

Научная статья
УДК 519.218.28

А.В. Боровский

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

А.Л. Галкин

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
г. Москва, Российская Федерация*

Н. Н. Ильиных

*Государственное бюджетное учреждение здравоохранения
Иркутская ордена «Знак почета» областная клиническая больница,
г. Иркутск, Российская Федерация*

С.С. Козлова

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

Модификация математической модели заражения COVID-19 в городских поликлиниках на примере Иркутска

Аннотация. Уточнена аналитическая формула для скорости заражения ковид-19 восприимчивых к инфекции людей в поликлиниках города с учетом статистической поправки. Поликлиники, обслуживающие населенный пункт, различаются по количеству врачей, пропускной способности и приписанному составу населения. Различия в этих показателях могут достигать двукратной величины. Они приводят в формуле для скорости заражения граждан в поликлиниках города к возникновению статистической поправки. Для города Иркутска, в котором имеется 35 взрослых поликлиник, получена величина этой поправки, которая составляет 32 %. К примеру, оценки для Иркутска на 28.12.2021 г., показали, что до 80 % заражений ковид-19 происходили в поликлиниках города. Теория указывает на необходимость внедрения в городских поликлиниках электронной очереди, записи на прием к врачу через сайт медицинского учреждения, оформление больничного листа в электронном виде, решения вопроса о разделении потоков инфицированных и восприимчивых к инфекции людей в поликлиниках.

Ключевые слова. Эпидемия COVID-19, скорость заражения в поликлиниках, статистическая поправка к скорости заражения в поликлиниках, заражение COVID-19 в поликлиниках города Иркутска, поликлиники как фактор постоянного заражения COVID-19.

Информация о статье. Дата поступления: 10 февраля 2022 г.

Original article

A.V. Borovsky

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

A.L. Galkin

*A.M. Prokhorov Institute of General Physics RAS,
Moscow, Russian Federation*

N.N. Ilyinykh

*State Budgetary Healthcare Institution
Irkutsk Order "Badge of Honor" Regional Clinical Hospital,
Irkutsk, Russian Federation*

S.S. Kozlova

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

Modification in the Mathematical Model of COVID-19 Infection in Urban Polyclinics on the Example of Irkutsk

Abstract. The study has specified the analytical formula for the rate of covid-19 infection of people susceptible to infection in polyclinics of the city taking into account the statistical correction. Polyclinics serving the local community differ in the number of doctors, capacity and registered population. The distinctions in these indicators can reach two times the value. Those indicators lead to statistical correction in the formula for infection rate of citizens in polyclinics. For the city of Irkutsk, which operates 35 polyclinics, the value of this statistical correction was 32 %. For example, estimates for Irkutsk on 12.28.2021 showed that up to 80 % of covid-19 infections occurred in polyclinics of the city. The findings point to the need to introduce an electronic queue in polyclinics, introduce an online appointment system, issue a sick leave remotely, control the flows of infected and susceptible to infection people in polyclinics.

Keywords. Epidemic of COVID-19, infection rate in polyclinics, statistical correction to the rate of infection in polyclinics, COVID-19 infection in polyclinics of the city of Irkutsk, polyclinics as a factor in constant COVID-19 infection.

Article info. Received 10 February 2022.

Введение

В период эпидемии коронавирусной инфекции жители Российской Федерации убедились в том, что поликлиники городов и другие медицинские учреждения являются источниками повышенной опасности распространения заболевания для их посетителей. Что неудивительно, так как к терапевтам в поликлиники за больничными листами идут лица, зараженные вирусной инфекцией SARS-COV-2. Если власти в столице вводят электронные очереди, запись к врачу по телефону и интернет, телемедицину, выдачу больничных листов через сайт Госуслуг, что кардинально снижает скорость контактов инфицированных и восприимчивых людей в поликлиниках, то по стране этого не происходит главным образом из-за отсутствия дополнительного финансирования. Поэтому поток болеющих людей идет в поликлиники, в том числе инфицированных вирусной инфекцией, там встречается с неинфицированными людьми и заражает их. Таким образом, поликлиники являются постоянными источниками инфицирования граждан в населенных пунктах.

