

DOI: 10.19181/population.2022.25.1.12

МЕТА-АНАЛИЗ ДЕМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ НАСЕЛЕНИЯ РАЗНЫХ СТРАН НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОНАВИРУСА COVID-19

Черкашин А. К.*, Красноштанова Н. Е.

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

*E-mail: akcherk@irnok.net

Финансирование:

Исследование выполнено за счёт средств государственного задания АААА-А21-121012190056-4.

Для цитирования:

Черкашин А. К., Красноштанова Н. Е. Мета-анализ демографической реакции населения разных стран на распространение коронавируса COVID-19 // Народонаселение. – 2022. – Т. 25. – № 1. – С. 141-154. DOI: 10.19181/population.2022.25.1.12.

Аннотация. Пандемия 2020 г. COVID-19 продолжалась в 2021–2022 гг. с выраженной сезонной волновой динамикой заболевания по регионам мира. Актуальными остаются вопросы изучения демографической реакции населения разных стран на инфекционные угрозы. В основе проведённого исследования лежит методология расслоения многообразия связей характеристик реакции населения по условиям среды реализации этих связей в различных временных и пространственных обстоятельствах. В процедурах мета-анализа системные связи послойно сравниваются так, чтобы различные системы представлялись как одна система, что подчиняется общим закономерностям, абстрагированным от местных условий, территориальных особенностей. В исследовании каждый ситуационный слой представлен эпидемиологической кривой, описываемой с помощью функции распределения Фреше с индивидуальными коэффициентами. Мета-аналитическое послойное сравнение кривых осуществляется через сопоставление положения пиков эпидемических волн и их амплитуды для каждой страны. Несмотря на различия социально-экономических, природно-климатических и иных условий распространения коронавируса, в разнородных ситуациях выявлены общие закономерности и получены обобщенные оценки величины эффекта, показывающие, что население разных стран в целом одинаково нелинейно реагирует на ситуацию по единому закону саморегулирования опасности инфицирования. Представленная общая схема реализации мета-анализа глобальных пространственно-временных эпидемиологических данных позволяет выявить зависимость, инвариантные относительно территориальных особенностей распространения коронавируса.

Ключевые слова: COVID-19, демографическая реакция населения, мета-анализ рядов данных, математическое моделирование, риск и опасность заражения.

Введение

Начавшаяся в конце 2019 г. в Китае эпидемия коронавируса COVID-19 (SARS-CoV-2) в течение 2020 г. переросла в пандемию и охватила все страны мира, оказав влияние на состояние экологии, экономики и социально-демографические характеристики жизни населения. Несмотря на предпринятые меры по изоляции, вакцинации и карантинные ограничения, пандемическая ситуация в мире в конце 2021 — начале 2022 гг. вновь обострилась. Ответная реакция общества и государства на эти события отличается в разных странах, как по особенностям принимаемых правительствами решений по управлению эпидемической ситуацией, так и по изменению популяционного здоровья населения, которое определяется многими факторами, включая генетическое, природно-климатическое и социально-экономическое влияние [1]. Подчеркивается, что пандемия — не только медицинское явление, а колоссальное воздействие на общество, приводящее к обострению социальных проблем [2]. Коллективная реакция (отклик, ответ, эффект, последствия) на такие воздействия населения выражается в изменении демографических характеристик под влиянием внешних факторов различной природы, особенно в кризисных ситуациях, к числу которых относятся риски и опасности, связанные с пандемией COVID-19 [3].

Количественные исследования реакции населения разных регионов и стран мира на инфицирование базируются на материалах статистической отчетности о числе подтвержденных случаев заболевания, выздоровления и смертности от COVID-19, которое отображает новые аспекты популяционной динамики [4; 5]. Демографическая реакция на изменение ситуации вследствие естественных причин и действий государственной власти может служить показателем оценки опасности и риска распространения инфекции, эффективности управления и особенностей поведения населения [6], подкреплённые данными социологических опросов [7]. Используемые в опросах анке-

ты включают сведения о демографических показателях, владении знаниями об особенностях заболевания, по используемым источникам информации о вирусе, о следовании мерам предупреждения распространения болезни, трудностях, с которыми сталкивались респонденты в связи с пандемией [8]. Оценивались психосоциальные последствия пандемии, связанные с закрытием образовательных учреждений, переходом на онлайн-обучение, изоляцией и иными карантинными мерами и так далее.

Многие социологические исследования касаются вопросов психологической нагрузки на людей в условиях пандемии COVID-19 [9]. Выявлено, что проживающие в городе, имели меньший уровень беспокойства, чем жители сельской местности, что связывается с различием уровня экономического развития, доступности культурных и образовательных ресурсов. Показано, что в богатых странах люди более тревожно реагируют на пандемию, чем в бедных, например, в Латинской Америке [10]. Следовательно, пандемия помимо высокого риска потери работы, физического здоровья и жизни, глобально повлияла на психическое здоровье населения. Пандемия COVID-19 привела к повышению беспокойства и тревожности населения всего мира, проявилась в реакции людей на разных уровнях от отдельного человека до населения стран; при этом эпидемический процесс статистически оценивается в показателях заболевания, вакцинирования, выздоровления и смертности.

С целью объединения результатов исследований разных территорий, обоснования и проверки научных гипотез предлагается использовать методы географического мета-анализа [11], которые в приложении к оценке демографической реакции населения разных стран на распространение заболевания COVID-19 позволяют выявить общие закономерности эпидемического процесса [5] и представить их в форме математической модели его поэтапного развития для решения прямых и обратных задач моделирования и прогнозирования возникновения кризисных ситуаций.

