

DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-15



Использование клеточного автомата для оценки влияния городской планировки на социальноэкономические показатели при распространении эпидемий

С.А. Елистратов, ORCID: 0000-0002-7006-6879 <sa.elistratov@ispras.ru>

*Институт системного программирования РАН,
Россия, 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.*

*Институт математики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 4.*

Аннотация. В работе рассматривается влияние городской планировки на социальноэкономические факторы, полученные из эпидемиологических показателей путем моделирования распространения эпидемии с помощью клеточного автомата. Показывается, что (при одинаковом соотношении площадей районов с высокой и низкой плотностью) планировка влияет на распространение эпидемии, причем существует оптимальная планировка, которая минимизирует экономические убытки и смертность. Несмотря на модельность подхода, результат свидетельствует о том, что ущерб от пандемии может быть снижен благодаря грамотной градостроительной политике.

Ключевые слова: имитационное моделирование, клеточные автоматы, эпидемиология.

Для цитирования: Елистратов С.А. Использование клеточного автомата для оценки влияния городской планировки на социальноэкономические показатели при распространении эпидемий. Труды ИСП РАН, том 36, вып. 5, 2024 г., стр. 219–226. DOI: 10.15514/ISPRAS–2024–36(5)–15.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского Научного фонда (проект 23-71-10068).

Cellular Automaton Approach for the Urban Planning Influence Estimation on the Social and Economic Indicators while a Disease Spreading

S.A. Elistratov, ORCID: 0000-0002-7006-6879 <sa.elistratov@ispras.ru>

*Institute for System Programming of RAS,
25, Aleksandra Solzhenitsyna str., Moscow, 109004, Russian Federation.
Institute of Mathematics of Siberian Branch of the RAS,
4, Akademika Koptyuga ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation.*

Abstract. The aim was to investigate how does a city configuration influence on a lethal disease spread. For this purpose, several configurations for subareas with high and low population density are considered. The spread was simulated via a stochastic cellular automata approach, with the main indicators being determined as average over a set of runnings. Since the automaton was based on a SIRS model, as an economic indicator we used the simultaneous sick number, as a social – cumulative dead number. In addition, we considered Manshift losses as a cost loss parameter. The simulation results yield that for the minimal dead number and economic losses it is preferable to use a regular grid of square-shaped low-density subareas. Despite the model suggested indicates that the city planning is important for the pandemic damage minimization which can be reduced due to smart urban development policy.

Keywords: imitational modeling, cellular automata, epidemiology.

For citation: Elistratov S.A. Cellular automaton approach for the urban planning influence estimation on the social and economic indicators while a disease spreading. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 36, issue 5, 2024. pp. 219-226 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-15.

Acknowledgements. The work was supported by Russian Science Foundation (project 23-71-10068).

1. Введение

После пандемии COVID-19 роль исследований распространения заболеваний резко возросла [1]. Появилось большое число работ, как прогностических [2,3], так и использующих математические модели. Среди последних особое место занимают модели игр среднего поля [4-6] для оценки интегральных эпидемиологических показателей, и имитационное моделирование [7-10].

В то же время, исследуется влияние на распространение эпидемии различных факторов, таких как климатические условия [11,12], плотность населения [13,14] и другие. Работы [15,16] указывают на то, что одним из таких факторов является городская планировка. Существуют попытки учесть ландшафт в моделировании распространения эпидемий [17].

Широко распространенным методом имитационного моделирования является использование клеточных автоматов, которые применяются как в эпидемиологии [18-20], так и в экономике [21] и при проведении городского планирования [22].