В нашей предыдущей работе [1] было проведено исследование заражения граждан в поликлиниках населенного пункта, и была получена формула для скорости заражения в поликлиниках.

Эта формула записывалась через средние величины: среднюю пропускную способность поликлиник Q и скорость заражения населения города $\frac{dN_-(t-\tau)}{dt}$ с временным лагом назад, равным скрытому периоду развития инфекции τ . Формула не учитывала отличительные особенности работы поликлиник города. Поликлиники имеют различное количество врачей, прикрепленного населения и различную пропускную способность приема граждан.

В данной статье рассмотрим подробнее вывод статистической поправки к математической модели для скорости заражения посетителей поликлиник города вирусной инфекцией. Численные оценки проведем для города Иркутска. Как будет показано ниже, учет статистической поправки оказывается существенным.

Отметим, что различные теоретические модели эпидемии ковид-19 в последнее время рассматривались в работах [2–11].

1. Скорость заражения в поликлиниках

Формула для скорости заражения граждан в поликлиниках города была получена в [1]

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\Pi} = \sum_k \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_k = p_{\text{зар}} \gamma_3 \frac{T}{2T_p} \sum_k Q^k \frac{dN_-^k(t-\tau)}{dt}. \quad (1)$$

Напомним, что суммирование $k = 1, 2, \dots, M$ производится по городским медицинским районам (ГМР), T — время проведенное посетителем поликлиники в ожидании приема врача, T_p — время работы врача (смена), двойка в знаменателе учитывает работу поликлиник в две смены, γ_3 — доля заболевших граждан, которые пойдут в поликлинику из-за необходимости получения больничного листа, $p_{\text{зар}}$ — вероятность заражения восприимчивого лица при одном контакте с инфицированным лицом.

В предыдущей работе пропускная способность конкретной поликлиники Q^k была заменена на среднее значение Q , которое после этой операции можно вынести за знак суммы. Суммирование по ГМР в результате указанного упрощения приводит к скорости заражения по всему городу с лагом τ .

Ниже откажемся от упрощения суммы по ГМР.

Вычисление суммы

$$\sum_k Q^k \frac{dN_-^k(t-\tau)}{dt}.$$

Представленная выше сумма, фигурирующая в (1), имеет вид

$$\sum_k x_k y_k, \quad (2)$$

где x_k, y_k — одномерные массивы, причем

$$x_k \equiv Q^k, y_k \equiv \frac{dN_-^k(t-\tau)}{dt}. \quad (3)$$

Вычислим средние значения

$$x = \frac{1}{M} \sum_k x_k, y = \frac{1}{M} \sum_k y_k.$$

Преобразуем сумму (2)

$$\begin{aligned} \sum_k x_k y_k &= \sum_k (x_k - x + x) \cdot (y_k - y + y) = \sum_k (\Delta x_k + x) \times \\ &\times (\Delta y_k + y) = \sum_k \Delta x_k \Delta y_k + Mxy + x \sum_k \Delta y_k + y \sum_k \Delta x_k \end{aligned}$$

Здесь введены отклонения компонент одномерных массивов от их средних значений

$$\Delta x_k = x_k - x, \Delta y_k = y_k - y, k = 1, 2 \dots M.$$

Последние две суммы равны нулю

$$\sum_k \Delta y_k = 0, \sum_k \Delta x_k = 0.$$

Поэтому

$$\sum_k x_k y_k = Mxy + \sum_k \Delta x_k \Delta y_k. \quad (4)$$

Отметим, что в (4) не сделано никаких приближений.

