

Прогноз развития эпидемической ситуации COVID-19 в Москве в 2022-2023 годах

А.В. Тараник, С.Н. Лебедев, И.А. Литвиненко, Г.В. Байдин, М.Г. Белова, О.Н. Павленко, Е.В. Бесова

Аннотация—Рассмотрено распространение COVID-19 в 2020-2022 годах в Москве и построен долгосрочный прогноз развития эпидемии до конца 2023 года. Описана модель распространения инфекции COVID-19 и способ построения прогноза. Основным инструментом построения стал вариант агентного моделирования. В качестве исходных данных использовались сведения о летальных исходах в популяции города Москва до 22.09.2021. Модель имитировала состояние 12 миллионов жителей, которые распространяли инфекцию через ежедневные социальные контакты. Возможные состояния агентов: восприимчивый, инфицированный (симптомный, бессимптомный), иммунный, умерший. Летальный исход возможен только при первом симптомном заболевании. Длительность иммунитета индивидуально разыгрывается для агента и не превышает 180 дней. В нашей модели вероятность умереть при первом симптомном заболевании в Москве составила - 1.66% для всех штаммов до появления омикрона. С помощью разработанного подхода получен прогноз на осенне-зимний период 2021-2022 года. Привлекая ретроспективные данные до 15.04.2022, удалось оценить точность этого прогноза и показать снижение летальности в 2.66 раза при омикроне по сравнению с предыдущими штаммами. Также был сделан прогноз для Москвы на 2022-2023 год, который показывает существенное снижение ежедневных уровней летальности при сохранении циркулирующего штамма омикрон. Долгосрочный прогноз указывает на обесценивание роли сезонного фактора, влияющего на эпидемический процесс COVID-19, из-за высокой трансмиссивности циркулирующих штаммов. Доля иммунных людей в популяции постоянно находится вблизи 70%, люди непрерывно инфицируются по мере потери иммунитета после прошлого заболевания.

Ключевые слова—covid-19, агентное моделирование инфекций, смена штамма, летальность.

Статья получена 27 октября 2022 г. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Соглашения № 075-11-2020-011 от 19.10.2020 г. (ИГК 0000000007520RHT0002).

А. В. Тараник, «Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ) (e-mail: a.v.taranic@mail.ru).

С. Н. Лебедев, РФЯЦ-ВНИИТФ, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., (e-mail: lsn1955@mail.ru).

И. А. Литвиненко, РФЯЦ-ВНИИТФ, к.ф.-м.н., (e-mail: igla5008@gmail.com)

Г. В. Байдин, РФЯЦ-ВНИИТФ, к.ф.-м.н., (e-mail: g.v.baydin@mail.ru)

М. Г. Белова, РФЯЦ-ВНИИТФ, (e-mail: maribella2007@yandex.ru)

О. Н. Павленко, РФЯЦ-ВНИИТФ, (e-mail: onp67gr@mail.ru)

Е. В. Бесова, РФЯЦ-ВНИИТФ, (e-mail: delen-snz@yandex.ru)

I. ВВЕДЕНИЕ

Пандемия новой коронавирусной инфекции COVID-19 создала чрезвычайную ситуацию в области общественного здравоохранения в Российской Федерации в 2020-22 годах. Волнообразное распространение COVID-19 к осени 2021 года привело к высоким уровням заболеваемости во всех субъектах Российской Федерации. Согласно данным центра по контролю и профилактике заболеваний США (англ. Centers for Disease Control and Prevention, CDC), прогнозирование эпидемии COVID-19 в США для отдельных штатов на срок более 4 недель считается нерепрезентативным [1]. В России ситуация с построением прогнозов эпидемической ситуации не лучше. В настоящее время группой научных организаций во главе с РФЯЦ-ВНИИТФ ведутся работы по трехлетнему проекту «Моделирование эпидемий вирусных инфекций». Целью проекта является разработка математических моделей и создание программного комплекса моделирования распространения вирусных инфекций в масштабе Российской Федерации.

В данной статье мы использовали разработанную в рамках проекта агентную стохастическую математическую модель, первые результаты по которой были представлены на международной конференции «XV Забабахинские научные чтения» в 2021 году [2]. Основные результаты, на основе которых написана данная статья, были представлены на 13-ой международной мультikonференции «Биоинформатика Геномной Регуляции и Структурной/Системной Биологии» – BGRS/SB-2022 с 4 по 8 июля 2022 года в Новосибирске [3]. Подробное описание разработанной авторами агентной стохастической модели распространения вирусных инфекций в Российской Федерации опубликовано в журнале International Journal of Open Information Technologies [4].

