



ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАЛЬНОСТИ ОТ COVID-19 НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В 2020–2023 ГГ. С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА

Н.В. Юминова¹, Н.А. Контаров^{1,2}, Е.И. Долгова¹

¹ Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова, Москва, Россия

² Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

The study of the mortality characteristics of SARS-CoV-2 in the territory of the Russian Federation in 2020–2023 using the second-order phase transition model

N.V. Yuminova¹, N.A. Kontarov^{1,2}, E.I. Dolgova¹

¹ Research Institute of Vaccines and Sera named after I.I. Mechnikov, Moscow, Russia

² First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov, Moscow, Russia

Резюме

Коронавирус SARS-CoV-2 стал серьезным испытанием для всего мирового сообщества в 2020 г. Его появление и высокая скорость распространения заставили систему здравоохранения переориентироваться. В нашей работе мы сфокусировались на изучении данных о летальности от COVID-19 в России с 2020 по 2023 г. Экспоненциальный прирост летальности рассмотрен с точки зрения фазового перехода второго рода. Также с помощью метода Хёрста мы провели поиск наличия трендовости в показателях летальности из года в год. Предложены дополнительные критерии в принятии решений о введении и снятии ограничительных мер. Полученные результаты должны помочь в решении эпидемиологических задач при столкновении с новым инфекционным агентом.

Ключевые слова: SARS-CoV-2, COVID-19, фазовый переход второго рода, метод Хёрста, RS-анализ, индекс летальности.

Введение

SARS-CoV-2 был впервые выделен от пациента с COVID-19 инфекцией в Китае в конце 2019 г. За несколько месяцев заболевание распространилось по всему земному шару. А в марте 2020 г. ВОЗ объявило о начале пандемии COVID-19. Многие страны стали вводить локдаун. Россия не стала исключением и также предприняла ряд ограничительных мер для сдерживания инфекционного марша и минимизации нагрузки на систему здравоохранения. Ограничительные меры, введенные впервые многими странами, дали как положительный эпидемиологический, так и отрицательный экономический и психоэмоциональный эффект. Нововведение поставило вопрос перед руководством страны и ор-

Abstract

Coronavirus SARS-CoV-2 has become a serious test for the entire global community in 2020. Its appearance and high speed of spread forced the healthcare system to reorient itself. In our work we focused on studying the mortality data from COVID-19 in Russia in 2020–2023. The exponential mortality increase is considered from the point of view of a second-order phase transition. Also, using the Hurst method, we searched for the presence of a trend in mortality rate from year to year. Additional criteria are proposed in making decisions on the introduction and removal of restrictive measures. The obtained results should help in solving epidemiological problems when faced with a new infectious agent.

Key words: SARS-CoV-2, COVID-19, second-order phase transition, Hurst method, RS-analysis, mortality rate.

ганизаторами здравоохранения о выборе времени введения и снятия ограничительных мер.

Цель исследования — математический анализ динамики распространения коронавирусной инфекции SARS-CoV-2 как метод прогнозирования будущих эпидемий, оценка степени долговременной корреляции данных о летальности, аргументация принятия решений по карантинизации населения мегаполиса в условиях новой эпидемиологической угрозы.

Материалы и методы исследования

Выполнен анализ данных ежедневной заболеваемости и летальности популяции Москвы (численность населения 13 104 177 человек), Санкт-

Петербурга (численность населения 5 600 044 человек) и Севастополя (численность населения 558 273 человек) с марта 2020 г. по февраль 2023 г. Исследовались данные о заболеваемости и смертности взрослых и детей, поэтому в расчет не бралась первая половина 2020 г., когда учет заболеваемости детского населения не проводился. Данные получены из Единого государственного реестра записей актов гражданского состояния (ЕГР ЗАГС) [1].

Для описания развития эпидемии SARS-CoV-2 в указанной популяции выбрана пороговая модель, т.к. она, в отличие от популярных компартимент-моделей, содержит меньшее количество свободных параметров, что удобнее при расчетах.

Данная модель предполагает, что при достижении определенной отметки количества инфицированных людей в популяции (порога) запускается волнообразный рост числа заболевших. Момент изменения характера нарастания численности инфицированного контингента является фазовым переходом второго рода.

