



А.В. Боровский

*Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

А.Л. Галкин

*Институт общей физики имени А.Н. Прохорова РАН,
г. Москва, Российская Федерация*

С.С. Козлова

*Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Анализ статистических данных амбулаторного лечения COVID-19 по городу Иркутску за 2020-2021 гг.

Аннотация. Появление новой коронавирусной инфекции (COVID-19) поставило перед специалистами здравоохранения задачи, связанные с быстрой диагностикой и оказанием медицинской помощи больным. В настоящее время продолжается интенсивное изучение клинических и эпидемиологических особенностей заболевания, разработка новых средств его профилактики и лечения [1–7].

Важнейшую роль в борьбе с новой коронавирусной инфекцией (COVID-19) представляют организационные мероприятия при оказании медицинской помощи пациентам с указанной патологией на амбулаторном этапе. С января 2022 г. в условиях распространения нового штамма SARS-CoV-2 омикрон отмечается значимое возрастание нагрузки на амбулаторное звено здравоохранения.

Вариант омикрон, несущий множественные замены в S-белке коронавируса, половина из которых расположена в рецептор-связывающем домене, обладает наивысшей контагиозностью среди всех вариантов COVID-19. Источником инфекции является больной человек, в том числе находящийся в инкубационном периоде заболевания, и бессимптомный носитель SARS-CoV-2.

Новая коронавирусная инфекция (COVID-19), вызванная вариантом омикрон, характеризуется более коротким инкубационным периодом (в среднем 3–4 суток).

Передача инфекции осуществляется воздушно-капельным, воздушно-пылевым и контактно-бытовым путями. Ведущим путем передачи SARS-CoV-2 является воздушно-капельный, который реализуется при кашле, чихании и разговоре.

Высокая контагиозность, наличие нескольких путей передачи инфекции, а также возможность бессимптомного носительства, обуславливают быстрое распространение штамма омикрон.

Целью данной работы является анализ статистики амбулаторного лечения COVID-19, вычисление среднего времени лечения в поликлиниках.

В статье определена статистическая кривая для количества выздоровевших пациентов в зависимости от длительности лечения. Предложены гауссовская и лоренцевская (в физической терминологии) аппроксимации статистической кривой. Методом наименьших квадратов определены коэффициенты аппроксимаций. Произведены расчеты среднего времени лечения в амбулаторных условиях, а также получены средние затраты на амбулаторное лечение граждан в городе Иркутске.

Ключевые слова. Математическое моделирование эпидемий, теоретические модели эпидемий, модель распространения корона вируса, новая корона вирусная инфекция, амбулаторное лечение коронавируса.

Информация о статье. Дата поступления: 2 мая 2023 г.; дата принятия к публикации: 20 ноября 2023 г.; дата онлайн-размещения: 12 декабря 2023 г.

Original article

A.V. Borovsky

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

A. L. Galkin

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

S.S. Kozlova

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

The Analysis of Statistical Data of Outpatient Treatment of COVID-19 in the City of Irkutsk in 2020-2021

Abstract. The emergence of a new coronavirus infection (COVID-19) has set health professionals tasks related to rapid diagnosis and medical care for patients. Currently, intensive study of the clinical and epidemiological features of the disease continues as well as the development of new means of its prevention and treatment.

The most important role in the fight against the new coronavirus infection (COVID-19) is represented by organizational measures in providing medical care to patients with this pathology during the outpatient stage. Since January 2022, under the conditions of the spread of a new strain of SARS-CoV-2 omicron, there has been a significant increase in the burden on the outpatient health care unit.

The omicron variant, carrying multiple substitutions in the coronavirus S-protein, half of which are located in the receptor-binding domain, has the highest contagiousness among all COVID-19 variants. The source of infection is a sick person, including one who is in the incubation period of the disease, and an asymptomatic carrier of SARS-CoV-2.

The greatest danger to others is a sick person in the last two days of the incubation period and the first days of the disease. A new coronavirus infection (COVID-19) caused by the omicron variant is characterized by a shorter incubation period (2–7 days, on average 3–4 days).

Transmission of infection is carried out by airborne, airborne and household contact routes. The leading route of transmission of SARS-CoV-2 is airborne, which is realized when coughing, sneezing and talking.

High contagiousness, the presence of several ways of transmission of infection, as well as the possibility of asymptomatic carrier, cause the rapid spread of the omicron strain.