Для построения прогноза развития эпидемического процесса в городе Москве для начала (на первом этапе) создается адекватная эпидемиологическая модель на основе ретроспективных реальных данных. Эпидемиологическая модель предполагает, что по ежедневному числу зафиксированных летальных исходов будет получена (восстановлена) дополнительная информация о прошедшем эпидемическом процессе, которая не могла быть

зарегистрирована в явном виде. Это посуточные значения: трансмиссивности циркулирующего вируса, доли заразных и доли иммунных жителей. Далее (на втором этапе) строится сам прогноз в выбранных предположениях о циркулирующих штаммах и их летальности.

Фактически на первом этапе с помощью агентной стохастической модели распространения инфекции COVID-19 через ежедневные социальные контакты получаем цифровой двойник популяции Москвы с описанием иммунологического статуса каждого жителя по итогам прошедшего эпидемического процесса. А на втором этапе рассчитывается виртуальный процесс дальнейшего распространения инфекции COVID-19 среди жителей с целью создания прогноза.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наша эпидемиологическая модель предполагает передачу инфекции при ежедневных контактах знакомых людей внутри популяции населенного пункта. Агенты имеют фиксированный индивидуальный список ежедневно повторяющихся контактов. Возможные состояния агентов: восприимчивый, инфицированный (симптомный, бессимптомный), иммунный, умерший. Для инфекции COVID-19 выбраны следующие параметры: вирусная нагрузка инфицированных агентов одинакова и равномерно распределена с 5-го по 9-ый день после заражения, доля симптомной формы течения заболевания 28% [5]. Летальный исход возможен только при первом симптомном заболевании, на 28 день разыгрывается возможная смерть агента с симптомным течением с учетом выбранной летальности, длительность иммунитета индивидуально разыгрывается для агента и не превышает 180 дней.

Модель используется для построения прогноза. Прогноз рассчитывается в два этапа: предварительный и окончательный. На предварительном этапе используются ретроспективные данные. На окончательном этапе строится сам прогноз.

Целью первого этапа является нахождение адекватной эпидемиологической модели для конкретной популяции, основанной на ретроспективных данных летальных исходов.

Перед описанием вычислительной процедуры поиска адекватной эпидемиологической модели определим пять ключевых понятий.

Фактические ретроспективные данные – ежесуточные данные о летальных исходах, которые вместе с размером популяции являются неизменяемыми, однозначно воспринимаемыми данными при построении виртуального эпидемического процесса распространения инфекции в Москве.

Инфицированность – состояние восприимчивого агента после попадания в его организм SARS-CoV-2 при условии, что вирус проникает в клетки-мишени и начинает в них размножаться. Инфицированный агент тождественен заболевшему агенту, при этом заболевание может протекать в бессимптомной форме.

Заразность – свойство инфицированного

(заболевшего) агента выделять вирус и распространять инфекцию при социальных контактах, независимо от клинической формы заболевания (симптомной или бессимптомной). Заразный агент тождественен вирусовыделителю, как отмечалось выше, заразным инфицированный агент является с 5-го по 9-ый день после инфицирования.

Летальность – вероятность смерти агента при первом симптомном течении заболевания на 28 день после инфицирования. Зависит от уровня медицины, поведения людей. Летальность в нашей модели одинакова для всех агентов Москвы.

Трансмиссивность $k(t)$ – вероятность инфицирования восприимчивого агента при ежедневных социальных контактах с одним и тем же инфицированным агентом в течение периода его заразности.

В процессе численной процедуры поиска адекватной эпидемиологической модели:

- берутся фактические ретроспективные данные;
- выбирается фиксированная на весь период эпидемии летальность среди симптомных случаев;
- находятся посуточные значения трансмиссивности $k(t)$, при которых число виртуальных и реальных летальных исходов в популяции совпадают;
- анализируется соответствие полученного виртуального эпидемического процесса дополнительно привлекаемой априорной информации (изменению свойств вируса за счёт появления нового штамма, введению ограничительных мер и т.д.);
- повторяются расчетные действия с другой летальностью в случае неадекватности виртуального эпидемического процесса.

На рисунке 1 приведена поясняющая блок-схема.

В нашей эпидемиологической модели все агенты идентичны в плане восприимчивости к инфекции. Число агентов совпадает с числом жителей Москвы. Их возраст, индивидуальные особенности организма и сопутствующие заболевания не учитываются. Различия агентов, характеризующих гетерогенность моделируемой популяции, определены:

- наличием индивидуального числа контактов;
- постоянством индивидуального списка агентов, с кем он контактирует в течение суток;
- индивидуальным временным интервалом иммунного статуса после перенесенной инфекции;
- возможностью заражения только одним из нескольких циркулирующих штаммов вируса.

