

© НАРКЕВИЧ А. Н., ШАДРИН К. В., ВИНОГРАДОВ К. А.

УДК 614.2

DOI: 10.20333/2500136-2020-2-111-116

Моделирование распространения коронавирусной инфекции на территории города Красноярск

А. Н. Наркевич, К. В. Шадрин, К. А. Виноградов

Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого, Красноярск 660022, Российская Федерация

Цель исследования. Оценка возможного распространения коронавирусной инфекции (COVID-19) и ее последствий в г. Красноярске с применением математического моделирования.

Материал и методы. Используются данные об общей численности населения г. Красноярска и численности выявленных случаев заболевания коронавирусной инфекцией по дням от первого выявленного случая. В качестве модели эпидемического процесса коронавирусной инфекции COVID-19 использована математическая модель, опубликованная Z. Liu et al. (2020). Отличительной особенностью данной модели от аналогичных является то, что описанные предварительные расчеты позволяют осуществлять моделирование на начальном этапе развития инфекции на определенной территории.

Результаты. По результатам проведенной оценки возможного распространения коронавирусной инфекции COVID-19 на территории г. Красноярска отмечено, что при отсутствии какого-либо воздействия извне, в виде различного рода карантинных и иных мероприятий, сдерживающих распространение коронавирусной инфекции COVID-19, пик численности заболевших наступит на 65–70 сутки от первого выявленного больного. При этом численность больных в данный период составит более 200 000 человек, из которых порядка 46 000 больных останутся для системы здравоохранения неизвестными.

Заключение. Полученные результаты моделирования распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в г. Красноярске показали, что при отсутствии каких-либо воздействий для прерывания эпидемического процесса потенциально можно ожидать через 2–2,5 месяца от момента выявления первого больного значительного увеличения численности больных. При таком существенном увеличении численности больных коронавирусной инфекцией COVID-19 в значительной степени увеличивается численность больных, которым потенциально понадобится госпитализация и интенсивная терапия.

Ключевые слова: коронавирусная инфекция, COVID-19, моделирование, распространение инфекции, пандемия.

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

Для цитирования: Наркевич АН, Шадрин КВ, Виноградов КА. Моделирование распространения коронавирусной инфекции на территории города Красноярск. *Сибирское медицинское обозрение.* 2020;(2):111-116. DOI: 10.20333/2500136-2020-2-111-116

Modeling of coronavirus infection spread among the residents of Krasnoyarsk city

A. N. Narkevich, K. V. Shadrin, K. A. Vinogradov

Prof. V. F. Voyno-Yasensky Krasnoyarsk State Medical University, Krasnoyarsk 660022, Russian Federation

The aim of the research is the assessment of possible coronavirus infection (COVID-19) spread by means of mathematical modeling and its consequences in Krasnoyarsk city.

Material and methods. Data on the total Krasnoyarsk city population and number of daily detected cases of coronavirus infection starting from the first detected case are used. Mathematical model published by Z. Liu et al., (2020) was used as a model of epidemic coronavirus infection, COVID-19 process. The main feature of this model is that preliminary calculations allow the use of model at the initial stage of infection spread in certain area.

Results. According to the results of the assessment of possible coronavirus infection COVID-19 spread in the territory of Krasnoyarsk city, in case of no external influence such as quarantine or some other activities, infected by COVID-19 patients' peak would be on 65–70 days dating from the time the first patient was identified. In this regard, the number of patients within this period would exceed 200,000 people, while 46,000 patients would remain unknown to health care system.

Conclusion. The obtained modeling results of coronavirus infection COVID-19 spread in Krasnoyarsk city revealed that in case of no influence on epidemiologic process, potentially, in 2–2.5 months since the first infected patient was detected, a large number of patients could be expected. In case of significant increase in number of patients with coronavirus infection, COVID-19, the number of patients who need hospitalization and intensive care would increase as well.

