

DOI: 10.19181/population.2020.23.3.8

НАЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОПАСНОСТИ РАЗВИТИЯ ПАНДЕМИИ КОРОНАВИРУСА COVID-19: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Черкашин А. К.

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН
(664033, Россия, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1)

E-mail: akcherk@irmok.net

Финансирование:

Исследование выполнено за счет средств государственного задания АААА-А17-117041910167-0.

Для цитирования:

Черкашин А. К. Национальные особенности изменения опасности развития пандемии коронавируса COVID-19: математическое моделирование и статистический анализ // Народонаселение. — 2020. — Т. 23. — № 3. — С. 83-95. DOI: 10.19181/population.2020.23.3.8

Аннотация. Исключительные события, связанные с распространением инфекции коронавируса COVID-19 среди населения различных стран, предоставляют информацию для сравнительного анализа и количественной оценки качества принимаемых решений в различных национальных обстоятельствах борьбы с пандемией. С использованием математических моделей теории надежности выявляется общая тенденция изменения эпидемических кривых и проводится оперативный расчет коэффициентов моделей и динамики численности установленных случаев заболеваний по функции отказов (фактов заражений), плотности вероятности отказов (роста доли инфицированных), интегрированной опасности и риска заражения, приемлемого риска, первичной готовности к эпидемии и управляемости текущей эпидемической ситуацией. Россия, в отличие от других стран, вступила в эпидемический процесс с высокой готовностью — малым показателем приемлемого риска, но продемонстрировала низкую управляемость текущей ситуацией. Функции надежности основаны на двойной интерпретации уравнения изменения меры опасности во времени и по факторам развития эпидемического процесса, в частности, по возрасту населения. Базовым для математического и статистического анализа является экспоненциальное уравнение опасности, которое в полулогарифмической шкале представлено линейной зависимостью от времени. Ее искажения за счет варьирования управляемой величины приемлемого риска указывает на национальные особенности регулирования эпидемической нагрузки на население. Все показатели надежности имеют ясный смысл и взаимосвязаны. Для прогнозирования необходимо знать моменты начала и пика эпидемии, потенциал заражения в группе риска, приемлемый риск. По данным в фазе экспоненциального роста приемлемый риск линейно снижается со временем до минимального значения, что становится основанием для оценки управляемости эпидемической ситуацией и дальнейшего совершенствования модели.

Ключевые слова: пандемия COVID-19, страновые особенности эпидемических кривых, математические модели опасности заражения, показатель предварительной готовности, управляемость ситуацией.

© Черкашин А. К., 2020.

Введение

Текущие события, связанные с распространением инфекции COVID-19 (SARS-CoV-2), поставили перед глобальным сообществом много новых биомедицинских, хозяйственных, демографических и иных проблем. Ситуация в различных странах быстро меняется в зависимости от особенностей географического положения, культурно-исторических традиций населения и типа национальной организации государственного управления здравоохранением, в соответствии с которыми изменяются характеристики эпидемического процесса и вырабатывается местная тактика и стратегия борьбы с эпидемией, ставшей пандемией. Осуществляется беспрецедентный глобальный мониторинг этого процесса с детальной фиксацией многочисленных статистических показателей по странам, регионам, отдельным районам и городам с разверткой во времени и по возрасту. Такая информация поступает в реальном времени, служит для принятия оперативных решений, позволяет ученым проверить гипотезы, выявить новые закономерности, построить модели и проверить их эффективность.

Предсказание возникновения пандемии — занятие неблагодарное, но готовиться к ней необходимо заранее [1]. В октябре 2019 г. Университет Джона Хопкинса и журнал «The Economist» опубликовали рейтинг безопасности стран с точки зрения их устойчивости к воздействию эпидемий [2], в котором на первых местах находились США и Великобритания. В общемировом и всероссийском масштабах цели санитарно-эпидемиологической

безопасности служит развитие системы здравоохранения, что снижает риски воздействия ведущих причин нездоровья и смертности на индивидуальном или популяционном уровне [3]. Популяционное здоровье и первичная заболеваемость населения зависит от многих факторов — генетических, природно-климатических, социально-экономических, учет которых необходим для решения социально-демографических проблем, повышения качества жизни и развития страны и её регионов [4]. Пандемия COVID-19 еще раз выявила территориальный, национальный, этнический и расовый характер глобальной вирусной эпидемии [5].

Для объяснения закономерностей распространения нового коронавируса были предложены различные математические модели процесса [6]. При этом отмечалось, что из-за ограниченности доступной информации на предварительном этапе используются упрощенные модели, не учитывающие неоднородность популяции, но по мере развертывания процесса качество моделей и основанные на них рекомендации совершенствуются [7]. По мере поступления информации начинают использовать классическую и обобщенную динамическую модель SIR [8; 9]. Отмечается, что расчетные коэффициенты модели сходны по регионам, но в разные периоды наблюдений отличаются, изменяются со временем, что связывается с эффектом регулирования ситуации — усилением мер профилактики и борьбы с эпидемией [10].

Для описания механизма эпидемического процесса используется логистическое уравнение модели SIR [9]:

$$\text{а) } \frac{dS}{dt} = -\alpha IS, \quad \text{б) } \frac{dI}{dt} = \alpha IS = \alpha I(S_0 - I), \quad (1)$$

где S_0 и $S(t)$ — исходное, базовое в группе риска и текущее количество не болевшего населения, восприимчивого к инфекции (тыс. человек) в момент t — (потенциал заражения); $I(t)$ — число подтвержденных случаев заболевания с начала процесса $t = t_0$ (в днях); α — положительная константа (частота контактов в расчете на тыс. человек, 1/тыс. чел × день). Эти уравнения использовались как основа для оценки опасности распространения гриппа птиц, прогноза риска возникновения эпизоотий и эпидемий [11] с учетом возрастного состава и миграции населения [12] в неоднородной географической среде.