Мета-анализ в научных исследованиях

Под мета-анализом понимается совокупность процедур сквозной научной методологии, заключающейся в объединении результатов ряда исследований методами статистики для проверки одной или нескольких взаимосвязанных научных гипотез. Мета-знание — чистое знание, абстрагированное от местных обстоятельств, территориальных особенностей. Высокая общность подхода, его междисциплинарный характер и учет условий среды позволяет рассматривать методологию мета-анализа на метатеоретическом уровне, предполагающем использование математических формул отображения знаний с фундаментальными содержательными ограничениями [11]. Наиболее широкое применение мета-анализ нашёл в социальных, медицинских и биологических науках [12; 13], где он используется с целью выявления общих закономерностей, изучения и объяснения наблюдаемых различий вследствие неоднородности (гетерогенности) результатов исследований и, соответственно, увеличения точности оценки эффекта анализируемого вмешательства с применением статистической обработки имеющейся информации. Это позволяет более точно определять категории объектов и типы среды, для которых применимы полученные результаты [11].

Методология мета-анализа базируется на метатеоретической основе — гипотезе системного расслоения земной реальности на многообразии геоисторической среды. Локально процессы и явления описываются однотипными квалитетрическими уравнениями интеграции и генерализации данных, поэтому каждая ситуация сводится к свойствам типового слоя и универсальным уравнениям связи переменных [11]. Это позволяет понимать и исследовать различные объекты как один и тот же объект, и сопоставлять их путем сравнения с выбранным эталоном. Проведение мета-анализа состоит из нескольких последовательных процедур-этапов, важнейшие из которых [14]: 1) определение критериев включения оригинальных исследований в мета-анализ; 2) оценка неоднородности их результатов; 3) получение обобщённой оценки величины эффекта (зависимости); 4) анализ чувствительности выводов.

Критерием включения информационных материалов в мета-анализ является однотипность решаемых задач и изучаемой зависимости $F(x)$ — системной тематической модели, отражающей причинно-следственные связи в форме воздействия факторных переменных $x = \{x_i\}$ на реакцию $F(x)$ похожих объектов. Базовая гипотеза проведения мета-анализа состоит в том, что поверхность, задаваемая функцией $F(x)$, является многообразием, т.е. локально подобна касательным в точке $F(x_0)$, $x_0 = \{x_{0i}\}$ плоскостям (слоям) MTx_0 к этой поверхности, описываемым линейными соотношениями:

$$F(x) = a \cdot x + F^*(a) = a \cdot (x - x_0) + F(x_0), a \cdot x = \sum_i \frac{\partial F}{\partial x_i} x_i, a_i(x_0) = \frac{\partial F}{\partial x_i}(x_0), \quad (1)$$

$$F^*(a) = -a \cdot x_0 + F(x_0) = -\sum_i \frac{\partial F}{\partial x_i} x_{0i} + F(x_0). \quad (2)$$

Все наблюдаемые неоднородные явления $F(x)$ рассматриваются как расслоения $MT = \{MTx_0\}$ над точками многообразия $F(x_0)$ параметров внешней и внутренней среды $x_0 = \{x_{0i}\}$. В смещённых (относительных) показателях $f(y) = F(x) - F(x_0)$, $y = \{y_i\} = \{x_i - x_{0i}\}$ функции $F(x)$ локально соответствует однородное билинейное уравнение по переменным $y = \{y_i\}$ и $a = \{a_i\}$:

$$f(y) = a \cdot y = \sum_i a_i y_i = \sum_i \frac{\partial f}{\partial y_i} y_i. \quad (3)$$

Здесь $f(y)$ — универсальная мета-аналитическая функция, одинаковая для всех средовых условий, позволяющая в локальных координатах $y = \{y_i\}$ сводить разные зависимости $F(x)$ к одному типовому соотношению $f(y)$, сравнивать их путем сопоставления (отождествления) разных точек касания $(F(x_0), x_0)$, характеризующих среду.

Коэффициенты чувствительности $a = \{a_i\}$ и $F^*(a)$ уравнения (1) определяются по статистическим данным с помощью линейного регрессионного анализа для каждого наблюдения. Оценка однородности разных выборок проводится путем сравнения $F^*(a)$ с линейной зависимостью (2). Коэффициенты корреляции R или детерминации R^2 указывают при $R=1$ на полную однородность статистических материалов различных наблюдений, т.е. подтверждают факт их проведения в однотипной среде с параметрами $(F(x_0), x_0)$, которые вычисляются по данным разных наблюдений на основе регрессии $F^*(a)$ на все a_i в соответствии с уравнением (2). Обобщённая оценка величины эффекта (зависимости) получается в виде универсальной формулы (3). Анализ чувствительности выводов мета-анализа проводится с изменением различных параметров уравнений (1)–(3) и оценочными расчётами реакций $F(x) = f(y) + F(x_0)$ для иных условий x_0 .

Для моделирования развития эпидемии обычно используются классическая и обобщённая эпидемиологические модели SIR У. Кермака и А. МакКендрика 1927 г. [15]. Она описывает перераспределение числа восприимчивых (S), инфицированных (I), умерших (D) и изолированных (R) частей населения со временем t . Одним из альтернативных направлений моделирования является оценка опасности и риска [6], что формализуется в терминах теории вероятности и надёжности. Надёжность связывается с отсутствием отказов (утрат, потерь, жертв, аварий) — свойством объекта сохранять его работоспособность (жизнедеятельность) во времени. В эпидемическом процессе отказ связан со случаями инфицирования, потерей здоровья или смертью человека. Надёжность отражает ситуацию в относительных показателях, в их ожидаемом осреднённом поведении.

Развитие эпидемии COVID-19 описывается функцией надёжности $P^*(t)$ — вероятности безотказной работы общественной системы, сохранения популяционного здоровья к моменту времени t . Текущее, реальное время t считается в днях с 1 января 2020 г. (рис. 1). Функция кумулятивной вероятности накопления отказов (ненадёжности) равна $F^*(t) = 1 - P^*(t)$, и в эпидемиологической модели SIR $S(t) = S_0 P^*(t)$, $I(t) = S_0 F^*(t)$, где S_0 — потенциал заражения, заранее неизвестное число возможно инфицированных. На основе функции надёжности $P^*(t)$ рассчитываются другие показатели:

$$P(t) = -\frac{dP^*(t)}{dt}, \quad E(t) = -\ln P^*(t), \quad E^*(t) = -\ln F^*(t), \quad p(t) = \frac{dE}{dt} = \frac{P(t)}{P^*(t)}, \quad (4)$$

где $P(t)$ — функция плотности вероятности (распределения) отказов, в частности, доля количества подтверждённых случаев инфицирования за единицу времени (сутки); $E(t)$, $E^*(t)$ — интегрированная опасность, вероятность того, что процесс будет $E(t)$ или не будет $E^*(t)$ продолжаться до момента t ; $p(t)$ — интенсивность отказов, дифференцированная опасность, или риск, равный доле заболевших за единицу времени в численности чувствительного населения $S(t)$ (заболеваемость).