The purpose of this work is to analyze the statistics of outpatient treatment of COVID-19, to calculate the average treatment time in polyclinics.

The article describes a study of the model of the spread of the COVID-19 epidemic among outpatient patients in Irkutsk. From the analysis of the statistics of outpatient visits, a statistical curve was determined for the number of recovered patients depending on the duration of treatment. Gaussian and Lorentzian (in physical terminology) approximations of the statistical curve are proposed. The coefficients of ap-

proximations are determined by the method of least squares. The analytical formula for the average treatment time in the polyclinic is derived.

Calculations of the average treatment time in outpatient settings were made, as well as the total costs of treatment of citizens in the city of Irkutsk were obtained.

Keywords. Mathematical modeling of epidemics, theoretical models of epidemics, model of the spread of the corona virus, infection in hospitals, new coronavirus infection, outpatient treatment of coronavirus.

Article info. Received 2 May, 2023; Accepted 20 November, 2023; Available online 12 December, 2023.

На основе полученных данных за 2020–2021 гг. построена сводная таблица исходов амбулаторного лечения по городу Иркутску (табл. 1).

Таблица 1

Исходы амбулаторного лечения 2020–2021 гг.

Исход	Количество
Выздоровление	206 116
лечение прервано	375
лечение продолжено	75 442
на госпитализацию	8 359
Общий итог	290 292

На рис. 1 представлена статистика исходов амбулаторных посещений пациентов по городу Иркутску за 2020–2021 гг. в зависимости от времени лечения. По горизонтальной оси отложено количество дней лечения. По вертикальной оси число пациентов. Пик приходящийся на первый день посещения поликлиники формально учитывает незаболевших (здоровых) посетителей. В дальнейшем учитывать его не будем.

Обработаем статистику выздоровлений после посещения поликлиник за период 2020–2021 гг.

Функция $f(t)$ описывает количество выздоровлений на интервале dt , нормированные на общее количество выздоровевших. Интеграл нормирован на единицу

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1. \quad (1)$$

Функция $f(t)$ меняется от 1 до 0 при изменении t от 0 до ∞ . Функцию $f(t)$ определим из анализа статистики амбулаторных посещений с диагнозом COVID-19.

Далее на рисунке 2 представлена статистика амбулаторных посещений с исходом — выздоровление по городу Иркутску за 2020–2021 гг. в зависимости от времени лечения. По горизонтальной оси отложено количество дней лечения. По вертикальной оси число пациентов.

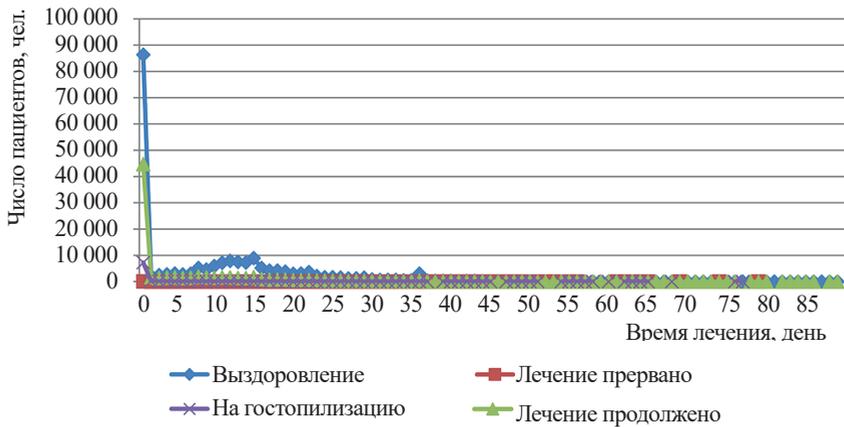


Рис. 1. Статистика исходов амбулаторных посещений г. Иркутск 2020–2021 гг.

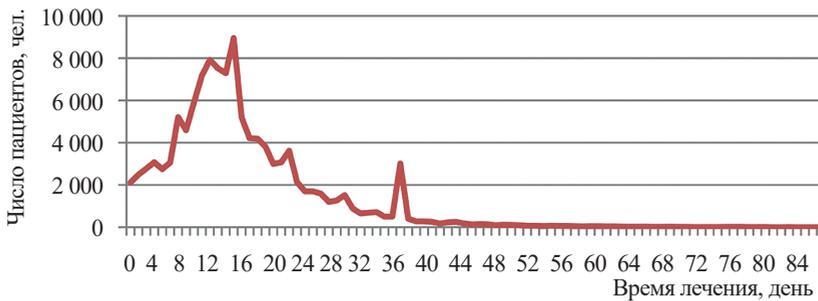


Рис.2. Статистика амбулаторных посещений город Иркутск 2020–2021 гг. с исходом — выздоровление

Рассмотрим различные варианты аппроксимации статистики.