В нашей работе мы предлагаем использовать имитационную модель клеточного автомата, который совмещает вышеуказанные подходы. В задачах эпидемиологии обычно рассматривается прямоугольная одномерная область с равномерной плотностью агентов, которая не учитывает топографию. Учесть влияние городской планировки можно с помощью движущихся агентов, однако такое моделирование будет излишне сложно, поскольку основное время расчета будет уходить на перемещение агентов, так как скорость распространения заболевания много меньше скорости движения человека. Подобное описание более подходит для описания поведения больших масс людей [23,24], и несмотря на имеющийся опыт [25] рассмотрения стохастических перемещения подвижных агентов применительно к возможным очагам распространения инфекций – в плане эпидемиологии приведенный подход в большей степени применим к высокоактивным патогенам или

биологическому оружию и позволяет учитывать лишь факт заражения, исключая возможность рассмотрения дальнейшего протекания болезни вплоть до выздоровления.

В связи с этим предлагается модель статических агентов, сосредоточенных в своей резидентарной зоне. При введении ограничений на перемещение во время эпидемии (как было в случае пандемии COVID-19), на характерных временных масштабах распространения болезни людей можно считать неподвижными. Учесть городскую планировку в таком случае можно с помощью неравномерной плотности агентов. В такой модели удобно подсчитывать основные эпидемиологические показатели.

Вместе с этим, стоит отметить важность влияния эпидемии на социальную и экономическую сферу [26,27]. Несмотря на простоту предлагаемой модели, с ее помощью оказывается возможным косвенно оценить влияние городской планировки на социальноэкономические факторы, связанные с распространением эпидемий.

2. Математическая модель

В качестве модели используется клеточный автомат с четырьмя состояниями: агент без иммунитета, зараженный агент, иммунизированный агент, мертвый агент / клетка без агента. Агенты находятся в квадратном пространстве, конфигурация планировки регулируется с помощью показателя плотности населения. Плотность в пространстве агентов измеряется как среднее количество живых агентов в области к полному числу клеток в этой области и является нормированной на единицу.

Инициализация автомата происходит следующим образом. Для каждой клетки генерируется случайное число из интервала $[0,1]$, и если оно оказывается меньше заданного уровня плотности населения для текущей клетки, в нее сажается неиммунизированный агент. В качестве зараженного агента выбиралась одна клетка (центральная или юго-западный угол). Кроме того, для каждого агента сохраняется время (число итераций) τ , в течение которого его состояние оставалось неизменным.

Далее автомат функционирует по следующим правилам (коэффициенты и времена задержки взяты из работ [28,29,30,31,32,33]):

- 1) пустая клетка / мертвый агент не меняют состояние;
- 2) неиммунизированный агент может стать зараженным с вероятностью 0.274 при $\tau > 5.5$;
- 3) зараженный агент может стать иммунизированным с вероятностью 0.29 при $\tau > 10$;
- 4) зараженный агент может умереть с вероятностью 0.062 при $\tau > 14$;
- 5) иммунизированный агент может утратить иммунитет с вероятностью 0.5 при $\tau > 90$.

Поскольку такая модель не учитывает транспортные потоки, имеет смысл рассматривать ее для моделирования локального распространения заболевания в области постоянного нахождения людей, например, в жилой зоне. Поскольку изучается быстро распространяющаяся эпидемия с возможным летальным исходом, логично включить в рассмотрение ограничительные меры по передвижению населения, как с рабочими целями, так и с целью досуга. Это означает, что люди не посещают парки, но при этом вынуждены ходить в магазин или аптеку. Поскольку мы не разделяем агентов по социовозрастным группам, будем считать, что рассматриваются только взрослые трудоспособные агенты.

В такой постановке рассматривается несколько конфигураций планировок (рис. 1). Для всех конфигураций, изображенных на рис. 1, соотношение площадей областей с высокой и низкой плотностью одинаково и составляет 3:1. Равное соотношение областей обеспечивает одинаковое количество населения для возможности сравнения. Конфигурации (a)-(d) будут использованы для определения, какое расположение зон пониженной плотности является оптимальным. Поскольку мы считаем принятыми ограничительные меры, можно рассматривать зоны пониженной плотности как парки. Конфигурация (a) соответствует одному большому парку (такому, как Центральный парк в Нью-Йорке), конфигурация (d) –

множеству регулярно расположенным небольших парков. Конфигурации (b) и (e) используются для определения наилучшей формы областей пониженной плотности. Схемы (c) и (f) сравнивают регулярное расположение (в виде прямоугольной сетки) и радиальное – первое характерно для планоно застраиваемых городов (Санкт-Петербург, Новосибирск), второе – для более древних (таких как Москва).