В начале процесса, когда $S \approx S_0$, нарастание $I(t)$ идет по экспоненте

$$I(t) = \exp[\alpha S_0(t - t_0)]$$

или в полулогарифмическом масштабе

$$\ln I(t) = \alpha S_0 I(t - t_0) -$$

по прямой зависимости от времени t . Очевидно, что в фазе экспоненциального роста необходимо снижать частоту контактов α и размер группы риска S_0 , что достигается территориальной и личной изоляцией (разобщением) населения, соблюдением гигиенических требований, вакцинацией и в целом наличием коллективного иммунитета.

На размножение вируса COVID-19 в человеческой популяции влияет множество факторов. Процесс разворачивается во времени и пространстве, имеет свои возрастные и региональные особенности, поэтому трудно создать универсальную модель, учитывающую множество показателей и коэффициентов их связей, подлежащие статистической оценке, чтобы получить точные результаты описания эпидемических систем. Необходимы разные модели, полисистемный подход [13], когда для решения поставленной проблемы используются наиболее удобные, простые и адекватные соотношения. Одним из перспективных направлений моделирования является оценка опасности и риска [14–16], в данном случае — риска распространения коронавируса среди населения разных регионов и стран, для разработки стратегии обеспечения безопасности. Показателем

такой оценки служит демографическая реакция на изменение ситуации вследствие естественных причин и действия органов государственной власти [17].

Материалы и методы

При знакомстве с эпидемическими кривыми COVID-19 [18] обращает на себя внимание, что быстрое разворачивание процесса соответствует странам и регионам в основном с высокими уровнем и качеством жизни. По числу установленных на 17 апреля 2020 г. случаев заболевания — это США, Испания, Италия, Германия и Франция, в Италии — Милан (Ломбардия), в США — Нью-Йорк, в России — Москва. Особенностью эпидемических кривых опасности в полулогарифмической шкале является линейный рост в начале процесса и выполаживание в конце (рис. 1).

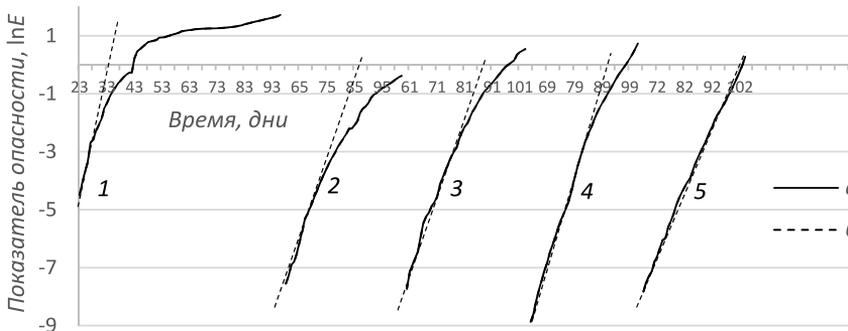


Рис. 1. Изменение опасности $\ln E(t)$ развития эпидемии коронавируса CAVID-19 в разных странах: 1 — Китай, 2 — Франция, 3 — Германия, 4 — США, 5 — Россия. Условные обозначения: а — эпидемические кривые $\ln E(t)$, б — линейная аппроксимация этих кривых в первой фазе процесса — 102 дня 2020 года

Fig. 1. Changes in the hazard index $\ln E(t)$ of the COVID-19 coronavirus epidemic process in different countries: 1 — China, 2 — France, 3 — Germany, 4 — USA, 5 — Russia. Symbols: а — epidemic curves $\ln E(t)$, б — linear approximation of these curves in the first phase of the process — 102 days in 2020.

Источник: Пандемия COVID-19. Материалы Википедии. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/COVID-19> (дата обращения: 17.04.2020).

Время начала процесса, показатели скорости роста, пик заболеваемости и стационарный уровень индивидуальны для населения разных территорий. Эти закономерности здесь формализуются в терминах теории надежности, применяемых в популяционной динамике [19], в том числе для исследования качества жизни [15; 20].

По определению надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, обеспечивающих выполнение своих функции в данных условиях [21; 22]. Надёжность связывается с отсутствием отказов (утрат, потерь, жертв, аварий) в работе (деятельности) – свойством объекта сохранять его работоспособность (жизнедеятельность) во времени или в процессе наработки по принятому параметру (возрасту, расстоянию, числу применений). Отказ в эпидемическом процессе связан со случаями инфицирования, потерей здоровья или смертью человека. Надежность характеризует ситуацию без

учета числа объектов в системе, в их ожидаемом осредненном поведении.

Для количественной оценки развития эпидемии используют показатели надежности, например, вероятность безотказной работы до момента t (в днях с начала пандемии, 31 декабря 2019 г. для COVID-19), которая задается убывающей функцией надежности $P^*(t)$ типа вероятности сохранения здоровья к моменту t . Функция кумулятивной вероятности накопления отказов (ненадежности) равна $F^*(t) = 1 - P^*(t)$ так что в эпидемиологической модели (1): $S(t) = S_0 P^*(t)$, $I(t) = S_0 F^*(t)$. В силу относительности показателей надежности $P^*(t) = S(t)/S_0$, $F^*(t) = I(t)/S_0$ на их величину мало влияет принятая в стране методика статистического учета случаев инфицирования, что определяет преимущества аналитических вычислений по формулам надежности.