Показано [5], что пандемические кривые первой волны по качественным и количественным показателям лучше описываются функциями вероятности экстремальных событий — функцией Фреше распределения максимальных значений:

$$F^*(z) = \exp(-z^{-\alpha}), z > 0, \alpha > 0 \text{ при } z^{-\alpha} = \pm \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)], \quad (5)$$

где $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m$ — собственное время популяционной системы, $1/\theta$ — константа временного растяжения графиков. Увеличение значения θ относительных темпов хода собственного времени τ приводит к сокращению длительности эпидемического периода, что индивидуализирует процесс по странам. В момент $\tau = t_m$ будет $\tau = \tau_m$ и в окрестностях точки $t = t_m$ собственное время τ линейно приближается текущим временем $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m \approx \theta(t/t_m - 1) + t_m$; при $\theta = t_m$ величина $\tau = t$.

Функция плотности распределения равна

$$P(\tau) = \alpha \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)] \exp\{-\exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]\}. \quad (6)$$

Значение коэффициента α находится по положению $\tau_m(t_m) = t_m$ максимума функции $P(\tau_m) = P_m$: $\alpha = eP_m$. Кривая подтверждённых случаев заболевания за сутки $P(\tau)$ согласно уравнению (6) сначала быстро возрастает, а затем медленно опускается. Прогнозируется несколько эпидемических волн, каждая из которых аппроксимируется уравнением (6) (рис. 1) в данном случае в линейном приближении хода времени. Различие констант θ влияет на величину коэффициента $\alpha \leftrightarrow \alpha\theta/t_m$ в зависимости $P(t)$ от времени t .

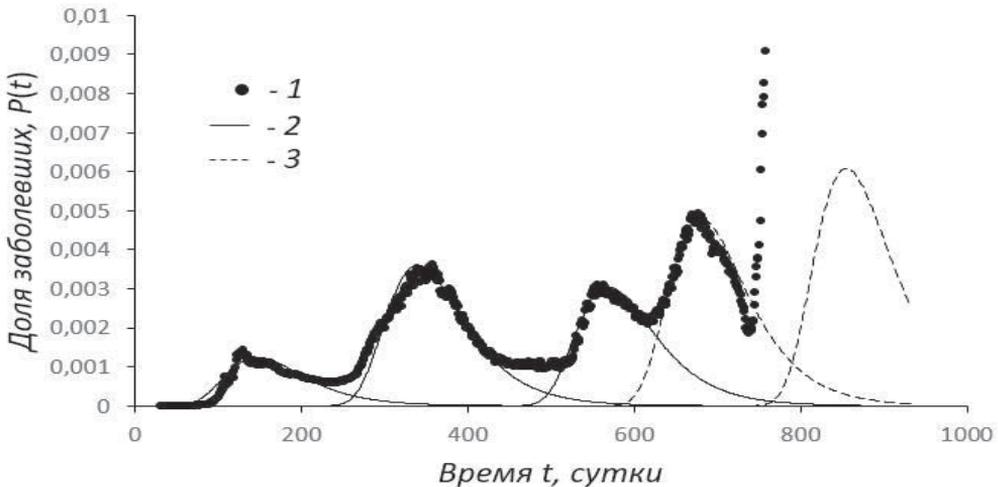


Рис. 1. Суточное изменение доли подтверждённых случаев заболевания COVID-19 в России: 1 — исходные данные; 2 — кривые аппроксимации данных по формуле (6) при $\tau = t$; 3 — прогноз изменений при сохранении пандемической ситуации

Fig. 1. Daily change in the proportion of COVID-19 confirmed cases in Russia: 1 — initial data; 2 — curves of data approximation according to the formula (6) when $\tau = t$; 3 — forecast of changes while

maintaining the pandemic situation

Источник: ВОЗ: [сайт]. — URL: <https://covid19.who.int/> (дата обращения: 30.10.2021).

Для функции Фреше интегрированная опасность $E^*(\tau) = -\ln F^*(z) = \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]$ и риск заболеть (заболеваемость) $p^*(\tau) = -dE^*(\tau) / d\tau = \alpha \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]$, где $p^*(\tau_m) = \alpha$ — приемлемый риск. Отсюда следует функция

$$P(\tau) / P_m = eE^*(\tau) \exp[-E^*(\tau)], \quad (7)$$

вид которой в координатах $E^*(\tau)$ не зависит от средовых параметров (τ_m, α) , поэтому она может быть использована в процессе мета-анализа для выделения общих закономерностей. Нормированная кривая функции (7) проходит через начало координат $(0, 0)$ при $E^*(t) = 0$, $F^*(\tau) = 1$ и точку максимума с координатами $(1, 1)$ при $E^*(\tau_m) = 1$.

Уравнения (4) для функции Фреше связаны с описанием механизма саморегулирования развития инфекционного процесса в показателях интегрированной опасности:

$$dE^*(\tau) / d\tau = -\alpha \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)] = -\alpha E^*(\tau), p^*(\tau) = \alpha E^*(\tau), \quad (8)$$

т.е. величины $p^*(\tau)$ и $E^*(\tau)$ пропорциональны с коэффициентом $p_m = \alpha$. Уравнение (8) показывает, как устойчивое уменьшение $E^*(\tau)$ с ходом времени τ регулируется текущей опасностью инфицирования $E^*(\tau)$. Выражение $p(\tau) = \alpha E^*(\tau)$ является вариантом универсального уравнения (3) общего вида

$$f(y) \leftrightarrow p(\tau) - p_m = \alpha [E^*(\tau) - E^*(\tau_m)] \quad (9)$$

– линейной зависимостью риска и опасности заболеть. Этот факт может быть использован для оценки адекватности выбранной модели исходным данным и выявления степени изменчивости приемлемого риска $p_m = \alpha$ по территориям.