Аппроксимация гауссовой функцией

$$f(t) = b_1 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-c_1}{d_1}\right)^2\right). \quad (2)$$

Подбор коэффициентов b_1 , c_1 , d_1 по методу наименьших квадратов дает следующие значения коэффициентов $b_1 = 6871.39$, $c_1 = 12.1595$, $d_1 = 9.12369$.

Аппроксимация лоренцевой функцией

$$f(t) = \frac{b_2}{1 + \left(\frac{t-c_2}{d_2}\right)^2}. \quad (3)$$

В (3) коэффициент c_2 соответствует положению максимума функции на оси абсцисс, коэффициент d_2 равен полуширине рас-

пределения на полувысоте, коэффициент b_2 соответствует максимальному значению функции.

Подбор коэффициентов b_2 , c_2 , d_2 по методу наименьших квадратов приводит к следующим числовым значениям $b_2 = 7726.68$, $c_2 = 12.0259$, $d_2 = 6.02823$.

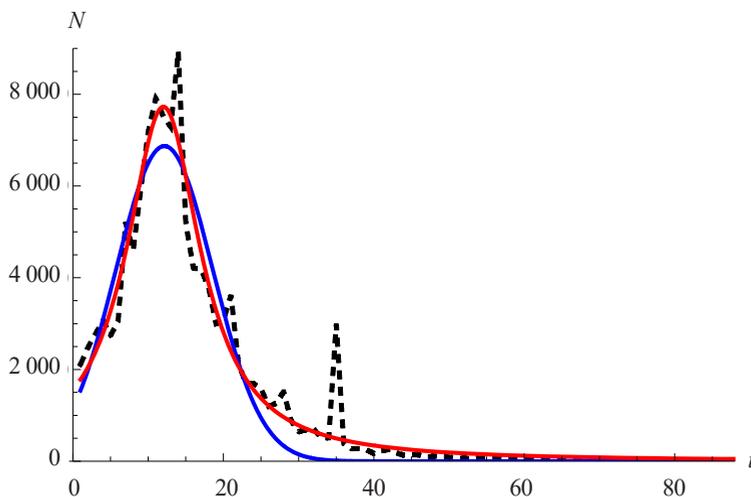


Рис. 3. Варианты аппроксимации статистических данных

На рис. 3 пунктиром изображена кусочно-линейная аппроксимация статистических данных, синяя кривая — аппроксимация гауссовой функцией, красная кривая — аппроксимация лоренцевской функцией.

Расчет среднеквадратичного отклонения (число отсчетов $j = 88$) проводится по формуле (4)

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (f_{\text{эксн}, i} - f_{\text{анпр}, i})^2}. \quad (4)$$

Для аппроксимации гауссовой функцией $\rho = 617.39$ или по отношению к максимальному значению 8946 составляет 0.0690132 (6.9%).

Для аппроксимации Лоренцевской функцией $\rho = 454.19$ или по отношению к максимальному значению 8946 составляет 0.05076 (5.1%).

Интеграл от лоренцевской функции равен

$$f(t) = \frac{1}{d_2 \left[1 + \left(\frac{t-c_2}{d_2} \right)^2 \right] \left[\pi / 2 + \tan^{-1} c_2 / d_2 \right]}. \quad (5)$$

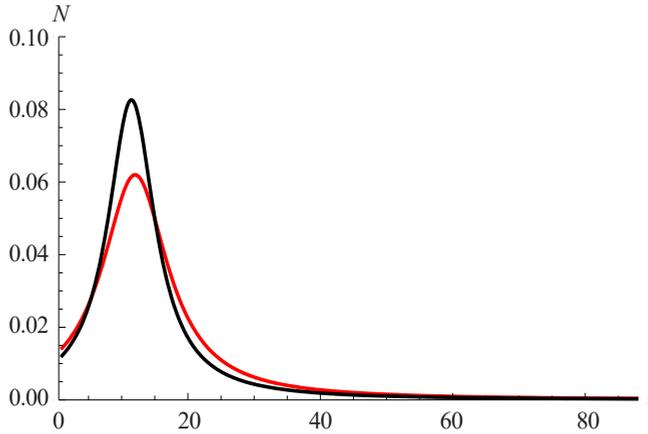


Рис. 4. Нормированные лоренцевы функции статистики выздоровления больничной (черная) и амбулаторной (красная)