На основе функции надежности $P^*(t)$ рассчитываются другие показатели:

$$P(t) = -\frac{dP^*(t)}{dt}, E(t) = -\ln P^*(t), p(t) = \frac{dE}{dt} = \frac{P(t)}{P^*(t)}, \quad (2)$$

где $P(t)$ – функция плотности вероятности (распределения) отказов, в частности, доля подтвержденных случаев инфицирования за единицу времени; $E(t)$ – интегрированная опасность, вероятность того, что процесс будет разворачиваться до момента t ; $G(t) = 1 - E(t)$ – мера возможности достижения состояния безопасности; $p(t)$ – интенсивность отказов, дифференцированная опасность, или риск, равный доле заболевших за единицу времени в численности чувствительного населения $S(t)$ (заболеваемость).

Для описания эпидемического процесса удобно принять экспоненциальную функцию опасности, распространенную в биосоциальных, финансово-экономических и страховых приложениях:

$$E(t) = -\ln P^*(t) = \exp(k(t - t_m)), \quad (3)$$

где k – положительный постоянный коэффициент (приемлемый риск – ПР); t_m – момент максимального развития (пика) процесса. Тогда $P^*(t)$ соответствует дважды экспоненциальной функции вероятности Гомпертца [19]:

$$P^*(t) = \exp\left[-\exp(k(t - t_m))\right], \quad (4)$$

$$P(t) = eP_m \exp(k(t - t_m)) \exp\left[-\exp(k(t - t_m))\right], \quad (5)$$

$$p(t) = \frac{dE(t)}{dt} = k \exp(k(t - t_m)), \quad (6)$$

где $P(t_m) = P_m$ – максимальное значение $P(t)$ (на пике развития эпидемии). Урав-

нение (6) для интенсивностей отказов $p(t)$ соответствует известной модели Кокса, применяемой при изучении зависимости риска наступления события от продолжительности пребывания объекта в группе риска [14]. Приемлемый риск (ПР) $p(t_m) = k$ определяет границы безопасности $G(t_m) = 0$ существования рассматриваемой системы, достигаемые при $t = t_m$. ПН – это уровень риска, с которым общество готово мириться, в данном случае на общегосударственном уровне в конкретных обстоятельствах пандемии.

Функция опасности (3) удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{dE}{dt} = kE(t) \tag{7}$$

Такая модель обеспечивает экспоненциальный рост числа установленных случаев инфицирования населения в первой фазе эпидемии:

$$F^*(t) = 1 - P^*(t) = 1 - \exp(-\exp[k(t - t_m)]) \approx 1 - \{1 - \exp[k(t - t_m)]\} = \exp[k(t - t_m)] \tag{8}$$

Следовательно, показатель ПР

$$k = -(\alpha \Delta t_0 - 1) S_0 / \Delta t_m + 1 / \Delta t_m, \Delta t_m = t_m - t_0, \Delta t_m = t_m - t_0 \tag{9}$$

а при малых k будет $F^*(t) \approx 1 - \exp\{-[1 + k(t - t_m)]\}$ – моноэкспоненциальная функция эпидемической ситуации, реализованной в Китае.

В эпидемическом процессе на первых этапах наблюдается только значение $I(t) = S_0 F^*(t) = S_0 [1 - P^*(t)]$, причем величина потенциала заражения S_0 неизвестна. Для определения коэффициентов перечисленных уравнений теории надежности по данным необходимо рассчитать величину опасности в логарифмическом масштабе по формуле:

$$\ln E(t) = \ln \{-\ln[(S_0 - I(t)) / S_0]\} = k(t - t_m) \tag{10}$$

Подбираем значение S_0 так, чтобы обеспечить линейную зависимость $\ln E(t)$ от t (см. рис. 1).

Возможна общая постановка задачи исследования факторной зависимости опасности $E(t, x, y)$ – гладкой функции времени t и показателей наработки (жизнедеятельности) x и y , характеризующей, например, возраст системы x или иной показатель y ее динамического состояния. Эту функцию можно рассматривать как поверхность многообразия связи переменных $E[t, x(t), y(t)]$, касательная к которой в точке (x, y) описывает процессы уравнением полного дифференциала этой функции $E[t, x(t), y(t)]$ по параметру направления изменения t (производная Лагранжа):

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial E}{\partial t} + v_x \frac{\partial E}{\partial x} + v_y \frac{\partial E}{\partial y} \tag{11}$$

где $v_x = dx/dt$, $v_y = dy/dt$ – скорости изменения состояния системы по характеристикам. В случае $dE/dt = p(t) = 0$ уравнение (11) описывает непрерывный замкнутый поток элементов без потерь (безрисковый процесс). От вида функции потерь зависит решение уравнения (11), в частности, в варианте дифференциальной связи (7), которая описывает изменение функции только от параметра t . Сопоставление (7) и (11) дает дифференциальное уравнение зависимости опасности также от факторных переменных (x, y) :

$$\frac{\partial E}{\partial t} + v_x \frac{\partial E}{\partial x} + v_y \frac{\partial E}{\partial y} = kE(t, x, y). \tag{12}$$