Применим строгую формулу (4) к сумме, фигурирующей в (1), получим

$$\sum_k Q^k \frac{dN_-^k(t-\tau)}{dt} = Q \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} + \sum_k \Delta Q^k \Delta \frac{dN_-^k(t-\tau)}{dt}, \quad (5)$$

где в соответствии с обозначениями (3)

$$Q = \frac{1}{M} \sum_k Q^k \text{ и } \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} = \sum_k \frac{dN_-^k(t-\tau)}{dt}.$$

Далее нужно учесть, что предельный поток посетителей для поликлиники зависит от количества врачей.

На основе годовой отчетности «Медицинского информационно-аналитического центра Иркутской области» (МИАЦ) можем увидеть, что пропускная способность амбулаторно — поликлинических учреждений примерно 20 посещений в смену на одного врача [1]

$$Q^k = 20 \cdot N_B^k,$$

где N_B^k — это количество врачей в k -ом учреждении. Поэтому

$$\Delta Q^k = 20 \cdot \Delta N_B^k.$$

Будем считать, что скорость заражения граждан в городе распределяется пропорционально количеству жителей, прикрепленных к конкретной поликлинике, которое пропорционально количеству врачей — терапевтов. Поэтому

$$\frac{dN^k(t-\tau)}{dt} = \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} \cdot \frac{N_B^k}{N_B}.$$

В результате получаем

$$\sum_k \Delta Q^k \Delta \frac{dN^k(t-\tau)}{dt} = 20 \frac{1}{N_B} \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} \sum_k (\Delta N_B^k)^2.$$

Окончательная формула приобретает вид

$$\begin{aligned} \sum_k Q^k \frac{dN^k(t-\tau)}{dt} &= Q \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} + 20 \frac{1}{N_B} \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} \sum_k (\Delta N_B^k)^2 = \\ &= Q \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} \cdot \left\{ 1 + \frac{M}{(N_B)^2} \sum_k (\Delta N_B^k)^2 \right\}. \end{aligned}$$

Предварительно вычислив среднеквадратичное отклонение числа терапевтов, распределенных по различным поликлиникам

$$\sigma^2(N_B^k) = \frac{1}{M} \sum_k (\Delta N_B^k)^2.$$

Получим

$$\sum_k Q^k \frac{dN^k(t-\tau)}{dt} = Q \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{(\bar{N}_B)^2} \sigma^2(N_B^k) \right\}, \bar{N}_B = \frac{N_B}{M}.$$

С учетом статистической поправки запишем новую результирующую формулу для скорости заражения граждан в поликлиниках города

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\Pi} = p_{\text{зар}} \gamma_3 \frac{T}{2T_p} Q \frac{dN_-(t-\tau)}{dt} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{(\bar{N}_B)^2} \sigma^2(N_B^k) \right\}. \quad (6)$$

Формула учитывает статистику распределения врачей терапевтов по поликлиникам города, время, проведенное пациентом в ожидании приема врача, длительность смены врача и другие факторы.

2. Числовые оценки для города Иркутска¹

Параметры составляют: $p_{\text{зар}} = 0,01$ — вероятность заражения восприимчивого лица при одном контакте с инфицированным лицом, при условии ношения масок, $\gamma_3 = 0,7$ — доля заболевших граждан, которые пойдут в поликлинику, время приема врача (смена) $T_p = 6$ часов [1]. Примем время ожидания приема врача в период пика эпидемии $T = 3$ часа. Средняя суточная пропускная способность терапевтического отделения одной поликлиники $Q = 20 \cdot \frac{N_g}{M} = \frac{20 \cdot 612}{35} \cong 350 \frac{\text{чел}}{\text{сутки}}$. На 21.12.2021 скорость инфицирования COVID-19 по городу Иркутску, определенная с использованием процентного соотношения на основе областных данных, составляла $\approx 150 \frac{\text{чел}}{\text{сутки}}$. Получим на 28 декабря скорость заражения в поликлиниках без учета статистической поправки

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\Pi} = 0,01 \cdot 0,7 \cdot \frac{3}{2 \cdot 6} \cdot 350 \cdot 150 = 92 \frac{\text{чел}}{\text{сутки}}.$$