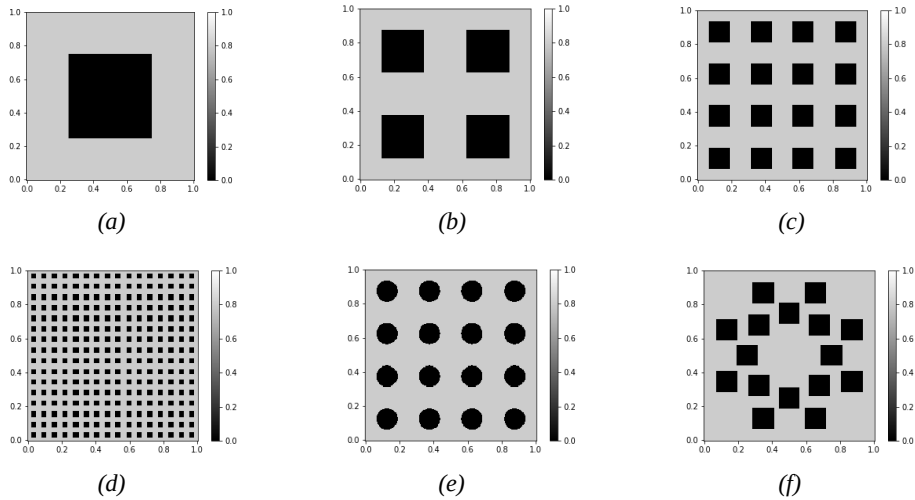


Рис. 1. Конфигурации городской планировки.
Fig. 1. Urban planning configurations.

Поскольку рассматриваемая система является имитационной SIRS-моделью (исходя из правил клеточного автомата 1-5), в ней возможен подсчет числа зараженных, выздоровевших и умерших агентов. Исходя из этих данных, в качестве социального фактора предлагается рассматривать кумулятивную смертность D (то есть полное число умерших агентов к определенному моменту времени); в качестве экономических показателей будем рассматривать число одновременно больных людей как $I-R-D$, где I – кумулятивное число инфицированных, R – кумулятивное число выздоровевших. Мы рассматриваем именно этот показатель, поскольку это число людей, у которых открыт больничный и которые не работают. Вторым экономическим показателем в такой модели будет выступать величина экономических потерь в человеко-днях, то есть $\Sigma(I-R)$.

3. Результаты моделирования

Поскольку рассматриваемый автомат стохастический, результат имеет смысл осреднять. На рис. 2 приведены эпидемиологические показатели для случая планировки (c). Видно, что дисперсионный коридор довольно узок по сравнению со средними значениями. Здесь же заметим, что использование клеточного автомата является принципиальным, поскольку результаты расчета не аппроксимируются логистической кривой (при построении последней фиксировалось начальное значение (P_0) и асимптотика на бесконечности (K), а параметр r варьировался). Большая длительность переходного процесса по сравнению с моделью Ферхюльста можно объяснить именно учетом геометрии, что подчеркивает важность учета планировки.

Из рис. 3 видно, что измельчение зон пониженной плотности не оказывает существенного влияния на количество больных, изменяя лишь форму кривой. То же относится к кумулятивной смертности, что позволяет расценивать конфигурации (a)-(d) (рис. 1) в нашей модели как соизмеримые.