Уравнения такого вида в популяционной динамике называются уравнениями Мак-

Кендрика – Фон Фестера [8, 20]. Оно имеет фундаментальное значение и применимо к любой аналитической функции $E(t, x, y)$, что используется при моделировании. Важно подчеркнуть эквивалентность двух способов описания (7) и (12): первый удобен для анализа временных рядов данных, второй – при учете факторного влияния. Находятся первые интегралы дифференциального уравнения (12) – функции, которые сохраняют постоянное значение вдоль любого его решения, являющегося функциональной комбинацией $\Phi(c_j) = C$ первых интегралов [23]. При постоянных ν_x, ν_y первые интегралы уравнения (12) равны

$$c_1 = x - \nu_x t, c_2 = E / \exp\left[\left(k / \nu_x\right)x\right], c_3 = E / \exp\left[\left(k / \nu_y\right)y\right]. \quad (13)$$

Значения инвариантов c_j восстанавливаются по начальным и граничным условиям. В частном случае, скорость $\nu_x = dx / dt$ определяет изменение возраста x человека со временем, скорость $\nu_y = dy / dt$ характеризует варьирование серьезности y его заболевания. Обычно считается, что $\nu_x = 1$ т.е. возраст соответствует течению времени, но полагают также, что существует биологический возраст, когда, например $1 > \nu_x > 0$ т.е. процесс старения замедляется, что характерно для стран с высокой продолжительностью жизни. Тогда, как следует из (13), $E = c_3 \exp\left[\left(k / \nu_x\right)x\right]$ – опасность инфицирования будет экспоненциально увеличиваться с возрастом x с темпами более высокими в благополучных странах. В случае с COVID-19 данные свидетельствуют [18], что наибольшему риску подвержены пожилые люди с большим различием возрастных тенденций по государствам. При $\nu_x < 0$ зависимость от возраста будет обратная, как это было во время пандемии 1918 г., когда 99% людей, умерших от гриппа и его осложнений, были моложе 65 лет [1]. Судя по инфограммам, преобладают легкие формы $y \rightarrow 0$ COVID-19, что, как следует из (13) $E = c_3 \exp\left[\left(k / \nu_x\right)y\right]$, соответствует ситуации $\nu_y < 0$. По степени летальности y , где $\nu_y > 0$, новый коронавирус имеет невысокие показатели $p = 0,036$ в день [24].

Результаты исследования

Опираясь на перечисленные формулы, появляется возможность количественно оценить национальные показатели управления пандемией по особенностям реакции населения на распространение нового коронавируса. Использовались данные из различных источников по изменению во времени величины установленных случаев заражения населения $I(t)$ разных стран вирусом COVID-19. Данные обрабатывались численными методами по указанным уравнениям. Суточная скорость изменения характеристик рассчитывалась по формуле $V(t) = E(t) - E(t-1)$. Связи устанавливались методами корреляционного и регрессионного анализа, в ходе которого решалась обратная задача моделирования – определения информативных коэффициентов модели по временным рядам данных [15].

На первом этапе обработки данных по территориям, где население широко охвачено пандемией коронавируса (табл. 1), проверялась гипотеза связи опасности $E(t)$ и риска $p(t)$ по уравнению (7), что соответствует пропорции $p = k_1 E$ с индивидуальным коэффициентом ПР k_1 для каждой страны. Он дает первую оценку k для расчета по модели (3). Коэффициенты определялись с корреляцией $R > 0,95$ зависимости p от E и E от t и в основном подтверждают справедливость экспоненциальной функции опасности (3). Для $p(E)$ худшие результаты аппроксимации имеются по материалам Китая, поскольку здесь данные не обладают необходимой гладкостью: есть сильно «выскакивающие» значения.

В эту формулу не укладываются данные по США, где по вычисленному ПР на середину апреля должно быть не более 104 ты-

сячи зараженных против 10-кратного превышения этой величины в реальности. Зависимость S_0 от упомянутого индекса готовности f положительна ($R=0,63$), т.е.

считавшиеся по расчетам наиболее подготовленные к пандемии страны, оказались реально более уязвимыми.

Для понимания национальных особен-

Таблица 1
Основные показатели эпидемического процесса коронавируса COVID-19 по разным странам на середину апреля 2020 г. (пояснения в тексте)

Table 1

Key indicators of the epidemic process of COVID-19 coronavirus in different countries by mid-April 2020 (explanations in the text)

Страна	k_1	S_0	t_0	t_m	k	k_0	g	f
США	0,159	850	33	99	0,163	0,572	0,00427	83,50
Испания	0,128	190	56	97	0,128	0,641	0,00556	65,90
Италия	0,082	175	50	93	0,094	0,579	0,00552	56,20
Франция	0,113	167	56	95	0,112	0,777	0,00791	68,20
Германия	0,141	141	54	96	0,143	0,642	0,00562	66,00
Великобритания	0,109	120	59	107	0,141	0,527	0,00395	77,90
Китай	0,0164	83	0	38	0,152	0,711	0,01555	48,20
Россия	0,179	95	67	112	0,175	0,439	0,00287	44,30

Источник: Рассчитано автором по данным — Пандемия COVID-19. Материалы Википедии [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/COVID-19>; Global Health Security Index. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ghsindex.org/wp-content/uploads/2019/10/2019-Global-Health-Security-Index.pdf> (дата обращения: 16.03.2020).

ностей управления ситуацией исследуется зависимость $\ln E(t)$ по разным странам (рис. 1). Теоретически она должна быть линейной от t , что идеально проявляется в России, в других странах в начальных фазах процесса, а в КНР — нелинейна с низким значением ПР $k_1 = 0,0164$ /день. При таком значении экспонента $E(t)$ становится линейной функцией времени, что характерно для физико-технических систем [21], когда надежность $P^*(t)$ падает по экспоненте.

