



Научная статья

РИСКИ СМЕРТИ, СВЯЗАННЫЕ С ТЕМПЕРАТУРАМИ: ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ В РЕГИОНАХ РОССИИ В 2004–2019 ГГ.

М.Р. МаксименкоНациональный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ),
Российская Федерация, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 11

В условиях климатических изменений и усиления теплового стресса возрастает необходимость изучения зависимости смерти от температур воздуха. Для проведения таких исследований необходимы многолетние временные ряды агрегированных оценок температур. Для большей части стран мира существует два основных типа источников данных о температурах: наземные метеорологические наблюдения и растровые данные. Первые более точно отражают местную специфику, не всегда обеспечивают полное покрытие территории. Растровые данные позволяют охватить всю территорию, но не всегда учитывают локальные микроклиматические особенности. В данной работе проводится сравнение этих источников данных для анализа ассоциации смертности с температурой на примере регионов России.

Для оценки зависимости «доза – эффект» использовалась двухуровневая модель. На первом уровне зависимости смертности от температур по регионам рассчитаны при помощи модели с распределенными лагами. На втором уровне обобщенные оценки получены при помощи метарегрессии со случайными эффектами.

Зависимость смертности от температур в России демонстрирует типичную форму J-образной кривой с более высокими рисками, связанными с холодом. При этом при использовании растровых данных смертность, связанная с жарой, была выше, чем на основе данных метеорологических наблюдений. Как правило, температуры с минимальными рисками смерти находятся между 15 и 20 °С, причем в более теплых регионах эти значения оказывались выше.

Полученные результаты показывают общую сопоставимость растровых и точечных данных для анализа смертности. Тем не менее в ряде регионов, в первую очередь в крупных и малонаселенных, в силу различных причин наблюдались расхождения в оценках.

Ключевые слова: изменение климата, атмосферный реанализ, температура воздуха, температурный стресс, растровые данные, наземные метеорологические наблюдения, смертность населения, регионы РФ.

Климатические изменения приводят к увеличению частоты и интенсивности волн жары, периодов устойчиво высоких температур, во время которых непропорционально быстро растут риски смерти, в особенности наиболее уязвимых групп населения [1]. Причем некоторые исследования указывают, что потенциальное снижение аналогичных рисков, связанных с холодом, может не компенсировать растущую смертность, связанную с жарой [2]. В частности, прогнозируется, что в Европе, даже с учетом адаптации населения, число смертей, ассоциированных с температурами, вырастет практически повсеместно [3]. В связи с этим изучение влияния температур на здоровье и смертность населения становится все более актуальным и требует более детального анализа.

В наибольшей степени изучена взаимосвязь рисков смерти под воздействием экстремально высоких температур. За счет того, что резкие всплески

смертности в периоды жары всегда представляли серьезную проблему для общественного здравоохранения, они на протяжении значительного времени изучались в рамках эпидемиологических исследований [4]. Накопленные данные свидетельствуют о значительном влиянии волн жары на риски для здоровья, в том числе связанные с болезнями системы кровообращения и органов дыхания [5–7]. Также во время волн жары в связи с лесными пожарами, застоянием воздушных масс, появлением «островов жары» и другими факторами существенно растет концентрация загрязняющих веществ в атмосфере, что является дополнительным фактором риска [8, 9].

В то же время избыточная смертность в холодный период остается значительно менее исследованной, а существующие данные о причинно-следственных связях и физиологических механизмах имеют более ограниченную доказательную базу

© Максименко М.Р., 2025

Максименко Михаил Романович – младший научный сотрудник (e-mail: mikemaksimenko@gmail.com; тел.: 8 (915) 476-60-68; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-6676>).

[10]. Тем не менее эпидемиологические исследования демонстрируют, что именно риски, связанные с холодом, вносят наибольший вклад в общее бремя смертности, ассоциированной с температурами [11].

Особенную методологическую сложность представляет точная оценка того температурного стресса, который человек воспринимает. Это связано с тем, что влияние температур в значительной мере зависит от целого ряда сопутствующих факторов: влажности, скорости ветра, атмосферного давления и др. [12]. Для учета этих показателей зачастую применяются различные биометеорологические индексы, расчет которых строится на комбинации этих параметров с температурами для оценки интегрального значения теплового стресса [13–15]. Тем не менее в большинстве случаев основные результаты оказываются схожими и при использовании среднесуточных температур воздуха для прогнозирования рисков избыточной смертности [12].

Российский опыт исследований смертности, ассоциированной с температурами, основывается, как правило, на работах, посвященных различным городам России. Первые работы были сосредоточены на анализе рисков, вызванных холодом, и особенностях адаптации населения к низким температурам¹. Однако систематические эпидемиологические исследования начали проводиться только в середине 2000-х гг. [16–18]. В этих работах выявлен статистически значимый прирост смертности в отдельных группах во время волн жары в 1999 и 2001 гг., а также волны холода в 2006 г.

В частности, имеются свидетельства о смертности во время волн жары и холода на юге [19–21], севере [7, 14, 22], северо-западе [23], в Сибири [24] и на Дальнем Востоке [25, 26], в Москве [9].

Значительная часть работ фокусируется на оценке избыточной смертности во время волн жары или холода по возрасту и причине смерти или на построении ассоциации температур с рисками смерти в рамках отдельных городов. Также проводились сравнения различных биометеорологических индексов как предикторов смертности [14, 21]. Отдельное внимание уделялось взаимодействию температур с загрязнением воздуха как дополнительному фактору риска [9]. Кроме того, рассматривалось влияние продолжительности волн жары и холода на уровень смертности [20].

Общие выводы исследований свидетельствуют об избыточной смертности как во время волн жары, так и во время волн холода, однако конкретные уровни риска зависят от географических особенностей, исследуемых групп населения, критериев температурных волн, методологических параметров и др. Например, на примере Волгограда, Ростова-на-Дону

и Астрахани было показано, что риски смерти во время жары превышают аналогичные риски во время волн холода [19, 20]. Напротив, в Мурманске, Архангельске и Магадане риски, связанные с холодом, оказались выше [7]. В исследованиях на примере Хабаровска и Красноярска было установлено, что население обоих городов испытывает избыточную смертность как во время волн жары, так и во время волн холода. При этом для Хабаровска более высокие риски смерти наблюдались в жару [26], тогда как для Красноярска – во время волн холода [24].

Работ, посвященных оценке влияния температур на смертность на региональном уровне, сравнительно немного [27–29]. В них риски, связанные с холодом, в целом оказываются выше, однако анализ осложняется широкими доверительными интервалами оценок.

Подходы к анализу данных в экологической эпидемиологии. Информация о состоянии окружающей среды (температуры, загрязнения воздуха и др.) представлена данными наземных наблюдений и растровыми данными. Наземные наблюдения обеспечивают высокую точность данных непосредственно в точках измерения, благодаря чему часто рассматриваются как «золотой стандарт». Однако они не могут обеспечить полного географического покрытия. Кроме того, зачастую станции (в особенности метеорологические) располагаются в нетипичных местах: аэропортах, периферийных районах крупных городов, что снижает их применимость для оценок факторов риска в местах проживания людей [30, 31].

Растровые данные о температурах формируются на основе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) либо интерполяции и различных геостатистических методов. Этот подход обеспечивает сплошное покрытие всей изучаемой территории. Однако ошибки измерений, расчетов и агрегирования ограничивают их точность и применимость как источника сведений о состоянии окружающей среды [32]. Глобальные растровые продукты, обладая сравнимой детализацией во времени, зачастую имеют слишком низкое пространственное разрешение и отражают реальные условия лишь в усредненном виде, без учета локальных паттернов [33], и оказываются доступными лишь с определенным лагом. А наборы растровых данных со сверхвысоким разрешением из-за ограниченного охвата не позволяют проводить анализ в пределах больших по площади регионов.

Одним из источников растровых данных о температурах, используемых в экологической эпидемиологии, являются атмосферные реанализы. Они основываются на данных ДЗЗ, наземных метеорологических наблюдениях и моделях циркуляции атмосферы, что позволяет создавать непрерывные вре-

¹ Winter mortality and cold stress in Yekaterinburg, Russia: interview survey / G.C. Donaldson, V.E. Tchernjavskii, S.P. Ermakov, K. Bucher, W.R. Keatinge // *BMJ*. – 1998. – Vol. 316, № 7130. – P. 514–518. DOI: 10.1136/bmj.316.7130.514; Cold related mortalities and protection against cold in Yakutsk, eastern Siberia: observation and interview study / G.C. Donaldson, S.P. Ermakov, Y.M. Komarov, C.P. McDonald, W.R. Keatinge // *BMJ*. – 1998. – Vol. 317, № 7164. – P. 978–982. DOI: 10.1136/bmj.317.7164.978

менные ряды и составлять ретроспективные прогнозы. Однако, поскольку они представляют собой модельные расчеты, часто они неспособны учесть локальные погодные условия [34]. Тем не менее многочисленные исследования указывают на их взаимную сопоставимость с другими источниками данных для анализа смертности [35, 36].

Дополнительные сложности связаны с расчетом агрегированного уровня температур в пределах определенной территории, так как выбор конкретного метода расчета может оказаться столь же критичным, как и выбор того или иного источника данных [37]. Наиболее простым и интуитивно понятным методом агрегирования является усреднение всех имеющихся значений [38]. Однако зачастую такие оценки оказываются нерепрезентативными. Например, ситуацию в приграничных районах могут гораздо точнее отражать наблюдения в соседних регионах, из-за чего иногда стоит расширить выборку метеостанций за счет буферной зоны. Усреднение также не позволяет учесть различия, связанные с неоднородностью расселения. Для этого возможно учитывать каждую метеостанцию с весом, обратно пропорциональным ее расстоянию до центра региона. В этом случае наиболее репрезентативной центральной точкой, отражающей особенности расселения, является центр населенности. Центр населенности региона – это точка, расстояние от которой до всех остальных точек внутри региона с учетом их весов по численности населения будет наименьшим.