Key words: coronavirus infection, COVID-19, modeling, spread of infection, pandemia.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

Citation: Narkevich AN, Shadrin KV, Vinogradov KA. Modeling of coronavirus infection spread among the residents of Krasnoyarsk city. *Siberian Medical Review.* 2020;(2):111-116. DOI: 10.20333/2500136-2020-2-111-116

Введение

Эпидемическая вспышка заболеваемости коронавирусом человека COVID-19 произошла в Ухане (Китай). Первые случаи заражения были отмечены в начале декабря 2019 года, а к 29 января 2020 года в Китае было зарегистрировано более 7 000 случаев заражения [1]. Типичными симптомами инфекции COVID-19 являются сухой кашель, лихорадка, быстрая утомляемость, затрудненное дыхание и двусторонняя инфильтрация легких [2].

Важную роль в развитии эпидемического процесса при отсутствии вакцины [3] играет сам механизм передачи инфекции. Отмечено, что передача COVID-19 может осуществляться индивидуумами, у которых еще нет выраженных симптомов инфекции [4, 5, 6, 7, 8]. Поэтому как в Китае, так и в других странах, были введены меры, направленные на сокращение числа контактов между людьми [1, 9].

Всемирная организация здравоохранения дала рекомендации всем учреждениям системы здравоохранения и соответствующим органам в каждой стране выносить управленческие решения и давать прогнозы, основываясь только на фактических актуальных данных [10]. Данные рекомендации, с учетом территориальных и региональных особенностей, приняты к исполнению в Российской Федерации, в том числе органами власти административно-территориальных образований. К сожалению, для прогнозирования распространения заболевания, оценки возможных рисков и эффективности вмешательств часто недостаточно данных, причем не только о динамике численности подтвержденных инфицированных. В этом случае для построения прогноза можно использовать методы математического моделирования [11, 12, 13]. Основываясь на результатах моделей, можно разработать различные стратегии для эффективного и действенного предотвращения или контроля распространения заболеваний на большой территории, не допустить их дальнейшего распространения [11].

С начала 2020 года уже опубликовано большое количество работ, в которых представлены математические модели распространения коронавирусной инфекции COVID-19 [3, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. В этих работах, которые преимущественно описывают эпидемическую ситуацию в Китае, авторы подчеркивают значительную роль прямого пути передачи вируса от человека к человеку [4, 15]. Кроме того, у большого числа инфицированных людей наблюдается относительно длительный инкубационный период, поэтому в отсутствие симптомов они не знают о своем инфицировании в течение 10–14 дней и могут через непосредственный контакт легко заразить других людей [21]. Модели, описанные в работах

[3, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22], доказали свою состоятельность при описании эпидемиологической ситуации как в целой стране, так и в отдельных городах, а значит могут являться инструментом для описания распространения эпидемии коронавируса COVID-19 в других городах и регионах мира.

Целью исследования явилась оценка возможного распространения коронавирусной инфекции (COVID-19) и ее последствий в г. Красноярске с применением математического моделирования.

Материал и методы

В качестве материала исследования использована общая численность населения г. Красноярск, которая на 01 января 2019 года составила 1 095 286 человек при плотности населения 2 765 человек на один квадратный километр, и число выявленных случаев заболевания коронавирусной инфекцией по дням от первого выявленного случая.

Данные о числе зарегистрированных случаев коронавирусной инфекции взяты из официальных отчетов Министерства здравоохранения Красноярского края. На момент написания статьи в Красноярском крае случаи заболевания коронавирусной инфекцией COVID-19 зарегистрированы только на территории г. Красноярск.

В качестве модели эпидемического процесса коронавирусной инфекции COVID-19 использована математическая модель, опубликованная Z. Liu et al., (2020) [23]. Отличительной особенностью данной модели от аналогичных является то, что описанные предварительные расчеты позволяют осуществлять моделирование на начальном этапе развития инфекции на определенной территории.