Степень адекватности полученной эпидемиологической модели проверяется через соответствие дополнительной информации, привлекаемой для проверки.

Например, при смене циркулирующего в популяции штамма вируса рост трансмиссивности должен соответствовать свойствам нового штамма. При введении ограничительных мер властями (локдауна) трансмиссивность должна падать в период действия ограничений. При наличии сезонного влияния на передачу инфекции максимальный рост

трансмиссивности должен совпадать с наступлением зимнего периода.

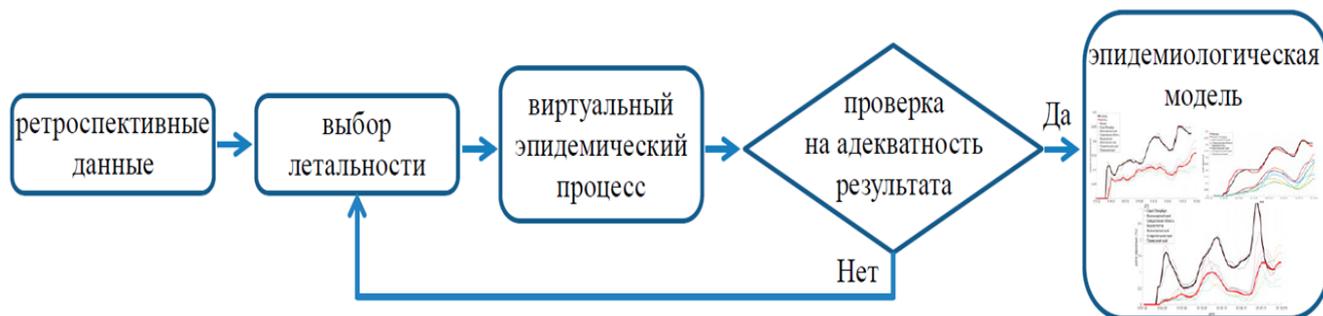


Рисунок 1 – Схема создания адекватной эпидемиологической модели по ретроспективным данным летальных исходов

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обоснования выбора летальности в модели и построения прогноза нами были использованы данные о летальных исходах в Москве с начала пандемии COVID-19 до 22 сентября 2021 года. Ретроспективные данные о летальных исходах были получены с помощью двух источников информации. Использовались ежедневные летальные случаи от COVID-19 с сайта стопкоронавирус.рф [6] и ежемесячные данные из архива Росстата [7]. Поскольку на ресурсе стопкоронавирус.рф собраны лишь оперативные данные, а наиболее точный учёт летальности от COVID-19 представлен в архиве данных Росстата по естественному движению населения в разрезе субъектов Российской Федерации, итоговая посуточная динамика была получена нами путём синтеза двух этих

источников. Суммарное число летальных исходов за каждый месяц соответствует данным Росстата [7], а форма временной зависимости ежесуточных летальных исходов - данным сайта [6].

В нашей модели вероятность умереть при первом симптомном заболевании в Москве составила - 1.66% [4]. Именно при такой летальности получилась адекватная зависимость трансмиссивности от времени. На рисунке 2 показана динамика трансмиссивности в Москве. Адекватность иллюстрирует правильный рост трансмиссивности между точками А, В, С при выбранной летальности. Точки А и С соответствуют середине лета 2020 и 2021 года. Ограничения властей в это время отсутствовали, и разница в значениях трансмиссивности должна была определяться исключительно свойствами циркулирующих штаммов.