При расчетах по формулам необходимо знать значения t_0 , t_m и S_0 , которые точно определяются на основе статистических данных по началу, пику и окончанию эпидемического процесса. Время t_0 здесь соответствует моменту, когда в стране выявлены первые 10 инфицированных новым коронавирусом больные. Разница $\Delta t = t_m - t_0$ равна времени развертывания процесса — сумме длительности фазы экспоненциального роста $\Delta t_0 = t - t_0$ и предпикового периода $\Delta t_m = t_m - t$ (начала выполаживания кривой прироста установ-

ленных случаев заражения). Этими параметрами определяется линейная зависимость (9) величины ПР k от максимально возможного по текущим оценкам потенциала заражения S_0 : $k = -0,00052S_0 + 0,207$, $R = -0,80$.

Сравнение k и k_1 , найденных разными способами (табл. 1), сопоставимы: $k = 0,65k_1 + 0,060$ ($R = 0,76$). Получается, что значение k на треть меньше k_1 , что обусловлено большей сложностью функций связей, чем предполагалось. Это определено отклонением от линейной тенденции изменения $\ln E(t)$ (см. рис. 1) по формуле (10) и детерминировано значением $k(t)$, которое зависит от времени и является управляемой величиной. Такое значение вычисляется по статистическим данным глобального мониторинга пандемии $k(t) = p(t) / E(t)$ (рис. 2). Величина $k(t)$ варьирует во времени t , проявляя общую тенденцию снижения с коэффициентом g (табл. 1): $k(t) = k_0 - gt$. Показатель первичной ПР k_0 отражает неготовность системы национального здра-

воохранения к началу пандемического процесса; он понижается при более позднем начале эпидемии t_0 . Соответственно готовность будет противоположной по знаку величиной $\Delta k_0 = k_{0K} - k_0$, вычисляемой, например, относительно китайской ПР k_{0K} . Показатель g характеризует управляемость социально-экономической системой. Самая высокая неготовность $k_{0K} = 0,777/\text{день}$ (готовность $\Delta k_0 = 0$) была в Китае, первым встретившим эпидемию коронавируса, самая низкая $k_0 = 0,439$ (повышенная готовность $\Delta k_0 = 0,339$) — в России, что последняя вошла в пандемический процесс из перечисленных стран. Напротив, самая высокая управляемость $g = 0,0156/\text{день}^2$ характерна для Китая и самая низкая $g = 0,00287$ — для России, медленно снижающей приемлемый риск с одинаковыми темпами g до конца мая. Если такая закономерность понятна с учетом особенностей государственного устройства Китая, власти которого жестко ограничили передвижение населения и обеспечили его изоляцию, то высокие показатели регулируемости (табл. 1) в «свободных» и «открытых» западных странах, например, $g = 0,00791$ во Франции, удивляют. Здесь темпы снижения ПР намного больше российского показателя g управления «непослушным» населением. В связи с этим можно также полагать, что население западноевропейских стран более ответственно отнеслось к ситуации, чем российское общество. Вместе с тем, из-за особенностей поведения населения, политики правительств, их специфической оценки опасности эпидемии относительно низкая государственная управляемость пандемией проявилась в Великобритании $g = 0,00395$ и США $g = 0,00427/\text{день}^2$. По данным табл. 1 прослеживается линейная положительная зависимость $k_0 = 0,793gt_m + 0,204$ ($R = 0,97$). Отсюда требуемый уровень постоянной готовности Δk_0 снижается при увеличении управляемости g и отдалении момента t_m проявления пика эпидемии.

Высокая подготовленность системы здравоохранения России обеспечила сна-

чала оптимистичный сценарий управления социально-экономической и эпидемической ситуацией, позволивший пролонгировать момент начала массового инфицирования и пика заболевания. Для этого с 20.02.2020 г. был введен запрет на въезд на территорию России граждан Китая. С 17.03. прекращено железнодорожное и авиасообщение с зарубежными странами. 25.03. для борьбы с распространением эпидемии период с 30 марта по 3 апреля объявлен нерабочим, который продлен до 30 апреля, а затем — до 11 мая с целью максимального сохранения здоровья и жизни населения. Главы администраций регионов России получили дополнительные права и обязанности, позволяющие принимать во внимание местную специфику коронавирусной ситуации. Вместе с тем в начале апреля стало ясно, что население России не в полной мере осознает опасность и необходимость соблюдения мер противодействия эпидемии — режима самоизоляции и социального дистанцирования, в чем выразилась низкая управляемость ситуацией со стороны руководства страны и регионов и появилась необходимость введения более строгих мер в г. Москве и в других субъектах Российской Федерации. Текущие расчеты по модели начала апреля указывали на 112 день пандемии (21 апреля 2020 г.) как момент достижения пика (плато) развития эпидемии в России. Однако в начале мая наблюдался новый всплеск заражения с ежедневным приростом более 10 тыс. человек. С позиции принятой модели популяционная система постоянно меняется с коррелированным смещением параметров списка таблицы 1, что снижает предсказуемость развития процесса. Необходимо в наблюдаемых отклонениях выявить закономерности, связанные с потерей управляемости, чтобы не только поддерживать ($g = 0$) в стране постоянный уровень ПР $0,08/\text{день}$, но и не допустить ее перехода в отрицательную область $g < 0$ неуправляемости.