Результаты и обсуждение

Динамика численности больных коронавирусной инфекцией COVID-19, выявленных на территории Красноярского края, по дням начиная с первого выявленного больного, представлена на рисунке 1. Необходимо отметить, что на графике представлена информация о фактической численности больных в определенный день, а не численность выявленных в день – общее число выявленных и верифицированных за период наблюдения больных составляет на текущий момент (26.03.2020) 6 пациентов.

На рисунке 1 представлена численность больных на определенный день от начала эпидемического процесса с коэффициентом 0,11, который рассчитан Z. Liu et al., (2020) [23]. Данный коэффициент рассчитывается исходя из допущения о том, что из всех больных известны только 80% и процесс у больного протекает бессимптомно в среднем 7 дней. Таким образом коэффициент ν равен:

$$\nu = \frac{1}{7} \times 0,8 = 0,14 \times 0,8 = 0,11$$

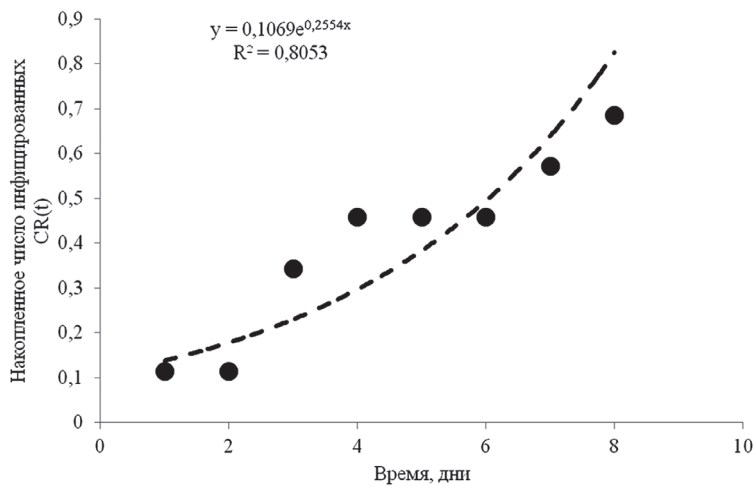


Рисунок 1. Аппроксимация числа больных экспоненциальной функцией.

Figure 1. Approximation of number of patients with exponential function.

Как видно на рисунке 1, динамика численности пациентов довольно хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией (коэффициент детерминации – 0,8053).

Для дальнейшего моделирования эпидемического процесса коронавирусной инфекции COVID-19 использованы коэффициенты полученной экспоненциальной функции: $x_1 = 0,1069$, $x_2 = 0,2554$. Для дальнейшего моделирования также необходим

коэффициент x_3 , который является свободным членом полученной экспоненциальной функции. Однако, в нашем случае он получился равным нулю. В связи с тем, что данный коэффициент используется только при расчете начального числа инфицированных человек, что имеет низкую значимость в качестве результата моделирования, то нами использован коэффициент $x_3 = 0,1$ [3].

При использовании рассчитанных коэффициентов получены результаты моделирования динамики накопленного числа случаев зарегистрированных заболеваний, числа известных и неизвестных случаев заболевания на определенный момент времени (рис. 2). Под неизвестными случаями заболевания коронавирусной инфекцией COVID-19 подразумеваются случаи заболевания, которые протекают бессимптомно и остаются неизвестными не только для системы здравоохранения, но и для самого инфицированного.

На рисунке 3 представлена более детальная динамика числа инфицированных в инкубационном периоде и с симптомами в момент предполагаемого пика развития коронавирусной инфекции COVID-19, а на рисунке 4 – динамика численности пациентов, которым потребуется госпитализация и интенсивная медицинская помощь.

