

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт математики и фундаментальной информатики
Базовая кафедра вычислительных и информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ

заведующий кафедрой

/ В. В. Шайдуров

«___» _____ 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Сравнение компартментальных эпидемиологических моделей

Направление 02.04.01 Математика и компьютерные науки

Магистерская программа 02.04.01.01 Математическое и компьютерное моделирование

Руководитель	доцент, кандидат физико- математических наук	В. С. Петракова
Выпускник		Е. С. Шехов
Нормоконтролёр		Т. Н. Шипина

Красноярск 2023

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация на тему «Сравнение компартментальных эпидемиологических моделей» содержит 40 страниц текстового документа, состоит из введения, 3 глав, заключения, 13 рисунков, списка литературы и трёх приложений; список литературы содержит 39 использованных источников.

Цель данной работы — сравнить три эпидемиологические модели разной степени детализации, выявить разницу в их прогностических возможностях и рассчитать их чувствительность к входным параметрам.

В работе разработано программное обеспечение для процесса моделирования эпидемиологической обстановки и расчета чувствительности компартментальных моделей, проведено сравнительное исследование полученных результатов моделирования и значений чувствительности.

Ключевые слова: ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА, ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЯ, МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ПОТОЧЕЧНЫЕ ОЦЕНКИ, РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПАРТМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ, КАМЕРЫ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ, АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ.

ANNOTATION

Master's thesis on „Comparison of compartmental epidemiological models“ contains 40 pages of a text document, consists of an introduction, 3 chapters, a conclusion, 13 figures, bibliography and three appendices; the bibliography contains 39 of used sources.

The purpose of this work is to compare three epidemiological models with different levels of detail, to identify the difference in their predictive capabilities and calculate their sensitivity to input parameters.

In the work, software was developed for the process of modeling the epidemiological situation and calculating the sensitivity of compartmental models, a comparative study of the obtained modeling results and sensitivity values was carried out.

Key words: EPIDEMIOLOGICAL SITUATION, DISEASE DYNAMICS, DISEASE PREDICTION METHODS, STATISTICAL METHODS, POINTED ESTIMATES, REGRESSION MODELS, MACHINE LEARNING, EPIDEMIOLOGICAL MODEL, SIMULATION, COMPARTMENTAL MODEL, CAMERA, STATISTICAL DATA, SENSITIVITY ANALYSIS, FOURIER TRANSFORM.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Обзор существующих методов прогнозирования заболеваний	4
1.1 Статистические методы	4
1.1.1 Поточечные оценки	5
1.1.2 Регрессионные модели	6
1.2 Модели на основе машинного обучения	8
1.2.1 Байесовские сети	8
1.2.2 Искусственные нейронные сети.	9
1.3 Модели на основе фильтрации	10
1.4 Модели, основанные на дифференциальных уравнениях	11
2 Сравнение компартментальных эпидемиологических моделей SIR, SIRV-D и SEIR-HCD на основе данных по заболеваемости коронавирусом в Новосибирске	14
2.1 Описание дифференциальных эпидемиологических моделей SIR, SIRV-D и SEIR-HCD	14
2.2 Алгоритм поиска параметров моделей на основе их линеаризации	20
2.3 Результаты сравнительного анализа моделей SIR, SIRV-D и SEIR-HCD для описания вспышки коронавируса в Новосибирске	21
3 Анализ временной динамики чувствительности входных параметров мо- делей SIR, SIRV-D и SEIR-HCD	24
3.1 Обзор существующих методов анализа чувствительности дифференци- альных моделей	24
3.1.1 Локальная чувствительность на основе производных	25
3.1.2 Метод Морриса	26
3.1.3 Метод Соболя	27
3.2 Метод eFAST	29
3.3 Результаты анализа временной динамики чувствительности входных па- раметров моделей SIR, SIRV-D и SEIR-HCD	32
Заключение	35
Список использованных источников	36
Приложения	41

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня основным подходом к моделированию распространения заболеваний в эпидемиологии является использование компартментальных (камерных) моделей. Основная идея заключается в разбиении населения на камеры (т. е. группы, части) в зависимости от эпидемиологического статуса каждого человека. Модель SIR, предложенная в 1905 г., представляет собой пример простейшей модели. В ней вся популяция делится на три камеры: S — не иммунные (члены популяции, не имеющие иммунитета от исследуемого вируса), I — инфицированные (заражённые), R — выбывшие (либо получившие иммунитет после болезни, либо умершие).