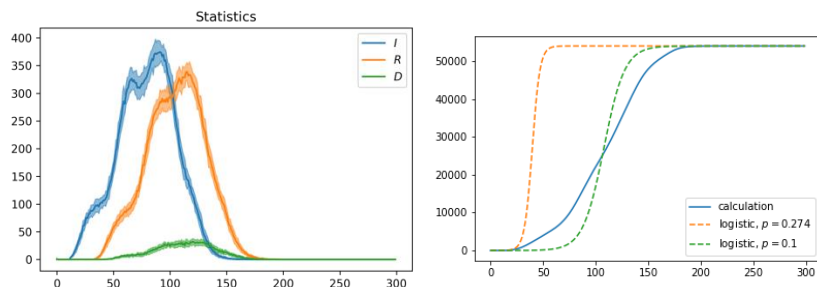


Рис. 2. Осредненные эпидемиологические показатели с коридорами дисперсий для конфигурации с) (справа) и сравнение кумулятивного числа заражений с логистической кривой (слева).
Fig. 2. Averaged epidemiological indicators with dispersion for 4x4 square parks grid c) (LHP) and comparison of simulated cumulative infected and logistic curves (RHP).

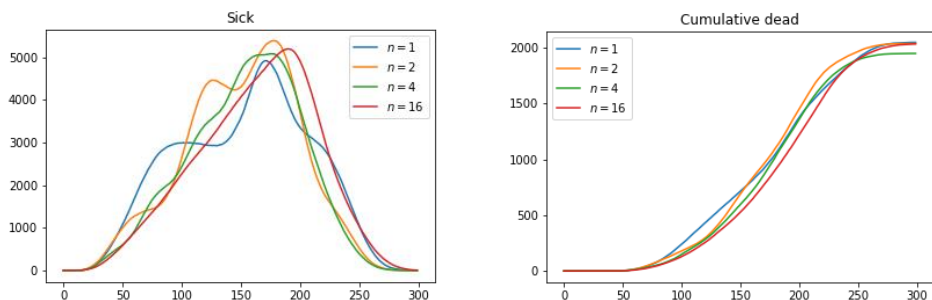


Рис. 3. Влияние конфигурация а) – d), источник в юго-западном углу.
Fig. 3. Regular grid configuration influence, source at the south-west corner.

В отличие от количества, форма областей разреженности при той же площади влияет на социальноэкономические показатели, увеличивая как максимальное число единовременно больных, так и кумулятивную смертность (рис. 4), причем квадратная форма предпочтительнее круглой. В то же время, использование радиального расположения вместо прямоугольной сетки оказывает лишь незначительное влияние на эти показатели (рис. 5).

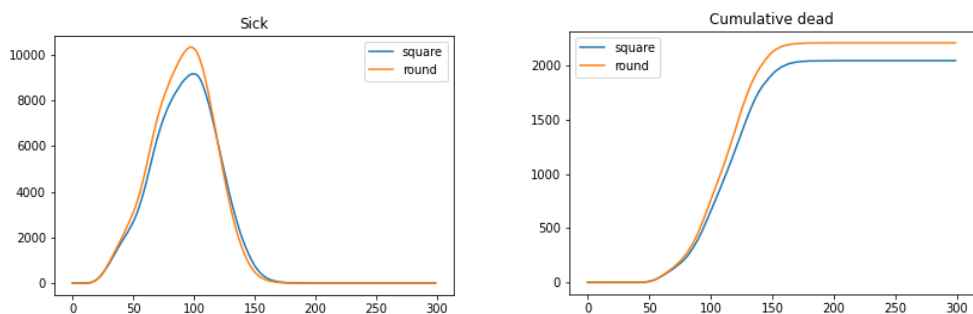


Рис. 4. Влияние формы областей пониженной плотности населения, источник в центре.
Fig. 4. Low-density areas shape influence, source at the center.

Графики экономических убытков, приведенные на рис. 6, подтверждают предыдущие результаты и свидетельствуют о том, что на этот показатель влияет только форма областей пониженной плотности. Заметим, что линейный наклон графиков в конце возник из-за того, что умершие агенты навсегда вышли из экономического процесса, при этом убытки рассчитываются относительно того уровня, когда все агенты, присутствовавшие в системе на

момент начала пандемии, находятся на рабочих местах. Отметим, что на среднем графике рис. 6 приведены дисперсионные коридоры для исключения возможности случайного расхождения кривых, однако их ширины очень малы.