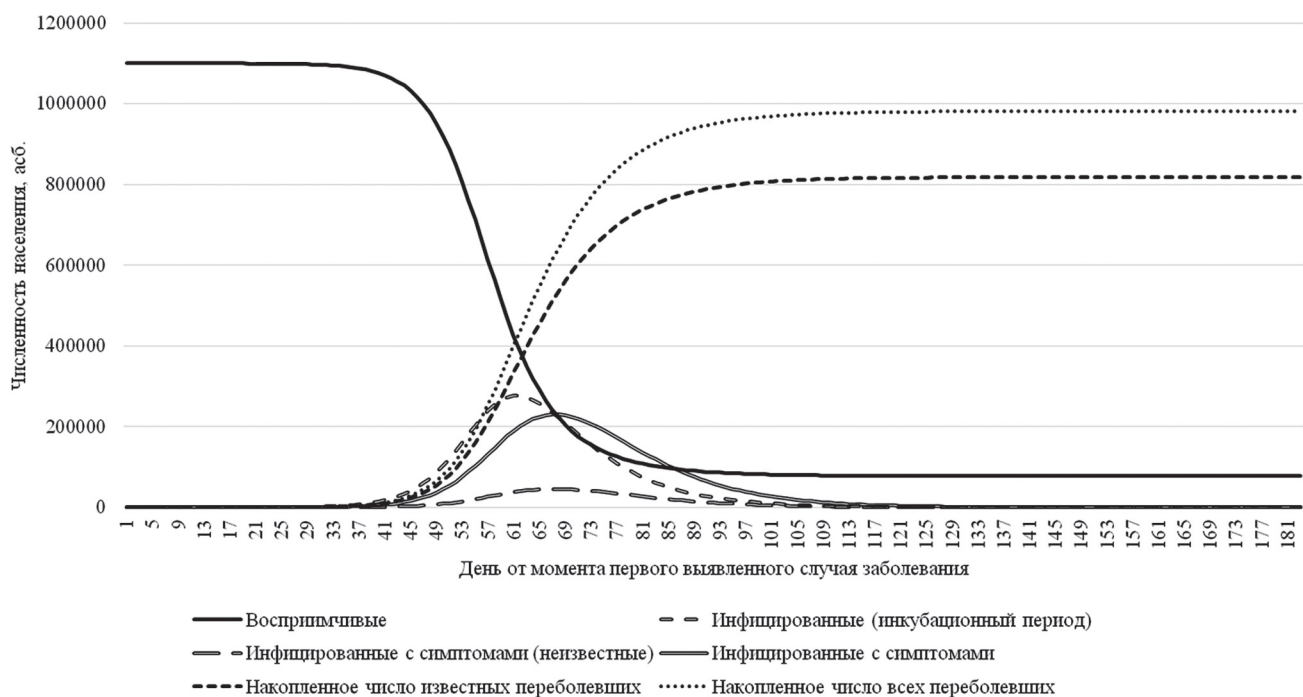


Рисунок 2. Динамика накопленного числа случаев зарегистрированных заболеваний, число известных и неизвестных случаев заболевания на определенный момент времени.

Figure 2. Dynamics of accumulated number of registered disease cases, number of known and unknown cases of the disease at a certain period of time.