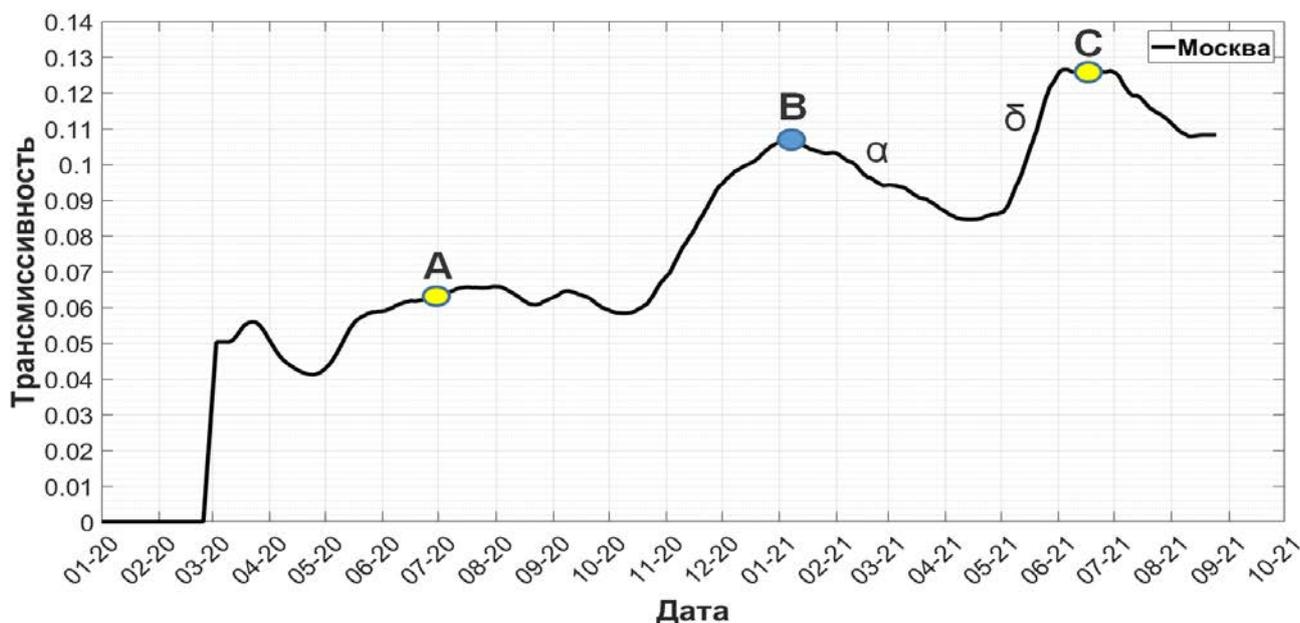


Рисунок 2 – Динамика трансмиссивности в Москве

Между точками А и С в Москве произошла смена циркуляции исходного штамма на альфа, а далее на дельта. Согласно результатам американских и английских исследований [8]-[9], трансмиссивность

дельты в 1.95 раза выше, чем трансмиссивность исходного штамма, что соответствует изменениям наших значений трансмиссивности в точке А (0.064) и в точке С (0.126). Также известно, что точки А (лето 2020)

и В (декабрь 2020 - январь 2021) соответствуют циркуляции одного и того же штамма. Это позволило нам дать оценку влияния сезонного фактора на передачу инфекции. Зимой вероятность инфицирования в 1.68 раза выше, чем летом. Можно сделать вывод, что мутации штамма в течение года оказывают большее влияние на эпидемический процесс, чем сезонный фактор.

Таким образом, по ретроспективным летальным данным для Москвы в период от начала пандемии 02.02.2020 до 22.09.2021 удалось построить адекватную эпидемиологическую модель, а также определить летальность для исходного штамма, альфа штамма и дельта штамма и определить влияние сезонного фактора на передачу воздушно-капельной инфекции в крупнейшем мегаполисе Европы.

Следующим нашим естественным шагом было построение прогнозов развития эпидемической ситуации в Москве. Были построены два прогноза для

Москвы. Условия прогнозов предполагали одинаковую летальность всех штаммов и учет влияния сезонного фактора.

В первом прогнозе предполагалось продолжение циркуляции дельта штамма. Во втором прогнозе сделано предположение о возможном появлении нового штамма (омикрон) с 03.12.2021 с трансмиссивностью в 4 раза выше, чем у дельта. На момент построения прогнозов циркуляции омикрона в Москве не было.

На рисунке 3 представлены результаты построения прогнозов. Выданы ретроспективные и прогнозные величины ежесуточного числа смертей в Москве. Видно, что первый прогноз дал четвертую волну в середине ноября, второй прогноз дал дополнительно пятую волну в середине февраля.



Рисунок 3 – Динамика ежесуточных смертей в Москве

Стоит отметить, что построение прогноза для конкретной популяции без описания ретроспективных данных будет обладать малой предсказательностью. Если раньше можно было предположить, что большинство мирового населения одинаково восприимчиво к инфекции, то два года пандемии, использование различных типов и стратегий вакцинации, колебания показателей инфицирования/выздоровления, а также изменчивости самого вируса привели к колоссальному разнообразию иммунологического ландшафта. Совокупность всех этих факторов влияет на дальнейшее течение эпидемического процесса и учитывается нами на первом этапе при построении адекватной эпидемиологической модели по ретроспективным летальным данным COVID-19 до

22.09.2021.