Статистическая информация

Информационная основа исследования [5] базируется на статистических рядах данных по странам о фактах развития коронавирусной инфекции COVID-19, которые непрерывно формируются и хранятся в виде баз данных (БД) на нескольких международных серверах: сайты ВОЗ¹, Университета Джонса Хопкинса² и Worldmeters.info³. Источником первичной информации являются тысячи официальных ресурсов о текущей ситуации по коронавирусу: правительств, министерств здравоохранения, региональных организаций, которые сопоставляются и верифицируются. В России сбор такой информации осуществляется через Министерство здравоохранения. Официальная статистическая информация по стране и отдельным регионам о количестве регистрируемых случаев заболевания, выздоровевших и умерших ежедневно публикуется на специальном сайте⁴. Содержание статистической информации о случаях заражения, выздоровления, летальности и др. зависит от орга-

¹ ВОЗ: [сайт]. – URL: <https://covid19.who.int/> (дата обращения: 30.10.2021).

² Информационный центр Университета Джона Хопкинса по коронавирусу: [сайт]. – URL: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (дата обращения: 30.10.2021).

³ Пандемия коронавируса COVID-19: [сайт]. – URL: <https://www.worldometers.info/coronavirus/> (дата обращения: 30.10.2021).

⁴ Официальная информация о коронавирусе в России: [сайт]. – URL: stopkoronavirus.rf (дата обращения: 30.10.2021).

низации работы по её накоплению в каждой стране, поэтому оправдано применение в качестве показателей инфицирования относительных величин типа мер надёжности. Эффективность мета-анализа зависит от особенностей рядов эпидемиологических данных: есть гладкие ряды данных суточного прироста заболевших, удобные для обработки, и ряды данных с резкими изменениями значений, требующие предварительного сглаживания.

Данные по странам накапливаются и наглядно обрабатываются в электронных таблицах MS Excel по алгоритму описания статистического графика суточного прироста числа инфицированного COVID-19 населения за 2020–2022 годы. Рассчитывается вероятность потери здоровья (ненадёжности жизнедеятельности) чувствительным населением $S_0: F^*(t) = S(t)/S_0$. В качестве S_0 принимается число заболевших на момент t (25.10.2021 г.). Вычисляется плотность распределения моментов заражения (подтверждённых случаев заболевания) — доля суточного прироста заболевших $P(t) = F^*(t+1) - F^*(t)$ и другие показатели надёжности (2): интегрированная опасность $E^*(t) = -\ln F^*(t)$, риск $p(t) = E^*(t+1) - E^*(t)$. Суточные данные по плотности распределения доли заболевших $P(t)$ по странам подставляются в таблицу MS Excel, и автоматически рассчитываются коэффициенты модели и кривые аппроксимации.

По информации 2020 г. выявлен индивидуальный характер динамики заболевания населения разных стран, выраженный в количественных показателях подготовленности и управляемости эпидемической ситуацией. По показателю опасности $\ln E(t)$ развития эпидемии коронавируса выясняется, что по сравнению с другими странами население России слабо реагирует на пандемическую ситуацию и не в полной мере осознаёт необходимость соблюдения мер противодействия эпидемии, и требуется введение более строгих мер профилактики [6].

Уточнение вида модели в терминах теории надёжности и проверка ее на массовом материале показали, что лучшую аппроксимацию кривых роста доли инфицированных обеспечивает функция Фреше (5) распределения максимальных значений, в данном случае — моментов t подтверждения случаев заболевания. По данным первой (весенне-летней) волны развития пандемического процесса 2020 г. по странам продемонстрировано существование двух связанных $\alpha = eP_m$ показателей приемлемого риска $\alpha = 0,026$ /сутки и максимума $P_m = 0,0095$ /сутки кривой плотности распределения $P(t)$ ежесуточного заражения по моментам времени t , величина которых одинаковая по территориям [5]. Это означает, что развитие пандемии по странам относится к одному типу явлений, что позволяет привести зависимость $P(t)$ к одной типовой мета-аналитической модели $P(\tau)$ с постоянными коэффициентами.

Четвёртая волна пандемии коронавируса COVID-19 осенью 2021 г. в России и во всем мире проходила на фоне сложной политико-экономической ситуации с особенностями, связанными с вакцинацией и появлением новых штаммов коронавируса, при заражении которыми болезнь быстрее развивается с сокращённым инкубационным периодом до 4,5–5 дней и быстрым утяжелением клинических проявлений в течение нескольких дней после появления первых симптомов. Больные стали более заразными и могут инфицировать больше людей, которые сами легче заражаются. Среди тяжёлых пациентов, которых не удаётся спасти, появились молодые люди старше 30 лет, у которых нет хронических заболеваний. Медики отмечают, что в красных зонах мало пациентов, которые сделали прививку — среди них умирают единицы с хроническими заболеваниями и солидным возрастом. Врачи считают, что в России практически не было серьёзных ковидных ограничений, поэтому заболеваемость и смертность стремительно растут⁵.

Подъём пятой волны пандемии в России состоялся в середине января 2022 г. и связан с омикрон-штаммом SARS-CoV-2. Заболевание протекает легче или так же, как при заражении дельта-штаммом, но поражаются переболевшие и вакцинированные, дети

⁵ Люди быстро подхватывают вирус и быстро «тяжелееют»: врачи — о новых симптомах ковида и четвёртой волне // Новости онлайн: [сайт] — URL: <https://74.ru/text/health/2021/10/04/70171988/> (дата обращения: 11.11.2021).