При использовании растровых данных для агрегированной оценки теплового стресса возникает аналогичная проблема учета неравномерности расселения [39]. Для решения этой проблемы дополнительно используют растровые поверхности плотности населения. Взвешенные по численности населения значения температур намного более точны в качестве агрегированных оценок теплового стресса.

В российской практике большинство исследований смертности, связанных с температурами, проводилось на уровне отдельных городов, поэтому в качестве данных о температурах обычно использовались измерения с наземных станций [40]. Как правило, вне Москвы информация о температурах доступна лишь на основе сети станций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета), данными которой и пользовалось большинство исследователей. При этом вследствие анализа в пределах отдельных городов проблем агрегирования и усреднения данных в работах не возникало. Исследований, посвященных изменению смертности в результате колебания

температур на региональном уровне, намного меньше, и в них, как правило, также используются точечные данные с наземных станций [28, 29]. Растровые данные и данные реанализов для изучения смертности, связанной с температурами, пока используются достаточно редко, хотя и представляют значительный потенциал для анализа в силу возможности полного покрытия территории.

В настоящей работе предполагается провести региональные оценки рисков смерти, связанных с температурами воздуха, рассчитанных на основе двух источников данных: точечных наземных наблюдений и растровых данных реанализа. Предполагается, что существенных различий между двумя источниками данных не будет, однако наибольшие расхождения будут наблюдаться для рисков, связанных с жарой.

Материалы и методы. Исследование охватывает период 2004–2019 гг., характеризующийся устойчивой тенденцией снижения смертности в России в целом. Анализ включал 80 регионов РФ с непрерывными временными рядами данных. Из рассмотрения были исключены Республика Крым и г. Севастополь, данные для которых доступны лишь с 2015 г. Кроме того, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа были включены в состав Тюменской области, а Ненецкий автономный округ – в состав Архангельской области.

Все сведения о смертности и усредненных значениях температур в регионах были агрегированы на уровне недель. Хотя дневные ряды способны отразить влияние краткосрочных эффектов более точно, использование недельных данных демонстрирует сопоставимые по качеству и репрезентативности результаты [41].

В качестве основного источника демографических данных использовалась Российская база данных краткосрочных колебаний смертности (РосБКС), содержащая понедельную статистику о смертности по регионам РФ за 2000–2021 гг.² База данных основана на деперсонифицированных микроданных Росстата, агрегированных по регионам на уровне недель³. В качестве исследуемого показателя использовались еженедельные стандартизованные коэффициенты смертности (СКС) с использованием Европейского стандарта населения 2013 г.⁴, из-за чего влияние эффектов возрастной структуры на оценки отношения смертности и температур было исключено [42]. Для оценки среднегодовой численности населения использовались данные Российской базы данных по рождаемости и смертности (РосБРС), рассчитанные на основе данных Росстата, разработанной Центром

² Российская база данных краткосрочных колебаний смертности [Электронный ресурс] // Международная лаборатория исследований населения и здоровья НИУ ВШЭ. – URL: <https://demogr.hse.ru/russtmf> (дата обращения: 17.04.2025).

³ За исключением 9–13 недель 2012 г. в Псковской области.

⁴ Eurostat. Revision of the European Standard Population. Report of Eurostat's task force: 2013 edition // Publications Office of the European Union. DOI: 10.2785/11470

демографических исследований Российской экономической школы (ЦДИ РЭШ)⁵. Данные о численности населения использовались без пересчета с учетом итогов переписи 2021 г.

Для оценки рисков, связанных с тепловым стрессом, для каждого региона в разрезе недель были рассчитаны средние температуры воздуха с использованием двух источников данных: измерений наземных метеорологических станций и растровых данных атмосферного реанализа.

В качестве источников точечных данных использовались недельные средние температуры воздуха, рассчитанные на основе данных наземных метеостанций из базы «Аисори-М», предоставляемой Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД)⁶. Этот массив включает срочные метеорологические наблюдения с 600 станций, охватывающих территорию России и некоторых стран постсоветского пространства. Так как не для всех метеопостов имелись непрерывные ряды данных и не все из них располагались вблизи границ России, в общей сложности в анализ была включена 571 станция. Кроме того, база «Аисори-М» содержит справочник с описанием возможных изменений в методике измерений для каждой станции, а также их географические координаты, которые использовались для последующих расчетов.

Растровые данные были получены из атмосферного реанализа EAC4 (ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4), который проводится Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) на глобальном уровне [43]. Реанализ EAC4 имеет пространственное разрешение 0,75° на 0,75° и доступен на сайте Copernicus Atmosphere Data Store⁷. Данные реанализа начали публиковаться с 2003 г. и продолжают обновляться два раза в год, предоставляя данные с задержкой в несколько месяцев. Помимо этого, в EAC4 публикуются сведения о других метеорологических параметрах, а также о концентрации различных веществ в атмосфере. Исходное временное разрешение данных составляет 3 ч, но для анализа они были агрегированы по неделям.

Для учета неравномерного расселения внутри исследуемых территориальных единиц использовались растровые данные из Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4), одного из наиболее актив-

но используемого источника сведений о численности населения для составления региональных оценок тех или иных площадных показателей. Этот массив данных предоставляется NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)⁸ и имеет пространственное разрешение 0,5 на 0,5°⁹. GPWv4 основан на официальной демографической статистике, в частности, для России используется муниципальный уровень анализа. Дополнительно в GPWv4 учитываются особенности земной поверхности, за счет чего плотность населения лучше соответствует реальному расселению. В качестве источника был взят набор данных GPWv4 за 2010 г., отражающий плотность населения на середине исследуемого периода.

Для оценки агрегированных по регионам средних недельных температур использовались три подхода, два из которых основывались на данных метеостанций. Для первого метода центр населенности определялся для каждого региона на основе данных о плотности населения из GPWv4. Затем всем метеорологическим станциям, расположенным внутри региона и в пределах двухсоткилометровой (в соответствии с [29]) буферной зоны вокруг него, были присвоены веса, обратно пропорциональные их расстоянию до регионального центра населенности. Средние недельные температуры рассчитывались как взвешенная сумма температур по всем выбранным метеостанциям.

Помимо этого, для дополнительной верификации оценок средние недельные температуры по регионам на основе наземных наблюдений были рассчитаны альтернативным способом. Он строился на оценке недельных температур на уровне муниципалитетов. Аналогично для каждого муниципалитета определялся центр населенности, выбирались метеостанции в пределах соответствующей буферной зоны и присваивались веса в соответствии с их удаленностью от центра муниципалитета. После этого средняя температура по региону рассчитывалась как средневзвешенная температура по муниципалитетам, где веса определялись на основе численности населения каждой территориальной единицы.

Для расчета средних температур на основе растровых данных были использованы усредненные по неделям изображения из реанализа EAC4. Эти данные были приведены к пространственному разрешению раstra плотности населения для обеспечения

⁵ Центр демографических исследований [Электронный ресурс] // Российская экономическая школа (РЭШ). – URL: <https://www.nes.ru/demogr/> (дата обращения: 17.04.2025).

⁶ Аисори-М: Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс]. – URL: <http://aisori-m.meteo.ru> (дата обращения: 14.04.2025).

⁷ Atmosphere Data Store [Электронный ресурс]. – URL: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu> (дата обращения: 14.04.2025).

⁸ Gridded Population of the World (GPW), v4 [Электронный ресурс] // Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). – URL: <https://beta.sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev10> (дата обращения: 17.04.2025).

⁹ Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals, Revision 11 // Center for International Earth Science Information Network, Columbia University (CIESIN). – 2018.

взаимной сопоставимости. Таким образом, средние значения температур в каждом регионе были рассчитаны как средние значения температур в соответствующих ячейках раstra, взвешенные на число жителей, проживающих в пределах каждой ячейки.

Для оценки зависимости рисков смерти от температур была использована двухуровневная модель с квазипуассоновской регрессией для каждого региона на первом уровне и метаанализом региональных оценок для получения обобщенных результатов на втором уровне. В частности, на первом этапе для каждого региона при помощи модели с распределенными лагами (DLM) регионов [44] строится кривая «доза – эффект» влияния температур на смертность с учетом отложенных эффектов влияния температур. Затем эти региональные оценки агрегируются для расчета данной зависимости в целом для России и последующей поправки региональных результатов на эти цифры.

Кривая «доза – эффект» в данном контексте отражает оценки относительных рисков смерти (Relative Risks, RR) всех наблюдаемых температур. Так как она обладает нелинейной формой, как правило, ее представляют в качестве непараметрических функций. В качестве референтного уровня, относительно которого рассчитывались все риски, связанные с температурами, использовалась температура минимальной смертности (TMC). Таким образом, минимальный уровень относительного риска смерти был равен единице [45]. Более детально эта методология описана в работе [46]. Анализ временных рядов был проведен с помощью квазипуассоновской регрессии, формула которой может быть представлена как:

$$\begin{aligned} \log(E(Y_{week})) = & \\ = intercept + ns(week, df = 7 \text{ per year}) + & \\ + cb(ns(T, knots = 3), lag = 0, 1, 2, 3) + & \\ + offset(\log(Pop)), & \end{aligned}$$

где $E(Y_{week})$ – ожидаемое значение недельного СКС в регионе;

$intercept$ – свободный член уравнения, отражающий средний уровень СКС в регионе;

$ns(week, df = 7 \text{ per year})$ – натуральный кубический сплайн с 7 степенями свободы для каждого года наблюдения, который был включен для учета сезонности и долгосрочных трендов смертности.

Модель $cb(ns(T, knots = 3), lag = 0, 1, 2, 3)$ представляет собой модель с распределенными лагами (DLM), которая используется для учета влияния температур на риски смерти с учетом отложенных эффектов.

