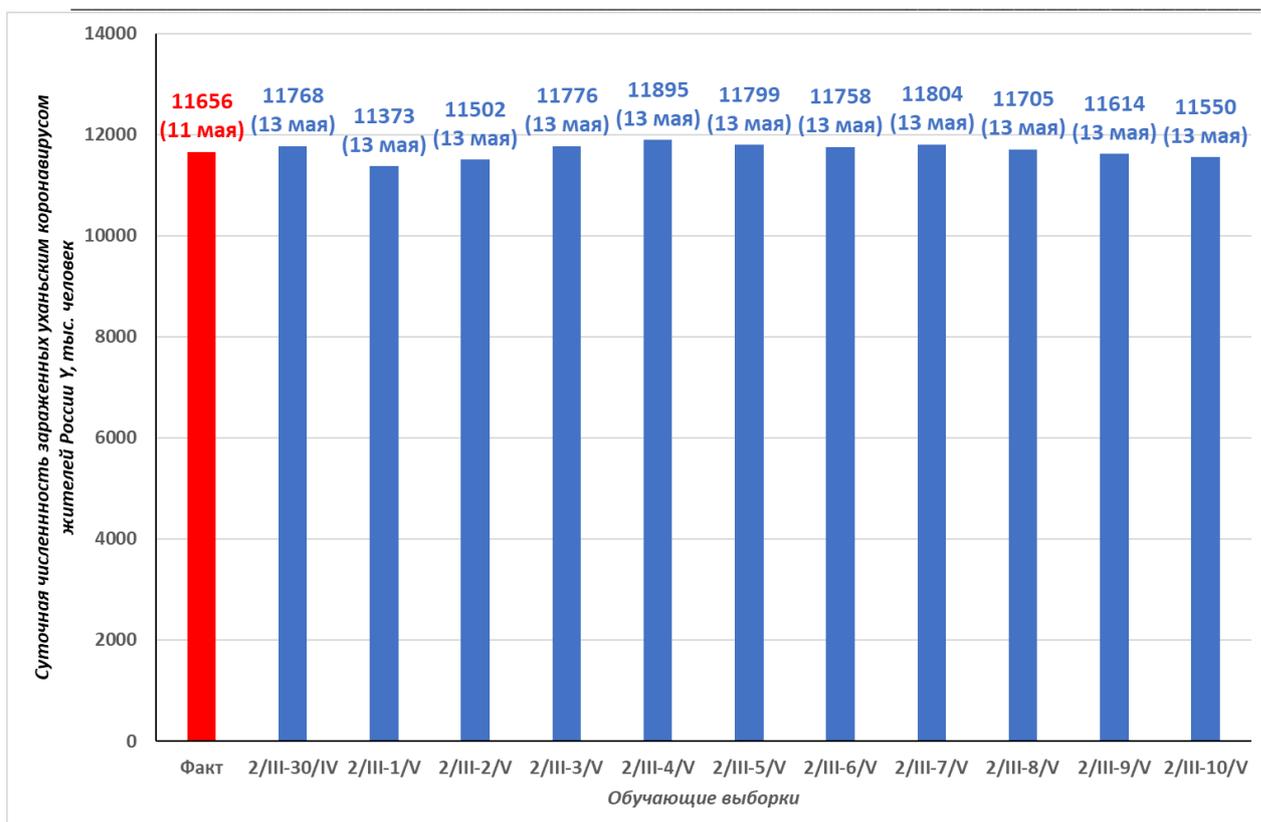


Рис. 6. / Fig. 6. Фактическая и прогнозная пиковая численность зараженных уханьским коронавирусом в России, достигаемая 13 мая 2020, по функции (2), исследованной с 02.03.2020 по 30.04.2020 – 10.05.2020 / Actual and predicted peak number of people infected with the Wuhan coronavirus in Russia, reached on May 13, 2020, according to function (2), studied from 03/02/2020 to 04/30/2020 – 05/10/2020

Источник / Source: таблицы 3 и 5 / tables 3 and 5

Заключение

Итак, нами представлена методология эконометрического прогнозирования распространения уханьского коронавируса в России, которая в условиях малой изученности нового коронавируса оказалась достаточно действенной на 1-ой фазе эпидемии (весна 2020 г.). Отличительные черты нашей методологии следующие:

- 1) выбор функции Гаусса на основе изучения колоколообразных траекторий распространения родственного уханьскому коронавирусу SARS-CoV-1 в 2002–2003 гг.,
- 2) последовательное МНК-оценивание параметров зависящих от времени нелинейных квадратичных экспонент Гаусса – сначала для Москвы, а потом для России,
- 3) стабилизация во времени как МНК-оценок параметров, так и значений прогнозных пиковых дат и пикового числа случаев заражения,
- 4) эндогенное определение этих пиковых значений,
- 5) достаточно низкие прогнозные ошибки наступления пиков,
- 6) отсутствие необходимости в перенастройке параметров функций Гаусса и корректировке прогнозов.