Далее получаем, что нормированная на 1 лоренцевская функция не зависит от b_2

$$\int_0^{\infty} \frac{b_2 dt}{1 + \left(\frac{t-c_2}{d_2}\right)^2} = b_2 d_2 \left(\pi / 2 + \tan^{-1} c_2 / d_2\right). \quad (6)$$

На рис. 4 представлены нормированные лоренцевы функции, полученные при аппроксимации статистики выздоровления больничной [1] и статистики выздоровления амбулаторной.

Стоимость лечения

Благодаря ГБУЗ Иркутской ордена «Знак почета» областной клинической больнице, которая предоставила разрешение на использование обезличенных статистических данных в целях выполнения научно-исследовательской работы и написания научных статей, мы имеем в исходных данных столбец, описывающий стоимость лечения каждого случая, что позволит нам произвести суммарные затраты на лечение граждан.

Умножим число выздоровевших пациентов N на стоимость одного дня лечения Q на время лечения t и на функцию распределения $f(t)$ и интегрируем от 0 до ∞ .

Получим формулу (7)

$$\Sigma = NQ \langle t \rangle, \langle t \rangle = \int_0^{\infty} tf(t) dt. \quad (7)$$

Для лоренцевой функции распределения интеграл расходится. Однако, учитывая конечность статистики выздоровлений по времени, интеграл можно обрезать сверху.

Вычислим $\langle t \rangle$ с учетом обрезания g (8)

$$\langle t \rangle = \int_0^g tf(t)dt. \quad (8)$$

Тогда плотности вероятности выздоровевших по дням лечения (функция распределения $f(t)$): при госпитализациях — черная, амбулаторное лечение — красная кривая (рис. 4).

Вероятность выздороветь за t дней (также без обрезания интеграла) на рис. 5.

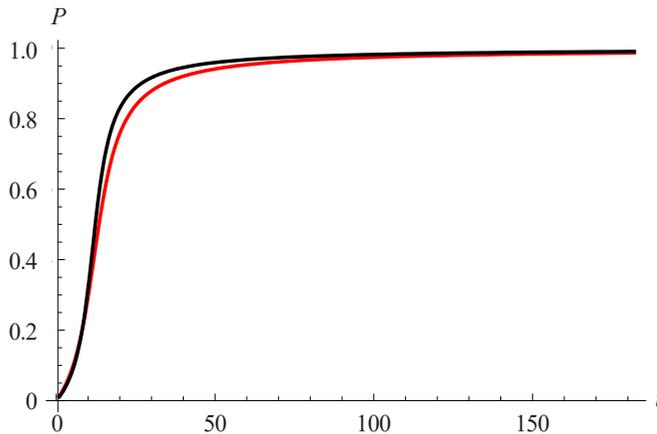


Рис. 5. Вероятность выздоровления за t дней (также без обрезания интеграла)

А зависимости математического ожидания от обрезания (рис. 6)

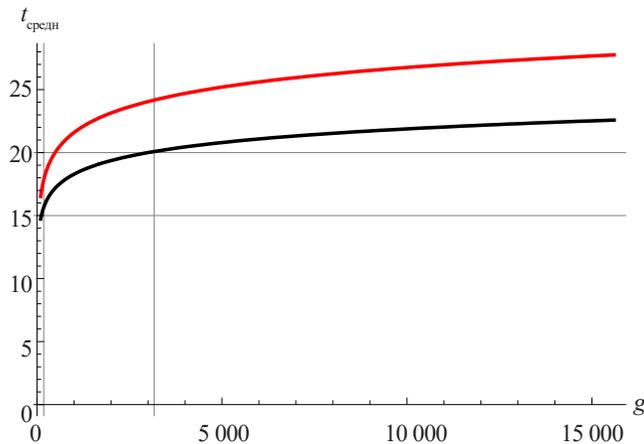


Рис. 6. Вероятность выздоровления за t дней (также без обрезания интеграла)

И если обрезать по числу дней наблюдения $g_1 = 182$; $g_2 = 88$, то получим $\langle t \rangle_1 = 17.816$; $\langle t \rangle_2 = 15.643$