Выводы

Разрабатываются модели и методы расчета количественных показателей реакции национального государства и общества на опасность распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в начальной фазе эпидемии. Полученные результаты сохраняют свою актуальность в процессе развития пандемии, добавляя новые знания о явлении. Используются понятия, модели и методы теории надежности описания развития эпидемической ситуации функциями (2)-(6) вероятности безотказной работы (выживания, сохранения здоровья), плотности вероятности (распределения) отказов (темпов инфицирования), интегрированной опасности заражения, интенсивности отказов (риска заболеть), приемлемого риска, управляемости эпидемической ситуацией. Управление осуществляется через давление власти на величину приемлемого риска (допустимой заболеваемости). По результатам статистической обработки данных по числу подтвержденных случаев заболевания населения разных стран проведен сравнительный анализ процесса развертывания эпидемии в национальных обстоятельствах борьбы с пандемией.

Функции надежности основаны на двойной интерпретации уравнения (7, 11-12) изменения меры опасности во времени и по факторам развития эпидемического процесса, в частности, учитывается возрастная структура населения. Базовым для математического и статистического анализа является экспоненциальное уравнение опасности (3), в полулогариф-

мической шкале представленное линейной зависимостью от времени, искажения которой за счет варьирования управляемой величины приемлемого риска указывает на национальные особенности регулирования эпидемической нагрузки на население.

В Китае реализован упрощенный вариант регулирования этим процессом с высоким уровнем риска, низкой первичной подготовленностью санитарно-эпидемиологических служб и с жесткой управляемостью изоляцией населения. Западные страны, такие как Италия и Франция, характеризуются средней подготовленностью и управляемостью эпидемиологической обстановкой. Изменчивость ситуации в начальный период эпидемии лучше всего моделируется указанными методами на примере населения России, для которой свойственна высокая подготовленность и низкая управляемость обществом в критической ситуации. Текущие расчеты по данным начала апреля 2020 г. указывают на 21 апреля как момент начала формирования пика развития эпидемии в России, но в начале мая произошло нарушение этой тенденции с потерей управляемости и с отложенным максимумом кривой инфицирования (132 день 11 мая 2020 г.). Полученные результаты подтверждают работоспособность модели в ясных терминах теории надежности и определяют направления ее совершенствования в условиях продолжающейся глобальной пандемии по вновь возникающим данным и обстоятельствам для лучшего понимания особенностей протекающих процессов по странам.

Литература и Интернет-источники

1. **Гендон Ю. З.** Пандемии гриппа: прошлое и будущее // Природа. — 2008. — № 5. — С. 3–9.
2. Global Health Security Index. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ghsindex.org/wp-content/uploads/2019/10/2019-Global-Health-Security-Index.pdf> (дата обращения: 16 марта 2020).
3. **Каткова И. П.** Российское здравоохранение в контексте задач достижения всеобщей доступности услуг здравоохранения к 2030 году // Народонаселение. — 2020. — Т. 23. — № 1. — С. 135–147. DOI: 10.19181/population.2020.23.1.11
4. **Будилова Е. В., Лагутин М. Б., Мигранова Л. А.** Влияние демографических и социально-экономических факторов на популяционное здоровье населения // Народонаселение. — 2019. — № 3. — С. 80–92. DOI: 10.24411/1561-7785-2019-00028

5. **Aaltola M.** Covid-19—a trigger for global transformation? Political distancing, global decoupling and growing distrust in health governance // FIIA working papers, 2020, N113. P. 4–14.
6. **Denis M., Vandeweerd V., Verbeke R., Van der Vliet D.** Overview of information available to support the development of medical countermeasures and interventions against COVID-19 // Version dd. 30, 2020, Transdisciplinary insights. P. 1–134.
7. **Cohen J.** Scientists are racing to model the next moves of a coronavirus that's still hard to predict // Science, 07 February 2020. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.sciencemag.org/news/2020/02/scientists-are-racing-model-next-moves-coronavirus-thats-still-hard-predict> (дата обращения: 18.04.2020).
8. **Kermack W, McKendrick A.** Contributions to the mathematical theory of epidemics — part III. Further studies of the problem of endemicity // Bulletin of Mathematical Biology, 1991, Vol. 5. No. 3(1–2). P. 89–118.
9. **Бейли Н.** Математика в биологии и медицине. — М.: Мир, 1970. — 326 с.
10. **Zhang G., Pang H., Xue Y., Zhou Y., Wang R.** Forecasting and analysis of time variation of parameters of COVID-19 infection in China using an improved SEIR model.— 2020 // Centre for Mathematical Modelling of Infectious Diseases COVID-19 working group // The lancet, March 11, 2020. [Электронный ресурс] — Режим доступа: www.thelancet.com/infection. (дата обращения: 18.03.2020).
11. **Владимиров И. Н., Мясникова С. И., Черкашин А. К.** Геоинформационное обеспечение оценки заболевания птичьим гриппом в регионе // Известия РАН. Серия географическая.— 2008.— № 2.— С. 122–131.
12. **Huang C. Y., Wen T. H., Tsai Y. S.** A Novel four-layer model for simulating epidemic dynamics and assessing intervention policies // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Applied Mathematics. Vol. 2013. P. 1–20.
13. **Черкашин А. К.** Полисистемное моделирование. — Новосибирск: Наука, 2005. — 280 с.
14. **Therneau T. M., Grambsch P. M.** Modeling survival data: extending the Cox model. New York: Springer-Verlag, 2000. 355 p.
15. **Черкашин А. К.** Оценка качества жизни на основе решения обратной задачи моделирования динамики численности населения // Народонаселение.— 2014.— № 1.— С. 54–67.
16. **Черкашин А. К., Красноштанова Н. Е.** Моделирование оценки риска хозяйственной деятельности в районах нового нефтегазового освоения // Проблемы анализа риска.— 2015.— Т. 12, № 6.— С. 44–52.
17. **Склянова И. П., Черкашин А. К.** Количественная оценка демографической реакции на изменения условий жизнедеятельности в моногородах // Регион: экономика и социология. — 2015.— № 4.— С. 179–197.
18. **Roser M., Ritchie H., Ortiz-Ospina E.** Coronavirus disease (COVID-19): Statistics and research // Our World in Data.— 2020. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://ourworldindata.org/coronavirus/> (дата обращения: 01.04.2020).
19. **Gavrilov L. A., Gavrilova N. S.** Reliability theory of aging and longevity // Handbook of the biology of aging, Sixth edition. Academic Press. San Diego, CA, USA, 2006, P. 3–42.
20. **Черкашин А. К., Леценко Я. А., Боева А. В.** Динамические и квалиметрические модели оценки качества жизни семьи // Народонаселение.— 2015.— № 3.— С. 61–76.
21. **Høyland A., Rausand M.** System Reliability Theory: Models and Statistical Methods. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004. 518 p.
22. **Северцев Н. А., Дедков В. К.** Методологические вопросы надежности и безопасности // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика.— 2007.— № 3(6).— С. 123–128.
23. **Камке Э.** Справочник по дифференциальным уравнениям в частных производных первого порядка.— М.: Наука, 1966.— 260 с.
24. **Насколько опасен коронавирус: заразность, летальность и группы риска.** [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://ria.ru/20200319/1568742369.html?in=t> (Дата обращения: 18.04.2020).