и молодежь. Его быстрое распространение приводит к дополнительной нагрузке на систему здравоохранения. По данным статистики на 25.10.2021 число заболевших в России равно $I=8,2$ млн человек, умерших от COVID-19 — $D=227,5$ тыс. человек, т.е. летальность в среднем составила $D/I=0,0279$. С января 2021 г. летальность увеличилась почти в 2 раза с 1,87 до 3,60%, что совпало с началом массовой вакцинации и объясняется ростом тяжести заболевания по разным причинам. Летальность оказалась выше в 4 раза среди непривитых от коронавируса, чем вакцинированных. Общая смертность возросла на 18% по сравнению с прошлым годом. С января 2022 г. текущая летальность резко сократилась до 1,04%.

Мета-анализ рядов данных

Мета-зависимость (9) в виде $p(\tau) = \alpha E^*(\tau) + \beta$ достоверно проявляется в реакции населения РФ и удовлетворяет формуле (9) $p(\tau) = 0,0217E^*(\tau) - 0,0169$ с коэффициентом корреляции $R=0,919$. Коэффициент $\alpha = 0,0218$ соответствует мере приемлемого риска, которая изменяется по странам, и в 24 из них при $R>0,7$ рассчитанный интервал $\alpha = 0,02270 \pm 00178$ включает значение α по России. В общем случае коэффициент α варьирует по странам и континентам $\beta = -0,988\alpha + 0,00497$ ($R=0,761$) согласно соотношению (2), когда по аналогии с уравнениями (1) и (9):

$$p(\tau) - 0,00497 = \alpha[E^*(\tau) - 0,988], \quad (10)$$

то есть α является переменной величиной, когда зависимость $p(\tau)$ от $E^*(\tau)$ представляет собой пучок линий с наклоном α по каждой стране и ситуации. Центр пучка $[p(\tau_m), E^*(\tau_m)]$ находится в точке $[0,00497; 0,988]$. Уменьшение значения α соответствует увеличению длительности волны эпидемического процесса. Центральное положение соответствует $E^*(\tau_m) \approx 1$.

По формуле (7) нормированное значение $P(\tau)$ отношением $P_n(\tau) = P(\tau) / P_m$ в идеальном варианте должно определяться только величиной интегрированной опасности $E^*(\tau)$. Для кривых отдельных волн эпидемии для приведения к общему виду эта величина трансформируется $E^*(\tau) \rightarrow e^*(\tau)$ для каждой страны так, чтобы графики проходили через начало координат (0, 0), когда нормированное значение $e^*(\tau) = 0$, и точку максимума (1, 1) при $P(\tau) / P_m = 1$ и $e^*(\tau) = 1$. Общее для всех стран уравнение преобразования $e^*(\tau) = [1,61E^*(\tau) - 0,78]^\gamma$, $\gamma = 1,45$ показывает, что линейная при $\gamma = 1$ зависимость (7) в общем случае нелинейна $\gamma = 1,45$, т.е. имеет место взаимодействие показателей опасности $E^*(\tau)$, обычно связанное с положительным эффектом самоорганизации.

Графическая зависимость $P_n(\tau) = P(\tau) / P_m$ от $e^*(\tau)$ (рис. 2) значений для отдельных стран соответствует расчетной кривой $P_n[e^*]$ вида (7). Выявляется сходство графиков $P_n[e^*]$ для населения разных стран (рис. 2в), что позволяет рассматривать разные зависимости (рис. 2а, б) как единую мета-закономерность, которая удовлетворяет уравнению (7) для нормированных значений $E^*(\tau) \rightarrow e^*(\tau)$ и учитывает 94% точек на графике. Для России сходство эмпирических и теоретических показателей зависимости $P_n[e^*]$ очень высокое ($R=0,97$).

При проведении мета-анализа происходит сжатие информации с выделением постоянных коэффициентов и общих закономерностей связи характеристик систем в «чистом» виде в центральной информативной части рядов данных одной волны. Минимальный разброс (однородность) данных вокруг графиков теоретических формул опре-

делает достоверность связей и позволяет их использовать в различных условиях для обработки рядов данных и решения задач прогнозирования. Графики на рис. 2 подтверждают работоспособность формулы (7), а значит и уравнений (5) и (6) в статистических исследованиях, но не обязательно их окончательно обосновывает, поскольку рекомендуемый вид формулы $E^*(\tau) = \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]$ может быть иной. Подтверждением формулы становится линейная зависимость $\ln E^*(\tau) = -\alpha(\tau - \tau_m) = -\alpha\tau + \alpha\tau_m$.

