

Научная статья

УДК 004.81:159.953.32

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-3-108-1>**Модель распространения деструктивных воздействий в ограниченных коллективах на основе ограниченной машины Больцмана****Дмитрий Львович Бережных^{1✉}, Алексей Владимирович Павленко^{2✉},
Роман Александрович Соловьев³**^{1, 2, 3}Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники,
Череповец, Россия,¹dberezhnykh@mail.ru ✉²alxpavlenko@yandex.ru ✉

Аннотация. В статье приведена сетевая модель распространения инфекционных заболеваний, адаптированная для задач прогнозирования в коллективах организаций. Предложена реализация указанной модели на основе нейросетевой архитектуры ограниченной машины Больцмана, позволяющей за счет скрытых представлений воспроизводить влияние составляющих ее узлов друг на друга, что делает возможным формирование потенциальных сценариев распространения инфекции при относительно малом количестве исходных данных. В качестве примера деструктивного воздействия в статье используется новая коронавирусная инфекция COVID-19.

Ключевые слова: математическое моделирование, прогнозирование, нейронные сети, ограниченная машина Больцмана, новая коронавирусная инфекция COVID-19

Для цитирования: *Бережных Д. Л., Павленко А. В., Соловьев Р. А.* Модель распространения деструктивных воздействий в ограниченных коллективах на основе ограниченной машины Больцмана // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 3 (108). С. 11–20. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-3-108-1>.

A model for spreading destructive effects in a limited team based on Restricted Boltzman Machine**Dmitry L. Berezhnykh^{1✉}, Alexey V. Pavlenko^{2✉},
Roman A. Soloviev³**^{1, 2, 3}Military Order of Zhukov University of Radio Electronics,
Cherepovets, Russia,¹dberezhnykh@mail.ru ✉²alxpavlenko@yandex.ru ✉

Abstract. The article considers a network model of spreading infectious diseases adapted for forecasting tasks in organizations. The authors propose the implementation of the current model based on Restricted Boltzmann Machine architecture. This approach allows reproducing the influence of its constituent nodes on each other due to hidden representations, which makes it possible to form

potential scenarios for the spread of infection with relatively small amount of initial data. New coronavirus infection is used as an example of destructive impact.

Keywords: mathematical modeling, forecasting, neural networks, Restricted Boltzmann Machine, COVID-19

For citation: Berezhnykh D. L., Pavlenko A. V., Soloviev R. A. A model for spreading destructive effects in a limited team based on Restricted Boltzmann Machine. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 3 (108), pp. 11–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-3-108-1>.

Введение

Изменившаяся реальность, в которой мировое сообщество вынуждено жить с появлением новой коронавирусной инфекции, поставило перед военно-политическим руководством нашей страны проблемы, имеющие социальный, экономический и организационно-управленческий характер. Они должны решаться во всех сферах государственной деятельности, в том числе при выполнении задач обеспечения безопасности Российской Федерации. Новую коронавирусную инфекцию необходимо рассматривать именно как деструктивное воздействие: эффект ее влияния на все отрасли и аспекты жизни общества может быть изучен, взят на вооружение и целенаправленно использован.

Опыт организации специальной работы в период наиболее интенсивного роста заболеваемости показал, что выполнение основных требований, предъявляемых к данным видам деятельности, дается руководителям всех уровней весьма непросто. Это обусловливается как продолжительным «бессимптомным» периодом и несовершенством тестовых систем, так и отсутствием четкой структуры организационно-управленческих решений, основанной на адекватных моделях развития эпидемиологических ситуаций в конкретных коллективах с учетом особенностей их рода занятий.

На основе широкого спектра математических моделей появляется возможность построения различных вариантов течения заболеваний с целью формирования эффективной организационной стратегии и корректировки комплекса нормативно-правовых и организационных действий, направленных на профилактику распространения инфекции, а также оптимизации ресурсов систем материально-технического и медицинского обеспечения.

Основная часть

В настоящее время при организации специальной работы профилактика роста заболеваемости состоит преимущественно в контроле выполнения необходимых санитарных мер. На данный момент отсутствуют адекватные имитационные модели, применение которых позволило бы прогнозировать распространение деструктивных воздействий в ограниченных коллективах организаций. Известны три основных класса вышеуказанных моделей:

1) *детерминированные модели*, представляющие собой системы дифференциальных уравнений, отражающие переходы популяции между различными состояниями (например, «здоров», «болен», «инфицирован», «обладает иммунитетом» и т. д.).