Отметим, что применение этой методологии позволило дать достаточно точные прогнозы наступления пиков уханьского коронавируса и последующего снижения его распространения. По нашему мнению, предложенная методология может быть успешно использована для прогнозирования динамики распространения новых коронавирусов во время будущих эпидемий, в особенности на начальных фазах, и их влияния на экономическое развитие мировой и российской экономик.

Автор выражает благодарность академику РАН В.Л. Макарову за полезные обсуждения полученных результатов на научном семинаре, старшему научному сотруднику ЦЭМИ РАН О.С. Пономаревой за большую помощь и полезные советы при подготовке данной статьи,

заведующему Лабораторией вероятностно-статистических методов в экономике ЦЭМИ РАН, к.ф.-м.н. А.В. Кудрову за ценные советы и замечания.

Литература / References

1. Афанасьев, А.А. (2020а), “Эконометрическое прогнозирование суточной численности зараженных уханьским коронавирусом жителей г. Москвы за период с марта по июль 2020 г. (версия от 25.04.2020)”. Доступно по адресу: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/294603297/> (дата обращения: 15.09.2024). [Afanasiev, A.A. (2020), “Econometric forecasting of the daily number of Moscow citizens infected with the Wuhan coronavirus from March to July 2020 (full version of 25 April 2020)”. Available at: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/294603297/> (accessed 15 September, 2024)]
2. Афанасьев, А.А. (2020б), “Эконометрическое прогнозирование суточной численности зараженных уханьским коронавирусом жителей г. Москвы за период с марта по июль 2020 г. (версия от 25.04.2020, сокращенный вариант)”. Доступно по адресу: https://corona.indem.ru/Forecast_CV-19_In_Moscow.pdf (дата обращения 15.09.2024) [Afanasiev A.A., (2020), “Econometric forecasting of the daily number of Moscow citizens infected with the Wuhan coronavirus from March to July 2020 (abridged version of 25 April 2020)”. Available at: https://corona.indem.ru/Forecast_CV-19_In_Moscow.pdf (accessed 15 September, 2024)]
3. Афанасьев, А.А. (2020с), “Исполнение эконометрического прогноза суточной численности зараженных уханьским коронавирусом жителей г. Москвы (26 апреля – 9 мая 2020 г.)”. Доступно по адресу: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/297636272/> (дата обращения 15.09.2024) [Afanasiev, A.A. (2020), “Execution of the econometric forecast for the daily number of Moscow citizens infected with the Wuhan coronavirus (26 April – 9 May 2020)”. Available at: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/297636272/> (accessed 15 September, 2024)]
4. Благовещенский, Ю.Н. (2020а), “Россия: когда число инфицированных за сутки перестанет расти?” Доступно по адресу: <https://corona.indem.ru/Prognoz-RF.pdf> (дата обращения 15.09.2024) [Blagoveshchensky, Yu. N. (2020а), “Russia: When will the number of infected people per day stop growing?” Available at: <https://corona.indem.ru/Prognoz-RF.pdf> (accessed 15.09.2024)]
5. Благовещенский, Ю.Н. (2020б), “Что стало с нашими прогнозами для России?”. Доступно по адресу: <https://corona.indem.ru/chto-stalo-prognoz-ross1.pdf> (дата обращения 15.09.2024) [Blagoveshchensky, Yu. N. (2020б), “What happened to our forecasts for Russia?” Available at: <https://corona.indem.ru/chto-stalo-prognoz-ross1.pdf> (accessed 15.09.2024)]
6. ПАО Сбербанк (2020а), “Модель заболеваемости для Москвы”. Доступно по адресу: <https://sberindex.ru/ru/dashboards/model-zabolevaemosti-dlya-moskvy> (дата обращения 15.09.2024) [Sberbank PJSC (2020а), “Incidence model (Moscow)”. Available at: <https://sberindex.ru/en/dashboards/model-zabolevaemosti-dlya-moskvy> (accessed 15 September, 2024)].
7. ПАО Сбербанк (2020б), “Модель заболеваемости для России”. Доступно по адресу: <https://sberindex.ru/ru/dashboards/model-zabolevaemosti-dlya-rossii> (дата обращения 15.09.2024) [Sberbank PJSC (2020б), “Incidence model (Russia)”. Available at: <https://sberindex.ru/en/dashboards/model-zabolevaemosti-dlya-rossii> (accessed 15 September, 2024)].
8. Коммерсантъ (2020), “Собянин сообщил о сокращении тестирования на коронавирус из-за дефицита пипеток”. *Коммерсантъ*, 23.04.2020. Доступно по адресу: <https://www.kommersant.ru/doc/4329236> (дата обращения 15.09.2024)
9. Afanasiev, A.A. and Ponomareva, O.S. (2020), “Wuhan coronavirus spread in Russia: macroeconomic production function in regard to transport and communication infrastructure”. *Business Informatics*, vol. 14, no 4, pp. 76–95.
10. Biden, J. (2022), “Remarks by President Biden at the U.S.-Africa Business Forum”, Dec. 14, 2022. Available at: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/speeches-remarks/2022/12/14/remarks-by-president-biden-at-the-u-s-africa-business-forum/> (accessed 15 September, 2024).
11. Gates, B. (2022), “Hay un 50% de posibilidades de que tengamos otra pandemia de aquí a 20 años”. *El Diario*, 28 de mayo de 2022. Available at: https://www.eldiario.es/sociedad/bill-gates-hay-50-posibilidades-tengamos-pandemia-20-anos_1_9032669.html (accessed 15 September, 2024).
12. Feng, W., Zong, W., Wang, F., & Ju, S. (2020), “Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2): a review”. *Molecular cancer*, vol. 19, no 1, 100.