С тех пор было предложено множество моделей с разными камерами с целью улучшения результатов, которые могут быть получены с использованием SIR-моделей. Среди этих моделей в данной работе выделены и имплементированы SIR, SIRV-D и SEIR-HCD модели, также показаны их возможности прогнозирования и результаты работы. Целью данной работы является сравнение трех компартментальных моделей в их прогностической возможности и их чувствительности от входных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все три модели при заданной ширине окна наблюдений в 150 дней показывают схожие результаты. По мере уменьшения ширины окна модели SIR и SIRV-D показывают более приближенные к описываемой реальности результаты, однако при ширине окна, меньшей 10 дней, у моделей SIR и SIRV-D наблюдается эффект переобучения. Добавленные камеры V и D, по сравнению с SIR моделью, в модели SIRV-D, как видно из результатов работы, оказали незначительное отрицательное влияние на точность результатов по камерам S, I, R, однако точность показателей по камерам V и D достаточно высока. Модель SIRV-D предоставляет, по сравнению с SIR-моделью 2 новых показателя заболеваемости V и D, что дает возможность более точно оценивать риски в условиях быстро развивающейся заболеваемости.

Уменьшение окна наблюдений для модели SEIR-HCD не привело к росту точности моделирования распространения заболеваемости, что говорит о том, что добавленные камеры E, H, C, D снижают точность моделирования по сравнению с SIR-моделью, также модели не хватает данных о камере вакцинированных людей, по сравнению с SIRV-D моделью, что оказало отрицательное влияние на точность, т. к. вакцинация, согласно статистическим данным, является самым эффективным методом борьбы против коронавирусной инфекции.

Все цели и задачи магистерской диссертации выполнены в полном объеме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Кондратьев, М. А. Методы прогнозирования и модели распространения заболеваний / М. А. Кондратьев // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2013. — Vol. 5, no. 5. — Pp. 863–882.
- [2] Burkom, H. S. Automated Time Series Forecasting for Biosurveillance / H. S. Burkom, S. P. Murphy, G. Shmueli // *Statistics in Medicine*. — 2007. — Vol. 26, no. 22. — Pp. 4202–4218.
- [3] Методика расчета эпидемических порогов по гриппу и острым респираторным вирусным инфекциям по субъектам Российской Федерации / О. И. Киселев, И. Г. Маринич, Л. С. Карпова et al. — НИИ гриппа Северо-Западного отделения РАМН, 2010. — P. 88.
- [4] Serfling, R. E. Methods for Current Statistical Analysis of Excess Pneumonia-influenza Deaths / R. E. Serfling // *Public Health Reports*. — 1963. — Vol. 78, no. 6. — Pp. 494–506.
- [5] Online detection and quantification of epidemics / Camille Pelat, Pierre-Yves Boelle, Benjamin Cowling et al. // *BMC medical informatics and decision making*. — 2007. — 02. — Vol. 7. — P. 29.
- [6] Modeling emergency department visit patterns for infectious disease complaints: results and application to disease surveillance / J. C. Brillman, T. Burr, D. Forslund et al. // *BMC Medical Informatics and Decision Making*. — 2005. — Vol. 5, no. 4.
- [7] A practical guide for designing and conducting influenza disease burden studies. — World Health Organization, 2008. — 49 p. (дата обращения: 13.08.2013). http://www.wpro.who.int/emerging_diseases/documents/GuideforDesigningandConductingInfluenzaStudies/en/index.html.
- [8] Medication Sales and Syndromic Surveillance, France / E. Vergu, R. Grais, H. Sarter et al. // *Emerging Infectious Diseases*. — 2006. — Vol. 12, no. 3. — Pp. 416–421.
- [9] Mortality Associated With Influenza and Respiratory Syncytial Virus in the United States / W. W. Thompson, D. K. Shay, E. Weintraub et al. // *The Journal of the American Medical Association*. — 2003. — Vol. 289, no. 2. — Pp. 179–186.