В теории, предложенной в 1937 г. Л.Д. Ландау [2], описывается связь между фазовым переходом второго рода и изменением свойств системы. Указанная теория описывала процессы при изменении агрегатных состояний. В нашей работе мы попробовали использовать эту модель для исследования динамики эпидемиологического процесса.

Системы, в которых происходит фазовый переход второго рода, характеризуются параметрами порядка. В модели фазовых переходов второго рода Л.Д. Ландау для систем с одним параметром порядка предполагается, что устойчивыми состояниями для системы являются состояния с минимумом свободной энергии G . Функцию G раскладываем в ряд Тейлора по четным степеням q :

$$G = G_0 + a(P - P_c)q^2 + bq^4 \quad (1)$$

где P — внешняя управляющая процессом фазового перехода переменная, а P_c — критическое значение управляющей переменной. G_0 , a , b — некоторые переменные.

В устойчивых состояниях физической системы свободная энергия $G = \min$ и устойчивые состояния системы будут решениями уравнения:

$$\frac{dG}{dq} = 0 \quad (2)$$

В этом случае $q = 0$, когда $P \geq P_c$ и $0 < q < 1$, когда $P < P_c$.

При построении данной модели предполагается, что развитие вирусной инфекции носит пороговый характер. Переменная P характеризует интенсивность сопротивления вирусной инфекции и P пропорционально $1/T$ [3].

По аналогии с описанием физических систем G :

$$G = G_0 + a\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c}\right)q^2 + bq^4 \quad (3)$$

Решение (3):

$$q^2 = \begin{cases} \frac{a}{2b}\left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T}\right) = A - B\frac{1}{T}; & \frac{1}{T} < \frac{1}{T_c} \\ 0, & \frac{1}{T} > \frac{1}{T_c} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{где } A = \frac{a}{2bT_c}; \quad B = \frac{a}{2b}.$$

Когда число заразившихся достигает определенной отметки, порога, величина q^2 возрастает пропорционально обратной величине времени $1/T$ с интенсивностью B (рис. 1).

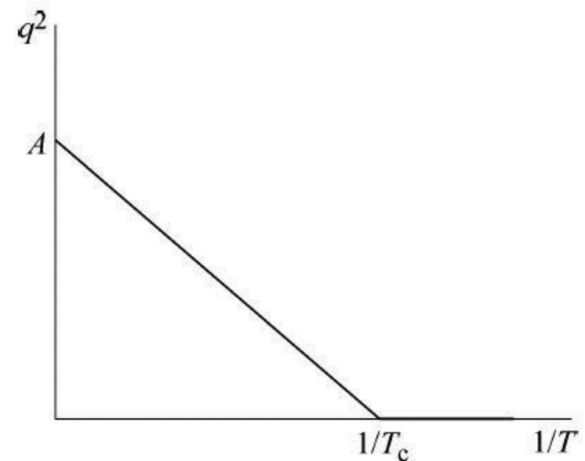


Рис. 1. Графическая зависимость свободного параметра q^2 от обратной величины времени $1/T$

Для изучения физических свойств системы (популяции) введен свободный параметр q , рассчитанный по формуле (5):

$$q = \frac{N_i(t)}{N(t)}, \quad (5)$$

где $N_i(t)$ — число скончавшихся от инфекции COVID-19 за сутки в городе, $N(t)$ — общее число летальных случаев в России за сутки.

Построена графическая зависимость параметра q^2 от времени t . На получившемся графике выявлены периоды экспоненциального роста летальности, которые нами рассмотрены как фазовый переход второго рода.

Данные каждого временного отрезка, соответствовавшие фазовому переходу второго рода, обработаны графически, где по оси x отложено обратное время $1/t$, по оси y — свободный параметр q^2 [4]. Для всех указанных периодов найден динамический коэффициент B по уравнению линии тренда:

$$y = Bx + A \quad (6)$$

Исследование наличия тренда и оценка степени долговременной корреляции данных смертности в Москве, Санкт-Петербурге и Севастополе с 2020 по 2023 г. осуществлено RS-анализом (метод Хёрста) [5]. По ежедневным статистическим данным о скончавшемся населении Москвы от COVID-19 с марта 2020 г. по февраль 2023 г. вычислены индексы летальности (ИЛ) как отношение числа смертельных исходов к числу заразившихся.