Кривая «доза – эффект», отражающая ассоциацию рисков смерти с температурами, моделировалась при помощи натурального кубического сплайна

с тремя узлами, расположенными равномерно на 25, 50 и 75 процентилях распределения температур каждого региона. Этот подход позволяет наиболее точно отражать нелинейные отношения между температурой и смертностью и является распространенным при проведении подобных исследований. Для учета структуры лагов использовались категориальные переменные. Таким образом, влияние температуры на смертность оценивалось не только в текущий момент, но и с учетом их воздействия за три предшествующие недели.

Параметр $offset(\log(Pop))$ в библиотеке `glm` языка программирования R используется при применении коэффициентов смертности в качестве зависимой переменной, так как в пуассоновской и квазипуассоновской регрессиях требуется производить анализ счетных данных. Поэтому логарифм средней численности населения за соответствующий период в качестве дополнительного параметра модели обеспечивал сопоставимость оценок смертности между собой в разных регионах.

Выбор оптимальных параметров сплайна, длины и структуры лагов в моделировании кривых «доза – эффект» строился на минимизации информационного критерия Акаике (AIC).

Для получения агрегированных оценок рисков, связанных с температурами, на основе региональных данных был проведен метаанализ региональных зависимостей «доза – эффект» [47, 48]. Данный подход позволяет объединить результаты из различных регионов, учитывая вариативность между ними за счет использования модели метарегрессии со случайными эффектами.

Агрегированная зависимость смертности от температур, рассчитанная для всей России на основе региональных оценок, в дальнейшем была использована для уточнения последних. Для этого применяются лучшие линейные несмещенные прогнозы (Best Linear Unbiased Predictors, BLUP), состоящие из двух компонентов. В первую очередь, они включают параметры кривых «доза – эффект», полученные для каждого региона на первом уровне анализа. Корректировка этих оценок на их отклонение от агрегированных результатов позволяет повысить точность региональных показателей. Данный компонент BLUP представляет собой случайные эффекты, уже полученные в результате использования метарегрессии [47]. Для представления региональных различий зависимости смертности от температур были показаны региональные вариации BLUP-оценок TMC, рассчитанные на основе каждого из трех методов агрегирования данных по температурам.

Обработка данных и статистический анализ были произведены в среде RStudio. В частности, построения обобщенных кривых «доза – эффект» для анализа были использованы библиотеки `glm`, `splines`, `dlm`, `mvmeta` и `mixmeta` [44].

Таблица 1

Описательные статистики временных рядов понедельных данных за 2004–2019 гг. в разрезе 80 регионов, используемых на первом уровне анализа для трех моделей, каждая из которых применяет температуры, рассчитанные различными способами

Показатель	1-й квартиль	Медиана	Среднее	3-й квартиль
<i>Зависимая переменная</i>				
Недельный СКС, на 1 тыс. чел.	17,20	19,50	20,08	22,40
<i>Независимые переменные</i>				
Средние недельные температуры на основе наземных станций по мун., °C	-3,509	5,600	4,728	15,067
Средние недельные температуры на основе наземных станций по рег., °C	-3,468	5,586	4,727	15,064
Средние недельные температуры на основе реанализа (ЕАС4), °C	-3,625	5,369	4,499	14,767

Примечание: источники – расчеты авторов на основе «РосБКС», «Аисори-М», ЕАС4.

Результаты и их обсуждение. Недельные показатели СКС в среднем за весь исследуемый период (2004–2019 гг.) оказались наибольшими в Чукотском АО (28,6 ‰), Республике Тыва (26,5 ‰), Еврейской АО (24,6 ‰) и Амурской области (24,1 ‰). Наименьшие значения наблюдались в Республике Ингушетия (11,6 ‰), Москве (13,4 ‰), Республике Дагестан (14,4 ‰), Санкт-Петербурге (15,7 ‰). На протяжении всего исследуемого периода смертность в России достаточно быстро снижалась: в 2005 г. средний понедельный СКС по всем регионам составил 25,2 ‰, к 2019 г. он сократился до 16,2 ‰. Необходимо отметить, что эти оценки основываются на средних значениях коэффициентов смертности по неделям, поэтому могут не всегда соответствовать годовым коэффициентам смертности в других источниках.

В течение рассматриваемого периода рекордно низкая средняя недельная температура воздуха была зафиксирована в конце декабря 2004 г. в Республике Саха (Якутия). Ее значения составили -43,15 °C при использовании данных наземных станций, -45,01 °C – при использовании средневзвешенного значения средних температур в муниципалитетах, и -44,66 °C – при использовании растровых данных реанализа. Средние недельные значения температур достигли максимума в Волгоградской области во время волны жары в августе 2010 г., характеризовавшейся пиковой смертностью в регионе, и составили 31,53; 32,18 и 32,34 °C для этих же источников данных соответственно. Рекордные значения как для экстремальной жары, так и для экстремального холода были зарегистрированы в один и тот же период при использовании этих источников данных, а количественные оценки оказались близкими.

Общее число недельных наблюдений за 2004–2019 гг. во всех регионах составило 66 640. Значения средних температур по регионам, полученные с помощью различных методов, демонстрируют высокую степень согласованности (табл. 1). Коэффициент корреляции между временными рядами температур, рассчитанный на основе данных с наземных станций, составил 0,991. Коэффициент корреляции между данными реанализа и агрегиро-

ванными данными по регионам составил 0,969, а между данными реанализа и средневзвешенными значениями по муниципалитетам – 0,978.

На региональном уровне средние недельные значения температур, полученные тремя разными методами, демонстрируют не только тесную линейную связь друг с другом, но и отсутствие в большинстве регионов смещений, связанных с систематическими ошибками (рис. 1, 2). Хотя в целом для положительных температур оценки были более согласованными. Однако есть некоторые исключения, например, Чукотский АО, где получающиеся при использовании разных методов агрегирования данные метеостанций не согласуются. Региональные и муниципальные центры населенности в Чукотском АО не позволяют получить сопоставимую картину, из-за чего оценки при использовании разных методов не соответствуют друг другу. Аналогичные, хотя и менее выраженные, различия были отмечены в некоторых других регионах с низкой плотностью и неравномерным распределением населения, в частности, в Тюменской области, Красноярском крае и Республике Алтай.

Кривые «доза – эффект», демонстрирующие ассоциацию смертности с температурами, полученные для всей России на основе метарегрессии, демонстрируют схожую между собой форму, отвечающую наиболее распространенной зависимости смертности от температур. И холод, и жара приводят к повышению рисков смерти, причем для большинства регионов ТМС находится в пределах 15–20 °C, что соответствует выводам, полученным в большинстве других исследований [3]. Однако риски, связанные с экстремальным холодом, оказались статистически более значимыми.

Это противоречит результатам многих исследований, в которых наибольшие риски связывают с жарой [11], и может объясняться двумя факторами. Во-первых, в данном исследовании использовался достаточно длинный лаговый период (три недели), что лучше позволяет учитывать отсроченные эффекты холода. При рассмотрении ассоциации температур со смертностью в пределах недели без учета лагов риски, связанные с жарой, оказываются

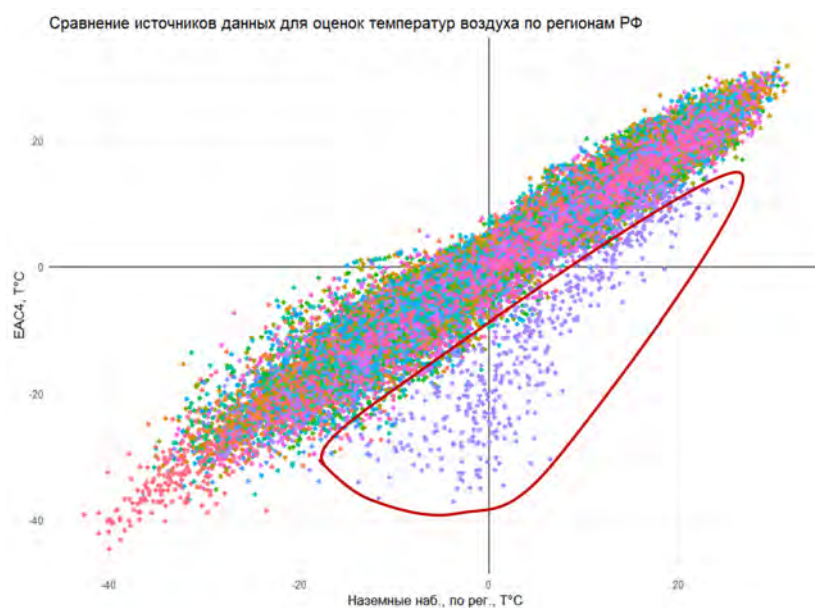


Рис. 1. Диаграмма рассеяния средних недельных оценок температур за 2004–2019 гг., полученных при помощи агрегирования точечных данных с учетом центров населенности регионов и взвешенных по плотности населения данных реанализа ЕАС4 (цветом показаны разные регионы РФ; красным выделены значения Чукотского АО; источники – расчеты авторов на основе «Аисори-М», ЕАС4)