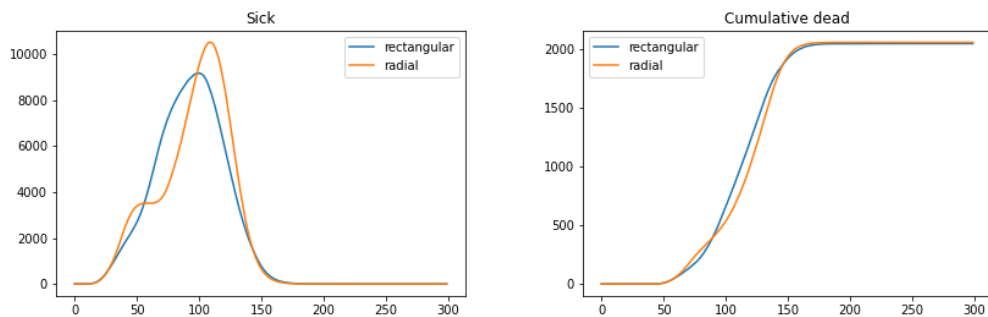


Рис. 5. Влияние расположения областей пониженной плотности населения, источник в центре.
Fig. 5. Low-density areas location influence, source at the center.

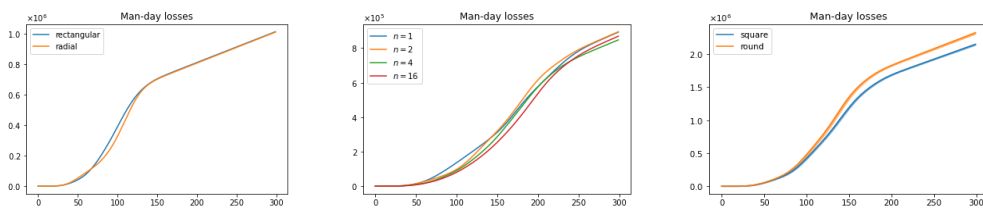


Рис. 6. Влияние на экономические убытки (слева направо соответственно) количества, формы и расположения областей с пониженной плотностью.
Fig. 6. Influence on the man-shift losses of (respectively left to right) number, hape and position of low-density areas.

4. Заключение

В работе произведено моделирование распространение заболеваний с помощью клеточного автомата на основе SIRS модели с учетом специфики городской планировки. Рассматривается влияние различных аспектов планировки на социальноэкономические показатели: кумулятивную смертность, число больных и экономические убытки. Показано, что расположение областей пониженной плотности в городах не влияет на эти показатели, однако влияет их форма. Несмотря на модельный характер задачи, результаты позволяют сделать вывод о том, что распространение эпидемии связано с городской планировкой, а убытки, вызванные пандемией, могут быть снижены благодаря грамотной градостроительной политике.

Список литературы / References

- [1]. Wynants L. Prediction models for diagnosis and prognosis of covid-19: systematic review and critical appraisal / L. Wynants, B. Van Calster, G.S. Collins, R.D. Riley // *BMJ*. – 2020. – 369. DOI: 10.1136/bmj.m1328.
- [2]. M. Riaz, M. Hussain Sial, S. Sharif, Q. Mehmood. Epidemiological Forecasting Models Using ARIMA, SARIMA, and Holt–Winter Multiplicative Approach for Pakistan // *Journal of Environmental and Public Health*, 2023, 8907610, 8 pages, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8907610>.
- [3]. A. Bakhta, T. Boiveau, Y. Maday, O. Mula, Epidemiological Forecasting with Model Reduction of Compartmental Models. Application to the COVID-19 Pandemic // *Biology* (2021), 10, 22. <https://doi.org/10.3390/biology10010022>.

