



ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСОВ

В. А. Кляпко, Н. Н. Майоров

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Ключевые тенденции развития современного мегаполиса, в период масштабных нагрузок на систему здравоохранения, в период распространения вирусов, побуждают к применению передовых методов и подходов к организации работы в сфере охраны здоровья. Объектом исследования выбран город Санкт-Петербург, выполнен анализ основных показателей нагрузки на систему здравоохранения города. Обоснованы изменения в системных процессах, вызванные длительным влиянием коронавирусной инфекции (COVID-19). Выполнен наукометрический анализ, отражающий необходимость внедрения информационных систем и сервисов в систему здравоохранения. Представлен анализ моделей и методов (SIR, ARIMA, Хольта-Винтерса) для решения задачи прогнозирования и представлены имитационные модели распространения вируса. Представлена практическая задача прогнозирования количества госпитализаций пациентов для оценки коечной мощности стационаров. Обосновано использование в информационно-аналитической системе модулей прогнозирования и имитационного моделирования распределения вирусов, для принятия решения, по оценке необходимой мощности системы здравоохранения.

Ключевые слова: система здравоохранения, анализ системы, госпитализация, медицинская помощь, методология прогнозирования, медицинская информационно-аналитическая система.

Для цитирования:

Кляпко В. А., Майоров Н. Н. Формирование требований к информационно-аналитической системе на основе использования математических моделей прогнозирования и имитационных моделей распространения вирусов // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(34), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2022 – с.52–60. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-52-60.

FORMATION OF REQUIREMENTS FOR THE INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM BASED ON THE USE OF MATHEMATICAL MODELS OF PREDICTION AND SIMULATION MODELS OF VIRUS PROPAGATION

V. A. Klyapko, N. N. Maiorov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Key trends in the development of a modern megalopolis, in the period of large-scale loads on the health care system, in the period of the spread of viruses, encourage the use of advanced methods and approaches to the organization of work in the field of health care. The object of the research is the city of St. Petersburg, the analysis of the main indicators of the load on the city's health care system has been carried out. The changes in the system processes caused by the long-term influence of coronavirus infection (COVID-19) are substantiated. The scientometric analysis reflecting the necessity of introduction of information systems and services in the health care system was performed. Analysis of models and methods (SIR, ARIMA, Holt-Winters) for the task of forecasting is presented and simulation models of virus spread are presented. The practical task of forecasting the number of hospitalizations of patients to estimate hospital bed capacity is presented. The use of forecasting and simulation modules of virus distribution in the information-analytical system is substantiated to make a decision on the estimation of necessary capacity of the health care system.

Keywords: health care system, system analysis, hospitalization, medical care, forecasting methodology, medical information and analytical system.

For citation:

Klyapko V. A., Maiorov N. N. Formation of requirements for the information-analytical system based on the use of mathematical models of prediction and simulation models of virus propagation // System analysis and logistics.: №4(34), ISSN 2007–5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2022 –p.52–60. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-52-60.



Учитывая опыт борьбы с пандемией COVID-19 (2019-2022), современная ситуация побуждает к применению и модернизации более широкого спектра методов организации деятельности в области здравоохранения мегаполиса. Ввиду большого значения факторов неопределенности, неоднородности данных, для выработки действий на опережение, необходимо использование имитационных цифровых моделей. Сейчас опубликовано достаточно много исследований, посвящённых прогнозированию числа случаев COVID-19, как во всём мире, так и в отдельных регионах и городах. Чаще всего в этих исследованиях использовались в основном модель ARIMA, модель линейного тренда Хольта и модель перехода состояний SIR. Также имеют место исследования, раскрывающие вопросы сравнения точности различных моделей, как например в [2, 3] показывается, что линейная модель Хольта [4] лучше, чем модель ARIMA, для приведенной выборки. Однако данные выводы носят некоторый локальный характер, и в каждом регионе имеют место свои уникальные особенности, которые необходимо учитывать при прогнозировании.

В представленной статье раскрываются вопросы оценки загруженности системы здравоохранения мегаполиса на основе решения задачи прогнозирования и формирования требований по включению модулей в медицинские информационно-аналитические системы.