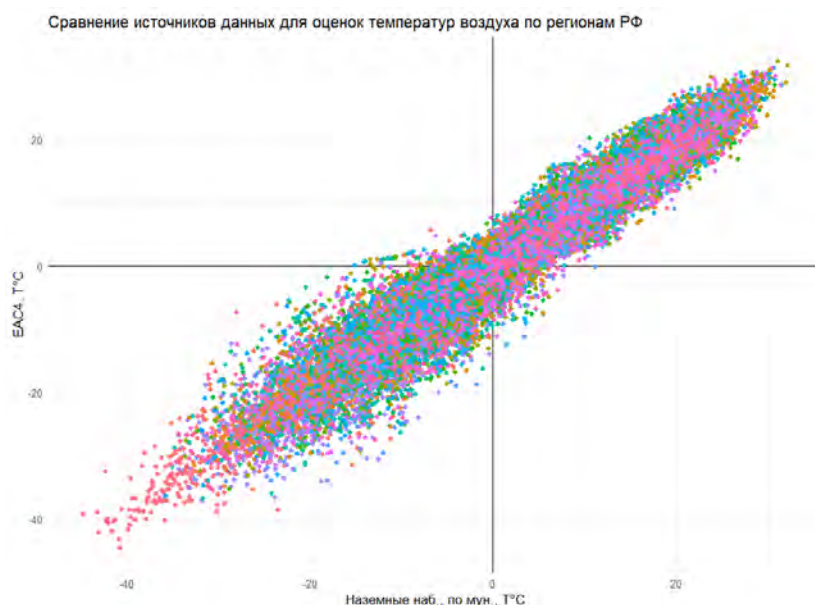


Рис. 2. Диаграмма рассеяния средних недельных оценок температур за 2004–2019 гг., полученных при помощи агрегирования точечных данных с учетом центров населенности муниципалитетов и взвешенных по плотности населения данных реанализа ЕАС4 (цветом показаны разные регионы РФ; источники – расчеты авторов на основе «Аисори-М», ЕАС4)

намного выше. Однако предсказательная способность такой модели на основе статистических критериев оказывается ниже. Во-вторых, полученные результаты согласуются с выводами других российских эпидемиологических исследований, где риски смерти во время волн холода часто бывают выше, чем во время волн жары¹⁰ [22]. Так или ина-

че, но данная оценка представляет лишь усредненную картину, основывающуюся на обобщенных данных из разных регионов, условия в которых различаются достаточно сильно.

Обобщенная оценка температуры минимальной смертности составила 19,12 °С при использовании данных наземных станций, агрегированных по

¹⁰ Winter mortality and cold stress in Yekaterinburg, Russia: interview survey / G.C. Donaldson, V.E. Tchernjavskii, S.P. Ermakov, K. Bucher, W.R. Keatinge // BMJ. – 1998. – Vol. 316, № 7130. – P. 514–518. DOI: 10.1136/bmj.316.7130.514

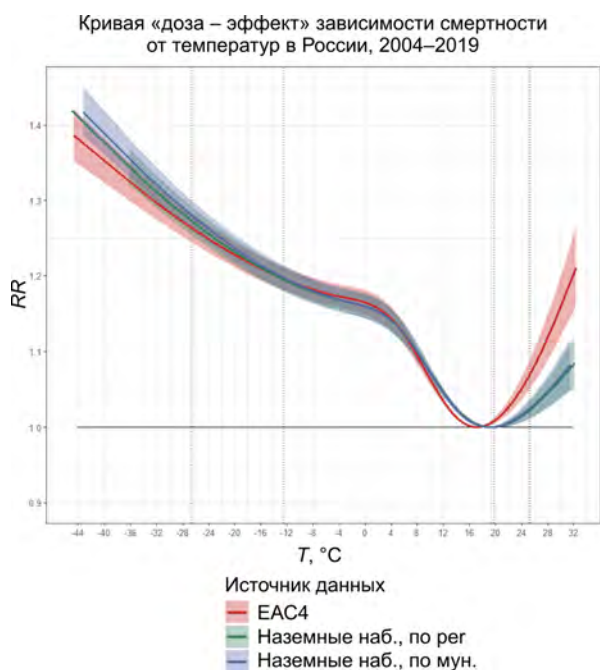


Рис. 3. Оценки рисков смерти, ассоциированных с температурами, рассчитанных разными способами: пунктирными линиями показаны 1-й, 10-й, 90-й и 99-й процентиля распределения температур во всех регионах России на протяжении изучаемого периода (2004–2019 гг.) (источники – расчеты авторов на основе «РосБКС», «Аисори-М», EAC4)

регионам. Для средневзвешенных температур по муниципалитетам значение ТМС равнялось 19,34 °C, а для данных реанализа – 17,17 °C. В терминах многолетнего распределения температур ТМС соответствует процентилям: 88,4; 88,8 и 83,0. Относительно высокие значения процентилей объясняются особенностями климата России, в подавляющем большинстве регионов наблюдается продолжительный зимний период, не отмечающийся в других регионах, в которых проводились аналогичные работы [45, 49].

Формы кривых «доза – эффект», построенных на основе наземных наблюдений, очень похожи между собой для всего спектра наблюдаемых температур. Для данных, полученных на основе оценок по регионам, риски, связанные с экстремальными температурами, оказались немного выше, но это различие статистически незначимо. Более существенные несоответствия наблюдаются между данными, полученными на основе растровых данных и агрегированных наземных наблюдений. В особенности значительными они оказались для экстремально высоких температур (рис. 3).

Индикаторами рисков смерти в результате экстремальных температур могут служить точечные оценки относительных рисков при определенных граничных значениях, например 95-м или 99-м процентилях многолетнего распределения в случае эффектов, связанных с жарой [50]. Так, относительные

риски смерти в результате экстремального холода на основе данных температурного реанализа оказались ниже, чем для данных с метеорологических станций.

Гораздо более значимым оказалось различие в рисках для верхних процентилей многолетнего распределения средних недельных температур. Относительные риски смерти для 99-го процентиля на основе данных метеостанций в модели с распределенными лагами составили примерно 1,02, в то время как для данных на основе растров – 1,07, и это различие оказалось статистически значимым (табл. 2). При этом важно отметить, что температуры, соответствующие этим процентилям, различались не слишком сильно.

В среднем по регионам значения BLUP (лучших линейных несмещенных) оценок ТМС, рассчитанных на основе наземных наблюдений, оказались на 2–3 °C выше, чем оценки, полученные с использованием растровых данных. В большинстве случаев расчеты на основе разных методов приводили к согласованным результатам. В пределах федеральных округов, как правило, более южные регионы с более высокими температурами демонстрировали более высокие значения ТМС (Белгородская область в ЦФО, Республика Калмыкия в ЮФО, Саратовская область в ПФО), однако отмечались и несоответствия, например, Республика Коми в СЗФО.

Взаимосвязей между средними значениями СКС и уровнями ТМС отмечено не было. Несмотря на то что регионы с более высоким уровнем смертности, как правило, находятся в более холодном климате, это не повлияло на итоговую региональную дифференциацию. В большинстве регионов ТМС соответствовали 75–85-му процентилям многолетнего распределения температур при использовании данных реанализа. Для оценок на основе данных метеорологических станций ТМС находились, как правило, между 80-м и 90-м процентилями. Значения ниже 70-го процентиля практически не отмечались, в то время как в некоторых регионах (Камчатский край, Сахалинская область, Республика Коми, Республика Тыва) они приближались к 99-му процентилю, что обусловлено как холодным климатом, так и недостаточной достоверностью BLUP-оценок в условиях небольшой численности населения.

Наибольшие расхождения между оценками ТМС, полученными различными методами, наблюдаются в некоторых малонаселенных регионах с низкой плотностью метеостанций, например, в Чукотском АО, где их репрезентативность для обобщенных региональных оценок температур оказывается ниже. В Центральном, Приволжском и Южном федеральных округах сеть метеостанций имеет более полное покрытие, а физико-географические характеристики не демонстрируют значительных различий, в связи с чем BLUP-оценки ТМС оказались наиболее согласованными между собой. Однако отдельные регионы, например, Республика Адыгея,

Таблица 2

Относительные риски, связанные с экстремальными температурами, рассчитанные разными способами, для 1-го, 5-го, 95-го и 99-го процентилей распределения температур во всех регионах России на протяжении изучаемого периода (2004–2019 гг.)

Метод агрегирования данных		1-й проц. к ТМС	5-й проц. к ТМС	95-й проц. к ТМС	99-й проц. к ТМС
На основе наземных станций по мун.	T, °C	-26,39	-17,65	21,8	25,43
	RR	1,272 (95 % CI: 1,253–1,291)	1,219 (95 % CI: 1,203–1,236)	1,004 (95 % CI: 1,000–1,008)	1,023 (95 % CI: 1,012–1,035)
На основе наземных станций по рег.	T, °C	-26,77	-17,63	21,74	25,31
	RR	1,282 (95 % CI: 1,262–1,302)	1,223 (95 % CI: 1,206–1,24)	1,005 (95 % CI: 1,001–1,009)	1,025 (95 % CI: 1,012–1,038)
На основе реанализа (EAC4)	T, °C	-26,62	-17,89	21,41	25,05
	RR	1,264 (95 % CI: 1,245–1,283)	1,218 (95 % CI: 1,202–1,235)	1,021 (95 % CI: 1,013–1,028)	1,066 (95 % CI: 1,048–1,085)