Наиболее широко они используются в предметной области моделирования эпидемиологических процессов ввиду низких вычислительных затрат и своей простоты. Известными представителями данного класса моделей являются SIR, SEIR, SIRS, SIS-модели и их модификации. Для COVID-19 преимущественно применяются системы уравнений, включающие три дополнительных состояния – госпитализированные, тяжелые, умершие. На основе модели SEIR-HCD осуществляется прогнозирование распространения вируса SARS-CoV-2 во Франции и Германии, есть публикации о ее применении для некоторых субъектов РФ, в частности для Москвы. Основной недостаток детерминированных моделей – низкая детализация; результаты подобной аналитики актуальны для масштабов страны или региона, но не применимы в рамках воинских частей или конкретных организаций¹;

2) *стохастические контактные (агентные) модели*, предполагающие учет контактов между конкретными людьми в виде уникальных единичных событий. Их основное отличие от детерминированных моделей заключается в вариативности возможных состояний с определенными значениями вероятности. Реализация данного класса моделей позволяет создавать более детализированные варианты прогнозов, однако является существенно более затратной с вычислительной точки зрения, а также требует большого количества исходных данных для формирования первичных распределений;

3) *сетевые модели*, основная идея которых состоит в репрезентации распространения заболеваний в виде графовых структур, где вершины представляют конкретных людей, а ребра – факт контакта. В отличие от стохастических контактных моделей сетевые модели позволяют учитывать контакты между людьми как повторяющееся, а не уникальное событие, что дает возможность принимать в расчет более сложные сценарии распространения инфекций – пары, тройки и большее количество задействованных узлов графа одновременно. Сценарии, построенные с применением графовых структур, имеют более высокую детализацию (вплоть до прогнозирования состояния конкретного человека). Однако использование сетевых моделей существенно затрудняется с ростом количества вершин, ввиду чего они практически не реализуются при создании сценариев эпидемий масштаба COVID-19. В качестве исключения можно привести сетевую модель, описывающую развитие коронавирусной инфекции на круизном лайнере “Diamond Princess”².

¹ Криворотько О. И., Кабанихин С. И., Зятьков Н. Ю., Приходько А. Ю., Прохошин Н. М., Шишленин М. А. Математическое моделирование и прогнозирование COVID-19 в Москве и Новосибирской области // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23, № 4. С. 395–414; Noll N. B., Aksamentov I., Druelle V., Badenhorst A., Ronzani B., Jefferies G., Albert J., Neher R. A. COVID-19 Scenarios: an interactive tool to explore the spread and associated morbidity and mortality of SARS-CoV-2. URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.05.20091363v2> (дата обращения: 28.11.2021).

² Jenness S. M., Willebrand K. S., Malik A. A., Lopman B. A., Omer S. B. Modeling Dynamic Network Strategies for SARS-CoV-2 Control on a Cruise Ship. URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.08.26.20182766v2> (дата обращения: 28.11.2021).

В данной статье представлен подход, основанный на применении сетевой модели (ввиду ее потенциально высокой точности). Однако с учетом «неявного» характера передачи возбудителя (как воздушно-капельным путем, так и посредством контакта с предметами и поверхностями помещений), в графовой структуре предлагается принимать во внимание вершины разного типа. Одним типом указанных вершин является непосредственно человек, другим – помещение, в котором гипотетически возможна передача инфекции. Применительно к организации деятельности ограниченных коллективов имеет место дополнительное обоснование: в условиях изоляции и увеличенной продолжительности смен передача инфекции от инфицированного сотрудника здоровому возможна преимущественно в пределах помещений учреждения. Логично предположить, что вероятность заражения напрямую зависит от частоты и продолжительности присутствия работников в одном пространстве. Таким образом, представляя сотрудников и помещения как вершины графа, а их контакты – как ребра с весом, отражающим мощность данных контактов, можно провести ассоциацию с явлением нейропластичности, обусловливаемой правилом Хебба. В связи с этим корректно утверждение о допустимости реализации эпидемической модели организации в виде сетевой модели при условии того, что за основу будет взята архитектура ограниченной машины Больцмана (вид генеративной стохастической нейронной сети с обучением без учителя).