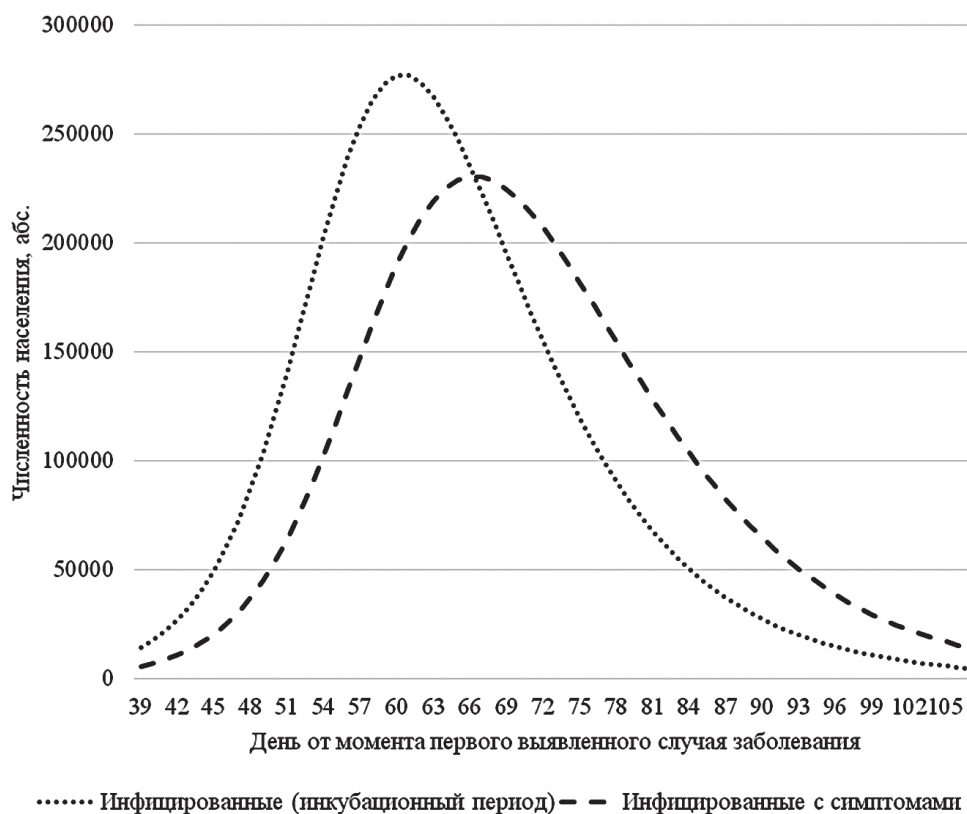


Рисунок 3. Более детальная динамика числа инфицированных в инкубационном периоде и с симптомами в момент предполагаемого пика развития коронавирусной инфекции COVID-19.

Figure 3. More detailed dynamics of number of infected people during the incubation period and with symptoms at the expected peak of coronavirus infection COVID-19 development.