Получение формулы для среднего времени лечения с обрезанием интеграла

Отметим, что различные теоретические модели эпидемии ковид-19 в последнее время рассматривались в работах [2–7].

$$\langle t \rangle = \int_0^g tf(t)dt = \frac{1}{DA} \int_0^g \frac{tdt}{1 + \left(\frac{t-c}{D}\right)^2}. \quad (9)$$

Здесь

$$A = \pi/2 + \tan^{-1} c/D, \quad (10)$$

$$\tan^{-1} c \equiv D \operatorname{arctg} c/D. \quad (11)$$

Замена переменных

$$\frac{t-c}{D} = x \rightarrow t = c + Dx \rightarrow dt = Ddx,$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{DA} \int_0^g \frac{tdt}{1 + \left(\frac{t-c}{D}\right)^2} &= \frac{1}{A} \int_{-\frac{c}{D}}^{\frac{g-c}{D}} \frac{(c+Dx)dx}{1+x^2} = \frac{c}{A} \int_{-\frac{c}{D}}^{\frac{g-c}{D}} \frac{dx}{1+x^2} + \frac{D}{2A} \int_{-\frac{c}{D}}^{\frac{g-c}{D}} \frac{dx^2}{1+x^2} = \\ &= \frac{c}{A} \tan^{-1} x \left\{ \frac{D}{c} + \frac{D}{2A} \ln(1+x^2) \right\} \left\{ \frac{g-c}{-\frac{c}{D}} = \right. \\ &\left. \frac{c}{A} \left[\tan^{-1} \left(\frac{g-c}{D} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{c}{D} \right) \right] + \frac{D}{2A} \ln \left[\frac{D^2 + (g-c)^2}{D^2 + c^2} \right] \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

В первую квадратную скобку добавим $\pi/2$ и вычтем $\pi/2$, после чего выделим букву c

$$\begin{aligned} \langle t \rangle &= c - c \frac{\pi/2 - \tan^{-1} \left(\frac{g-c}{D} \right)}{\pi/2 + \tan^{-1} c/D} + \\ &+ \frac{D}{2[\pi/2 + \tan^{-1} c/D]} \ln \left[\frac{D^2 + (g-c)^2}{D^2 + c^2} \right]. \quad (13) \end{aligned}$$

При $g \gg c, D$ получим

$$\langle t \rangle = c + \frac{D}{2[\pi/2 + \tan^{-1} c/D]} \ln \frac{g^2}{D^2 + c^2}. \quad (14)$$

Так как

$$\lim_{g \rightarrow \infty} \tan^{-1} \left(\frac{g-c}{D} \right) = \frac{\pi}{2}. \quad (15)$$

Формулы верны как для госпитализаций, так и для амбулаторного лечения.

Выводы

В результате проведенного анализа статистических данных по амбулаторному лечению по городу Иркутску за 2020-2021 гг. с использованием лоренцевой аппроксимации статистических данных получена формула для среднего времени лечения:

$$\langle t \rangle = c + \frac{D}{2A} \ln \left[\frac{D^2 + (g-c)^2}{D^2 + c^2} \right]. \quad (16)$$

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{g-c}{D} \right) + \tan^{-1} c / D. \quad (17)$$

Здесь c и D константы лоренцевского распределения (c_2 и D_2), а g — константа обрезания интеграла (статистики) в днях.

Были определены средние затраты Q на амбулаторное лечение одного пациента в расчете на один день $Q = 569,8$ р.

Среднее время лечения в амбулаторных условиях 15,6 дней.

Умножив стоимость одного дня лечения на среднее время лечения и на число выздоровевших, можно получить суммарные затраты на лечение граждан.

Список использованной литературы

1. Боровский А.В. Математическая модель для скорости заражения SARS-COV-2 в неинфекционных больницах на примере города Иркутска / А.В. Боровский, Н.Н. Ильиных, С.С. Козлова. — DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(3).187-199. — EDN LPRLFE // System Analysis and Mathematical Modeling. — 2022. — Т. 4, № 3. — С. 187–199.
2. Тамм М.В. Коронавирусная инфекция в Москве: прогнозы и сценарии / М.В. Тамм. — DOI 10.17749/2070-4909.2020.13.1.43-51. — EDN YXELFS // Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология. — 2020. — Т. 13, № 1. — С. 43–51.
3. Иванов М.В. Математическое моделирование процесса пандемии. Теория и практика / М.В. Иванов // Институт развития стратегических инициатив. — 2020. — 30 апр. — URL: <https://indsi.ru/2020/04/30>.
4. Головинский П.А. Математическое моделирование распространение вирусов с длинной инкубационной фазой в тесном мире / П.А. Головинский. — DOI 10.17308/sait.2020.2/2909. — EDN HQGBNS // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2020. — № 2. — С. 5–14.
5. Modeling the Spatiotemporal Epidemic Spreading of COVID-19 and the Impact of Mobility and Social Distancing Interventions / A. Arenas, W. Cota, J. Gómez-Gardeñes, S. Gomez // Physical Review X. — 2020. — Vol. 10, iss. 4. — P. 041055.