- [4]. V. Petrakova, O. Krivorotko. Mean field game for modeling of COVID-19 spread // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 514(1), 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2022.126271>.
- [5]. Doncel, Josu, Nicolas Gast, and Bruno Gaujal. A mean field game analysis of SIR dynamics with vaccination. // *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 36(2): 482–99, 2022. doi: 10.1017/S0269964820000522.
- [6]. Ghilli, D., Ricci, C. & Zanco, G. A mean field game model for COVID-19 with human capital accumulation. *Econ Theory* 77, 533–560 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00199-023-01505-0>.
- [7]. P. Patlolla, V. Gunupudi, A. Mikler, Armin and R.T. Jacob (2004). Agent-Based Simulation Tools in Computational Epidemiology. 212-223. 10.1007/11553762_21.
- [8]. Perez L, Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. *Int J Health Geogr*. 2009 Aug 5;8:50. doi: 10.1186/1476-072X-8-50.
- [9]. Tracy M, Cerdá M, Keyes KM. Agent-Based Modeling in Public Health: Current Applications and Future Directions. *Annu Rev Public Health*. 2018 Apr 1;39:77-94. doi: 10.1146/annurev-publhealth-040617-014317.
- [10]. Bissett, K.R., Cadena, J., Khan, M. *et al.* Agent-Based Computational Epidemiological Modeling. *J Indian Inst Sci* 101, 303–327 (2021). <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00260-2>.
- [11]. Anwar A, Anwar S, Ayub M, Nawaz F, Hyder S, Khan N, Malik I. Climate Change and Infectious Diseases: Evidence from Highly Vulnerable Countries. *Iran J Public Health*. 2019 Dec;48(12):2187-2195. PMID: 31993386; PMCID: PMC6974868.
- [12]. Mecenass P, Bastos RTDRM, Vallinoto ACR, Normando D. Effects of temperature and humidity on the spread of COVID-19: A systematic review. *PLoS One*. 2020 Sep 18;15(9):e0238339. doi: 10.1371/journal.pone.0238339.
- [13]. Ganasegeran K, Jamil MFA, Ch'ng ASH, Looi I, Peariasamy KM. Influence of Population Density for COVID-19 Spread in Malaysia: An Ecological Study. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Sep 18;18(18):9866.
- [14]. Hazarie, S., Soriano-Paños, D., Arenas, A. *et al.* Interplay between population density and mobility in determining the spread of epidemics in cities. *Commun Phys* 4, 191 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00679-0>.
- [15]. Montoya ID. Topography as a contextual variable in infectious disease transmission. *Clin Lab Sci*. 2004 Spring;17(2):95-101.
- [16]. Henstell, Samantha (2019). "The Role of Urban Planning in the Spread of Communicable Diseases," *Agora Journal of Urban Planning and Design*, 26-32.
- [17]. Arifin, S.M.N.; Arifin, R.R.; Pitts, D.D.A.; Rahman, M.S.; Nowreen, S.; Madey, G.R.; Collins, F.H. Landscape Epidemiology Modeling Using an Agent-Based Model and a Geographic Information System. *Land* 2015, 4, 378-412. <https://doi.org/10.3390/land4020378>
- [18]. Fuentes M.A. Cellular automata and epidemiological models with spatial dependence / M.A. Fuentes, M.N. Kuperman // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 1999. – 267(3). – p. 471-486. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437199000278> DOI: 10.1016/S0378-4371(99)00027-8.
- [19]. White S.H. Modeling epidemics using cellular automata / S.H. White, A.M. Del Rey, G.R. Sanchez // *Appl Math Comput*. – 2006. – 186(1). – p. 193-202. DOI: 10.1016/j.amc.2006.06.126.
- [20]. Krivorotko O. Agent-based modeling of COVID-19 outbreaks for New York state and UK: Parameter identification algorithm / O. Krivorotko, M. Sosnovskaia, I. Vashchenko, C. Kerr // *Infect Dis Model*. – 2024. – 7(1). – p. 30-44. DOI: 10.1016/j.idm.2021.11.004.
- [21]. W. Song, Z. Yunlin, X. Zhenggang, Y. Guiyan, H. Tian, Huang and M. Nan. Landscape pattern and economic factors' effect on prediction accuracy of cellular automata-Markov chain model on county scale // *Open Geosciences*, vol. 12, no. 1, 2020, pp. 626-636. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0162>.
- [22]. Yeh, A.G.O., Li, X., Xia, C. (2021). Cellular Automata Modeling for Urban and Regional Planning. In: Shi, W., Goodchild, M.F., Batty, M., Kwan, M.P., Zhang, A. (eds) *Urban Informatics*. The Urban Book Series. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_45.
- [23]. Гребенников Р.В. (2011). Моделирование поведения толпы с использованием локальных скалярных полей (диссертация на соискание степени к.т.н., Воронеж, 2011).
- [24]. М. Е. Степанцов, Математическая модель направленного движения группы людей. *Матем. Моделирование*, 2004, том 16, номер 3, 43–49
- [25]. И. В. Деревич, А. А. Панова, Стохастическая модель движения группы индивидов в ограниченном пространстве с учетом их социального поведения. *Матем. моделирование*, 2023, том 35, номер 6, 51–62.