Статистическая поправка для поликлиник города Иркутска составляет

$$\sigma^2(N_B^k) = \frac{1}{M} \sum_k (\Delta N_B^k)^2 = 644,36.$$

Среднее количество врачей в расчете на одну поликлинику

$$\bar{N}_B = 44,96.$$

Подставив эти числа в фигурную скобку формулы (6), получим

$$\left\{ 1 + \frac{1}{(\bar{N}_B)^2} \Delta^2(N_B^k) \right\} = 1 + 0,319 = 1,32.$$

¹ URL: <https://irkutskstat.gks.ru/ofstatistics>.

Таким образом, статистическая поправка дает увеличение скорости заражения на 32 %. В результате получаем для города Иркутска следующее выражение для скорости заражения в поликлиниках

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_п = 1,616 \frac{T}{T_p} \cdot \frac{dN_-(t-\tau)}{dt}, \quad (7)$$

С учетом поправки количество заражений в поликлиниках 28.12.2021 г. увеличивается с 92 до 121 чел.

Выводы

В работе получена уточненная формула для суточной скорости заражения граждан вирусной инфекцией в поликлиниках города. Модель учитывает различие в количестве врачей, работающих в поликлиниках города, различия в пропускной способности поликлиник, а также различия в численности граждан, приписанных к тем или иным поликлиникам. В результате возникает поправка, пропорциональная квадрату дисперсии количества врачей в поликлиниках и обратно пропорциональная квадрату среднего количества врачей, работающих в поликлиниках. Вычисления показали, что для города Иркутска статистическая поправка равна 32 %. Скажем, если 28.12.2021 г. без учета статистической поправки число заражений в городе составляло 92 чел., то с ее учетом — 121 чел.. Эта цифра равна 80 % от всего суточного заражения в городе.

Данное исследование показывает, что в условиях, когда в городе введены эффективные противоэпидемические меры, основная доля заражений происходит в поликлиниках города. Чтобы уменьшить это число кардинальным образом, необходимо сократить время ожидания приема врача в общей очереди до 15 минут. Решение данного вопроса известно на примере города Москвы. Это внедрение электронной очереди, запись на прием к врачу через интернет или по телефону, а также внедрение телемедицины. Очень важным вопросом является выдача больничных листов через сайт Госуслуг или через сайт медицинской организации. Важно также разделить в очереди инфицированных и восприимчивых людей на два независимых потока. Этого можно добиться организационными мероприятиями по изменению приема посетителей к врачам терапевтам. Новые поликлиники необходимо проектировать и строить с учетом физического разделения потоков инфицированных и восприимчивых к инфекции людей.

Список использованной литературы

1. Усовершенствованная математическая модель эпидемической кинетики и заражение SARS-COV-2 в поликлиниках / А.В. Боровский, А.Л. Галкин, Н.Н. Ильиных, С.С. Козлова // Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — Т. 32, № 1.

2. Кольцова Э.М. Математическое моделирование распространения эпидемии коронавируса COVID-19 в Москве / Э.М. Кольцова, Е.С. Куркина, А.М. Васецкий // *Computational Nanotechnology*. — 2019. — Т. 7, № 1. — С. 99–105.
3. Тамм М.В. Коронавирусная инфекция в Москве: прогнозы и сценарии / М.В. Тамм // *Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология*. — 2020. — Т. 13, № 1. — С. 43–51.
4. Иванов М.В. Математическое моделирование процесса пандемии. Теория и практика / М.В. Иванов // ИРСИ. — 2020. — URL: <https://indsi.ru/2020/04/30>.
5. Головинский П.А. Распространение вирусов с длинной инкубационной фазой в тесном мире / П.А. Головинский. — DOI 10.17308/sait.2020.2/2909 // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. — 2020. — № 2. — С. 5–14.
6. Modeling the Spatiotemporal Epidemic Spreading of COVID-19 and the Impact of Mobility and Social Distancing Interventions / A. Arenas, W. Cota, J. Gómez-Gardeñes [et al.] // *Physical Review X*. — 2020. — Vol. 10, iss. 4. — P. 041055.
7. Riyapan P. A Mathematical Model of COVID-19 Pandemic: A Case Study of Bangkok, Thailand / P. Riyapan, S.E. Shuaib, A. Intarasit // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. — 2021. — URL: <https://doi.org/10.1155/2021/6664483>.
8. 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.
9. A Vigorous Study of Fractional Order COVID-19 Model via ABC Derivatives / X.-P. Li, H.A. Bayatti, A. Din, A. Zeb. — DOI 10.1016/j.rinp.2021.104737 // *Results in Physics*. — 2021. — Vol. 29. — P. 104737.
10. Mathematical Modeling and Optimal Control of the COVID-19 Dynamics / Z.-H. Shen, Y.-M. Chu, M.A. Khan [et al.]. — DOI 10.1016/j.rinp.2021.105028 // *Results in Physics*. — 2021. — Vol. 31. — P. 105028.