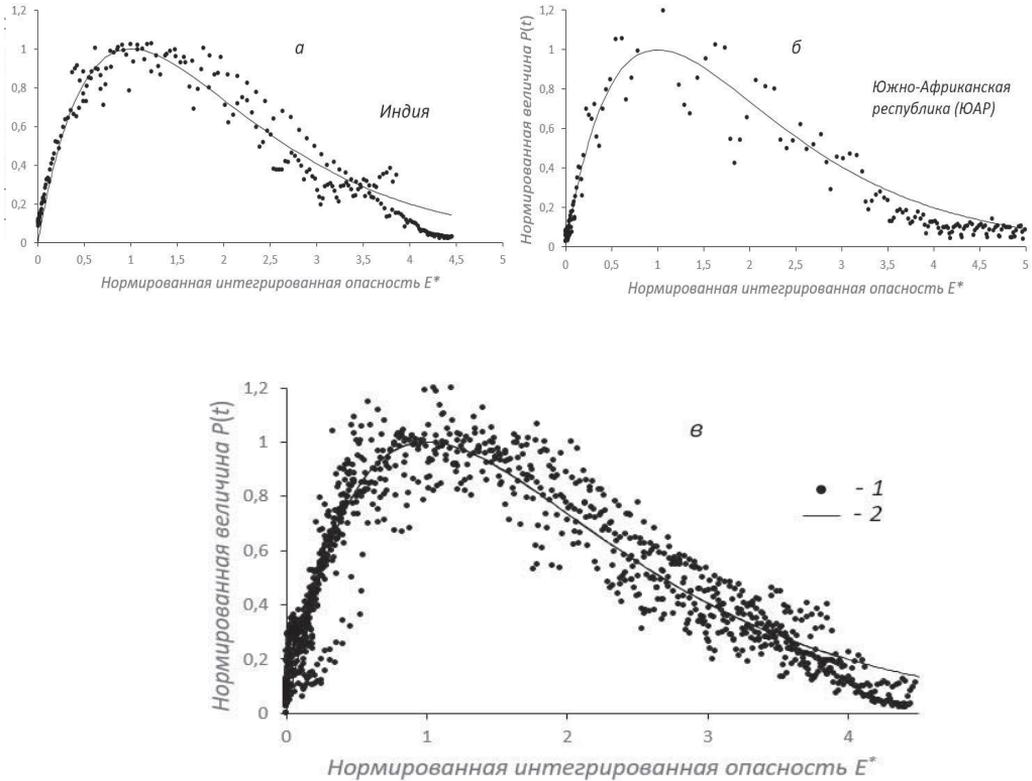


Рис. 2. Точечные графики зависимости нормированной доли $P_n(\tau) = P(\tau) / P_m$

подтверждённых случаев второй волны заболевания коронавирусом COVID-19 от величины $e^*(\tau)$ нормированной интегрированной опасности $E^*(\tau)$ в Индии (а) и ЮАР (б), а также с наложением графиков (в) для разных стран (Россия, США, ЮАР, Мексика, Индия, Казахстан, Канада): 1 — исходные данные; 2 — кривая аппроксимации данных по формуле (7).

Fig. 2. The dot plots of the dependence of the normalized proportion $P_n(\tau) = P(\tau) / P_m$ of confirmed cases of the second wave of COVID-19 coronavirus disease on the value of $e^*(\tau)$ of standardized integrated hazard $E^*(\tau)$ in India (a) and South Africa (б), as well as with overlapping graphs of different countries (Russia, USA, South Africa, Mexico, India, Kazakhstan, Canada): 1 — initial data; 2 — the curve of data approximation according to the formula (7).

Источник: по данным Информационного центра Университета Джона Хопкинса по коронавирусу: [сайт]. — URL: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (дата обращения: 30.10.2021).

В частности, для населения России при $\tau = t$ в период первой волны пандемии получается $\ln E^*(\tau) = -0,0217\tau + 4,072$, $\tau_m = 188$ дней, $R = 0,99$. Здесь коэффициент $\alpha = 0,0217$ совпадает по значению с величиной, полученный по формуле (9) для российских рядов данных. Такое сходство просматривается и для других стран, что позволяет использовать уравнение (6) для дальнейших расчётов.

Для вычисления доли подтверждённых случаев заболевания коронавирусом COVID-19 в России $P_k(t)$ (см. рис. 1) для каждой эпидемической волны k применяется уравнение (6) в реальном времени $\tau = t$ с поправкой K_k на амплитуду волны: $P_k(t) = K_k P(t)$. Коэффициенты уравнения равны $\alpha = 0,0217$ и $P_m = 0,008$. Расположение сезонных пиков $\tau_m = t_{mk}$ доли заболевших различается примерно на 179 дней, т.е. на полгода. Для прогнозирования необходимо заранее знать величину K_k и расположение t_{mk} (модальные значения) пиков инфицирования, что примерно определяется по тенденциям их роста: $t_{mk} = 170k$, $K_k = 0,139k$. В итоге появляется возможность рассчитать эпидемические кривые (см.рис.1), основываясь на мета-аналитической формуле (6) $P(t) = P_k(t) / K_k$ с поправками на амплитуду K_k и расположение t_{mk} пиков эпидемических волн.

На рис. 1 показаны первые 4 волны эпидемии COVID-19 в России за два года и начало пятой волны: наблюдаемые данные и прогнозные расчеты демографической реакции населения, выполненные по уравнению (6). Расчеты (пунктирная кривая рис. 1) проводились на момент 25.10.2021 г. (666 день наблюдения) и до начала января 2022 г. подтверждались текущей статистикой по заболеваемости COVID-19. Однако с 14.01.2022 г. (747 день) тенденция нарушилась в связи с появлением нового омикрон-штамма коронавируса, эпидемия которого и по времени начала и по масштабу проявления коренным образом отличается.

Выводы

Кривые, описывающие реакцию населения разных стран на распространение коронавируса COVID-19, имеют различающуюся временную структуру, в которой проявляются скрытые мета-аналитические закономерности. Это позволяет рассматривать различные графики как один и тот же график, сопоставлять кривые путем сравнения их с эталоном, в качестве которого могут использоваться ряды данных по заболеваемости населения РФ. Метатеоретической основой мета-анализа является методология расчленения многообразия связей переменных, характеризующих ситуацию — разделения объектов по условиям среды реализации этих связей в различных временных и пространственных обстоятельствах. В каждом ситуационном слое эпидемические кривые описываются функциями надёжности — вероятности проявления экстремальных событий, а именно, — функцией Фреше распределения максимальных значений. Функция удовлетворяет дифференциальному уравнению, отражающему процесс саморегулирования ситуации в показателях изменения опасности заболевания населения и может быть уточнена с учетом нелинейного эффекта самоорганизации. Кривые инфицирования послойно сравниваются путём сопоставления модальных значений: временного расположения пиков эпидемических волн и их амплитуды по разным странам.

Статистическая проверка гипотез мета-анализа указывают на достоверность теоретической связи риска заразиться с опасностью заболеть коронавирусом COVID-19 и зависимости нормированной доли подтверждённых случаев заболевания в разных странах от интегрированной опасности. Эти связи позволяют аналитически аппроксимировать ряды данных и разрабатывать прогнозы развития пандемии, основывающиеся на мета-анализе.

ваясь на знании тенденций роста амплитуды и изменения положения волн эпидемиологического процесса. Мета-аналитические исследования направлены на выявление общих закономерностей в разнородных проявлениях этого процесса, получение функциональной оценки величины эффекта (зависимости), показывающей, что население разных стран одинаково реагирует на опасность. В исследовании представлена общая схема мета-анализа, которая необходима для дальнейшей обработки большого постоянно обновляющегося массива пространственно-временных эпидемиологических данных.