Моделирование распространения вируса

Для решения задачи прогнозирования необходимо использовать актуальные аналитические данные и определять зависимости при распространении вируса в среде (к примеру, коронавирусной инфекции в мегаполисе). На основе анализа работ [5, 6] можно сказать, что имеет место ситуация, когда была выведена некоторая базовая модель (SIR), и авторы с учетом особенностей распространения коронавирусной инфекции, создали расширенные математические модели.

Модель SIR (Susceptible, Infected, Recovered) является базовой для описания распространения инфекционных заболеваний и была предложена в 1920-х годах шотландскими эпидемиологами Андерсоном Кермаком и Уильямом Маккендриком. Согласно SIR, население делится на три группы [7]:

- S — восприимчивые (незараженные) индивидуумы с 3 лет;
- I — инфицированные с симптомами;
- R — вылеченные.

Модель SIR построена с таким условием, что в определенный момент времени будут переходы между состояниями. С течением времени возможны переходы $S \rightarrow I$ (заражение) и $I \rightarrow R$ (выздоровление). Модель SIR не учитывает многие факторы, например: различную плотность населения в районах, различные способы передачи инфекции. Поэтому SIR неоднократно дорабатывалась.

Сегодня существует целое семейство моделей (и даже открытых кодов), разработанных на базе SIR-модели [согласно анализу работ 7, 8, 3]:

- SIRS. Модель для описания динамики заболеваний с временным иммунитетом;
- SEIR (контактировавшие с инфекцией (Exposed)). Модель описывает распространение заболевания с учетом инкубационного периода;
- SIS. Модель распространения заболевания, к которому не вырабатывается иммунитет;
- MSEIR (наделенные иммунитетом от рождения (Maternally derived immunity)).

Кроме представленных моделей, сегодня присутствуют модели, которые призваны отразить основные тенденции развития вируса. К таким моделям относят, модель Гарри Стивенса, опубликованная в The Washington Post «Почему такие вспышки, как коронавирус, распространяются по нарастающей, и как ослабить их рост» [9].



Автор представил четыре имитации, каждая из которых показывала варианты возможного развития распространения вируса в зависимости от принимаемых мер (рис. 2):

- никаких действий не предпринимается (рис. 2 (а));
- вводится частичный карантин (рис. 2(б));
- правительство ограничивает передвижение граждан, то есть большая часть людей находится дома (рис. 2 (в));
- почти все жители сидят дома (рис. 2 (д)).

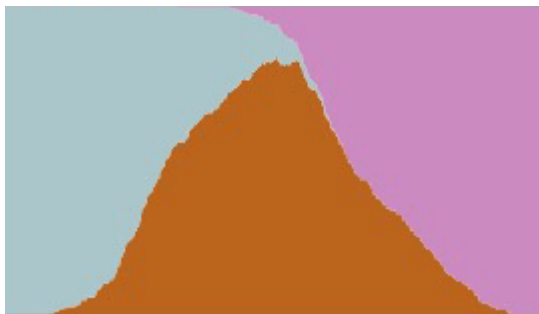


Рис. 2.а



Рис. 2. б



Рис. 2. в



Рис. 2. г

Рис. 2. Имитационная модель Гарри Стивенса (согласно открытому источнику [7,9])
(на рис. 2 Варианты возможного развития распространения вируса представлены цветами: голубой – здоровые, коричневый – болеющие, розовый – выздоровевшие)

Представленные на рис. 2 модели, и варианты развития ситуации, могут быть использованы в основе действий по стратегическому планированию, со стороны системы здравоохранения. Данная модель носит достаточно общий характер, так как в любой момент времени ситуация может перейти в новое состояние.

Для формирования систем принятия решения необходимо использовать модели и методы как краткосрочного, так и долгосрочного прогнозирования. При распространении инфекции, необходимо оперативно определять (прогнозировать) требуемое количество больничных мест. Для решения данной задачи предлагается использование метода Хольта – Винтерса [8]. На практике именно адаптивные экспоненциальные модели сглаживания являются эффективным инструментом для прогнозирования распространения коронавирусной инфекции.

В предложенной модели фигурируют несколько параметрических моделей прогноза, а именно: сглаженный экспоненциальный ряд, тренд, сезонность [10].