Нам представилась уникальная возможность провести оценку качества наших прогнозов после получения новых ретроспективных данных на период до 15.04.2022. Рисунок 4 иллюстрирует качество прогнозов согласно новым данным [10]. Видно, что четвертая волна была описана с удовлетворительной точностью, а пятая волна, вызванная омикроном, согласована по временной динамике, но сильно не совпадает по амплитуде летальности. Анализ западных публикаций по омикрону указывал на существенное снижение летальности от омикрона по сравнению с предыдущими штаммами [11], поэтому второй прогноз был пересчитан в предположении меньшей летальности.



Рисунок 4 – Динамика ежедневных смертей в Москве. Оценка качества прогноза по новым данным до 15.04.2022

Уменьшив в прогнозе летальность у тех агентов, которые симптомно заболели омикроном в 2.66 раза (точную величину подобрали итерационным способом), получили следующий скорректированный второй прогноз (см. рисунок 5), в котором удовлетворительно описывается пятая волна в Москве. Теперь с

уменьшенной от омикрона летальностью можно сделать вывод о качестве нашего прогноза. Прогноз для Москвы показал удовлетворительное согласие на период до 5 месяцев.



Рисунок 5 – Динамика ежедневных смертей в Москве. Прогноз с учетом пониженной летальности от омикрона в 2.66 раза

Проведя оценку качества наших прогнозов, мы сделали ещё три прогноза на ближайшие полтора года (см. рисунок 6) с учетом ретроспективных данных до

15.04.2022. В первом из них продолжается циркуляция омикрона. Существенной новой волны по смертям прогноз не выдал. Во втором прогнозе с 12.06.2022

вводится новый штамм в 2 раза трансмиссивнее омикрона и с такой же летальностью. Прогноз дал небольшой подъем осенью 2022 года. В третьем прогнозе с 12.06.2022 вводится новый штамм в 5 раз трансмиссивнее омикрона и с такой же летальностью. В таком случае в первой декаде августа 2022 года

возможна шестая волна, сравнимая по амплитуде с предыдущими пиками.