Практически решается обратная задача моделирования — выявление скрытых закономерностей развития пандемии для поиска мета-аналитического механизма регулирования, необходимого в разных странах для управления критической ситуацией, мерой сложности которой становится операционная единица, соответствующая опасности ситуации, что имеет важное значение для информационного обеспечения устойчивого развития общества.

Литература и Интернет источники

1. **Будилова, Е. В.** Влияние демографических и социально-экономических факторов на популяционное здоровье населения / Е. В. Будилова, М. Б. Лагутин, Л. А. Мигранова // *Народонаселение*. — 2019. — № 3. — С. 80–92. DOI: 10.24411/1561-7785-2019-00028.
2. **Javed, B.** The coronavirus (COVID-19) pandemic's impact on mental health / B. Javed, A. Sarwer, E. B. Soto, Z. Mashwani // *International Journal of Health Planning and Management*. — 2020. — No. 5. — P. 993–996. DOI: 10.1002/hpm.3008.
3. **Chenghu, Z.** COVID-19: Challenges to GIS with Big Data / Z. Chenghu, S. Fenzhen, P. Tao, Zh. An, Y. Du, L. Bin, C. Zhidong, W. Juanle, Y. Wen, Zh. Yunqiang, S. Ci et al. // *Geography and Sustainability*. — 2020. — No. 1. — P. 77–87.
4. **Черкашин, А. К.** Геоинформационный мониторинг и математическое моделирование развития пандемии коронавируса COVID-19 / А. К. Черкашин, С. И. Лесных, Н. Е. Красноштанова // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. — 2021. — Т. 21. — № 1. — С. 17–35. DOI: 10.38028/ESI.2021.21.1.002.
5. **Черкашин, А. К.** Национальные особенности изменения опасности развития пандемии коронавируса COVID-19: математическое моделирование и статистический анализ / А. К. Черкашин // *Народонаселение*. — 2020. — Т. 25. — № 3. — С. 83–95. DOI: 10.19181/population.2020.25.3.8.
6. **Гришина, Е. Е.** Эпидемиологический кризис 2020 г.: материальное положение населения и меры поддержки / Е. Е. Гришина // *Народонаселение*. — 2021. — Т. 24. — № 1. — С. 15–25. DOI: 10.19181/population.2021.24.1.2.
7. **Keckojevic, A.** The impact of the COVID-19 epidemic on the mental health of undergraduate students in New Jersey, cross-sectional study / A. Keckojevic, C. H. Basch, M. Sullivan, N. K. Davi // *PLOS ONE*. — 2020. — Vol. 15. — No. 9.
8. **Cao, W.** The psychological impact of the COVID-19 epidemic on college students in China / W. Cao, F. Ziwei, G. Hou, M. Han, X. Xu, J. Dong, J. Zheng // *Psychiatry Research*. — 2020. — Vol. 287. — No. 5. — P. 34–40.
9. **Alzueta, E.** How the COVID-19 pandemic has changed our lives: A study of psychological correlates across 59 countries / E. Alzueta, P. Perrin, F. C. Baker, S. Caffarra, D. Ramos-Usuga, D. Yuksel, J. C. Arango-Lasprilla // *Journal of Clinical Psychology*. — 2021. — Vol. 77. — No. 3. DOI: 10.1002/jclp.23082.
10. **Черкашин, А. К.** Особенности географического мета-анализа / А. К. Черкашин // *Географический вестник*. — 2021. — № 2. — С. 6–21. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-6-21.

11. **Турдалиева, Б. С.** Мета-анализ как инструмент доказательной медицины / Б. С. Турдалиева, Н. У. Рахматуллаева, В. Б. Тен [и др.] // Вестник КазНМУ.— 2011.— № 4.— С. 99–105.
12. **Gurevitch, J.** Meta-analysis in ecology / J. Gurevitch, P. S. Curtis, M. H. Jones // *Advances in Ecological Research*.— 2001.— Vol. 32.— P. 199–247.
13. **Реброва, О. Ю.** Мета-анализы и оценка их методологического качества. Русскоязычная версия вопросника AMSTAR / О. Ю. Реброва, В. К. Федяева // *Медицинские технологии. Оценка и выбор*.— 2016.— № 1.— С. 10–16.
14. **Бейли, Н.** Математика в биологии и медицине / Н. Бейли.— Москва : Мир, 1970.— 326 с.
15. **Kermack, W.** Contributions to the mathematical theory of epidemics—part III. Further studies of the problem of endemicity / W. Kermack, A. McKendrick // *Bulletin of Mathematical Biology*.— 1991.— Vol. 5.— No. 3(1–2).— P. 89–118.

Информация об авторах:

Черкашин Александр Константинович, д.геогр.н., проф., главный научный сотрудник, зав. лабораторией теоретической географии Института географии им. В.Б. Сочавы 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; РИНЦ Author ID: 58425.

Красноштанова Наталья Евгеньевна, к.геогр.н., научный сотрудник Института географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия.

Контактная информация: e-mail: kne1988@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-7643-6693; Researcher ID Web of Science: J-9702-2017; РИНЦ Author ID: 770074.

DOI: 10.19181/population.2022.25.1.12

META-ANALYSIS OF THE DEMOGRAPHIC RESPONSE OF POPULATIONS IN DIFFERENT COUNTRIES TO THE SPREAD OF COVID-19 CORONAVIRUS

Alexander K. Cherkashin*, Natalia E. Krasnoshtanova

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(1 Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, Russian Federation, 664033)*

**E-mail: akcherk@irnok.net*

Funding:

The study was funded by the State assignment AAAA-A21-121012190056-4.

For citation:

Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Meta-analysis of the demographic response of populations in different countries to the spread of COVID-19 coronavirus. *Narodonaselenie [Population]*. 2022. Vol. 25. No. 1. P. 141-154. DOI: 10.19181/population.2022.25.1.12. (in Russ.)