Ограниченная машина Больцмана состоит из видимых нейронов, значения которых известны, и скрытых (их значения неизвестны), а также связей между ними. В качестве значений видимых нейронов в предложенной модели выступают подтвержденные факты заболеваний персонала, следовательно, количество видимых переменных определяется числом сотрудников, а количество скрытых – числом рабочих помещений организации. Подобный подход позволяет применить вариант ограниченной машины Больцмана с бинарным форматом стохастических нейронов (так называемая RBM Бернулли-Бернулли), что существенно снижает требуемый для обучения объем данных, избавляет от погрешностей расчета вероятностных показателей бессимптомного этапа деструктивного воздействия, присущих стохастическим контактными моделям. Обученная нейронная сеть дает возможность моделировать развитие эпидемиологической обстановки на основе предварительно сформированных скрытых представлений.

Структура предложенной сетевой модели изображена на рис. 1.

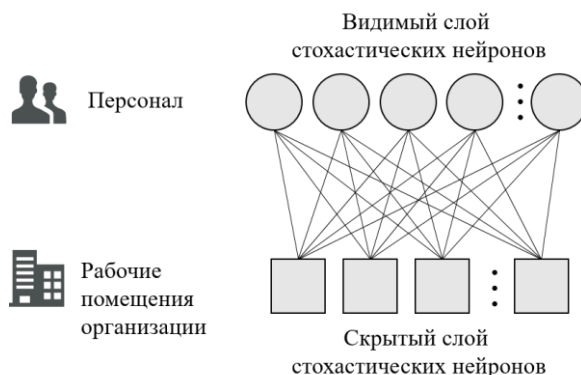


Рис. 1. Сетевая модель организации на основе ограниченной машины Больцмана

Обучение нейронной сети осуществляется на основе выборки, экземпляры которой образуют одномерный бинарный массив с метками ассоциативных связей, существующих в определенный отрезок времени. Размерность вышеуказанного массива совпадает с количеством сотрудников организации. Обучающая выборка в проведенных экспериментальных исследованиях представляла собой ассоциативные взаимосвязи трех типов:

- принадлежность к подразделению;
- совпадения по датам и типам дежурства;
- присутствие в одних помещениях в рамках повседневных взаимодействий (например, на совещаниях).

Формат обучающей выборки представлен на рис. 2.

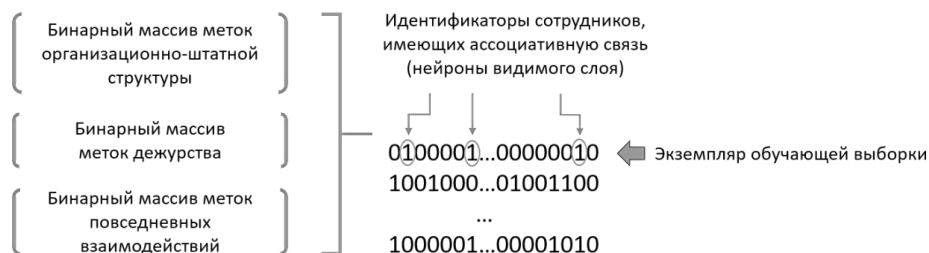


Рис. 2. Формат обучающей выборки

Обученная ограниченная машина Больцмана хранит в себе сложную систему сформированных ассоциативных связей, что позволяет прогнозировать влияние поданных на вход заболевших сотрудников на других работников организации в рамках одного временного состояния. Пример результата прогнозирования такого состояния представлен на рис. 3. За единицу по оси абсцисс принимается номер сотрудника организации (также являющийся номером видимого нейрона), а ось ординат отображает количество активаций нейронов видимого слоя. Все подразделения организации пронумерованы.