Сглаженный экспоненциальный ряд описывается следующим выражением:

$$L_t = \frac{k \times Y_t}{S_{t-s}} + (1 - k) \times (L_{t-1} + T_{t-1}), \quad (1)$$



где L_t – сглаженная величина за текущий период; k – коэффициент сглаживания ряда, который находится в диапазоне от 0 до 1; S_{t-s} – коэффициент сезонности предыдущего периода; Y_t – текущее значение ряда; L_{t-1} – сглаженная величина за предыдущий период; T_{t-1} – значение тренда за предыдущий период. Значения тренда определяется следующим выражением:

$$T_t = b \times (L_t - L_{t-1}) + (1 - b) \times T_{t-1}, \quad (2)$$

где T_t – значение тренда на текущий период; b – коэффициент сглаживания тренда, который находится в диапазоне от 0 до 1.

Сезонность характеризуется выражением:

$$S_t = \frac{q \times Y_t}{L_t} + (1 - q) \times S_{t-s}, \quad (3)$$

где S_t – коэффициент сезонности текущего периода; q – коэффициент сглаживания сезонности.

Прогнозные значения определяются выражением:

$$Y_{t+p} = (L_t + p \times T_t) \times S_{t-s+p}, \quad (4)$$

где Y_{t+p} – прогнозные значения на p период вперед; p – порядковый номер периода, на который делается прогноз; S_{t-s+p} – коэффициент сезонности за аналогичный период, в последнем сезоне. Общий алгоритм определения необходимого количества мест следующий:

1. выполнение непрерывного мониторинга по количеству обращений и госпитализаций;
2. внесение данных в медицинскую информационную систему мониторинга;
3. выявление тренда в распространении коронавирусной инфекции (определение стадии в развитии, как приведено на рис.1);
4. использование метода Хольта – Винтерса для прогнозирования числа госпитализаций пациентов;
5. анализ необходимого количества мест в больницах и профильных медицинских центрах;
6. переход к обоснованной системе принятия решений.

Исходные данные для исследования

В качестве исходных данных для выполнения прогнозирования были выбраны численные значения госпитализаций в период с января 2020 по март 2021 года, осуществляемых каретами скорой медицинской помощи, прикрепленных к Приморскому и Выборгскому районам Санкт-Петербурга (таблица 1).

Таблица 1 – Исходные данные

Месяц, год	Количество Госпитализаций (шт.)	Месяц, год	Количество Госпитализаций (шт.)
1	2	1	2
Январь 2020	4476	Август 2020	4053
Февраль 2020	4281	Сентябрь 2020	4588
Март 2020	4142	Октябрь 2020	5348
Апрель 2020	2156	Ноябрь 2020	5394
Май 2020	2671	Декабрь 2020	5506
Июнь 2020	2840	Январь 2021	4893
Июль 2020	3077	Февраль 2021	3923
		Март 2021	4897
		Апрель 2021	1474



График конечной мощности стационаров приведен на рис. 3.