Информация об авторе:

Черкашин Александр Константинович, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической географии Института географии им. В. Б. Сошавы Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия.

Контактная информация: e-mail: akcherk@irnok.net; ORCID: 0000-0002-7596-7780; Researcher ID Web of Science: K-2418-2017.

DOI: 10.19181/population.2020.23.3.8

NATIONAL CHARACTERISTICS OF CHANGES IN THE HAZARD OF DEVELOPMENT OF THE COVID-19 CORONAVIRUS PANDEMIC: MATHEMATICAL MODELING AND STATISTICAL ANALYSIS

Alexander K. Cherkashin

V.B. Sochava Institute of geography SB RAS
(1 Ulaanbaatar str., Irkutsk, Russian Federation, 664033)

E-mail: akcherk@irnok.net

Funding:

The research was carried out under the State assignment AAAA-A17-117041910167-0.

For citation:

Cherkashin A.K. National characteristics of changes in the hazard of development of the COVID-19 coronavirus pandemic: mathematical modeling and statistical analysis. *Narodonaselenie [Population]*. 2020. Vol. 23. No. 3. P. 83-95. DOI: 10.19181/population.2020.23.3.8 (in Russ.)

Abstract. *The article develops models and methods for calculating quantitative indicators of the response of the national state and society to the hazard of spreading COVID-19 coronavirus infection in different countries. There are used the concepts, models and methods in reliability theory to describe the development of the epidemiological situation with probability functions (possibilities) of no-failure operations (survival, health protection), probability density (distribution) of the failure (infection rates), integrated hazard of infection, failure rate (risk to take ill), acceptable risk, and manageability of the epidemic situation. Government control is carried out through pressure on the acceptable risk. Based on the results of statistical processing of data on the number of confirmed cases of the disease in different countries, a comparative analysis of the epidemic process in different national circumstances of the fight against the world pandemic was conducted. The reliability functions are based on a double interpretation of the equation of changes in the hazard measure over time and on the factors of development of the epidemic process, in particular, the age structure of the population is taken into account. The mathematical and statistical analyses are based on the exponential hazard equation, which is represented in a semi-logarithmic scale by a linear dependence on time. Nonlinear distortions are due to variations in the controlled value of acceptable risk and show national features of regulating the epidemic load on the population. The results obtained confirm the model's efficiency in clear terms of reliability theory and determine the direction of its improvement in the context of an ongoing global pandemic on the basis of newly emerging data and circumstances for a better understanding of the features of current processes across countries and continents.*

Keywords: COVID-19 pandemic, country features of epidemic curves, mathematical models of infection hazard, preparedness indicator, situational manageability.