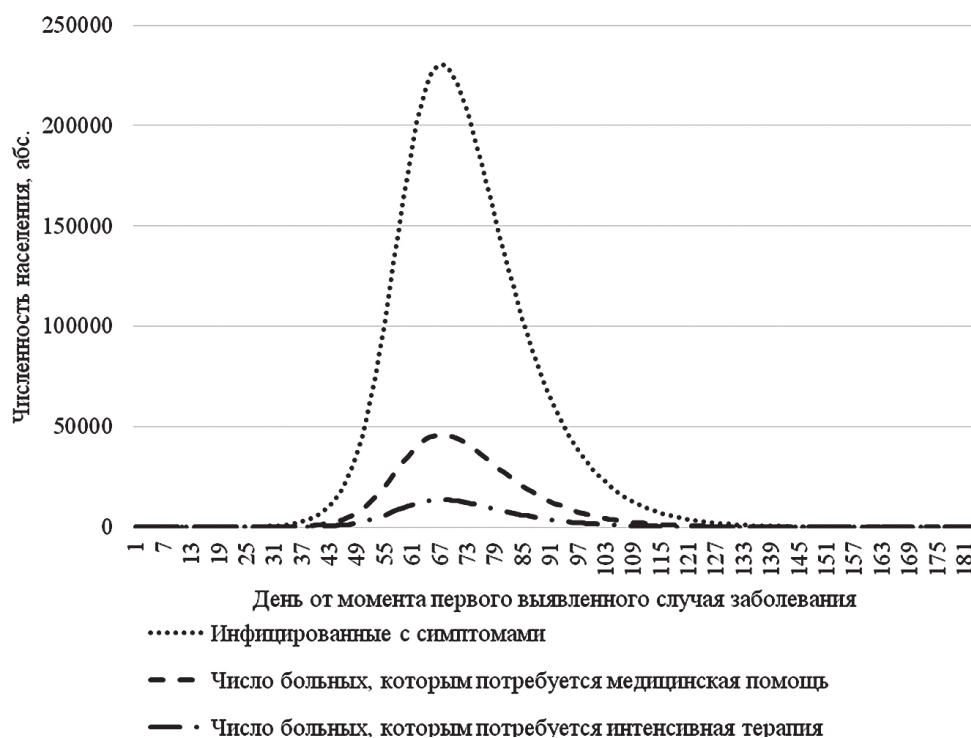


Рисунок 4. Динамика численности населения, требующего госпитализации, неотложной помощи и летальных случаев.

Figure 4. Dynamics of residents requiring hospitalization, emergency care and mortality rate.

По результатам проведенной оценки возможного распространения коронавирусной инфекции COVID-19 на территории г. Красноярска можно отметить, что при отсутствии какого-либо воздействия извне, в виде различного рода карантинных и иных мероприятий, сдерживающих распространение коронавирусной инфекции COVID-19, пик численности заболевших наступит на 65–70 сутки от первого выявленного больного. При этом численность больных в данный период составит более 200 000 человек, из которых порядка 46 000 больных останутся для системы здравоохранения неизвестными.

Практически нулевых значений численность больных достигнет к 180 дню распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в г. Красноярске. К этому моменту численность восприимчивого к инфекции населения снизится до 77 000–78 000 человек при условии, что у всех переболевших разовьется иммунитет, а численность невосприимчивых достигнет 980 000 человек.

Необходимо отметить, что основная нагрузка на систему здравоохранения будет приходиться на полуторамесячный срок с 50 до 93 дня распространения коронавирусной инфекции COVID-19 на территории г. Красноярска. Моделируемый пик численности больных будет сопровождаться резким увеличением числа болеющих с 50 000 до 230 000. Необходимо отметить, что данные значения отражают не ежедневное выявление новых случаев заболевания, а одномоментное наличие в г. Красноярске больных с учетом того, что к определенному периоду часть больных уже будет излечиваться.

На основании данных, представленных на рисунке 3, можно отметить, что в момент пика распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в г. Красноярске в госпитализации будут нуждаться порядка 46 000 больных. При этом в интенсивной терапии будут нуждаться более 13 000 пациентов.

Заключение

Таким образом, полученные результаты моделирования распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в г. Красноярске показали, что при отсутствии каких-либо воздействий для прерывания эпидемического процесса потенциально можно ожидать через 2–2,5 месяца от момента выявления первого больного значительного увеличения численности больных. При таком существенном увеличении численности больных коронавирусной инфекцией COVID-19 в значительной степени увеличивается численность больных, которым потенциально понадобится госпитализация и интенсивная терапия. Несомненно, что такое увеличение числа пациентов, требующих оказания различного рода медицинской помощи может привести к коллапсу системы здравоохранения.

Полученные в результате моделирования данные являются теоретическим обоснованием необходимости введения, возможно, довольно жестких карантинных мер, для предотвращения быстрого распространения коронавирусной инфекции COVID-19 и снижения нагрузки на здравоохранение. Помимо этого, полученные результаты моделирования в последующем позволят оценить эффективность организации противоэпидемических мероприятий по предотвращению распространения коронавирусной инфекции COVID-19.