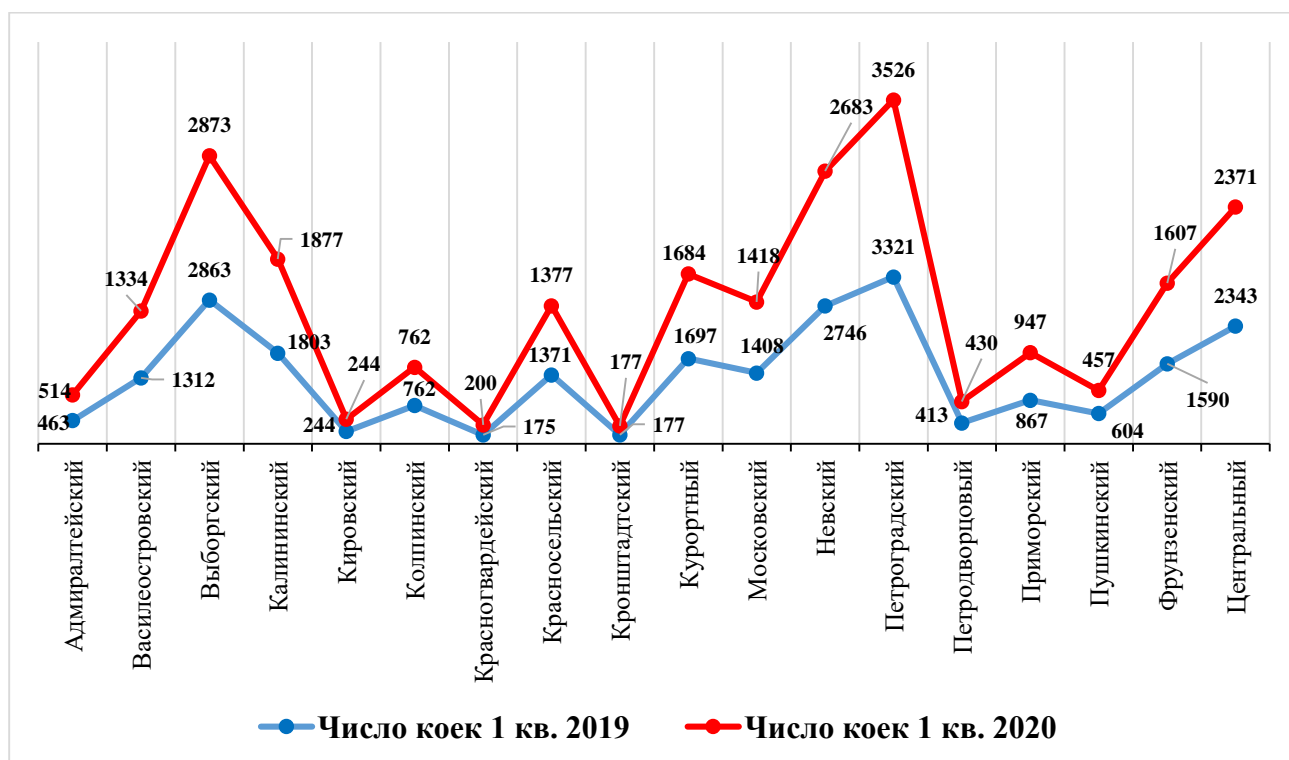


Рис. 3. График коечной мощности стационаров по районам Санкт-Петербурга за исследуемый период 1 квартала 2019 и 2020 годов (чел.)

На основании исходных данных видно, что за выбранные интервалы времени, в ряде районов была острая потребность в увеличении количества коечной мощности стационаров. Конечно, на уровне 2020-2021 годов, видно, что на систему здравоохранения города была оказана гигантская нагрузка [11]. При этом использование прогнозирования в сочетании с имитационными моделями распространения вирусной инфекции позволяет сформировать обоснованный контур принятия решения по вводу дополнительных мощностей.

Результаты прогнозирования

На основе использования метода Хольта-Винтераса были получены прогнозные значения количества госпитализаций пациентов, для выявления зависимости количества имеющихся коечных мест. Результат прогнозирования представлен на рис. 4. Данные представлены по выбранным районам Санкт-Петербурга (Приморскому и Выборгскому районам Санкт-Петербурга).