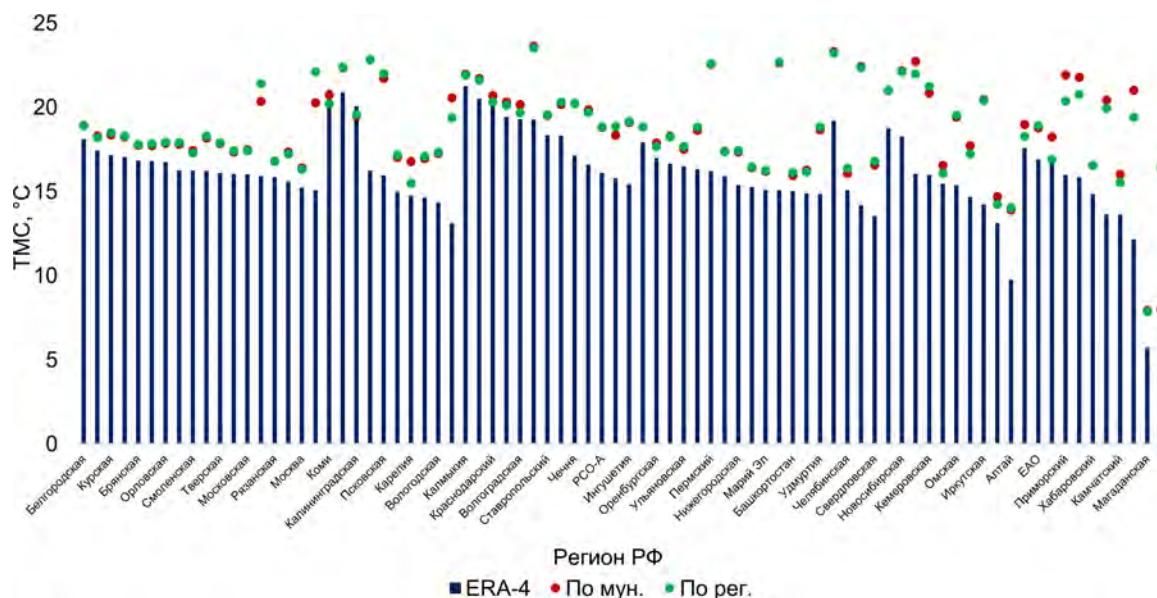


Рис. 4. BLUP-оценки ТМС для температур, рассчитанных разными способами, по регионам России за 2004–2019 гг. (источники – расчеты авторов на основе «РосБКС», «Ансори-М», EAC4)

Ивановская, Костромская, Архангельская области, Приморский край, Республика Якутия и Санкт-Петербург, демонстрируют аномальные разбросы в оценках ТМС между всеми тремя оценками, что может объясняться артефактами агрегации данных и недоучетом локальных климатических особенностей (рис. 4).

Полученные оценки зависимости смертности от температур имеют J-образную форму, где риски, связанные с холодом, преобладают. Эти данные позволяют рассчитать бремя температурного стресса и прогнозировать потери населения из-за изменения климата, а также разрабатывать региональные меры профилактики и противодействия негативным последствиям температур.

Опыт российских исследований не позволяет однозначно определить, какие риски (холода или жары) более значимы, так как выводы зависят от географического охвата и методологии [26]. Преобладание рисков, связанных с холодом, в данной ра-

боте может быть обусловлено использованием модели с распределенными лагами, учитывавшей влияние температур за три недели. Этот метод подходит для анализа годовой динамики, но занижает оценки при изучении смертности в результате волн жары [41]. Кроме того, недельные данные не учитывают краткосрочные эффекты высоких температур, которые проявляются в течение нескольких дней [44]. Это могло дополнительно способствовать недоучету смертности, ассоциированной с высокими температурами. Также важно учитывать, что анализировалась смертность от всех причин, включая внешние, которые играли существенную роль в начале исследуемого периода. Для многих внешних причин четкие зависимости от температур не установлены, что затрудняет выявление зависимостей на примере используемых данных.

Не выявлено значимой связи между исходными значениями СКС и температурными рисками. В регионах с высокой смертностью значительная

доля приходится на внешние причины и случаи, связанные с алкоголем, которые слабо зависят от температур. Поэтому общий уровень смертности существенно не повлиял на зависимость между температурой и смертностью.

Региональные различия в ТМС отражают природно-климатические особенности регионов. В более теплых регионах ТМС выше, что объясняется адаптацией населения к преобладающим условиям [49]. Аналогичные для большинства регионов России значения ТМС (15–18 °С) наблюдались в городах Финляндии, Швеции и Норвегии [45]. В соответствии с процентилями распределения температур, которым соответствуют ТМС, наилучшими являются оценки на основе реанализа. Как правило, в аналогичных климатических условиях процентилю с минимальными рисками смерти также находятся между 75-м и 85-м процентилями [49]. Снижение ТМС с увеличением широты и уменьшением среднегодовых температур отражает различия в адаптационном потенциале населения России.

В отдельных регионах, например, в Магаданской области или в Чукотском АО, отмечались аномально низкие значения ТМС, что может быть связано с большими разбросами данных и низкой достоверностью модели. Напротив, в Камчатском крае, Республике Коми и Забайкальском крае ТМС оказались завышенными, близкими к максимальным процентилям. В случае использования наблюдений метеостанций это может быть связано с недостаточным качеством исходных данных и особенностями BLUP-оценок.

В данном исследовании оценки рисков смерти, связанных с температурами, на уровне регионов, полученные разными методами, оказались схожими, что согласуется с результатами других работ [15, 30, 50–53]. Кроме того, даже достаточно крупный уровень агрегирования как во временном (по неделям), так и в пространственном (по регионам РФ) разрезах в целом не повлиял на сопоставимость оценок.

Дополнительной сложностью служило неравномерное распределение метеостанций. Большинство из них располагались в крупных населенных пунктах, что снижало их репрезентативность для малонаселенных регионов. В [54] предложено учитывать станции в радиусе 50 км от центра региона для расчета температур. В [29] и в данном исследовании был принят критерий в 200 км, что позволило увеличить объем выборки и повысить стабильность оценок.

Кривые «доза – эффект» на основе разных источников данных схожи. Однако при использовании данных реанализа риски, связанные с жарой, оказались выше. В других работах также наблюдались наибольшие расхождения для высоких температур, тогда как риски, связанные с холодом, оставались сопоставимыми. В некоторых исследованиях расчётные данные также давали завышенные оценки

рисков жары [30], но в других случаях наблюдалась обратная тенденция [15, 52, 54].

Атмосферные реанализы, основанные на моделировании, не всегда учитывают локальные микро-географические эффекты и экстремальные температуры из-за усреднения данных. Однако репрезентативность наблюдений метеостанций для таких обширных территорий также ограничена из-за неравномерного охвата.

Наименьшие расхождения между источниками данных наблюдались в регионах с равномерным расселением и равнинным рельефом. В других случаях возникали проблемы: в Чукотском АО согласованность оценок оказалась наименьшей. В Адыгее использовалось избыточное количество метеостанций, плохо отражающих местные условия, а в Санкт-Петербурге данные реанализа искажались из-за приморского расположения [51].

Таким образом, лишь в наиболее простых случаях оценки температуры и связанных с ними рисков на основе разных источников данных сопоставимы. В регионах с разреженной сетью метеостанций предпочтительнее использовать реанализы, тогда как для анализа внутри городов подходят данные метеостанций. Метеоданные доступны в реальном времени, что удобно для оперативных оценок, однако они могут содержать пропуски и быть фрагментарными. Для долгосрочных рядов предпочтительнее данные реанализов, составленных по единой методологии, за счет их полноты и широкого охвата.

При сравнении подходов к агрегированию данных метеостанций оценка температур по муниципалитетам оказалась эффективнее, чем по регионам. В крупных и малонаселенных регионах центр населения плохо отражает реальное расселение, снижая точность данных. Поэтому корректнее оценивать средние температуры на субрегиональном уровне с последующим агрегированием результатов для региона в целом.

Проблемы и ограничения. В работе оценивались температурные риски на уровне регионов РФ и сравнивалась применимость различных источников данных о температурах. Результаты согласуются с выводами других исследований, использовавших более детализированные данные и анализировавших кратковременные колебания смертности. Однако необходимо учитывать ряд ограничений, которые могли повлиять на интерпретацию полученных результатов.

Во-первых, несмотря на общую стабильность временных рядов смертности в большинстве регионов, в некоторых (например, Чукотский АО, Магаданская область) наблюдалась высокая волатильность данных. Это затруднило получение достоверных результатов, хотя использование метааналитических подходов частично сгладило проблему. Тем не менее для отдельных регионов адекватные оценки рисков смерти, связанных с температурами, так и не были получены.

Во-вторых, спецификация функции «доза – эффект» могла повлиять на результаты моделирования. Несмотря на наилучшие значения информационных критериев выбранной модели, расположение узлов сплайнов и структура лагов могли исказить оценки.

В-третьих, отсутствие данных о загрязнении воздуха ограничило анализ. На региональном уровне в России такие данные доступны только в рамках реанализов, так как разветвленной сети наблюдений за качеством воздуха с открытыми и доступными данными нет, что не позволяет включить их в модель.

Выводы. Целью работы был анализ смертности, связанной с температурами, на основе данных атмосферного реанализа EAC4 и метеорологических станций. Региональные значения температур рассчитывались тремя способами, которые продемонстрировали схожие паттерны временных рядов.

Зависимость смертности от температур в регионах России имела J-образную форму: риски были выше при низких температурах. Так, для 1-го перцентиля температур относительные риски достигли 1,25, тогда как для 99-го – 1,02 (по данным метеостанций) и 1,07 (согласно реанализу). Это объясняется учетом лаговых эффектов воздействия температур на здоровье на протяжении нескольких недель, что позволяет лучше учесть негативные последствия холода.

ТМС в большинстве регионов находились в пределах 15–20 °С, соответствуя 75–85-му перцентилям распределения температур (по данным реанализа). При использовании данных метеостанций температуры минимальной смертности оказывались на несколько градусов выше. Оптимальные температуры чаще выше в теплых регионах, что указывает на адаптацию населения к преобладающим условиям. Знание пороговых значений рисков позволяет эффективнее оценивать угрозы для жизни и разрабатывать меры для предотвращения негативных последствий влияния температур. К таким мерам относятся системы оповещения, информирования и предупреждения населения о наступлении волн жары или холода.