Литература / References

1. Ducrot A, Magal P, Nguyen T, Webb GF. Identifying the number of unreported cases in SIR epidemic models. *Mathematical Medicine and Biology: A Journal of the IMA*. 2019;dqz013. DOI: 10.1093/imammb/dqz013
2. Gralinski LE, Menachery VD. Return of the coronavirus: 2019-nCoV. *Viruses*. 2020;12(2):135. DOI: 10.3390/v12020135
3. Liu Z, Magal P, Seydi O, Webb G. Understanding Unreported Cases in the COVID-19 Epidemic Outbreak in Wuhan, China, and the Importance of Major Public Health Interventions. *Biology*. 2020;9(3):E50. DOI: 10.3390/biology9030050
4. Chan JF, Yuan S, Kok KH, To KK, Chu H, Yang J, Xing F, Liu J, Yip CC, Poon RW, Tsoi HW, Lo SK, Chan KH, Poon VK, Chan WM, Ip JD, Cai JP, Cheng VC, Chen H, Hui CK, Yuen KY. A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster. *Lancet*. 2020;395(10223):514-523. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30154-9
5. Haderler KP. Parameter identification in epidemic models. *Mathematical Biosciences*. 2011;229(2):185-189. DOI: 10.1016/j.mbs.2010.12.004
6. Li R, Pei S, Chen B, Song Y, Zhang T, Yang W, Shaman J. Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2). *Science*. 2020:eabb3221. DOI: 10.1126/science.abb3221
7. Munster VJ, Koopmans M, van Doremalen N, van Riel D, de Wit E. A Novel Coronavirus Emerging in China – Key Questions for Impact Assessment. *The New England Journal of Medicine*. 2020;382(8):692-694. DOI: 10.1056/NEJMp2000929
8. Wu P, Hao X, Lau EHY, Wong JY, Leung KSM, Wu JT, Cowling BJ, Leung GM. Real-time tentative assessment of the epidemiological characteristics of novel coronavirus infections in Wuhan, China, as at 22 January 2020. *Euro Surveill*. 2020;25(3):2000044. DOI: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000044
9. Cheng WCC, Wong SC, To KKW, Ho PL, Yuen KY. Preparedness and proactive infection control measures

against the emerging Wuhan coronavirus pneumonia in China. *Journal of Hospital Infection*. 2020;104(3):254-255. DOI: 10.1016/j.jhin.2020.01.010

10. Rabajante JF. Insights from early mathematical models of 2019-nCoV acute respiratory disease (COVID-19) dynamics. *arXiv*:2002.05296.

11. Heesterbeek H, Anderson RM, Andraesen V, Bansal S, De Angelis D, Dye C, Eames KT, Edmunds WJ, Frost SD, Funk S, Hollingsworth TD, House T, Isham V, Klepac P, Lessler J, Lloyd-Smith JO, Metcalf CJ, Mollison D, Pellis L, Pulliam JR, Roberts MG, Viboud C, Arinaminpathy N, Ball F, Bogich T, Gog J, Grenfell B, Lloyd AL, Mclean A, O'Neill P, Pearson C, Riley S, Tomba GS, Trapman P, Wood J. Modeling infectious disease dynamics in the complex landscape of global health. *Science*. 2015;347(6227):aaa4339. DOI: 10.1126/science.aaa4339

12. Siettos CI, Russo L. Mathematical modeling of infectious disease dynamics. *Virulence*. 2013;4(4):295-306. DOI: 10.4161/viru.24041

13. Tuite AR, Fisman DN. Reporting, Epidemic Growth, and Reproduction Numbers for the 2019 Novel Coronavirus (2019-nCoV) Epidemic. *Annals of Internal Medicine*. 2020. DOI: 10.7326/M20-0358

14. Hui DS, I Azhar E, Madani TA, Ntoumi F, Kock R, Dar O, Ippolito G, Mchugh TD, Memish ZA, Drosten C, Zumla A, Petersen E. The continuing 2019-nCoV epidemic threat of novel corona viruses to global health – The latest 2019 novel corona virus outbreak in Wuhan, China. *International Journal of Infection Diseases*. 2020;91:264-266. DOI: 10.1016/j.ijid.2020.01.009

15. Magal P, Webb G. The parameter identification problem for SIR epidemic models: Identifying Unreported Cases. *Journal of Mathematical Biology*. 2018;77(6-7):1629-1648. DOI: 10.1007/s00285-017-1203-9