- [10] Честнова, Т. В. К вопросу о выборе метода математического анализа с целью прогнозирования заболеваемости лептоспирозом / Т. В. Честнова, О. Л. Смольянинова, С. И. Логвинов // *Вестник новых медицинских технологий*. — 2011. — Vol. 18, no. 4. — Pp. 18–21.
- [11] Methods for monitoring influenza surveillance data / B. J. Cowling, I. O. L. Wong, L. M. Ho et al. // *International Journal of Epidemiology*. — 2006. — Vol. 35, no. 5. — Pp. 1314–1321.
- [12] A Bayesian dynamic model for influenza surveillance / P. Sebastiani, K. D. Mandl, P. Szolovits et al. // *Statistics in Medicine*. — 2006. — Vol. 25, no. 11. — Pp. 1803–1816.
- [13] Statistical methods for the prospective detection of infectious disease outbreaks: a review / S. Unkel, C. P. Farrington, P. H. Garthwaite et al. // *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*. — 2012. — Vol. 175, no. 1. — Pp. 49–82.
- [14] *Le Strat, Y.* Monitoring epidemiologic surveillance data using hidden Markov models / Y. Le Strat, F. Carrat // *Statistics in Medicine*. — 1999. — Vol. 18, no. 24. — Pp. 3463—3478.
- [15] *Siettos, C. I.* Mathematical modeling of infectious disease dynamics / C. I. Siettos, L. Russo // *Virulence*. — 2013. — Vol. 4, no. 4. — Pp. 1–12.
- [16] Disease surveillance using a hidden Markov model / R. E. Watkins, S. Eagleson, B. Veenendaal et al. // *BMC Medical Informatics and Decision Making*. — 2009. — Vol. 9, no. 39.
- [17] *Bai, Y.* Prediction of SARS epidemic by BP neural networks with online prediction strategy / Y. Bai, Z. Jin // *Chaos, Solitons and Fractals*. — 2005. — Vol. 26, no. 2. — Pp. 559–569.
- [18] Meteorological, environmental remote sensing and neural network analysis of the epidemiology of malaria transmission in Thailand / R. Kiang, F. Adimi, V. Soika et al. // *Geospatial Health*. — 2006. — Vol. 1, no. 1. — Pp. 71–84.

- [19] *Wieczorek, M.* Neural network powered COVID-19 spread forecasting model / M. Wieczorek, J. Silka, M. Woźniak // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2020. — Vol. 140. — P. 110203.
- [20] *Фирсов, О. В.* Гибридное прогнозирование заболеваемости раком почки и смертности от него на основе нейросетевых и статистических технологий / О. В. Фирсов // *Врач-аспирант*. — 2006. — Vol. 1. — Pp. 15–32.
- [21] *Белецкая, С. Ю.* разработка прогностических моделей развития заболеваемости детей в городском административном районе на основе нейросетевых технологий / С. Ю. Белецкая, В. Н. Коровин, О. В. Родионов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2012. — Vol. 6, no. 12. — Pp. 201–205.
- [22] *Ефимова, Н. В.* Опыт использования искусственных нейронных сетей при прогнозировании заболеваемости населения (на примере г. Братска) / Н. В. Ефимова, А. Ю. Горнов, Т. С. Зароднюк // *Экология человека*. — 2010. — Vol. 3. — Pp. 3–7.
- [23] *Shmueli, G.* Current and Potential Statistical Methods for Monitoring Multiple Data Streams for Biosurveillance / G. Shmueli, S. E. Fienberg // *Statistical Methods in Counterterrorism: Game Theory, Modeling, Syndromic Surveillance, and Biometric Authentication*. — Springer New York, 2006. — Pp. 109–140.
- [24] *Gardner Jr., Everette S.* Exponential smoothing: The state of the art / Everette S. Gardner Jr. // *Journal of Forecasting*. — 1985. — Vol. 4, no. 1. — Pp. 1–28. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/for.3980040103>.
- [25] *Williams, T.* Adaptive Holt-Winters forecasting / T. Williams // *The Journal of the Operational Research Society*. — 1987. — Vol. 38, no. 6. — Pp. 553–560.
- [26] *Hamilton, J.D.* Time Series Analysis / J.D. Hamilton. — Princeton University Press, 1994.
- [27] Forecasting disease risk for increased epidemic preparedness in public health / M.F. Myers, D.J. Rogers, J. Cox et al. // *Remote Sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology*. — Academic Press, 2000. — Vol. 47 of *Advances*