References and Internet sources

1. Gendon Yu. Z. Pandemii grippa: proshloye i budushcheye [Flu pandemics: past and future]. *Priroda [Nature]*. 2008. No. 5. P. 3–9. (in Russ.)
2. Global Health Security Index. Available at: <https://www.ghsindex.org/wp-content/uploads/2019/10/2019-Global-Health-Security-Index.pdf> (Accessed: 16 March 2020).
3. Katkova I. P. Rossijskoe zdavoohranenie v kontekste zadach dostizheniya vseobshchej dostupnosti uslug zdavoohraneniya k 2030 godu [Russian healthcare in the context of achieving universal access to health services by 2030]. *Narodonaselenie [Population]*. 2020. Vol. 23. No. 1. P. 135–147. DOI: 10.19181/population.2020.23.1.11 (in Russ.)
4. Budilova E. V., Lagutin M. B., Migranova L. A. Vliyaniye demograficheskikh i social'no-ekonomicheskikh faktorov na popul'acionnoye zdorov'e naseleniya [Impact of the demographic and socio-economic factors on the population health]. *Narodonaselenie [Population]*. 2019. No. 3. P. 80–92. DOI: 10.24411/1561-7785-2019-00028 (in Russ.)
5. Aaltola M. Covid-19—a trigger for global transformation? Political distancing, global decoupling and growing distrust in health governance. *FIIA Working Papers*. 2020. No. 113. P. 4–14.
6. Denis M., Vandeweerd V., Verbeke R., Van der Vliet D. Overview of information available to support the development of medical countermeasures and interventions against COVID-19. Version dd. 30, 2020. *Transdisciplinary Insights*. P. 1–134.
7. Cohen J. Scientists are racing to model the next moves of a coronavirus that's still hard to predict. *Science*. 7 February 2020. Available at: <https://www.sciencemag.org/news/2020/02/scientists-are-racing-model-next-moves-coronavirus-thats-still-hard-predict> (Accessed: 18 April 2020).
8. Kermack W, McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics, part III. Further studies of the problem of endemicity. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1991. Vol. 5. No. 3(1–2). P. 89–118.
9. Bailey N. Matematika v biologii i meditsine [*Mathematics in Biology and Medicine*]. Moscow. Mir [World]. 1970. 326 p. (in Russ.)
10. Zhang G., Pang H., Xue Y., Zhou Y., Wang R. Forecasting and analysis of time variation of parameters of COVID-19 infection in China using an improved SEIR model. Centre for Mathematical Modelling of Infectious Diseases COVID-19 working group. *The Lancet*. March 11, 2020. Available at: www.thelancet.com/infection. (Accessed: 18 March 2020).
11. Vladimirov I. N., Myasnikova S. I., Cherkashin A. K. Geoinformatsionnoye obespecheniye otsenki zabolevaniya ptich'im grippom v regione [Geoinformation support for avian influenza disease assessment in the region]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [RAS News. Geographical Series]*. 2008. No. 2. P. 122–131. (in Russ.)
12. Huang C. Y., Wen T. H., Tsai Y. S. A Novel four-layer model for simulating epidemic dynamics and assessing intervention policies. Hindawi Publishing Corporation. *Journal of Applied Mathematics*. Vol. 2013. P. 1–20.
13. Cherkashin A. K. Polisistemnoye modelirovaniye [*Polysystem Modeling*]. Novosibirsk. Nauka [Science]. 2005. 280 p. (in Russ.)
14. Therneau T. M., Grambsch P. M. *Modeling Survival Data: Extending the Cox Model*. New York. Springer-Verlag. 2000. 355 p.
15. Cherkashin A. K. Otsenka kachestva zhizni na osnove resheniya obratnoj zadachi modelirovaniya dinamiki chislenosti naseleniya [Quality of life evaluation on the basis of inverse modeling of population dynamics]. *Narodonaselenie [Population]*. No. 1. 2014. P. 54–67. (in Russ.)
16. Cherkashin A. K., Krasnoshtanova N. E. Modelirovaniye otsenki riska hozajstvennoj deyatelnosti v rajonah novogo neftegazovogo osvoeniya [Modeling of risk assessment of economic activity in areas of new oil and gas development]. *Problemy analiza riska [Issues of Risk Analysis]*. 2015. Vol. 12. No. 6. P. 44–52. (in Russ.)
17. Sklyanova I. P., Cherkashin A. K. Kolichestvennaya otsenka demograficheskoy reaktivnosti na izmeneniya uslovij zhiznedeyatel'nosti v monogorodah [Quantitative assessment of demographic response to

- changes in living conditions in single-industry towns]. *Region: ekonomika i sotsiologiya [Region: Economics and Sociology]*. 2015. No. 4. P. 179–197.
18. Roser M., Ritchie H., Ortiz-Ospina E. Coronavirus disease (COVID-19): Statistics and research. *Our World in Data*. 2020. Available at: <https://ourworldindata.org/coronavirus/> (Accessed: 1 April 2020).
 19. Gavrilov L. A., Gavrilova N. S. Reliability theory of aging and longevity. *Handbook of the Biology of Aging*. Sixth edition. Academic Press. San Diego, CA. USA. 2006. P. 3–42.
 20. Cherkashin A. K., Leshchenko Ya. A., Boeva A. V. Dinamicheskie i kvalimetricheskiye modeli otsenki kachestva zhizni sem'i [Dynamic and qualimetric models of estimating quality of life of family]. *Narodonaselenie [Population]*. No. 3, 2015. P. 61–76. (in Russ.)
 21. Høyland A., Rausand M. *System Reliability Theory: Models and Statistical Methods*. New Jersey. John Wiley & Sons Inc. 2004. 518 p.
 22. Severtsev N. A., Dedkov V. K. Metodologicheskiye voprosy nadozhnosti i bezopasnosti [Methodological issues of reliability and security]. *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika [Bulletin of Tver State University. Series: Applied Mathematics]*. 2007. No. 3(6). P. 123–128. (in Russ.)
 23. Kamke E. Spravochnik po differencial'nym uravneniyam v chastnykh proizvodnykh pervogo poryadka [Handbook on First-Order Partial Differential Equations]. Moscow. Nauka [Science]. 1966. 260 p. (in Russ.)
 24. Naskol'ko opasen koronavirus: zaraznost', letal'nost' i gruppy riska [How dangerous is the coronavirus: infectivity, lethality, and risk groups]. Available at: <https://ria.ru/20200319/1568742369.html?in=t> (Accessed: 18 April 2020). (in Russ.)

Information about the authors:

Alexander Konstantinovich Cherkashin, Dr. Sc. (Geogr.), Professor, Chief Researcher, Head of laboratory, V. B. Sochava Institute of Geography, RAS Siberian Branch, Irkutsk, Russian Federation.

Contact information: e-mail: akcherk@irnok.net; ORCID: 0000-0002-7596-7780; Researcher ID Web of Science: K-2418-2017.

Статья поступила в редакцию 05.05.2020.