Выполнен RS-анализ индексов летальности: рассчитано среднеквадратическое отклонение, накопленное отклонение, нормированный размах, коэффициент Хёрста (H); оценена степень долговременной корреляции [6].

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp})^2}, \quad (7)$$

где S — среднеквадратическое отклонение, N — число наблюдений, i -е наблюдение, среднее арифметическое значений наблюдений.

$$\frac{R}{S} = (aN)^H, \quad (8)$$

R — размах накопленного отклонения, a — коэффициент биологических процессов (принимается равным 0,5), N — число наблюдений, H — коэффициент Хёрста. Рассчитав S , найдем значение H , решив уравнение:

$$H = \frac{\log(\frac{R}{S})}{\log(aN)} \quad (9)$$

Рассчитан коэффициент распространения коронавируса (Rt). Этот коэффициент определяет среднее количество людей, которых инфицирует 1 больной до его изоляции. Его вычисляют по данным прироста случаев заражения за последние 8 сут.

$$Rt = \frac{X_8 + X_7 + X_6 + X_5}{X_4 + X_3 + X_2 + X_1}, \quad (10)$$

где $X1$ – $X8$ — количество новых случаев заражения за 1–8 сут. Снижение показателя Rt ниже единицы является одним из условий перехода к первому этапу снятия режима самоизоляции. Для принятия решения о поэтапном снятии ограничений, помимо величины коэффициента Rt , берутся в расчет данные о свободном кожном фонде и показателе тестирования на 100 тысяч населения. Согласно рекомендациям Роспотребнадзора, снижение коэффициента Rt до 0,8 может быть маркером перехода ко второму этапу снятия ограничений, а отметка в 0,5 и ниже — к третьему [7].

Результаты исследования

Графический анализ данных о числе смертельных исходов от COVID-19 показал волнообразное течение с пиками и спадами зарегистрированных летальных случаев (рис. 2).

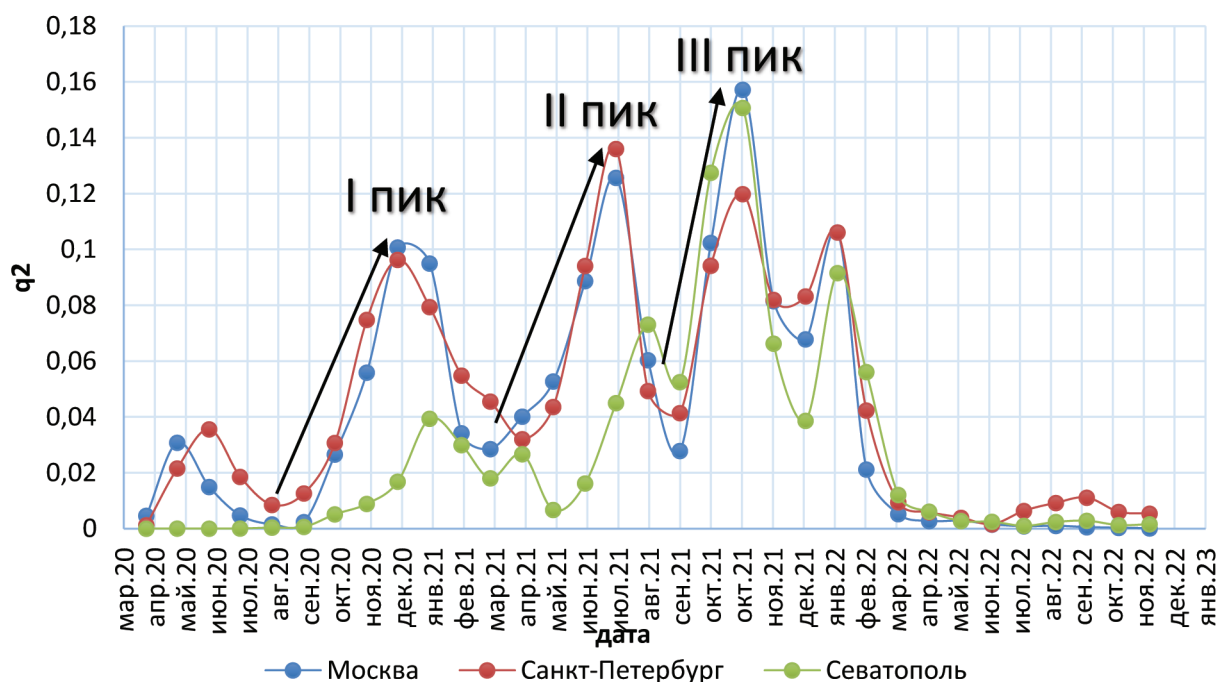


Рис. 2. Динамика изменения свободного параметра q^2 в 2020 – 2022 гг.