in Parasitology. — Pp. 309–330. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065308X00470132>.


- [28] *Ross, Ronald*. The prevention of malaria / Ronald Ross. — John Murray, 1911.
- [29] *Lotka, Alfred J.* UNDAMPED OSCILLATIONS DERIVED FROM THE LAW OF MASS ACTION. / Alfred J. Lotka // *Journal of the American Chemical Society*. — 1920. — Vol. 42, no. 8. — Pp. 1595–1599. <https://doi.org/10.1021/ja01453a010>.
- [30] *Volterra, Vito*. Fluctuations in the Abundance of a Species considered Mathematically / Vito Volterra. — 1926. — Vol. 118, no. 2972. — Pp. 558–560.
- [31] *McKendrick, A. G.* Applications of Mathematics to Medical Problems / A. G. McKendrick // *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*. — 1925. — Vol. 44. — P. 98–130.
- [32] *Kermack, W. O.* A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. — 1927. — Vol. 115, no. 772. — Pp. 700–721. <http://www.jstor.org/stable/94815>.
- [33] *Krivorotko, O. I.* Mathematical models of COVID-19 spread. — 2022.
- [34] 23. Petrakova, V. S. SIRV-D Optimal Control Model for COVID-19 Propagation Scenarios / V. S. Petrakova, V. V. Shaydurov // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. — 2023. — Vol. 16, No. 1. — P. 87-97. — EDN OEDUSL.
- [35] *Morris, Max D.* Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments / Max D. Morris // *Technometrics*. — 1991. — apr. — Vol. 33, no. 2. — P. 161–174. <https://doi.org/10.2307/1269043>.
- [36] *Qian, George*. Sensitivity analysis methods in the biomedical sciences / George Qian, Adam Mahdi // *Mathematical Biosciences*. — 2020. — 01. — Vol. 323. — P. 108306.
- [37] *Sobol, I. M.* On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models / I. M. Sobol // *Matem. Mod.* — 1990. — Vol. 2, no. 1. — Pp. 112–118.

- [38] Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 2001. — Vol. 55, no. 1. — Pp. 271–280. — The Second IMACS Seminar on Monte Carlo Methods.
- [39] Weyl, H. Mean motion / H. Weyl // *Uspekhi Mat. Nauk*. — 1976. — Vol. 31, no. 4(190). — Pp. 213–219.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт математики и фундаментальной информатики
Базовая кафедра вычислительных и информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В. В. Шайдуров




«23» июня 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

СРАВНЕНИЕ КОМПАРТМЕНТАЛЬНЫХ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Направление 02.04.01 Математика и компьютерные науки

Магистерская программа 02.04.01.01 Математическое и компьютерное моделирование

Руководитель	 23.06.2023	доцент, кандидат физико- математических наук	В. С. Петракова
Выпускник	 23.06.2023		Е. С. Шехов
Нормоконтролёр	 23.06.2023		Т. Н. Шипина

Красноярск 2023