- [26]. Managi S, Chen Z. Social-economic impacts of epidemic diseases. *Technol Forecast Soc Change*. 2022 Feb;175:121316. doi: 10.1016/j.techfore.2021.121316.
- [27]. Nicola M, Alsafi Z, Sohrabi C, Kerwan A, Al-Jabir A, Iosifidis C, Agha M, Agha R. The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *Int J Surg*. 2020 Jun;78:185-193. doi: 10.1016/j.ijssu.2020.04.018.
- [28]. Samui P, Mondal J, Khajanchi S. A mathematical model for COVID-19 transmission dynamics with a case study of India. *Chaos Solitons Fractals*. 2020 Nov;140:110173. doi: 10.1016/j.chaos.2020.110173
- [29]. Wu Y, Kang L, Guo Z, Liu J, Liu M, Liang W. Incubation Period of COVID-19 Caused by Unique SARS-CoV-2 Strains: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Netw Open*. 2022 Aug 1;5(8):e2228008.
- [30]. Ma T, Ding S, Huang R, Wang H, Wang J, Liu J, Wang J, Li J, Wu C, Fan H, Zhou N. The latent period of coronavirus disease 2019 with SARS-CoV-2 B.1.617.2 Delta variant of concern in the postvaccination era. *Immun Inflamm Dis*. 2022 Jul;10(7):e664.
- [31]. Park M, Pawliuk C, Nguyen T, Griffith A, Dix-Cooper L, Fourik N, Dawes M. Determining the communicable period of SARS-CoV-2: A rapid review of the literature, March to September 2020. *Euro Surveill*. 2021 Apr;26(14):2001506. doi: 10.2807/1560-7917.ES.2021.26.14.2001506.
- [32]. <https://www.publichealthontario.ca/-/media/documents/ncov/covid-wwksf/2021/03/wwksf-period-of-communicability-overview.pdf?la=en>.
- [33]. Baud D, Qi X, Nielsen-Saines K, Musso D, Pomar L, Favre G. Real estimates of mortality following COVID-19 infection. *Lancet Infect Dis*. 2020 Jul;20(7):773. doi: 10.1016/S1473-3099(20)30195-X.

Информация об авторах / Information about authors

Степан Алексеевич ЕЛИСТРАТОВ – Сотрудник Лаборатории цифрового моделирования технических систем Института системного программирования с 2021 года. Сфера научных интересов: математическое моделирование, прогностические модели, методы пониженной размерности.

Stepan Alekseevich ELISTRATOV – Employee of Technical Systems Digital Modeling Laboratory of the Institute for System Programming of the RAS since 2021. Research interests: numerical simulation, forecast models, reduced order methods.