Наиболее значимые периоды роста свободного параметра q^2 отмечались в первые 2 года пандемии и зафиксированы в Москве в декабре 2020 г. — 0,1007, июле 2021 г. — 0,1257, ноябре 2021 г. — 0,1572. В Санкт-Петербурге значение квадрата параметра q составило 0,0963 в декабре 2020 г., 0,1360 в июле 2021 г. и 0,1198 в ноябре 2021 г. В Севастополе рост смертности наблюдался примерно в то же время с небольшим запозданием относительно предыдущих мегаполисов, поэтому пики квадрата свободного параметра пришлось на январь 2021 г.,

август 2021 г. и ноябрь 2021 г., и их значения составили 0,0394, 0,0731 и 0,1507 соответственно.

В декабре 2020 г. в России выявлялся штамм «Альфа» коронавируса SARS-CoV-2, а уже в 2021 г. самым распространенным стал штамм «Дельта». Все три периода экспоненциального роста смертности, предшествовавшие указанным пикам летальности, рассмотрены как фазовый переход второго рода; обработаны графически, где по оси x отмечено обратное время $1/t$, по оси y отложен параметр q^2 (рис. 3 — 11).

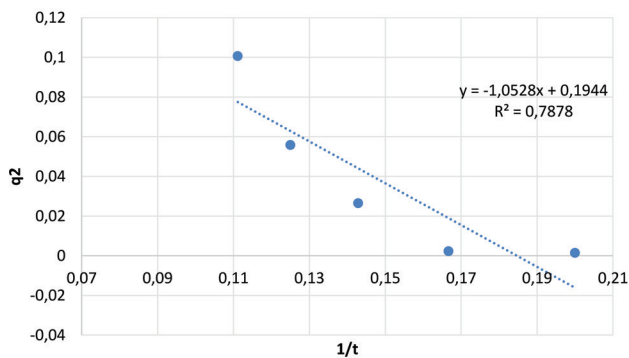


Рис. 3. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Москве. Август — декабрь 2020 г. Штамм «Альфа»

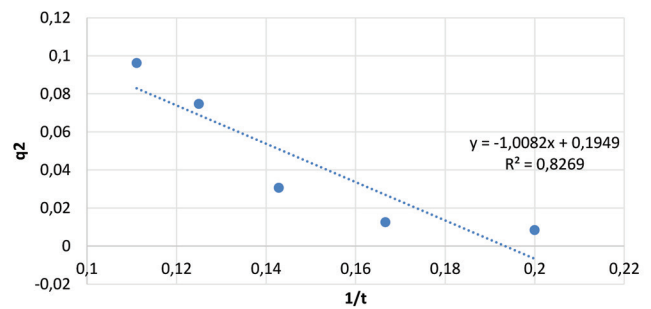


Рис. 6. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Санкт-Петербурге. Август — декабрь 2020 г. Штамм «Альфа»

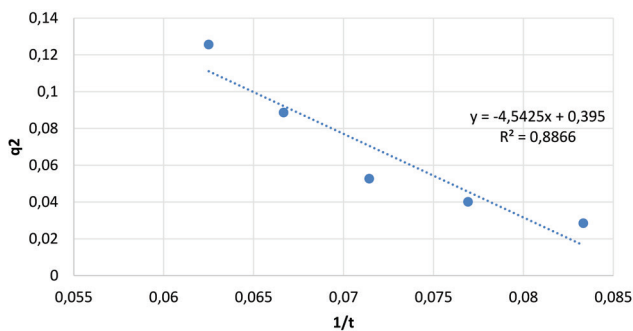


Рис. 4. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Москве. Март — июль 2021 г. Штамм «Дельта»