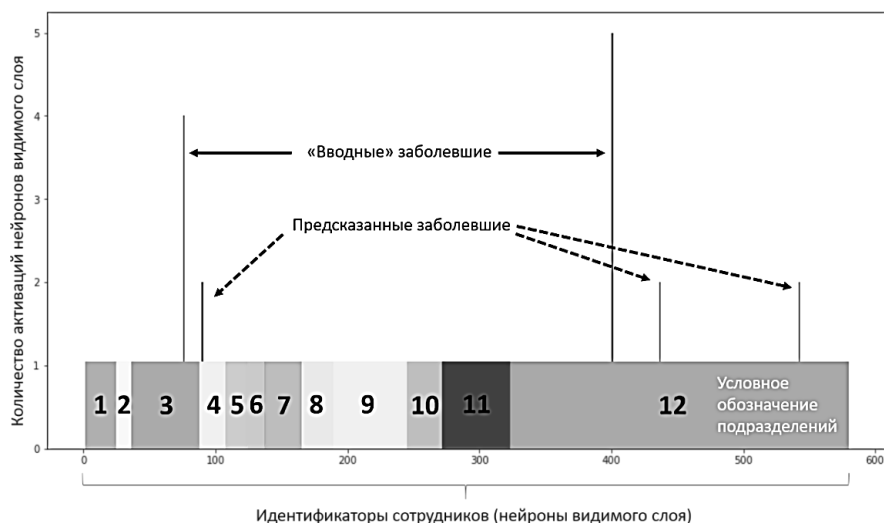


Рис. 3. Результат прогнозирования одиночного состояния организации

Перспективный анализ распространения деструктивного воздействия (инфекции) представляет собой последовательность состояний, аналогичных вышеуказанным позициям прогнозирования, при этом первое из них характеризуется появлением первых подтвержденных случаев заболевания. Полученные данные корректируются с учетом значения индекса контагиозности для исследуемой инфекции, а также информации о средней продолжительности течения болезни. Результат вышеуказанной корректировки является входным вектором для вычисления следующего состояния. Обобщенная структура метода прогнозирования распространения деструктивного воздействия представлена на рис. 4.

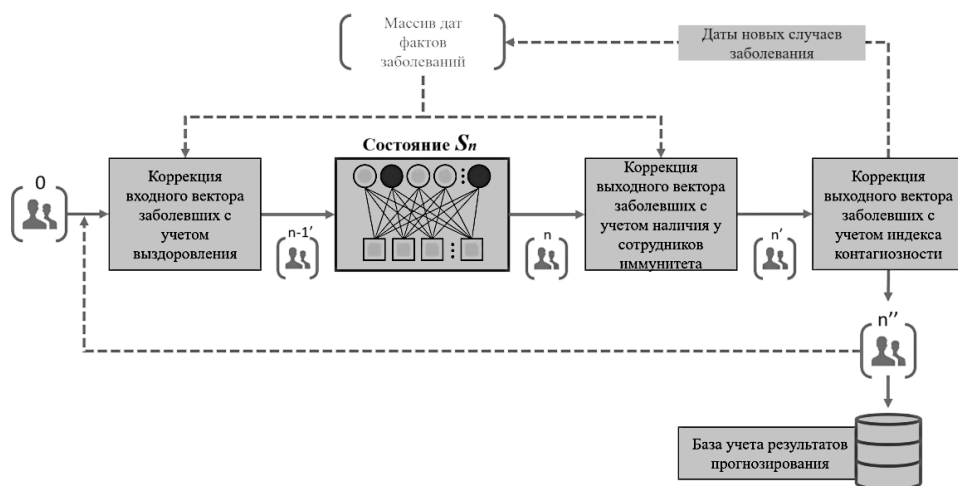


Рис. 4. Структура метода прогнозирования распространения деструктивного воздействия

Пример результатов прогнозирования трех последовательных состояний (с разницей в одну неделю между каждым из них) показан на рис. 5. Столбец диаграммы соответствует факту заболевания конкретного сотрудника. Построенные диаграммы демонстрируют, что появление одного или нескольких заболевших с высокой вероятностью приводит к лавинообразному росту числа зараженных в подразделении (наиболее наглядно это показано в подразделении, отмеченном знаком «*»).