Оба источника данных показали свою применимость, но в малонаселенных регионах с разреженной сетью станций достоверность данных метеонаблюдений снижалась, что влияло на согласованность оценок риска. Например, температура минимальной смертности по данным метеостанций в таких регионах была завышенной относительно реанализа.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Meehl G.A., Tebaldi C. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century // *Science*. – 2004. – Vol. 305, № 5686. – P. 994–997. DOI: 10.1126/science.1098704
2. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios / A. Gasparrini, Y. Guo, F. Sera, A.M. Vicedo-Cabrera, V. Huber, S. Tong, M. de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, P. Hilario Nascimento Saldiva [et al.] // *Lancet Planet. Health*. – 2017. – Vol. 1, № 9. – P. e360–e367. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30156-0
3. Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities / P. Masselot, M.N. Mistry, S. Rao, V. Huber, A. Monteiro, E. Samoli, M. Stafoggia, F. deDonato [et al.] // *Nat. Med.* – 2025. – Vol. 31, № 4. – P. 1294–1302. DOI: 10.1038/s41591-024-03452-2
4. Basu R. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008 // *Environ. Health*. – 2009. – Vol. 8. – P. 40. DOI: 10.1186/1476-069X-8-40
5. Kovats R.S., Hajat S. Heat Stress and Public Health: A Critical Review // *Annu. Rev. Public Health*. – 2008. – Vol. 29. – P. 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843
6. Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence / J. Cheng, Z. Xu, H. Bambrick, V. Prescott, N. Wang, Y. Zhang, H. Su, S. Tong, W. Hu // *Environ. Res.* – 2019. – Vol. 177. – P. 108610. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108610
7. Revich B., Shaposhnikov D. The influence of heat and cold waves on mortality in Russian subarctic cities with varying climates // *Int. J. Biometeorol.* – 2022. – Vol. 66, № 12. – P. 2501–2515. DOI: 10.1007/s00484-022-02375-2
8. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Изменения климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых регионах России // *Проблемы прогнозирования*. – 2012. – № 2 (131). – С. 122–139.
9. Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010 / D. Shaposhnikov, B. Revich, T. Bellander, G. Bero Bedada, M. Bottai, T. Kharkova, E. Kvasha, E. Lezina [et al.] // *Epidemiology*. – 2014. – Vol. 25, № 3. – P. 359–364. DOI: 10.1097/EDE.0000000000000090
10. What is cold-related mortality? A multi-disciplinary perspective to inform climate change impact assessments / K. Arbuthnott, S. Hajat, C. Heaviside, S. Vardoulakis // *Environ. Int.* – 2018. – Vol. 121, Pt 1. – P. 119–129. DOI: 10.1016/j.envint.2018.08.053
11. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study / A. Gasparrini, Y. Guo, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Zanobetti, J. Schwartz, A. Tobias, S. Tong [et al.] // *Lancet*. – 2015. – Vol. 386, № 9991. – P. 369–375. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0
12. Barnett A.G., Tong S., Clements A.C.A. What measure of temperature is the best predictor of mortality? // *Environ. Res.* – 2010. – Vol. 110, № 6. – P. 604–611. DOI: 10.1016/j.envres.2010.05.006

13. Do Biometeorological Indices Improve Modeling Outcomes of Heat-Related Mortality? / P. Vaneckova, G. Neville, V. Tippet, P. Aitken, G. Fitzgerald, S. Tong // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2011. – Vol. 50, № 6. – P. 1165–1176. DOI: 10.1175/2011JAMC2632.1
14. Определение порогов температурно-зависимой смертности на основе универсального индекса теплового комфорта – UTCI / Н.В. Шартова, Д.А. Шапошников, П.И. Константинов, Б.А. Ревич // *Анализ риска здоровью*. – 2019. – № 3. – С. 83–93. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.10
15. Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe / A. Urban, C. Di Napoli, H.L. Cloke, J. Kyselý, F. Pappenberger, F. Sera, R. Schneider, A.M. Vicedo-Cabrera [et al.] // *Environ. Res.* – 2021. – Vol. 198. – P. 111227. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111227
16. Revich B., Shaposhnikov D. Temperature-induced excess mortality in Moscow, Russia // *Int. J. Biometeorol.* – 2008. – Vol. 52, № 5. – P. 367–374. DOI: 10.1007/s00484-007-0131-6
17. Воздействие высоких температур атмосферного воздуха на здоровье населения в Твери / Б.А. Ревич, Д.А. Шапошников, В.Т. Галкин, С.А. Крылов, А.Б. Черткова // *Гигиена и санитария*. – 2005. – № 2. – С. 20–24.
18. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Семутникова Е.Г. Климатические условия и качество атмосферного воздуха как факторы риска смертности населения Москвы // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2008. – № 7. – С. 29–35.
19. Heat waves in southern cities of European Russia as a risk factor for premature mortality / B.A. Revich, D.A. Shaposhnikov, M.A. Podol'naya, T.L. Khor'kova, E.A. Kvasha // *Stud. Russ. Econ. Dev.* – 2015. – Vol. 26. – P. 142–150. DOI: 10.1134/S1075700715020100
20. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Волны холода в южных городах европейской части России и преждевременная смертность населения // *Проблемы прогнозирования*. – 2016. – № 2 (155). – С. 125–131.
21. Температура воздуха и смертность: исследование пороговых значений жары и чувствительности населения на примере г. Ростов-на-Дону / Н.В. Шартова, Д.А. Шапошников, П.И. Константинов, Б.А. Ревич // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2019. – Т. 2. – С. 66–94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-2-66-94
22. Волны жары и холода в городах, расположенных в арктической и субарктической зонах как факторы риска повышения смертности населения на примере Архангельска, Мурманска и Якутска / Б.А. Ревич, Д.А. Шапошников, О.А. Анисимов, М.А. Белолуцкая // *Гигиена и санитария*. – 2018. – Т. 97, № 9. – С. 791–798. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-791-798
23. Impact of Temperature Waves on the Health of Residents in Cities of the Northwestern Region of Russia / B.A. Revich, D.A. Shaposhnikov, O.A. Anisimov, M.A. Belolutskaia // *Stud. Russ. Econ. Dev.* – 2019. – Vol. 30, № 3. – P. 327–333. DOI: 10.1134/S1075700719030158
24. Черных Д.А., Тасейко О.В. Оценка риска повышения смертности от температурных волн для населения города Красноярск // *Экология человека*. – 2018. – № 2. – С. 3–8. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-2-3-8
25. Григорьева Е.А. Волны тепла на юге Дальнего Востока и здоровье человека // *ЗННCO*. – 2017. – № 2 (287). – С. 11–14. DOI: 10.35627/2219-5238/2017-287-2-11-14
26. Grigorieva E.A. Heat and cold waves at the South of the Russian Far East in 1999–2017 // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2020. – Vol. 606, № 1. – P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012016
27. Shaposhnikov D., Revich B. Toward meta-analysis of impacts of heat and cold waves on mortality in Russian North // *Urban Climate*. – 2016. – Vol. 15. – P. 16–24. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.11.007
28. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Health Consequences of the Russian Weather // *Ecological Economics*. – 2017. – Vol. 132. – P. 290–306. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.10.021
29. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Misfortunes never come singly: Consecutive weather shocks and mortality in Russia // *Econ. Hum. Biol.* – 2018. – Vol. 31. – P. 249–258. DOI: 10.1016/j.ehb.2018.08.008
30. Comparison of temperature-mortality associations estimated with different exposure metrics / K.R. Weinberger, K.R. Spangler, A. Zanobetti, J.D. Schwartz, G.A. Wellenius // *Environ. Epidemiol.* – 2019. – Vol. 3, № 5. – P. e072. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000072
31. Evaluating the association between extreme heat and mortality in urban Southwestern Ontario using different temperature data sources / K.K. Clemens, A.M. Ouédraogo, L. Li, J.A. Voogt, J. Gilliland, E. Scott Krayenhoff, S. Leroyer, S.Z. Shariff // *Sci. Rep.* – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 8153. DOI: 10.1038/s41598-021-87203-0
32. Daly C. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets // *Int. J. Climatol.* – 2006. – Vol. 26, № 6. – P. 707–721. DOI: 10.1002/joc.1322
33. Spangler K.R., Weinberger K.R., Wellenius G.A. Suitability of gridded climate datasets for use in environmental epidemiology // *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* – 2019. – Vol. 29, № 6. – P. 777–789. DOI: 10.1038/s41370-018-0105-2
34. Consistency of Temperature and Precipitation Extremes across Various Global Gridded In Situ and Reanalysis Datasets / M.G. Donat, J. Sillmann, S. Wild, L.V. Alexander, T. Lippmann, F.W. Zwiers // *J. Climate*. – 2014. – Vol. 27, № 13. – P. 5019–5035. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00405.1
35. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality / M.N. Mistry, R. Schneider, P. Masselot, D. Royé, B. Armstrong, J. Kyselý, H. Orru, F. Sera [et al.] // *Sci. Rep.* – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 5178. DOI: 10.1038/s41598-022-09049-4
36. Comparison of Population-Weighted Exposure Estimates of Air Pollutants Based on Multiple Geostatistical Models in Beijing, China / Y. Wu, J. Xu, Z. Liu, B. Han, W. Yang, Z. Bai // *Toxics*. – 2024. – Vol. 12, № 3. – P. 197. DOI: 10.3390/toxics12030197