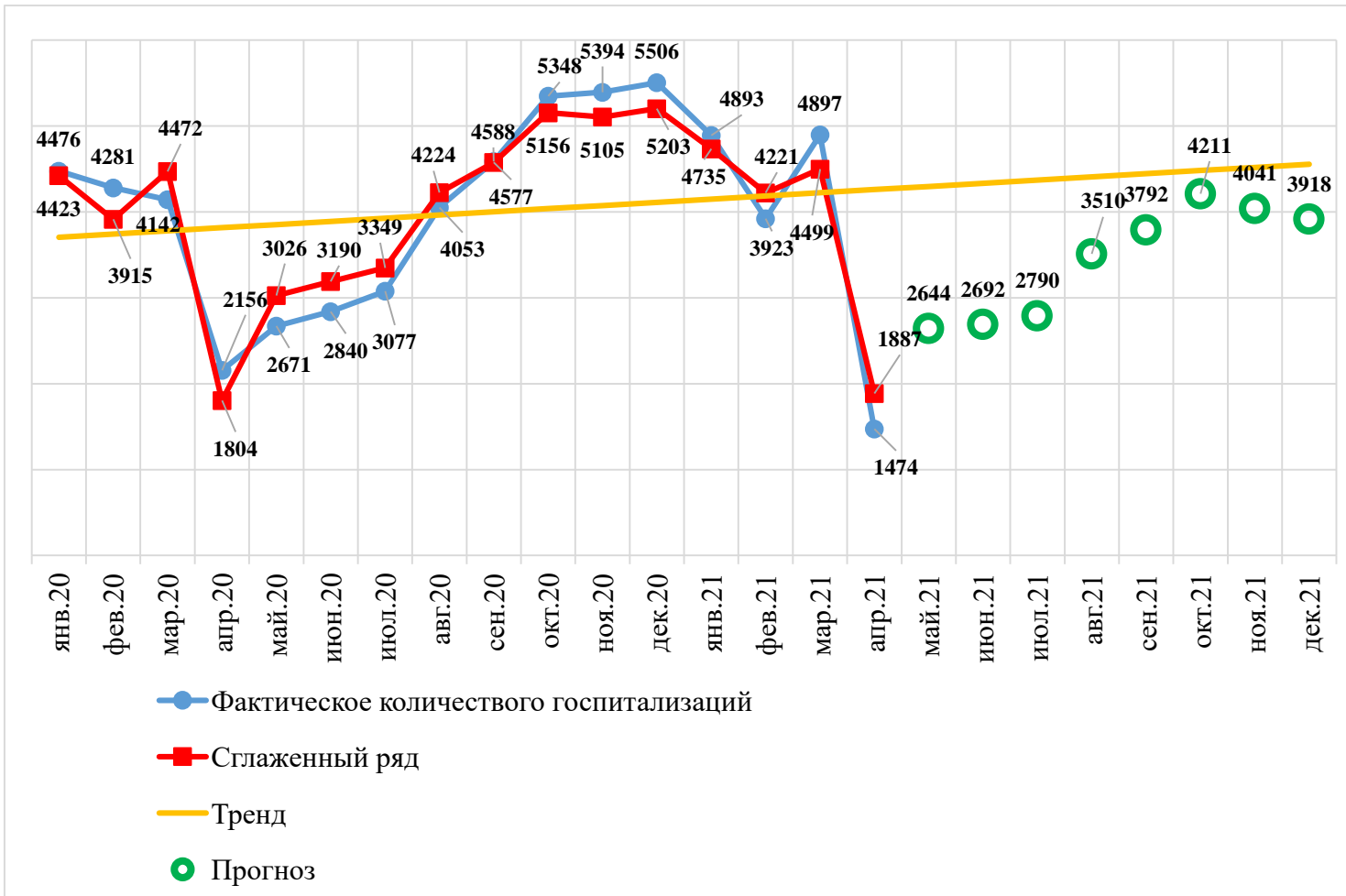


Рис. 4. Прогнозирование количества госпитализаций пациентов, осуществляемых каретами скорой медицинской помощи, прикрепленных к Приморскому и Выборгскому районам Санкт-Петербурга, выполненное методом Хольта – Винтерса

Заключение

При распространении вирусных инфекций система здравоохранения должна формировать устойчивое воздействие, направленное на сокращение распространения вирусной инфекции. Система здравоохранения должна оперативно увеличивать коечные мощности, тем самым уменьшать, как возможные контакты людей зараженных, с другими людьми, так и увеличить количество выздоровевших людей, имеющих иммунитет к вирусу. Однако точное количество новых коечных мест достаточно сложно определить. Данную задачу предлагается решать на основе использования математических моделей прогнозирования в сочетании с имитационными моделями распространения вирусов.