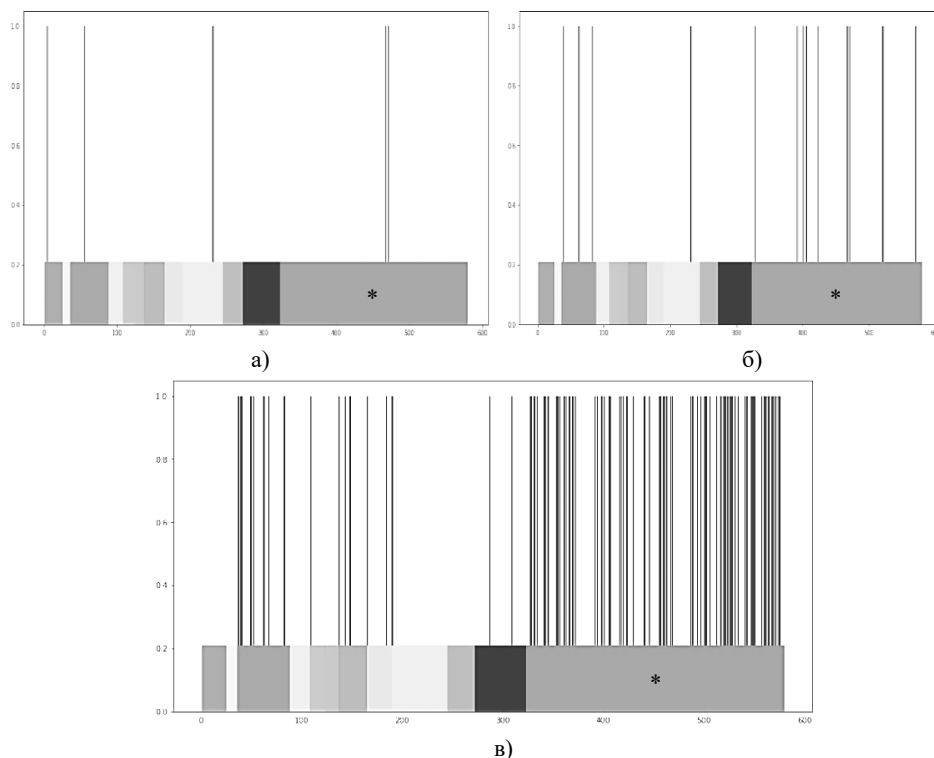


Рис. 5. Результаты прогнозирования трех последовательных состояний посредством предложенного метода

Рассматриваемый метод позволяет прогнозировать динамику распространения деструктивного воздействия как для организации в целом, так и для каждого подразделения в частности. На рис. 6 представлен пример смоделированного распространения инфекции для одной из организаций Министерства обороны РФ (линия № 1) в сравнении с реальной ситуацией в данной части (линия № 2) за период с 1 сентября 2020 года по 1 мая 2021 года.

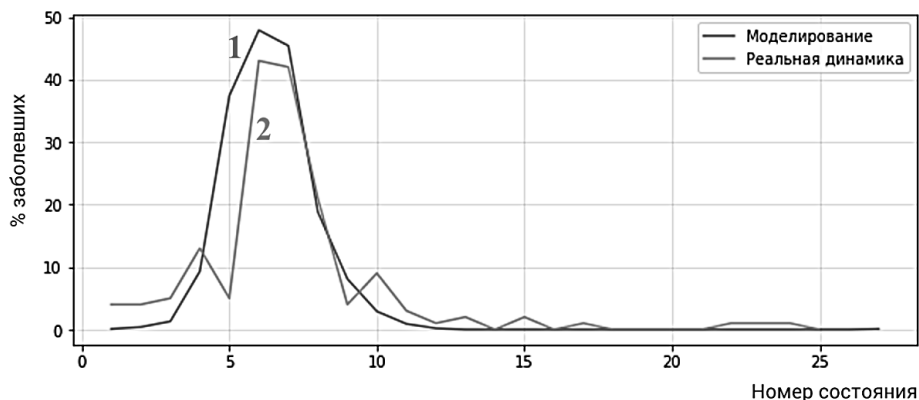


Рис. 6. Результаты прогнозирования (линия № 1) и реальная динамика (линия № 2) распространения деструктивного воздействия в организации

На рис. 7 продемонстрированы варианты прогноза распространения коронавирусной инфекции в одной из воинских частей:

- без принятия профилактических мер (линия № 1) – это приводит практически к 90 % одновременно заболевшего персонала;
- с применением необходимых санитарных мер (линия № 2) – происходит снижение количества одновременно заболевших до 78 %;
- с применением санитарных мер и дополнительными организационными действиями, такими как освобождение сотрудников командного пункта от суточных нарядов и замена военнослужащих по призыву в составе дежурной смены кадровыми офицерами (линия № 3) – реализация указанной стратегии позволяет снизить количество одновременно заболевших до 60 %.

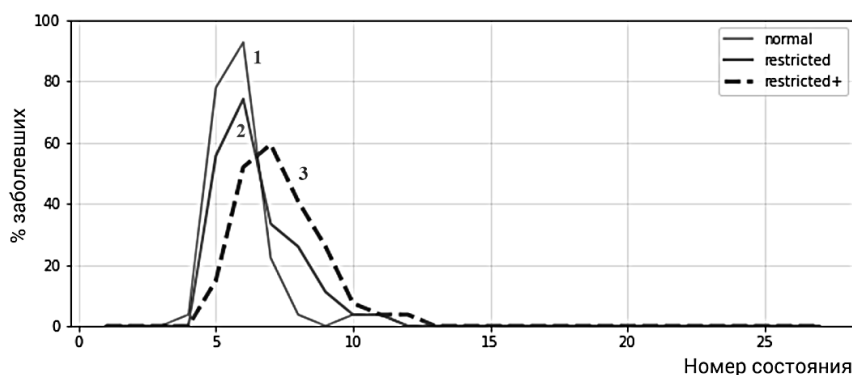


Рис. 7. Результаты прогнозирования распространения коронавирусной инфекции без применения санитарных мер (линия № 1), с применением санитарных мер (линия № 2), с применением санитарных и организационных мер (линия № 3)