References

1. Borovskiy A.V., Galkin A.L., Ilyinh N.N., Kozlova S.S. Improved Mathematical Model of Epidemic Kinetics and Infection with SARS-COV-2 in Polyclinics. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2022, vol. 32, no. 1. (In Russian).
2. Koltsova E.M., Kurkina E.S., Vasetsky A.M. Mathematical Modeling of the Spread of COVID-19 in Moscow. *Computational Nanotechnology*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 99–105. (In Russian).
3. 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).
4. Ivanov M.V. Mathematical Modeling of the Pandemic Process: Theory and Practice. *IRSI*, 2020. Available at: <https://indsi.ru/2020/04/30>. (In Russian).
5. 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). DOI: 10.17308/sait.2020.2/2909.
6. Arenas A., Cota W., Gómez-Gardeñes J., Gómez S., Granell C., Matamalas J.T., Soriano-Paños D., Steinegger B. Modeling the Spatiotemporal Epidemic Spreading of COVID-19 and the Impact of Mobility and Social Distancing Interventions. *Physical Review X*, 2020, vol. 10, iss. 4, pp. 041055.

7. 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. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/6664483>.

8. 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.

9. Li X.-P., Bayatti H.A., Din A., Zeb A. A Vigorous Study of Fractional Order COVID-19 Model via ABC Derivatives. *Results in Physics*, 2021, vol. 29, pp. 104737.

10. Shen Z.-H., Chu Y.-M., Khan M.A., Muhammad S., Al-Hartomy A., Higazy M. Mathematical Modeling and Optimal Control of the COVID-19 Dynamics. *Results in Physics*, 2021, vol. 31, pp. 105028. DOI: 10.1016/j.rinp.2021.105028.

Информация об авторах

Боровский Андрей Викторович — доктор физико-математических наук, профессор, 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.

Ильиных Николай Николаевич — заместитель главного врача, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Иркутская область «Знак почета» областная клиническая больница, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ilinykh_nn@iokb.ru.

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

Information about the Authors

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

Andrey L. Galkin — Doctor of 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.

Nikolay N. Ilyinykh — Deputy Chief Physician, State Budgetary Healthcare Institution Irkutsk Order “Badge of Honor” Regional Clinical Hospital Irkutsk, Russian Federation, e-mail: ilinykh_nn@iokb.ru.

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

Модификация математической модели заражения COVID-19 в городских поликлиниках на примере Иркутска / А.В. Боровский, А.Л. Галкин, Н.Н. Ильиных, С.С. Козлова. — DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).46-55 // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2022. — Т. 4, № 1. — С. 46–55.

For Citation

Borovsky A.V., Galkin A.L., Ilyinykh N.N., Kozlova S.S. Modification in the Mathematical Model of COVID-19 Infection in Urban Polyclinics on the Example of Irkutsk. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. 46–55. (In Russian). DOI: 10.17150/2713-1734.2022.4(1).46-55.