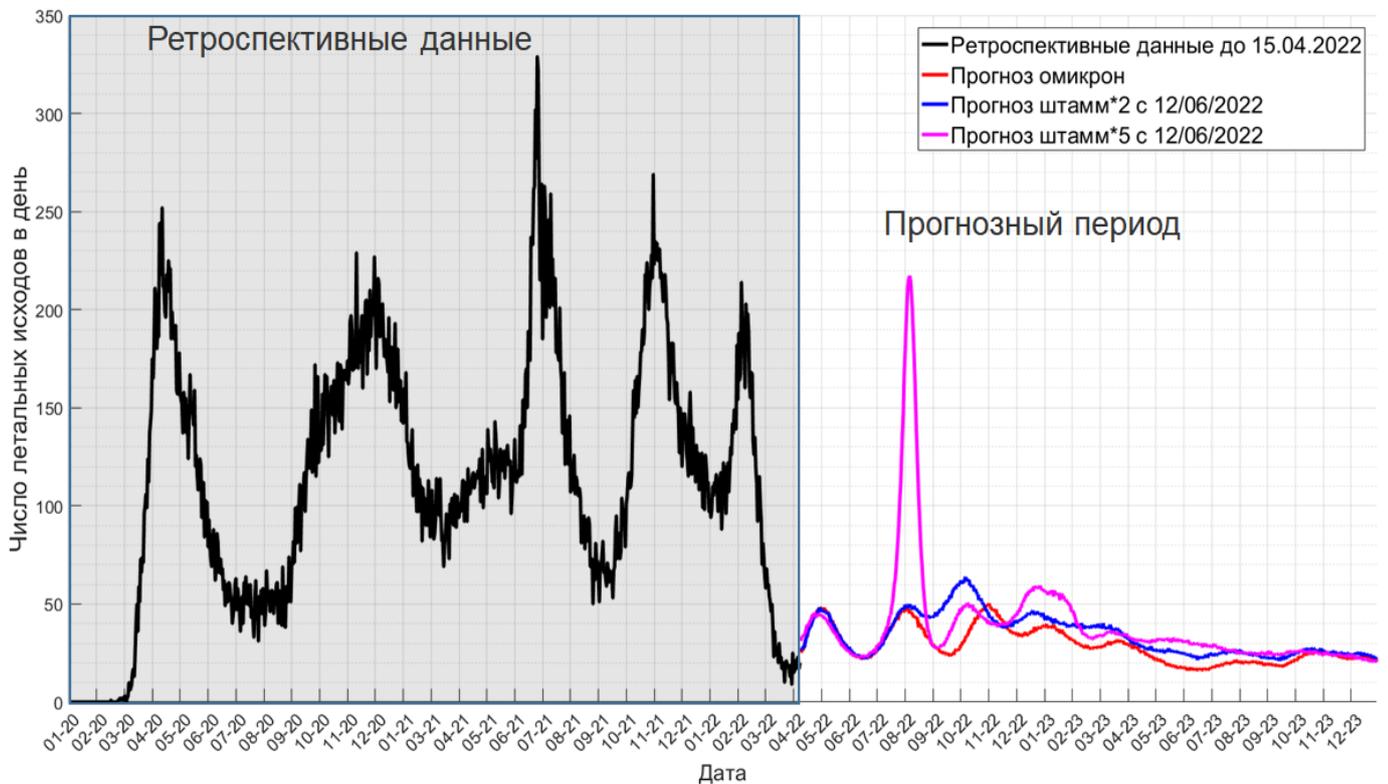


Рисунок 6 – Динамика ежесуточных смертей в Москве. Прогноз по новым данным до 15.04.2022

На рисунке 7 представлена динамика иммунной прослойки в ретроспективный период и ближайшие полтора года.

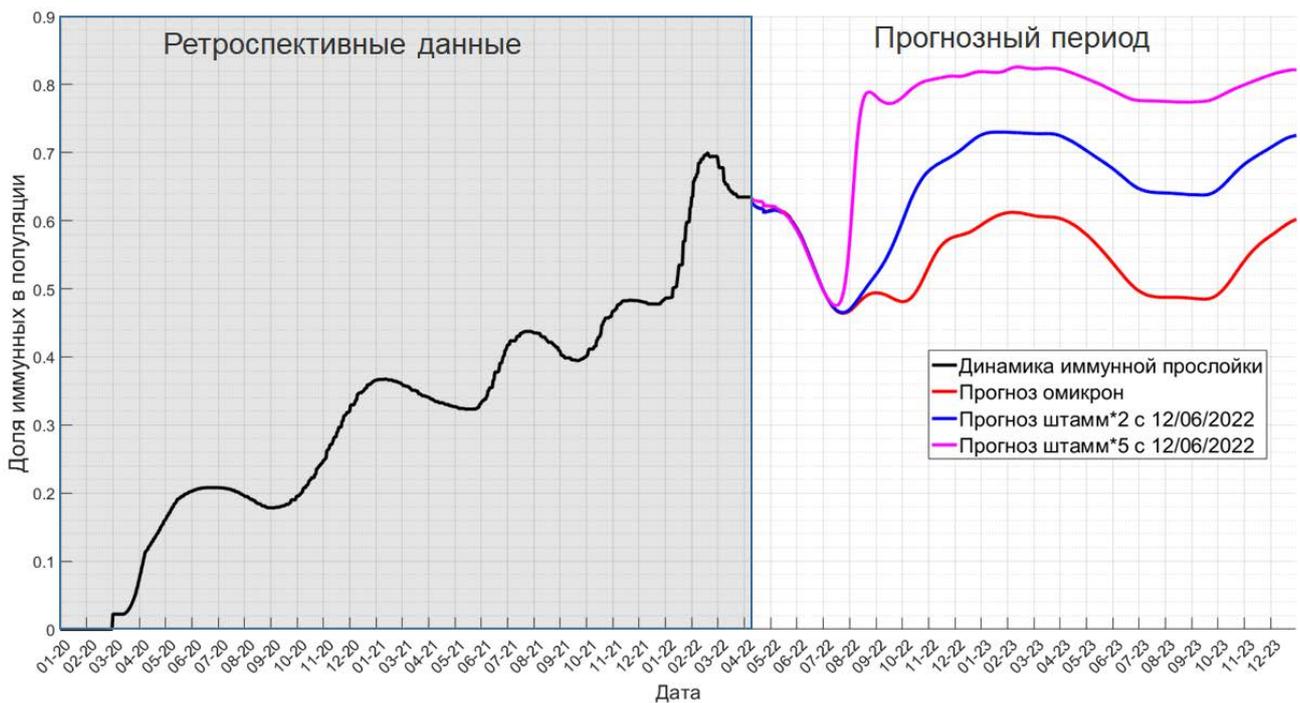


Рисунок 7 – Динамика иммунной прослойки в Москве в трех прогнозах

Доля иммунных людей в популяции постоянно находится вблизи 70%, люди инфицируются по мере потери иммунитета после прошлого заболевания. Можно утверждать, что при тех уровнях трансмиссивности циркулирующих в Москве штаммов появление новых вариантов становится всё менее вероятным.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено распространение COVID-19 в 2020-2022 годах в Москве и построен долгосрочный прогноз развития эпидемии до конца 2023 года. Описана модель распространения инфекции COVID-19 и способ построения прогноза. Основным инструментом построения стал вариант агентного моделирования.