Выводы

Результаты прогнозирования, полученные с помощью описанной в статье модели, могут быть применены для оценки способности подразделения (организации) выполнять поставленные задачи, а также для поддержки принятия решений о необходимых мерах по оптимизации служебного регламента, организации дежурств, подготовки резерва персонала. Изменение параметров (например, индекса контагиозности, средней продолжительности заболевания, организационно-штатной структуры) позволяет моделировать различные сценарии распространения инфекции в зависимости от применяемых мер. Следует отметить, что использование в данной статье новой коронавирусной инфекции в качестве примера не исключает возможности применения рассматриваемой модели для построения сценариев иных видов деструктивных воздействий. В дальнейшем на основе созданного метода планируется разработка системы мер, обеспечивающих непрерывное выполнение воинской частью поставленных задач, а также программная реализация системы поддержки принятия решений.

Список источников

Криворотко О. И., Кабанихин С. И., Зятков Н. Ю., Приходько А. Ю., Прохoshин Н. М., Шишленин М. А. Математическое моделирование и прогнозирование COVID-19 в Москве и Новосибирской области // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23, № 4. С. 395–414.

Jenness S. M., Willebrand K. S., Malik A. A., Lopman B. A., Omer S. B. Modeling Dynamic Network Strategies for SARS-CoV-2 Control on a Cruise Ship. URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.08.26.20182766v2> (дата обращения: 28.11.2021).

Noll N. B., Aksamentov I., Druelle V., Badenhorst A., Ronzani B., Jefferies G., Albert J., Neher R. A. COVID-19 Scenarios: an interactive tool to explore the spread and associated morbidity and mortality of SARS-CoV-2. URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.05.20091363v2> (дата обращения: 28.11.2021).

References

Krivorot'ko O. I., Kabanikhin S. I., Ziat'kov N. Iu., Prikhod'ko A. Iu., Prokoshin N. M., Shishlenin M. A. Matematicheskoe modelirovanie i prognozirovanie COVID-19 v Moskve i Novosibirskoi oblasti [Mathematical modeling and forecasting of COVID-19 in Moscow and Novosibirsk region]. *Sibirskii zhurnal vychislitel'noi matematiki* [Numerical Analysis and Applications], 2020, vol. 23, no. 4, pp. 395–414.

Jenness S. M., Willebrand K. S., Malik A. A., Lopman B. A., Omer S. B. *Modeling Dynamic Network Strategies for SARS-CoV-2 Control on a Cruise Ship*. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.08.26.20182766v2> (accessed: 28.11.2021).

Noll N. B., Aksamentov I., Druelle V., Badenhorst A., Ronzani B., Jefferies G., Albert J., Neher R. A. *COVID-19 Scenarios: an interactive tool to explore the spread and associated morbidity and mortality of SARS-CoV-2*. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.05.20091363v2> (accessed: 28.11.2021).

Сведения об авторах

Дмитрий Львович Бережных – кандидат технических наук, доцент; dberezhnykh@mail.ru, Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (д. 126, пр-т Советский, 162622 г. Череповец, Россия); **Dmitry L. Berezhnykh** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; dberezhnykh@mail.ru, Military Order of Zhukov University of Radio Electronics (126, pr. Sovetskiy, 162622 Cherepovets, Russia).

Алексей Владимирович Павленко – кандидат технических наук; alxpavlenko@yandex.ru, Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (д. 126, пр-т Советский, 162622 г. Череповец, Россия); **Alexey V. Pavlenko** – Candidate of Technical Sciences; alxpavlenko@yandex.ru, Military Order of Zhukov University of Radio Electronics (126, pr. Sovetskiy, 162622 Cherepovets, Russia).

Роман Александрович Соловьев – Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (д. 126, пр-т Советский, 162622 г. Череповец, Россия); **Roman A. Soloviev** – Military Order of Zhukov University of Radio Electronics (126, pr. Sovetskiy, 162622 Cherepovets, Russia).

Заявленный 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.

Статья поступила в редакцию 09.12.2021; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 06.04.2022.

The article was submitted 09.12.2021; Approved after reviewing 28.03.2022; Accepted for publication 06.04.2022.