16. Nishiura H, Kobayashi T, Yang Y, Hayashi K, Miyama T, Kinoshita R, Linton NM, Jung SM, Yuan B, Suzuki A, Akhmetzhanov AR. The Rate of Underascertainment of Novel Coronavirus (2019-nCoV) Infection: Estimation Using Japanese Passengers Data on Evacuation Flights. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(2):419. DOI: 10.3390/jcm9020419

17. Nishiura H, Linton NM, Akhmetzhanov AR. Initial cluster of novel coronavirus (2019-nCoV) infections in Wuhan, China Is consistent with substantial human-to-human transmission. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(2):488. DOI: 10.3390/jcm9020488.

18. Roosa K, Lee Y, Luo R, Kirpich A, Rothenberg R, Hyman JM, Yan P, Chowell G. Real-time forecasts of the COVID-19 epidemic in China from February 5th to February 24th. *Infectious Disease Modelling*. 2020;(5):256-263. DOI: 10.1016/j.idm.2020.02.002

19. Thompson RN. Novel coronavirus outbreak in Wuhan, China, 2020: Intense surveillance Is vital for preventing sustained transmission in new locations. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(2):498. DOI: 10.3390/jcm9020498

20. Wu JT, Leung K, Leung GM. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. *The Lancet*. 2020;395(10225):689-697. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30260-9

21. Yang C, Wang J. A mathematical model for the novel coronavirus epidemic in Wuhan, China. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2020;17(3):2708-2724. DOI: 10.3934/mbe.2020148

22. Zhao S, Musa SS, Lin Q, Ran J, Yang G, Wang W, Lou Y, Yang L, Gao D, He D, Wang MH. Estimating the unreported number of novel Coronavirus (2019-nCoV) cases in China in the first half of January 2020: A data-driven modelling analysis of the early outbreak. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(2):388. DOI: 10.3390/jcm9020388

23. Liu Z, Magal P, Seydi O, Webb GF. Predicting the cumulative number of cases for the COVID-19 epidemic in China from early data. *Populations and Evolution*. 2020:1-10. DOI: 10.20944/preprints202002.0365.v1

Сведения об авторах

Наркевич Артем Николаевич, к.м.н., доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией медицинской кибернетики и управления в здравоохранении, Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого; адрес: Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 1; тел.: +79135772432; e-mail: narkevichart@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1489-5058>

Шадрин Константин Викторович, старший преподаватель, Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого; адрес: Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 1; тел.: +79082130673; e-mail: kvsh_buffon@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8290-0904>

Виноградов Константин Анатольевич, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой, Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого; адрес: Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 1; тел. +7(391)2200389; e-mail: vinogradov16@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6224-5618>

Author information

Narkevich Artem Nikolaevich, Cand.Med.Sci., Associate Professor, head of research laboratory of medical cybernetics and management in health care, Prof. V. F. Voyno-Yasensky Krasnoyarsk State Medical University; Address: 1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, Russian Federation 660022; Phone: +79135772432; e-mail: narkevichart@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1489-5058>.

Shadrin Konstantin Viktorovich, senior lecturer, Prof. V. F. Voyno-Yasensky Krasnoyarsk State Medical University; Address: 1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, Russian Federation 660022; Phone: +79082130673; e-mail: kvsh_buffon@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8290-0904>

Vinogradov Konstantin Anatolevich, Dr.Med.Sci., Professor, head of the department, Prof. V. F. Voyno-Yasensky Krasnoyarsk State Medical University; Address: 1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, Russian Federation 660022; Phone +7(391)2200389; e-mail: vinogradov16@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6224-5618>

Дата поступления 01.04.2020 г.

Дата рецензирования 05.04.2020 г.

Принята к печати 06.04.2020 г.

Received 01 April 2020

Revision Received 05 April 2020

Accepted 06 April 2020



This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.