В построенной эпидемиологической модели для Москвы получена летальность в 1.66% при первом симптомном случае инфицирования всеми штаммами до омикрона. Летальность при омикроне в 2.66 раза ниже. Сезонный фактор в Москве увеличивает трансмиссивность передачи инфекции воздушно-капельным путем в 1.68 раза при переходе от летнего сезона к зимнему. Прогноз на ближайшие 2 года показывает существенное снижение ежедневных уровней летальности при сохранении циркулирующего штамма омикрон. Шестая волна возможна при появлении штамма с трансмиссивностью в 5 раз выше, чем у омикрона. Высокая трансмиссивность циркулирующих штаммов обесценивает роль сезонного фактора, влияющего на эпидемический процесс. Доля иммунных людей в популяции постоянно находится вблизи 70%, люди непрерывно инфицируются по мере потери иммунитета после прошлого заболевания.

Предполагаем, что будут затруднены смены штаммов на более трансмиссивные из-за малой доли восприимчивых в популяции и невозможности реализовать свои преимущества относительно уже циркулирующих штаммов.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] A Estee, Y Cramer, Evan L Ray, Velma K Lopez, Johannes Bracher, Andrea Brennen, Alvaro J Castro, and etc. Evaluation of individual and ensemble probabilistic forecasts of COVID-19 mortality in the US. medRxiv 2021.02.03.21250974. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.02.03.21250974>.
- [2] А.В. Тараник, С.Н. Лебедев, И.А. Литвиненко, Г.В. Байдин, О.Н. Павленко, М.Г. Белова, Е.В. Бесова. Модель прогноза развития эпидемиологической ситуации в очагах распространения вирусной инфекции через ежедневные социальные контакты жителей. // Забабахинские научные чтения: сборник тезисов докладов XV Международной конференции 27.09.2021–01.10.2021. Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 2021.
- [3] Taranik A.V., Lebedev S.N., Litvinenko I.A., Baydin G.V., Pavlenko O.N., Belova M.G., Besova E.V. Forecast of the development of the COVID-19 epidemic situation in Moscow in 2022–2023. In: Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022). Abstracts the Thirteenth International Multiconference. Novosibirsk, 2022. С. 921.
- [4] Alexander Taranik, Sergey Lebedev, Igor Litvinenko, Grigory Baydin, Marina Belova, Olga Pavlenko, Elena Besova “COVID-19 pandemic: Comparative analysis of epidemic processes in 8 regions of Russian Federation”, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 11, no. 1, 2023
- [5] Департамент здравоохранения города Москвы. Степень распространения COVID-19 среди близких контактов заболевших. 14 июля 2020. [Электронный ресурс]. - URL: https://mosgorzdrav.ru/uploads/imperavi/ru-RU/Заболеваемость_НКВ_у_контактных.pdf (дата обращения 2020-08-01).
- [6] Официальный Интернет-ресурс для информирования населения по вопросам коронавируса (COVID-19). [Электронный ресурс]. - URL: <https://стопкоронавирус.рф> (дата обращения 2022-05-12).
- [7] Архив оперативных данных по естественному движению населения в разрезе субъектов Российской Федерации. [Электронный ресурс]. - URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/edn_01-2022\(1\).htm](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/edn_01-2022(1).htm) (дата обращения 2022-01-20).
- [8] Nicole L. Washington, Karthik Gangavarapu, Mark Zeller, Alexandre Bolze, Elizabeth T. Cirulli, Kelly M. Schiabor Barrett and etc. Genomic epidemiology identifies emergence and rapid transmission of SARS-CoV-2 B.1.1.7 in the United States. medRxiv 2021.02.06.21251159. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.02.06.21251159>.
- [9] Public Health England. SARS-CoV-2 variants of concern and variants under investigation in England. Technical briefing 16. 18 June 2021. [Электронный ресурс]. - URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1001359/Variants_of_Concern_VOC_Technical_Briefing_16.pdf (дата обращения 2021-07-22).
- [10] Архив оперативных данных по естественному движению населения в разрезе субъектов Российской Федерации. [Электронный ресурс]. - URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/edn_05-2022.htm (дата обращения 2022-07-08).
- [11] Adjei S, Hong K, Molinari NM, et al. Mortality Risk Among Patients Hospitalized Primarily for COVID-19 During the Omicron and Delta Variant Pandemic Periods — United States, April 2020–June 2022. MMWR Morb Mortal Wkly Rep 2022;71:1182–1189. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm7137a4>.