Abstract. *The 2020 coronavirus infection COVID-19 (SARS-CoV-2) pandemic continued with renewed strength in 2021–2022, and the seasonal wave dynamics of the spread of the disease in the regions of the world were pronounced. The issues of studying the demographic response of populations in different countries to infectious threats remain relevant. The study is based on the methodology of stratifying (fibering) the diversity (manifold) of relations of the population reaction characteristics according to conditions of the environment of implementation of these relations in different temporal and spatial circumstances. In meta-analysis procedures, systemic relationships are compared layer*

by layer (fibers) so that different systems are represented as one system, which is subject to general patterns abstracted from local conditions and territorial features. In the study, each situational layer is represented by an epidemiological curve described using a Fréchet distribution function with individual coefficients. A meta-analytic layer-by-layer comparison of the curves is made by comparing the positions of the epidemic wave peaks and their amplitudes for each country. Despite the differences in socio-economic, climatic, political, and other conditions of the spread of the new coronavirus, general patterns were identified in heterogeneous situations and generalized estimates of the effect size were obtained, showing that populations in different countries generally respond in the same way according to the same law of self-regulation of the infection risk. The presented general scheme of implementing a meta-analysis of global spatiotemporal epidemiological data allows us to identify dependencies as invariant to territorial features of coronavirus spread.

Keywords: COVID-19, population demographic response, meta-analysis of data series, mathematical modeling, risk and hazard of infection.

References and Internet sources

1. Budilova E. V., Lagutin M. B., Migranova L. A. Vliyaniye demograficheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh faktorov na populyatsionnoye zdorov'ye naseleniya [Impact of the demographic and socio-economic factors on population health]. *Narodonaselenie [Population]*. 2019. No. 3. P. 80–92. (in Russ.)
2. Javed B., Sarwer A., Soto E. B., Mashwani Z. The coronavirus (COVID-19) pandemic's impact on mental health. *International Journal of Health Planning and Management*. 2020. Vol. 35. No. 5. P. 993–996. DOI: 10.1002/hpm.3008.
3. Chenghu Z. et al. COVID-19: Challenges to GIS with Big Data. *Geography and Sustainability*. 2020. No. 1. P. 77–87.
4. Cherkashin A. K., Lesnykh S. I., Krasnoshtanova N. E. Geoinformatsionnyj monitoring i matematicheskije modelirovaniye razvitiya pandemii koronavirusa COVID-19 [Geoinformation monitoring and mathematical modeling of the COVID-19 coronavirus pandemic development]. *Informatsionnyye i matematicheskije tehnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management]*. 2021. No. 1(21). P. 17–35. DOI: 10.38028/ESI.2021.21.1.002. (in Russ.)
5. Cherkashin A. K. Nacional'nyye osobennosti izmeneniya opasnosti razvitiya pandemii koronavirusa COVID-19: matematicheskije modelirovaniye i statisticheskij analiz [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.)
6. Grishina E. E. Epidemiologicheskij krizis 2020 g.: material'noje polozheniye naseleniya i mery podderzhki [Epidemiological crisis of 2020: financial situation of the population and social support]. *Narodonaselenie [Population]*. 2021. Vol. 24. No. 1. P. 15–23. DOI: 10.19181/population.2021.24.1.2. (in Russ.)
7. Kecojevic A., Basch C. H., Sullivan M., Davi N. K. The impact of the COVID-19 epidemic on the mental health of undergraduate students in New Jersey, cross-sectional study. *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15. No. 9.
8. Cao W., Ziwei F., Hou G., Han M., Xu X., Dong J., Zheng J. The psychological impact of the COVID-19 epidemic on college students in China. *Psychiatry Research*. 2020. Vol. 287. No. 5.
9. Alzueta E. et al. How the COVID-19 pandemic has changed our lives: A study of psychological correlates across 59 countries. *Journal of Clinical Psychology*. 2021. Vol. 77. No. 3.

10. Cherkashin A. K. Osobennosti geograficheskogo meta-analiza [Peculiarities of geographical meta-analysis]. *Geograficheskij vestnik [Geographical Bulletin]*. 2021. No. 2. P. 6–21. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-6-21. (in Russ.)
11. Turdalieva B. S. et al. Meta-analiz kak instrument dokazatel'noj meditsiny [Meta-analysis as a tool of evidence-based medicine]. *Vestnik KazNMU [Bulletin of the Kazakh National Medical University]*. 2011. No. 4. P. 99–105. (in Russ.)
12. Gurevitch J., Curtis P. S., Jones M. H. Meta-analysis in ecology. *Advances in Ecological Research*. 2001. Vol. 32. P. 199–247.
13. Rebrova O. Yu., Fedyaeva V. K. Meta-analizi i otsenka ih metodologicheskogo kachestva. Russkojazychnaja versija voprosnika AMSTAR [Meta-analyses and assessment of their methodological quality. Russian version of AMSTAR questionnaire]. *Meditsinskie tehnologii. Otsenka i vybor [Medical Technologies. Assessment and Choice]*. 2016. No. 1. P. 10–16. (in Russ.)
14. Bailey N. Matematika v biologii i meditsine [*Mathematics in Biology and Medicine*]. Moscow. Mir [World]. 1970. 326 p. (in Russ.)
15. 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.

Information about the authors:

Cherkashin Alexander Konstantinovich, Doctor of Geography, Professor, Chief Researcher, Head of laboratory, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation.

Contact information: e-mail: akcherk@irnok.net; ORCID: 0000-0002-7596-7780; Researcher ID Web of Science: K-2418-2017; Elibrary Author ID: 58425.

Krasnoshtanova Natalia Evgenievna, Candidate of Geography, Researcher, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation.

Contact information: e-mail: kne1988@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-7643-6693; Researcher ID Web of Science: J-9702-2017; Elibrary Author ID: 770074.

Статья поступила в редакцию 07.12.2021, одобрена 28.02.2022, опубликована 30.03.2022.