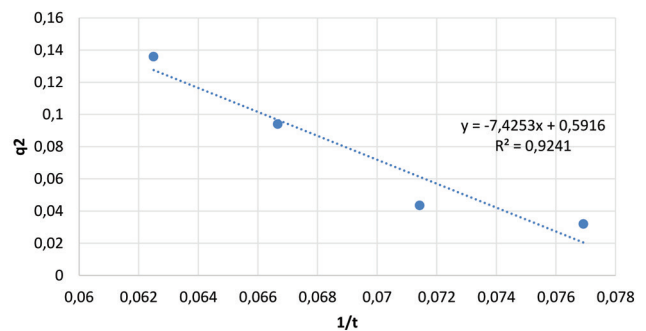


Рис. 7. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Санкт-Петербурге. Апрель — июль 2021 г. Штамм «Дельта»

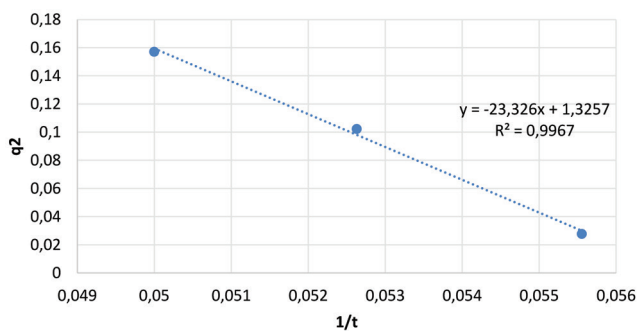


Рис. 5. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Москве. Сентябрь — ноябрь 2021 г. Штамм «Дельта»

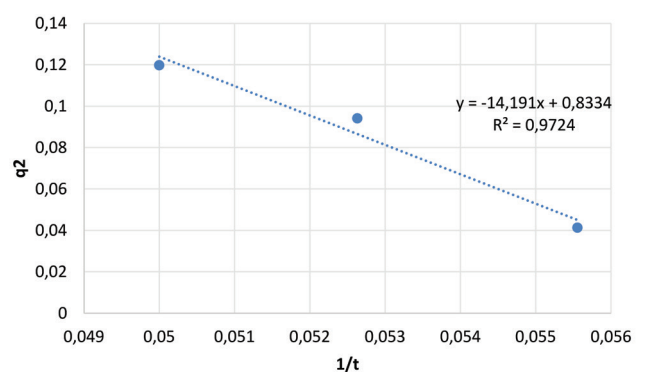


Рис. 8. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Санкт-Петербурге. Сентябрь — ноябрь 2021 г. Штамм «Дельта»

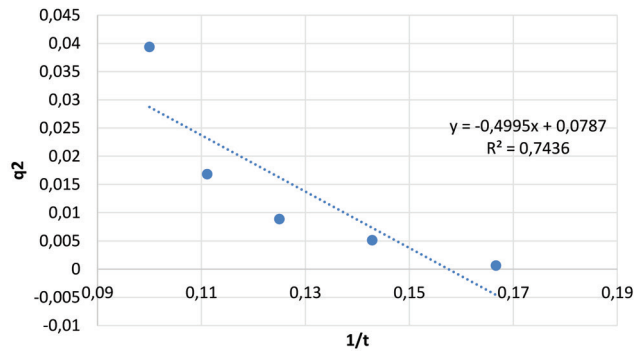


Рис. 9. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Севастополе. Сентябрь – январь 2021 г. Штамм «Альфа»

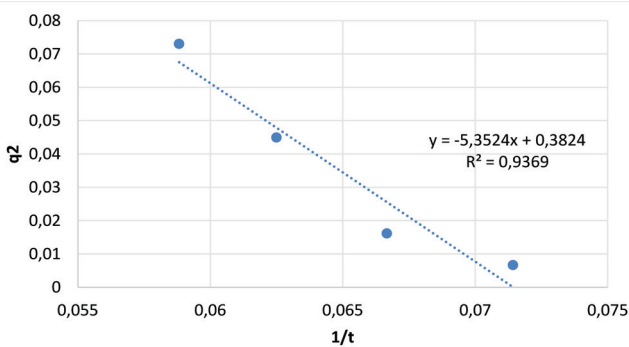


Рис. 10. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Севастополе. Май – август 2021 г. Штамм «Дельта»

Данный анализ показал высокую степень корреляции ($R^2 > 0,7$). Для каждого графика определён параметр B по уравнению линии тренда. Полученные данные представлены в таблице 1.