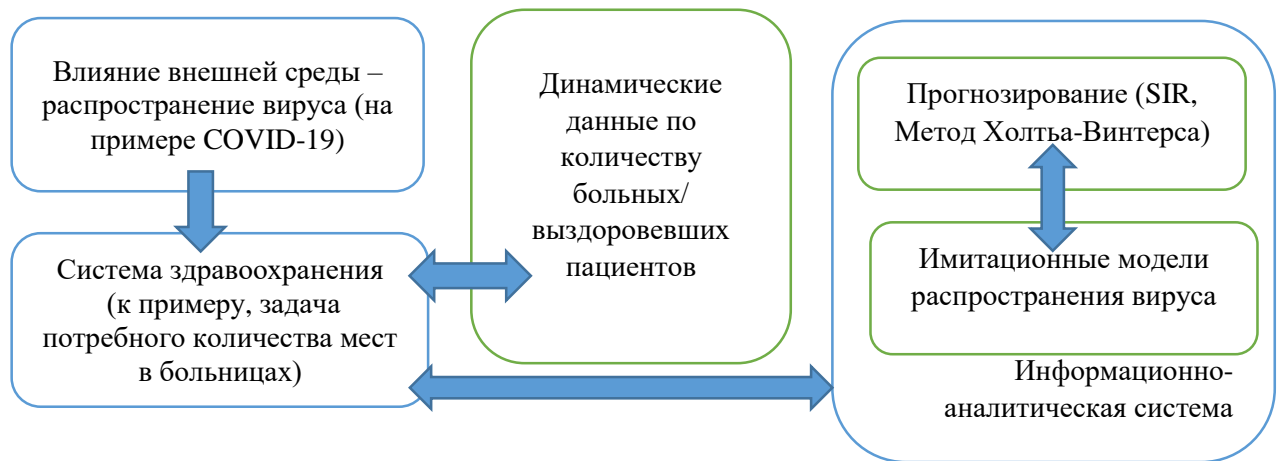


Рис. 4. Общая структура использования данных для корректировки принятия решения по коечной мощности стационаров с использованием информационно-аналитической системы

На основе выполненного эксперимента и полученных результатов предлагается следующая схема системы принятия решений (рис. 4), которая должна быть реализована в виде отдельной специализированной информационно-аналитической системы или группы отдельных интегрированных модулей.

Анализ ситуации на основе комбинации методов прогнозирования и имитационных моделей распределения вирусов, включенные как отдельные модули информационно – аналитического комплекса прогнозирования загруженности медицинских систем в мегаполисе позволит решить ключевую задачу – готовность сферы здравоохранения к всевозможным влияниям факторов внешней среды, и, как следствие, сведение к минимуму времени на принятие решений, и их реализацию при пиковой нагрузке на систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронавирус: статистика [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/covid19/stat#statistics-table> (дата обращения: 19.09.2022)
2. Abotaleb M.S.A. Predicting Covid-19 Cases using Some Statistical Models: An Application to the Cases Reported in China Italy and USA / M.S.A. Abotaleb // Academic Journal of Applied Mathematical Sciences. 2020. Vol. 6, no. 4. pp. 32-40. DOI:10.32861/ajams.64.32.40
3. Криворотько О. И., Математическое моделирование и прогнозирование COVID-19 в Москве и Новосибирской области/ Криворотько О. И., Кабанихин С. И., Зятков Н. Ю., Приходько А. Ю., Прохошин Н. М., Шишленин М. А. // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отделение. – Новосибирск, 2020. – Т. 23, – N 4. – С. 395–414.
4. Лукинский В.С. Модели и методы теории логистики: Учебное пособие. 2-е изд. / Под ред. В. С. Лукинского. — СПб.: Питер, 2018. — 448 с.
5. Roda, W.C., Varughese, M.B., Han, D., Li, M.Y. Why is it difficult to accurately predict the COVID-19 epidemic? (2020) Infectious Disease Modelling, 5, pp. 271-281.
6. Kermack W. O., McKendrick, A. G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics // Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A. 1927. No. 115. pp. 700–721.
7. Anastassopoulou C., Russo L., Tsakris A., Siettos C.I. Data-based analysis, modelling and forecasting of the novel Coronavirus (2019-nCoV) outbreak // Plos One. 2020. pp. 1-21. DOI: 10.1101/2020.02.11.20022186.



8. Siettos C.I., Russo L. Mathematical modeling of infectious disease dynamics // Virulence. 2013. Vol. 4, N 4. pp. 295–306.
9. Why outbreaks like coronavirus spread exponentially, and how to “flatten the curve” [Электронный ресурс]. URL: <https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/world/corona-simulator/> (дата обращения: 19.10.2022)
10. Фетисов В.А. Системный анализ/ Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, В. Е. Таратун, В. А. Романек - Санкт-Петербург : ГУАП, 2016. – 137 с.
11. Эпидемия коронавируса: реагирование национальных систем здравоохранения: дайджест / Департаментом международного и регионального сотрудничества СП РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://ach.gov.ru/upload/pdf/Covid-19-health-fin.pdf> (дата обращения: 19.10.2022)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кляпко Владислав Андреевич –

Магистр кафедры системного анализа и логистики, сотрудник СПб ГБУЗ МИАЦ Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: klyapko.rv@yandex.ru

Майоров Николай Николаевич –

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и логистики
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: nnm@guap.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Klyapko Vladislav Andreevich –

Master student of the Department of System Analysis and Logistics, Employee of the St. Petersburg State Budgetary Institution MIAC St. Petersburg
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: klyapko.rv@yandex.ru

Maivorov Nikolai Nikolaevich –

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of System Analysis and Logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: nnm@guap.ru