37. Keller J.P., Peng R.D. Error in estimating area-level air pollution exposures for epidemiology // *Environmetrics*. – 2019. – Vol. 30, № 8. – P. e2573. DOI: 10.1002/env.2573
38. Associations between ambient air pollution and daily emergency department attendances for cardiovascular disease in the elderly (65+ years), Sydney, Australia / B. Jalaludin, G. Morgan, D. Lincoln, V. Sheppard, R. Simpson, S. Corbett // *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* – 2006. – Vol. 16, № 3. – P. 225–237. DOI: 10.1038/sj.jea.7500451
39. A Comparative Analysis of the Temperature-Mortality Risks Using Different Weather Datasets Across Heterogeneous Regions / E. de Schrijver, C.L. Folly, R. Schneider, D. Royé, O.H. Franco, A. Gasparrini, A.M. Vicedo-Cabrera // *GeoHealth*. – 2021. – Vol. 5, № 5. – P. e2020GH000363. DOI: 10.1029/2020GH000363
40. Grigorieva E.A., Revich B.A. Health Risks to the Russian Population from Temperature Extremes at the Beginning of the XXI Century // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12, № 10. – P. 1331. DOI: 10.3390/atmos12101331
41. The effect of temporal data aggregation to assess the impact of changing temperatures in Europe: an epidemiological modelling study / J. Ballester, K.R. van Daalen, Z.-Y. Chen, H. Achebak, J.M. Antó, X. Basagaña, J.-M. Robine, F.R. Herrmann [et al.] // *Lancet Reg. Health Eur.* – 2023. – Vol. 36. – P. 100779. DOI: 10.1016/j.lanepe.2023.100779
42. Russian Short-Term Mortality Fluctuations Data Series / A.E. Shchur, S.A. Timonin, E.V. Churilova, E.V. Sergeev, V.V. Sokolova, O.A. Rodina, B.A. Shamsutdinov, D.A. Jdanov, V.M. Shkolnikov // *Population and Economics*. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 188–197. DOI: 10.3897/popecon.7.e114628
43. Inness A., Engelen R., Flemming J. The new CAMS global reanalysis of atmospheric composition: Newsletter [Электронный ресурс] // ECMWF. – 2019. – № 158. – URL: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/158/meteorology/newcams-global-reanalysis-atmospheric-composition> (дата обращения: 11.04.2025).
44. Gasparrini A. Distributed Lag Linear and Non-Linear Models in R: The Package dlnm // *J. Stat. Softw.* – 2011. – Vol. 43, № 8. – P. 1–20.
45. Geographical Variations of the Minimum Mortality Temperature at a Global Scale: A Multicountry Study / A. Tobias, M. Hashizume, Y. Honda, F. Sera, C. Fook Sheng Ng, Y. Kim, D. Roye, Y. Chung [et al.] // *Environ. Epidemiol.* – 2021. – Vol. 5, № 5. – P. e169. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000169
46. Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models // *Stat. Med.* – 2013. – Vol. 33, № 5. – P. 881–899. DOI: 10.1002/sim.5963
47. Gasparrini A., Armstrong B., Kenward M.G. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations // *Stat. Med.* – 2012. – Vol. 31, № 29. – P. 3821–3839. DOI: 10.1002/sim.5471
48. An extended mixed-effects framework for meta-analysis / F. Sera, B. Armstrong, M. Blangiardo, A. Gasparrini // *Stat. Med.* – 2019. – Vol. 38, № 29. – P. 5429–5444. DOI: 10.1002/sim.8362
49. Mapping the increased minimum mortality temperatures in the context of global climate change / Q. Yin, J. Wang, Z. Ren, J. Li, Y. Guo // *Nat. Commun.* – 2019. – Vol. 10, № 1. – P. 4640. DOI: 10.1038/s41467-019-12663-y
50. Ruuhela R., Hyvärinen O., Jylhä K. Regional Assessment of Temperature-Related Mortality in Finland // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2018. – Vol. 15, № 3. – P. 406. DOI: 10.3390/ijerph15030406
51. Study on the association between ambient temperature and mortality using spatially resolved exposure data / M. Lee, L. Shi, A. Zanobetti, J.D. Schwartz // *Environ. Res.* – 2016. – Vol. 151. – P. 610–617. DOI: 10.1016/j.envres.2016.08.029
52. Royé D., Íñiguez C., Tobías A. Comparison of temperature–mortality associations using observed weather station and reanalysis data in 52 Spanish cities // *Environ. Res.* – 2020. – Vol. 183. – P. 109237. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109237
53. Choi H.M., Bell M.L. Heat-mortality relationship in North Carolina: Comparison using different exposure methods // *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* – 2023. – Vol. 33, № 4. – P. 637–645. DOI: 10.1038/s41370-023-00544-y
54. Hanigan I., Hall G., Dear K.B.G. A comparison of methods for calculating population exposure estimates of daily weather for health research // *Int. J. Health Geogr.* – 2006. – Vol. 5. – P. 38. DOI: 10.1186/1476-072X-5-38

Максименко М.Р. Риски смерти, связанные с температурами: влияние различных источников климатических данных в регионах России в 2004–2019 гг. // *Анализ риска здоровью*. – 2025. – № 2. – С. 30–45. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.03

UDC 612.014.43

DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.03.eng

Read
online

Research article

TEMPERATURE-RELATED MORTALITY RISKS: EFFECTS OF DIFFERENT SOURCES OF CLIMATIC DATA IN THE RF REGIONS IN 2004–2019

M.R. Maksimenko

National Research University Higher School of Economics, 11 Myasnitckaya St., Moscow, 101000, Russian Federation

Climate change and increasing thermal stress highlights the need to investigate the temperature-mortality relationship using long-term aggregated temperature data. Globally, two primary sources of temperature data are utilized: ground-based meteorological observations and raster datasets. Ground-based observations from meteorological stations offer precise local temperature measurements but lack comprehensive spatial coverage. In contrast, raster data provide complete spatial coverage but may not accurately represent local microclimatic conditions. This study aims to compare these data sources for analyzing temperature-related mortality across regions of Russia.

To assess the exposure-response relationship, a two-stage modeling approach was applied. At the first stage, region-specific estimates were derived using a distributed lag model. At the second stage, pooled estimates were computed through random-effects meta-regression.

The temperature-mortality relationship in Russia is characterized by a typical J-shaped curve, with cold temperatures posing a higher mortality risk. Heat-related risks were generally higher when estimated using raster data compared to in-situ observations. Minimum mortality risk temperatures typically fall between 15 and 20 °C, with higher thresholds observed in warmer regions.

This study suggests general comparability of raster and point-based temperature data for mortality analysis. However, in certain regions, particularly large and sparsely populated ones, estimates diverged due to multiple factors.

Keywords: climate change, atmosphere reanalysis, air temperature, temperature stress, raster data, ground-based meteorological observations, mortality, regions of Russia.

References

1. Meehl G.A., Tebaldi C. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 2004, vol. 305, no. 5686, pp. 994–997. DOI: 10.1126/science.1098704
2. Gasparini A., Guo Y., Sera F., Vicedo-Cabrera A.M., Huber V., Tong S., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M., Hilario Nascimento Saldiva P. [et al.]. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet. Health*, 2017, vol. 1, no. 9, pp. e360–e367. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30156-0
3. Masselot P., Mistry M.N., Rao S., Huber V., Monteiro A., Samoli E., Stafoggia M., de'Donato F. [et al.]. Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities. *Nat. Med.*, 2025, vol. 31, no. 4, pp. 1294–1302. DOI: 10.1038/s41591-024-03452-2
4. Basu R. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environ. Health*, 2009, vol. 8, no. 1, pp. 40. DOI: 10.1186/1476-069X-8-40
5. Kovats R.S., Hajat S. Heat Stress and Public Health: A Critical Review. *Annu. Rev. Public Health*, 2008, vol. 29, pp. 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843
6. Cheng J., Xu Z., Bambrick H., Prescott V., Wang N., Zhang Y., Su H., Tong S., Hu W. Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence. *Environ. Res.*, 2019, vol. 177, pp. 108610. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108610
7. Revich B., Shaposhnikov D. The influence of heat and cold waves on mortality in Russian subarctic cities with varying climates. *Int. J. Biometeorol.*, 2022, vol. 66, no. 12, pp. 2501–2515. DOI: 10.1007/s00484-022-02375-2
8. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. Climate change, heat waves, and cold spells as risk factors for increased mortality in some regions of Russia. *Studies on Russian economic development*, 2012, vol. 23, no. 2, pp. 195–207. DOI: 10.1134/S1075700712020116
9. Shaposhnikov D., Revich B., Bellander T., Bero Bedada G., Bottai M., Kharkova T., Kvasha E., Lezina E. [et al.]. Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010. *Epidemiology*, 2014, vol. 25, no. 3, pp. 359–364. DOI: 10.1097/EDE.0000000000000090

© Maksimenko M.R., 2025

Mikhail R. Maksimenko – Junior Researcher (e-mail: mikemaksimenko@gmail.com; tel.: +7 (915) 476-60-68; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-6676>).