По ежедневным статистическим данным о скончавшемся населении Москвы от COVID-19 с марта 2020 г. по февраль 2023 г. вычислены индексы летальности (ИЛ) и выполнен их RS-анализ.

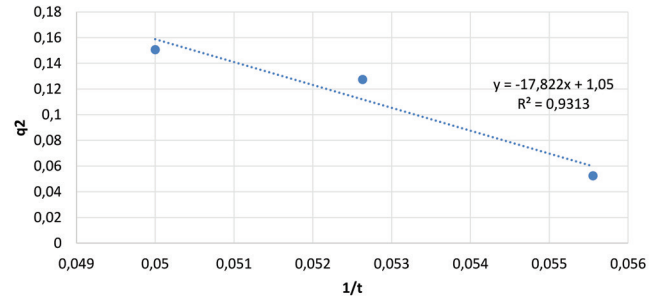


Рис. 11. Графическая зависимость q^2 от обратного времени в Севастополе. Сентябрь – ноябрь 2021 г. Штамм «Дельта»

Показатель Хёрста ИЛ COVID-19 для Москвы, Санкт-Петербурга и Севастополя составил 0,315, 0,323 и 0,397 соответственно. Коэффициент Хёрста ИЛ для России равен 0,234.

Рассчитаны коэффициенты распространения SARS-CoV-2 и также обработаны методом Хёрста. Для исследуемых городов получены следующие значения индекса $H(Rt)$: для Москвы – 0,282, Санкт-Петербурга – 0,361, Севастополя – 0,418 и России – 0,473. Результаты представлены в таблице 2.

Обсуждение

Выделено 3 значимых пика квадрата свободного параметра q , рассчитанного по данным о летальности от новой коронавирусной инфекции в Москве, Санкт-Петербурге в декабре 2020 г., июле и ноябре 2021 г.; в Севастополе в январе, августе и ноябре 2021 г. С каждым последующим пиком регистрировался рост динамического коэффициента летальности. Для Москвы в июле 2021 г. значение параметра B было в 4 раза выше, а в ноябре 2021 г. в 12 раз выше, чем в декабре 2020 г. В Санкт-Петербурге значение B возросло семикратно к июлю 2021 г., затем ещё и удвоившись к ноябрю

Таблица 1

Коэффициент B и степень корреляции периодов подъема летальности от COVID-19

Пик	Период	Москва		Санкт-Петербург		Севастополь	
		B	R^2	B	R^2	B	R^2
I	Вторая половина 2020 г.	1,05	0,78	1,00	0,82	0,49	0,74
II	Первая половина 2021 г.	4,54	0,88	7,42	0,92	5,35	0,93
III	Вторая половина 2021 г.	23,33	0,99	14,19	0,97	17,82	0,93

Таблица 2

RS-анализ индекса летальности и коэффициента распространения COVID-19

Показатель	Москва	Санкт-Петербург	Севастополь	Россия
ИЛ	0,315	0,323	0,397	0,234
Rt	0,282	0,361	0,418	0,473

2021 г. по сравнению с декабрём 2020 г. В Севастополе также отмечен рост параметра B в 7 раз в первой половине 2021 г. и более чем в 17 раз во второй половине 2021 г. по сравнению с январём 2021 г. Прогрессия значения динамического коэффициента B при применении модели фазового перехода второго рода может служить одним из сигналов для введения ограничительных мер при возникновении роста заболеваемости/летальности для снижения показателей смертности от новых инфекций.

Принцип регистрации новых случаев заболевания COVID-19 менялся с течением времени: в начале 2020 г. в России не учитывалась детская заболеваемость, со временем стали брать в расчет только тяжелые случаи течения инфекции. Учет летальности также претерпевал изменения во времени. В нашей работе, имея данные за несколько лет, мы рассчитали динамический коэффициент B , учитывая интервал в 2–3 месяца. На практике предлагается использование расчетов указанного коэффициента для второй и последующих вспышек новой инфекции, с учетом ежедневной статистики заболеваемости. Выявленное увеличение значения коэффициента B может служить маркером введения ограничительных мер.