COVID-19 epidemic forecast for Moscow for years 2022-2023

Alexander Taranik, Sergey Lebedev, Igor Litvinenko, Grigory Baydin, Marina Belova, Olga Pavlenko, Yelena Besova

Abstract—The paper analyzes the spread of COVID-19 in Moscow in 2020-2022 and gives its long-term forecast to the end of 2023. It describes the infection propagation model and the forecasting technique used. Agent-based modeling became the main tool of forecasting. Lethality statistics collected before 22.09.2021 in Moscow was used as initial data. The model simulated the states of 12 million individuals, who communicated the infection through daily social contacts. Their possible states were susceptible, infectious (symptomatic or asymptomatic), immune, and dead. The lethal outcome could only occur from the first symptomatic disease. Immunity duration is sampled individually for each agent; it is no longer than 180 days. In our model, the probability to die from the first symptomatic disease was determined to be 1.66% for all variants before omicron appeared. With the approach we developed, a forecast was made for the autumn-winter period of 2021-2022. Using retrospective data collected before 15.04.2022, we managed to evaluate the accuracy of our forecast and demonstrated lethality from omicron to be 2.66 times lower than from the variants that circulated earlier. A long-term forecast for the years 2022-2023 was also made. It shows much smaller values of daily lethality if omicron dominates. The effect of the seasonal factor in the forecast is seen to be weak because of the high transmissivity of the circulating variants. About 70% of individuals in the population remain immune; people continuously become infected as they lose immunity after past disease.

Keywords—Covid-19, agent-based modelling, change of strain, lethality.

REFERENCES

- [1] A Estee, Y Cramer, Evan L Ray, Velma K Lopez, Johannes Bracher, Andrea Brennen, Alvaro J Castro, and etc. Evaluation of individual and ensemble probabilistic forecasts of COVID-19 mortality in the US. medRxiv 2021.02.03.21250974. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.02.03.21250974>.
- [2] A.V. Taranik, S.N. Lebedev, I.A. Litvinenko, G.V. Baydin, O.N. Pavlenko, M.G. Belova, E.V. Besova, A model to predict epi-demic progression in the areas of viral infection transmission through daily social contacts. XV International Conference “Zababakhin Scientific Talks” 27.09.2021–01.10.2021, Book of Abstracts, Snezhinsk, RFNC-VNIITF, 2021.
- [3] Taranik A.V., Lebedev S.N., Litvinenko I.A., Baydin G.V., Pavlenko O.N., Belova M.G., Besova E.V. Forecast of the development of the COVID-19 epidemic situation in Moscow in 2022–2023. In: Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022). Abstracts the Thirteenth International Multiconference. Novosibirsk, 2022. C. 921.
- [4] Alexander Taranik, Sergey Lebedev, Igor Litvinenko, Grigory Baydin, Marina Belova, Olga Pavlenko, Elena Besova “COVID-19 pandemic: Comparative analysis of epidemic processes in 8 regions of Russian Federation”, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 11, no. 1, 2023
- [5] Moscow Health Care Department. COVID-19 spread among close contacts of patients. 14 July 2020. - URL: https://mosgorzdrav.ru/uploads/imperavi/ru-RU/Заболееваемость_НКВ_у_контактных.pdf (download 2020-08-01).
- [6] Official website of COVID-19 information - URL: <https://стопкоронавирус.рф> (download 2022-05-12).
- [7] Databank of on-line vital statistics over Russian Federation regions. - URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/edn_01-2022\(1\).htm](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/edn_01-2022(1).htm) (download 2022-01-20).
- [8] Nicole L. Washington, Karthik Gangavarapu, Mark Zeller, Alexandre Bolze, Elizabeth T. Cirulli, Kelly M. Schiabor Barrett and etc. Genomic epidemiology identifies emergence and rapid transmission of SARS-CoV-2 B.1.1.7 in the United States. medRxiv 2021.02.06.21251159. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.02.06.21251159>.
- [9] Public Health England. SARS-CoV-2 variants of concern and variants under investigation in England. Technical briefing 16. 18 June 2021. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1001359/Variants_of_Concern_VOC_Technical_Briefing_16.pdf (download 2021-07-22).
- [10] Databank of on-line vital statistics over Russian Federation regions. - URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/edn_05-2022.htm (download 2022-07-08).
- [11] Adjei S, Hong K, Molinari NM, et al. Mortality Risk Among Patients Hospitalized Primarily for COVID-19 During the Omicron and Delta Variant Pandemic Periods — United States, April 2020–June 2022. MMWR Morb Mortal Wkly Rep 2022;71:1182–1189. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm7137a4>.