6. Riyapan P. A Mathematical Model of COVID-19 Pandemic: A Case Study of Bangkok, Thailand / P. Riyapan, S.E. Shuaib, A. Intarasit. — DOI 10.1155/2021/6664483 // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. — 2021. — Vol. 9. — P. 1–11.

7. A Dynamical Study of SARS-COV-2: A Study of third Wave / X.-P. Li, Y. Wang, M.A. Khan [et al.]. — DOI 10.1016/j.rinp.2021.104705 // *Results in Physics*. — 2021. — Vol. 29. — P. 104705.

References

1. Borovsky A.V., Ilinykh N.N., Kozlova S.S. Mathematical Model for SARS-COV-2 Infection Rate in Non-Infectious Hospitals on the Example of the City of Irkutsk. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2022, vol. 4, no. 3, pp. 187–199. (In Russian). EDN: LPRLF. DOI: 10.17150/2713-1734.2022.4(3).187-199.

2. Tamm M.V. COVID-19 in Moscow: Prognoses and Scenarios. *Farmakoekonomika. Sovremennaya farmakoekonomika i farmakoepidemiologiya = Pharmacoeconomics. Modern Pharmacoeconomics and Pharmacoepidemiology*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 43–51. (In Russian). EDN: YXELFS. DOI: 10.17749/2070-4909.2020.13.1.43-51.

3. Ivanov M.V. Mathematical modeling of the pandemic process. Theory and practice. *Institute for the Development of Strategic Initiatives*, 2020, April 30. Available at: <https://indsi.ru/2020/04/30>. (In Russian).

4. Golovinski P.A. Mathematical Modelling of the Transmission of Viruses with a Long Incubation Period in a Small-World Network. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*, 2020, no. 2, pp. 5–14. (In Russian).

5. Arenas A., Cota W., Gómez-Gardeñes J., Gomez S. Modeling the Spatio-temporal Epidemic Spreading of COVID-19 and the Impact of Mobility and Social Distancing Interventions. *Physical Review X*, 2020, vol. 10, iss. 4, pp. 041055.

6. Riyapan P. Shuaib S.E., Intarasit A. A Mathematical Model of COVID-19 Pandemic: A Case Study of Bangkok, Thailand. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2021, vol. 9, pp. 1–11. DOI: 10.1155/2021/6664483.

7. Li X.-P., Wang Y., Khan M.A., Alshahrani M.Y., Muhammad T. A Dynamical Study of SARS-COV-2: A Study of third Wave. *Results in Physics*, 2021, vol. 29, pp. 104705. DOI: 10.1016/j.rinp.2021.104705.

Информация об авторах

Боровский Андрей Викторович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: andrei-borovskii@mail.ru.

Галкин Андрей Леонидович — доктор физико-математических наук, научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: galkin@kapella.gpi.ru.

Козлова Светлана Сергеевна — аспирант, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: svet201093@mail.ru.

Information about the Authors

Andrey V. Borovsky— D.Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail andrei-borovskii@mail.ru.

Andrey L. Galkin — D.Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Scientific Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail:galkin@kapella.gpi.ru.

Svetlana S. Kozlova — PhD Student, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail:svet201093@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Боровский А.В. Анализ статистических данных амбулаторного лечения COVID-19 по городу Иркутску за 2020–2021 гг. / А.В. Боровский, А.Л. Галкин, С.С. Козлова. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(4).494-504. — EDN BVYCRC // *System Analysis & Mathematical Modeling*.— 2023.— Т. 5, № 4.— С. 494–504.

For Citation

Borovsky A.V., Galkin A.L., Kozlova S.S. The Analysis of Statistical Data of Outpatient Treatment of COVID-19 in the City of Irkutsk in 2020–2021. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 494–504. (In Russian). EDN: BVYCRC. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(4).494-504.