Коэффициент Хёрста $ИЛ$ и Rt не равен 0,5, что указывает на наличие долговременной корреляции. Значения всех коэффициентов, полученных методом Хёрста, менее 0,5 соответствуют антиперсистентному ряду данных и свидетельствуют о неустойчивой динамике изменения указанных показателей.

Заключение

При возникновении новой эпидемиологической угрозы требуется непрерывный анализ данных заболеваемости и летальности с целью контроля и минимизации негативных последствий.

Авторский коллектив:

Юминова Надежда Васильевна — заместитель руководителя отдела вирусологии им. О.Г. Анджапаридзе, профессор отдела аспирантуры Научно-исследовательского института вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова, д.б.н., профессор; e-mail: yuminova@mail.ru

Контаров Николай Александрович — ведущий научный сотрудник отдела вирусологии им. О.Г. Анджапаридзе Научно-исследовательского института вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова; доцент кафедры медицинской и биологической физики Первого Московского государственного медицинского университета им. И.М. Сеченова, к.б.н.; e-mail: kontarov@mail.ru

Долгова Екатерина Игоревна — младший научный сотрудник лаборатории детских вирусных инфекций Научно-исследовательского института вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова; e-mail: doc.ekaterina.doigova@ya.ru

Использование модели фазового перехода второго рода может служить дополнительным инструментом для принятия решения о введении или снятии карантинных мер, регулируя нагрузку на систему здравоохранения и потенциально снижая число смертельных исходов в популяции.

Литература

1. <https://77.rosstat.gov.ru/folder/64634>
2. Ландау, Л.Д. Собрание трудов / Л.Д. Ландау. — 1969. — Т. 1.
3. Суховольский В.Г. Популяционная динамика онкозаболеваний: модель фазового перехода второго рода / В.Г. Суховольский [и др.] // Журнал Биофизика. — 2015. — Т. 60, вып. 4. — С. 777–786.
4. Суховольский, В.Г. Моделирование эпидемии коронавируса как фазового перехода / В.Г. Суховольский, А.В. Ковалев // Журнал общей биологии. — 2020. — Т. 81. — № 5. — С. 362–373. — DOI: 10.31857/S0044459620050073
5. Некрасова, И.В. Показатель Херста как мера фрактальной структуры и долговременной памяти финансовых рынков / И.В. Некрасова // Экономика. — 2015. — Выпуск № 7 (38).
6. Esposti F., Ferrario M., Signorini M.G. A blind method for the estimation of the Hurst exponent in time series: theory and application / Esposti F., Ferrario M., Signorini M.G. — DOI: 10.1063/1.2976187
7. <https://gogov.ru/articles/covid-rt>

References

1. <https://77.rosstat.gov.ru/folder/64634>
2. Landau L.D. Sbornie trudov 1969, t.1
3. Suhovol'skij V.G., Ivanova YU.D., K. Shulman i dr. Populyacionnaya dinamika onkozabolevanij: model' fazovogo perekhoda второго рода / Suhovol'skij V.G., Ivanova Yu.D., K. Shulman i dr. // Zhurnal Biofizika. — 2015. — Т. 60 — Vyp. 4 — S. 777- 786
4. Suhovol'skij V.G., Kovalev A.V. Modelirovanie epidemii koronavirusa kak fazovogo perekhoda / Suhovol'skij V.G., Kovalev A.V. // Zhurnal obshchej biologii. — 2020. — Т. 81. — №5. — S. 362 — 373 DOI: 10.31857/S0044459620050073
5. Nekrasova I.V. Pokazatel' Hersta kak mera fraktal'noj struktury i dolgosrochnoj pamyati finansovyh rynkov / Nekrasova I.V. // Ekonomika. — 2015. — Vypusk №7 (38)
6. Esposti F., Ferrario M., Signorini M.G. A blind method for the estimation of the Hurst exponent in time series: theory and application / Esposti F., Ferrario M., Signorini M.G. - DOI: 10.1063/1.2976187
7. <https://gogov.ru/articles/covid-rt>