10. Arbutnott K., Hajat S., Heaviside C., Vardoulakis S. What is cold-related mortality? A multi-disciplinary perspective to inform climate change impact assessments. *Environ. Int.*, 2018, vol. 121, pt 1, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.envint.2018.08.053
11. Gasparrini A., Guo Y., Hashizume M., Lavigne E., Zanobetti A., Schwartz J., Tobias A., Tong S. [et al.]. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *Lancet*, 2015, vol. 386, no. 9991, pp. 369–375. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0
12. Barnett A.G., Tong S., Clements A.C.A. What measure of temperature is the best predictor of mortality? *Environ. Res.*, 2010, vol. 110, no. 6, pp. 604–611. DOI: 10.1016/j.envres.2010.05.006
13. Vaneckova P., Neville G., Tippet V., Aitken P., Fitzgerald G., Tong S. Do Biometeorological Indices Improve Modeling Outcomes of Heat-Related Mortality? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, vol. 50, no. 6, pp. 1165–1176. DOI: 10.1175/2011JAMC2632.1
14. Shartova N.V., Shaposhnikov D.A., Konstantinov P.I., Revich B.A. Universal thermal climate index (UTCI) applied to determine thresholds for temperature-related mortality. *Health Risk Analysis*, 2019, no. 3, pp. 83–93. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.10.eng
15. Urban A., Di Napoli C., Cloke H.L., Kyselý J., Pappenberger F., Sera F., Schneider R., Vicedo-Cabrera A.M. [et al.]. Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe. *Environ. Res.*, 2021, vol. 198, pp. 111227. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111227
16. Revich B., Shaposhnikov D. Temperature-induced excess mortality in Moscow, Russia. *Int. J. Biometeorol.*, 2008, vol. 52, no. 5, pp. 367–374. DOI: 10.1007/s00484-007-0131-6
17. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Galkin V.T., Krylov S.A., Chertkova A.B. Impact of high ambient air temperatures on human health in Tver. *Gigiena i sanitariya*, 2005, no. 2, pp. 20–24 (in Russian).
18. Revitch B.A., Shaposhnikov D.A., Semoutnikova E.G. Climate conditions and ambient air quality as risk factors for mortality in Moscow. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2008, no. 7, pp. 29–35 (in Russian).
19. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Podol'naya M.A., Khor'kova T.L., Kvasha E.A. Heat waves in southern cities of European Russia as a risk factor for premature mortality. *Stud. Russ. Econ. Dev.*, 2015, vol. 26, pp. 142–150. DOI: 10.1134/S1075700715020100
20. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. Cold waves in southern cities of European Russia and premature mortality. *Stud. Russ. Econ. Dev.*, 2016, vol. 27, no. 2, pp. 210–215. DOI: 10.1134/S107570071602012X
21. Shartova N.V., Shaposhnikov D.A., Konstantinov P.I., Revich B.A. Air temperature and mortality: heat thresholds and population vulnerability study in Rostov-on-Don. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2019, vol. 2, pp. 66–94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-2-66-94 (in Russian).
22. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Anisimov O.A., Belolutskaia M.A. Heat waves and cold spells in three arctic and subarctic cities as mortality risk factors. *Gigiena i sanitariya*, 2018, vol. 97, no. 9, pp. 791–798. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-791-798 (in Russian).
23. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Anisimov O.A., Belolutskaia M.A. Impact of Temperature Waves on the Health of Residents in Cities of the Northwestern Region of Russia. *Stud. Russ. Econ. Dev.*, 2019, vol. 30, no. 3, pp. 327–333. DOI: 10.1134/S1075700719030158
24. Chernykh D.A., Taseiko O.V. Assessment of the risk mortality from thermal waves in Krasnoyarsk city. *Ekologiya cheloveka*, 2018, no. 2, pp. 3–8. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-2-3-8 (in Russian).
25. Grigorieva E.A. Heat waves at the southern part of the Far East and human health. *ZNiSO*, 2017, no. 2 (287), pp. 11–14. DOI: 10.35627/2219-5238/2017-287-2-11-14 (in Russian).
26. Grigorieva E.A. Heat and cold waves at the South of the Russian Far East in 1999–2017. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 606, no. 1, pp. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012016
27. Shaposhnikov D., Revich B. Toward meta-analysis of impacts of heat and cold waves on mortality in Russian North. *Urban Climate*, 2016, vol. 15, pp. 16–24. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.11.007
28. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Health Consequences of the Russian Weather. *Ecological Economics*, 2017, vol. 132, pp. 290–306. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.10.021
29. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Misfortunes never come singly: Consecutive weather shocks and mortality in Russia. *Econ. Hum. Biol.*, 2018, vol. 31, pp. 249–258. DOI: 10.1016/j.ehb.2018.08.008
30. Weinberger K.R., Spangler K.R., Zanobetti A., Schwartz J.D., Wellenius G.A. Comparison of temperature-mortality associations estimated with different exposure metrics. *Environ. Epidemiol.*, 2019, vol. 3, no. 5, pp. e072. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000072
31. Clemens K.K., Ouédraogo A.M., Li L., Voogt J.A., Gilliland J., Scott Kravynhoff E., Leroyer S., Shariff S.Z. Evaluating the association between extreme heat and mortality in urban Southwestern Ontario using different temperature data sources. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 8153. DOI: 10.1038/s41598-021-87203-0
32. Daly C. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *Int. J. Clim.*, 2006, vol. 26, no. 6, pp. 707–721. DOI: 10.1002/joc.1322
33. Spangler K.R., Weinberger K.R., Wellenius G.A. Suitability of gridded climate datasets for use in environmental epidemiology. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2019, vol. 29, no. 6, pp. 777–789. DOI: 10.1038/s41370-018-0105-2
34. Donat M.G., Sillmann J., Wild S., Alexander L.V., Lippmann T., Zwiers F.W. Consistency of Temperature and Precipitation Extremes across Various Global Gridded In Situ and Reanalysis Datasets. *J. Climate*, 2014, vol. 27, no. 13, pp. 5019–5035. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00405.1
35. Mistry M.N., Schneider R., Masselot P., Royé D., Armstrong B., Kyselý J., Orru H., Sera F. [et al.]. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 5178. DOI: 10.1038/s41598-022-09049-4

36. Wu Y., Xu J., Liu Z., Han B., Yang W., Bai Z. Comparison of Population-Weighted Exposure Estimates of Air Pollutants Based on Multiple Geostatistical Models in Beijing, China. *Toxics*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 197. DOI: 10.3390/toxics12030197
37. Keller J.P., Peng R.D. Error in estimating area-level air pollution exposures for epidemiology. *Environmetrics*, 2019, vol. 30, no. 8, pp. e2573. DOI: 10.1002/env.2573
38. Jalaludin B., Morgan G., Lincoln D., Sheppard V., Simpson R., Corbett S. Associations between ambient air pollution and daily emergency department attendances for cardiovascular disease in the elderly (65+ years), Sydney, Australia. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2006, vol. 16, no. 3, pp. 225–237. DOI: 10.1038/sj.jea.7500451
39. De Schrijver E., Folly C.L., Schneider R., Royé D., Franco O.H., Gasparrini A., Vicedo-Cabrera A.M. A Comparative Analysis of the Temperature-Mortality Risks Using Different Weather Datasets Across Heterogeneous Regions. *Geo-Health*, 2021, vol. 5, no. 5, pp. e2020GH000363. DOI: 10.1029/2020GH000363
40. Grigorieva E.A., Revich B.A. Health Risks to the Russian Population from Temperature Extremes at the Beginning of the XXI Century. *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 10, pp. 1331. DOI: 10.3390/atmos12101331
41. Ballester J., van Daalen K.R., Chen Z.-Y., Achebak H., Antó J.M., Basagaña X., Robine J.-M., Herrmann F.R. [et al.]. The effect of temporal data aggregation to assess the impact of changing temperatures in Europe: an epidemiological modelling study. *Lancet Reg. Health Eur.*, 2023, vol. 36, pp. 100779. DOI: 10.1016/j.lanepe.2023.100779
42. Shchur A.E., Timonin S.A., Churilova E.V., Sergeev E.V., Sokolova V.V., Rodina O.A., Shamsutdinov B.A., Jdanov D.A., Shkolnikov V.M. Russian Short-Term Mortality Fluctuations Data Series. *Population and Economics*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 188–197. DOI: 10.3897/popecon.7.e114628
43. Inness A., Engelen R., Flemming J. The new CAMS global reanalysis of atmospheric composition: Newsletter. *ECMWF*, 2019, no. 158. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/158/meteorology/new-cams-global-reanalysis-atmospheric-composition> (April 11, 2025).
44. Gasparrini A. Distributed Lag Linear and Non-Linear Models in R: The Package dlnm. *J. Stat. Softw.*, 2011, vol. 43, no. 8, pp. 1–20.
45. Tobías A., Hashizume M., Honda Y., Sera F., Fook Sheng Ng C., Kim Y., Royé D., Chung Y. [et al.]. Geographical Variations of the Minimum Mortality Temperature at a Global Scale: A Multicountry Study. *Environ. Epidemiol.*, 2021, vol. 5, no. 5, pp. e169. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000169
46. Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models. *Stat. Med.*, 2013, vol. 33, no. 5, pp. 881–899. DOI: 10.1002/sim.5963
47. Gasparrini A., Armstrong B., Kenward M.G. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations. *Stat. Med.*, 2012, vol. 31, no. 29, pp. 3821–3839. DOI: 10.1002/sim.5471
48. Sera F., Armstrong B., Blangiardo M., Gasparrini A. An extended mixed-effects framework for meta-analysis. *Stat. Med.*, 2019, vol. 38, no. 29, pp. 5429–5444. DOI: 10.1002/sim.8362
49. Yin Q., Wang J., Ren Z., Li J., Guo Y. Mapping the increased minimum mortality temperatures in the context of global climate change. *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 4640. DOI: 10.1038/s41467-019-12663-y
50. Ruuhela R., Hyvärinen O., Jylhä K. Regional Assessment of Temperature-Related Mortality in Finland. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 406. DOI: 10.3390/ijerph15030406
51. Lee M., Shi L., Zanobetti A., Schwartz J.D. Study on the association between ambient temperature and mortality using spatially resolved exposure data. *Environ. Res.*, 2016, vol. 151, pp. 610–617. DOI: 10.1016/j.envres.2016.08.029
52. Royé D., Íñiguez C., Tobías A. Comparison of temperature–mortality associations using observed weather station and reanalysis data in 52 Spanish cities. *Environ. Res.*, 2020, vol. 183, pp. 109237. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109237
53. Choi H.M., Bell M.L. Heat-mortality relationship in North Carolina: Comparison using different exposure methods. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2023, vol. 33, no. 4, pp. 637–645. DOI: 10.1038/s41370-023-00544-y
54. Hanigan I., Hall G., Dear K.B.G. A comparison of methods for calculating population exposure estimates of daily weather for health research. *Int. J. Health Geogr.*, 2006, vol. 5, pp. 38. DOI: 10.1186/1476-072X-5-38

Maksimenko M.R. Temperature-related mortality risks: effects of different sources of climatic data in the RF regions in 2004–2019. *Health Risk Analysis*, 2025, no. 2, pp. 30–45. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.03.eng

Получена: 07.05.2025

Одобрена: 20.05.2025

Принята к публикации: 22.06.2025