13. Jiang, S., He, Y., Liu, S. (2005), “SARS vaccine development”. *Emerging Infectious Diseases*, July, vol. 11, no 7, pp. 1016-1020.
14. Koenen, M., Balvert, M., Brekelmans, R., Fleuren, H., Stienen, V., Wagenaar, J. (2021). “Forecasting the spread of SARS-CoV-2 is inherently ambiguous given the current state of virus research”. *PLoS ONE*, vol. 16, no 3: e0245519. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0245519> (accessed 15 September, 2024).
15. Luo, J. (2020), “When Will COVID-19 End: Data-Driven Predictions” (updated on April 30, 2020). Data-Driven Innovation Lab, Singapore University of Technology & Design. Available at: https://persi.or.id/wp-content/uploads/2020/03/covid19_prediction_paper.pdf and <https://static.tayyar.org/Content/uploads/PdfLibrary/200426095427588~COVID19PredictionTable20200426.pdf> (accessed 15 September, 2024).
16. Luo, J. (2021), “Forecasting COVID-19 pandemic: Unknown unknowns and predictive monitoring”. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 166, May, 120602. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162521000342?via%3Dihub> (accessed 15 September, 2024).
17. Ma, J. (2020), “Estimating epidemic exponential growth rate and basic reproduction number”. *Infectious Disease Modelling*, vol. 5, pp. 129-141.
18. Rockefeller Foundation (2010), *Scenarios for the Future of Technology and International Development*, May. New York: The Rockefeller Foundation, 53 p
19. Tuli, S., & Tuli, S., Tuli, R., and Gill, S. S. (2020). “Predicting the Growth and Trend of COVID-19 Pandemic using Machine Learning and Cloud Computing”. 100222. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Fit-curves-for-SARS-CoV-1-pandemic-for-Hong-Kong-SAR-China-Data-source-WHO-epidemic_fig1_341317674 (accessed 15 September, 2024).
20. United Nations (2023), “World must be ready to respond to next pandemic: WHO chief”. Available at: <https://news.un.org/en/story/2023/05/1136912> (accessed 15 September, 2024)..
21. Xu, X., Chen, P., Wang, J., Feng, J., Zhou, H., Li, X., Zhong, W., and Hao, P. (2020), “Evolution of the novel coronavirus from the ongoing Wuhan outbreak and modeling of its spike protein for risk of human transmission”. *Science China Life Sciences*, 63, pp. 457–460.
22. Zhao, L., Feng, D., Ye, R. Z., Wang, H. T., Zhou, Y. H., Wei, J. T., de Vlas, S. J., Cui, X. M., Jia, N., Yin, C. N., Li, S. X., Wang, Z. Q., & Cao, W. C. (2020), “Outbreak of COVID-19 and SARS in mainland China: a comparative study based on national surveillance data”. *BMJ open*, 10(10), e043411.

Об авторе

Афанасьев Антон Александрович, доктор экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центрального экономико-математического института РАН, Москва; заведующий Кафедрой моделирования и системного анализа Факультета информационных технологий и анализа больших данных Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, Москва.

About author

Anton A. Afanasiev, Doctor of Sci. (Econ.), Associate Professor, Leading researcher, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Science, Moscow; Chief of the Cathedra of Modelling and System Analysis, Faculty of Information Technology and Big Data Analysis, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow.