
**Биоклиматическое районирование России с использованием
Универсального термического климатического индекса (UTCI)
в условиях современного и будущего климатов**

В.В. Виноградова, Т.Б. Туткова*

Институт географии РАН,
Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29

*Адрес для переписки: vvvinog@yandex.ru

Реферат. На основании Универсального термического климатического индекса UTCI проведена оценка биоклиматических условий на территории России в начале и середине XXI века. Исследовались зимние и летние особенности UTCI в условиях современного (2000-2022 гг.) и будущего климата (2040-2059 гг.) для двух сценариев: «мягкого» (SSP1-2.6) и «жесткого» (SSP5-8.5). Расчет среднесуточных значений индекса UTCI на территории России был выполнен с использованием программного пакета BioKlima 2.6. Для расчета использовались ежедневные данные трех моделей, участвующих в CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project): Института вычислительной математики РАН, Метеорологического офиса Хэдли Центра и Метеорологического института им. Макса Планка. Показано, что на территории России в условиях современного и будущего климата для обоих сценариев преобладают условия холодного стресса. Зимой практически на всей территории наблюдается холодный стресс различных градаций, а летом – условия отсутствия теплового стресса, включая комфортные условия. Методом кластеризации k-средних выполнено биоклиматическое районирование территории России для периодов 2000-2022 гг., по данным метеорологической сети, и для периода 2040-2059 гг. – по данным 3-х глобальных климатических моделей. На территории России выделено четыре квазиоднородных района по продолжительности благоприятных и неблагоприятных биоклиматических условий. Установлено, что в будущем климате можно ожидать существенное уменьшение площади района с наихудшими биоклиматическими условиями и расширение наиболее «теплого» района, по сценарию SSP5-8.5, по сравнению со сценарием SSP1-2.6.

Ключевые слова. Универсальный термический климатический индекс (UTCI), холодный стресс, тепловые нагрузки, тепловой комфорт, кластерный анализ, метод k-средних, модельные прогнозы, сценарии изменения климата.

Bioclimatic zoning of Russia using the universal thermal index (UTCI) in current and future climates

V.V. Vinogradova, T.B. Titkova*

Institute of Geography RAS,
29, Staromonetnyi lane, 109017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: vvvinog@yandex.ru

Abstract. Based on the Universal Thermal Climate Index (UTCI), an assessment of bioclimatic conditions in Russia at the beginning and middle of the 21st century was conducted. Winter and summer features of the UTCI were examined under present (2000-2022) and future (2040-2059) climates for two scenarios: a “mild” scenario (SSP1-2.6) and a “severe” scenario (SSP5-8.5). The calculation of daily mean UTCI values across Russia was performed using the BioKlima 2.6 software package. Daily data from three models participating in CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) were used for the calculations: the Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, the UK Met Office Hadley Centre, and the Max Planck Institute for Meteorology. It was shown that, under both current and future climates, cold stress conditions dominate in Russia for both scenarios. Cold stress of varying degrees is observed throughout most of the territory in winter, while in summer, conditions are characterized by the absence of heat stress, including comfortable conditions. Using the k-means clustering method, bioclimatic zoning of Russia was conducted for the periods 2000-2022 (based on meteorological network data) and 2040-2059 (based on data from 3 global climate models). Four quasi-homogeneous regions were identified in Russia based on the duration of favorable and unfavorable bioclimatic conditions. It has been established that, in the future climate, a significant reduction in the area with the worst bioclimatic conditions and an expansion of the “warmest” region can be expected under the SSP5-8.5 scenario, compared to the SSP1-2.6 scenario.

Keywords. Universal Thermal Climate Index (UTCI), cold stress, heat load, thermal comfort, cluster analysis, k-means method, model projections, climate change scenarios.

Введение

В Докладе об изменении климата IPCC говорится, что антропогенное изменение климата уже влияет на многие метеорологические и климатические экстремальные события во всех регионах Земного шара (IPCC, 2021). С ним связывают возникновение волн тепла и холода, засух и сильных ливней (NASEM, 2016; Fowler et al., 2021). В частности, волны тепла становятся самой смертоносной метеорологической опасностью (WMO, 2019). При этом, с 1980-х годов каждое последующее десятилетие было теплее, чем предыду-

щее, а десятилетие 2011-2020 гг. стало самым теплым за всю историю наблюдений (WMO, 2021).

Практически на всей территории России также происходит потепление различной степени интенсивности (Третий..., 2022). Скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры за 1976-2023 гг. составила $+0.5^{\circ}\text{C}/10$ лет. Максимум летнего потепления отмечается на юге ЕЧР. Минимум потепления в среднем за год отмечен на юге Сибири и на востоке Якутии, где зимой все еще наблюдается небольшая область убывания температуры (Доклад..., 2024).

Воздействие текущих и будущих климатических условий на человека может быть оценено с помощью биоклиматических индексов. Универсальный термический климатический индекс (Universal Thermal Climate Index – UTCI) – один из наиболее современных индексов, учитывающих комплексное воздействие на человека температуры, скорости ветра, солнечной радиации и влажности воздуха. Этот индекс используется в различных областях биометеорологии человека как для оценки краткосрочного воздействия погоды, так и для оценок последствий долгосрочных изменений климата, а также в эпидемиологии, медицинских исследованиях, биометеорологических прогнозах, туризме и рекреации, оценке биоклимата разного масштаба (Staiger et al., 2019; Katavoutas et al., 2022). Универсальная шкала оценок UTCI делает его независимым от характеристик населения, уровня акклиматизации и индивидуальных особенностей человека (например, возраста, массы тела и состояния здоровья), а основана на оценке теплового стресса. Индекс может применяться в любых климатических условиях, а результаты, полученные в разных районах, полностью сопоставимы (Błażejczyk, Kunert, 2011; Błażejczyk, Błażejczyk, 2014). UTCI может применяться в ключевых областях биометеорологии человека, таких, как ежедневное прогнозирование и предупреждения, городское и региональное планирование, экологическая эпидемиология и исследования воздействия климата на человека (Pappenberger et al. 2015; Pappenberger, Hannah, 2018). Di Napoli et al. (2018) использовали UTCI в анализе термической биоклиматической изменчивости в Европе и показали связь между этой изменчивостью и здоровьем человека, в частности увеличение теплового стресса в Европе за последние десятилетия способствовало росту смертности в условиях умеренного и сильного теплового стресса даже при росте индекса UTCI на 1°C (по индексной шкале). Этот индекс был использован Błażejczyk and Kunert (2011) для исследования сезонных особенностей биоклимата и региональной изменчивости биоклимата в Европе, что позволило объяснить, почему определенные сезоны и регионы могут быть опасными для человека с точки зрения его физиологических реакций на внешние раздражители.

Оценка биоклиматических условий на территории России при помощи этого индекса показала, что на большей части территории страны в условиях современного климата преобладают условия холодного стресса, но отмечается тенденция улучшения биоклиматических условий в северных регионах и

увеличения тепловой нагрузки на юге европейской территории (Виноградова, 2019; Vinogradova, 2021). Сравнительный анализ биоклиматических условий по индексу UTCI Чукотки и Аляски показал, что за период 1979-2020 гг. частота возникновения экстремальных холодов на Аляске и Чукотке снизилась приблизительно на 25% (Grigorieva et al., 2023).

При проведении географических исследований, в частности изучения воздействия текущих и будущих климатических условий на человека, как правило, возникает потребность выделения пространства с математически обоснованной высокой схожестью параметров, т.е. нахождение групп (кластеров) квазиоднородных районов по продолжительности благоприятных и неблагоприятных биоклиматических условий.

Целью работы является выделение на территории России методом кластеризации *k*-средних квазиоднородных районов по продолжительности благоприятных (комфорт) и неблагоприятных (холодовой и тепловой стресс) биоклиматических условий для современного периода 2000-2022 гг., по данным метеосети и возможных будущих изменений биоклиматических условий, середине XXI века (2040-2059 гг.), по данным трех глобальных климатических моделей CMIP6 с использованием универсального термического климатического индекса (UTCI), для двух контрастных сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5.

Материалы и методы

Оценка биоклиматических условий на территории России в начале и середине XXI века проводилась с использованием Универсального термического климатического индекса UTCI. Индекс основан на многоузловой модели Fiala теплового баланса человека (Fiala et al., 2012) и показывает тепловой стресс окружающей среды, воздействующий на организм человека (De Freitas, Grigorieva, 2017). Индекс UTCI отражает термические условия окружающей среды и применяется в основных областях биометеорологии человека (Błażejczyk et al., 2010; 2013; Bröde et al., 2010; 2012; Jendritzky et al., 2009; 2012). Индекс UTCI можно охарактеризовать как эквивалентную температуру окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$), которая оказывает такое же физиологическое воздействие на человека, как и фактическая окружающая среда (Bröde et al., 2012). Отклонение UTCI от температуры воздуха (T_a) зависит от фактических значений температуры воздуха, средней лучистой температуры (T_{mrt}), скорости ветра (v_a) и влажности, выраженной как упругость водяного пара (e) или относительная влажность (R) (Błażejczyk et al., 2013)

$$\text{UTCI} = f(T_a; T_{\text{mrt}}; v_a; e) = T_a + \Delta(T_a; T_{\text{mrt}}; v_a; e)$$

Оценочная шкала индекса UTCI основана на различных комбинациях температуры прямой кишки и кожи, потоотделения, озноба и т.д. Градации UTCI, с точки зрения теплового воздействия на человека, представлены в табл. 1 (Błażejczyk et al., 2013; Bröde et al., 2012; Fiala et al., 2012).

Таблица 1. Классификация индекса UTCI с точки зрения теплового воздействия на человека

Table 1. Classification of the UTCI in terms of human thermal exposure

Диапазон UTCI (°C)	Категория стресса	Физиологические реакции
Выше +46	Крайний тепловой стресс	Увеличение градиента ректальной температуры (T_{re}). Резкое снижение общей чистой потери тепла. Резкое увеличение интенсивности потоотделения > 650 г/ч.
+38 до +46	Очень сильный тепловой стресс	Градиент температуры к коже < 1 °K (за 30 мин.). Увеличение T_{re} за 30 мин.
+32 до +38	Сильный тепловой стресс	Динамическое тепловое ощущение (DTS) за 120 мин. > +2. Усредненная скорость потоотделения > 200 г/ч. Увеличение T_{re} за 120 мин. Скрытые тепловые потери > 40 Вт за 30 мин. Мгновенное изменение температуры кожи > 0 °K/мин.
+26 до +32	Умеренный тепловой стресс	Изменение градиентов скорости потоотделения, T_{re} и температуры кожи: средней (T_{skm}), лица (T_{skfc}), рук (T_{skhn}). Появление потоотделения через 30 мин. Резкое увеличение влажности кожи.
+9 до +26	Нет теплового стресса	Средняя скорость потоотделения > 100 г/час. DTS за 120 мин. < 1. DTS от -0.5 до 0.5 (среднее значение). Средние скрытые потери тепла > 40 Вт. Плато во временном градиенте T_{re} .
+9 до 0	Слабый холододовый стресс	DTS за 120 мин. < -1. Локальный минимум T_{skhn} (используйте перчатки).
0 до -13	Умеренный холододовый стресс	DTS за 120 мин. < -2. Кожный кровоток при 120 мин. меньше, чем при 30 минутах (сужение сосудов). Средняя T_{skfc} < 15 °C (боль). Снижение T_{skhn} . Градиент T_{re} < 0 °K/ч. За 30 мин. температура кожи лица T_{skfc} < 15 °C (боль). Градиент < -1 °K/ч (для сравнения).
-13 до -27	Сильный холододовый стресс	Средняя T_{skfc} < 7 °C (онемение). Градиент T_{re} < -0.1 °K/ч. T_{re} уменьшается от 30 до 120 мин. Увеличение градиента температуры в теле.
-27 до -40	Очень сильный холододовый стресс	За 120 мин. T_{skfc} < 0 °C (обморожение). Более резкое снижение T_{re} . За 30 мин. T_{skfc} < 7 °C (онемение). Появление дрожи. Градиент T_{re} < -0.2 °K/ч. Средняя T_{skfc} < 0 °C (обморожение). За 120 мин. T_{skfc} < -5 °C (высокий риск обморожения).
Ниже -40	Экстремальный холододовый стресс	Градиент T_{re} < -0.3 °K/ч. За 30 мин. T_{skfc} < 0 °C (обморожение).

Диапазон значений UTCI от +18 до +26°C может считаться «зоной теплового комфорта».

Для расчетов индекса UTCI были использованы среднесуточные значения приземной температуры воздуха, скорости ветра, влажности воздуха и атмосферного давления за период 2040-2059 гг. (Copericus, 2021), полученные на основе результатов расчетов трех моделей участвующих в CMIP6, и для двух сценариев изменения климата: SSP1-2.6 и SSP5-8.5 (IPCC, 2021). Это

сценарий с очень высокими выбросами парниковых газов, которые примерно вдвое превышают нынешние уровни к 2100 г. (SSP5-8.5) и сценарий с низкими выбросами, которые снижаются до чистого нуля, примерно к 2050 г. (SSP1-2.6). В сценарии SSP1-2.6 предполагается усиление контроля за загрязнением воздуха за счет заметной декарбонизации. Использовались результаты расчетов глобальных климатических моделей Института вычислительной математики РАН INM-CM5-0 (Володин и др., 2017), Метеорологического офиса Хэдли Центра HadGEM3-GC31 (Williams et al., 2017) и Метеорологического института им. Макса Планка MPI-ESM1-2-LR (Mauritsen, Roeckner, 2020) (табл. 2).

Таблица 2. Основные характеристики использованных моделей

Table 2. Main characteristics of used models

Модель	Организация	Характеристики	Шаг по широте и долготе
INM-CM5-0	Институт вычислительной математики РАН	Модель включает в себя компоненты: аэрозоль: атмосфера, земля, океан, морской лед.	1.5° (широта) × 2° (долгота)
HadGEM3-ES	Метеорологический офис Центра Хэдли	Модель включает в себя компоненты: аэрозоль, земля, океан, морской лед.	1.25° (широта) × 1.875° (долгота)
MPI-ESM1-2-LR	Институт метеорологии им. Макса Планка	Модель включает в себя компоненты: аэрозоль, земля, океан, морской лед	1.865° (широта) × 1.875° (долгота)

Выбор этих моделей обусловлен тем, что эти модели успешно воспроизводят основные климатические характеристики именно на территории России по сравнению с эмпирическими данными. Также модели Метеорологического офиса Хэдли Центра и Метеорологического института им. Макса Планка использовались для оценки биоклиматических условий будущего климата в европейских городах и на курортах Турции и показали хорошие результаты при сравнении с данными наблюдений (Katavoutas et al., 2022; Bilgin et al., 2024).

Были рассчитаны среднесуточные значения UTCI как отдельно для каждой модели, так и среднее значение для трех моделей. Для этого данные трех моделей были приведены к единому шагу $2^\circ \times 2^\circ$ по широте и долготе. Оценка биоклиматических условий для современного периода 2000-2022 гг. проводилась по данным метеорологических станций на территории России из архива ВНИИГМИ-МЦД (www.meteo.ru). Для всех расчетов UTCI использовался программный пакет BioKlima © 2.6¹⁾.

Проведенное нами ранее сравнение индекса UTCI по стационарным и модельным данным показало хорошее сходство значений двух массивов, но

¹⁾ BioKlima 2.6, software package, <http://www.igipz.pan.pl/geockoklimat/blaz/bio-klima.htm>

модели несколько занижают значения UTCI по сравнению со стационарными данными, хотя, в целом использование модельных данных для расчета UTCI допустимо, особенно учитывая широкие диапазоны градаций индекса.

По значениям индекса, осредненным для трех моделей для периода 2040-2059 гг., построены карты распределения UTCI для зимних и летних условий. Аналогичные карты построены для современного периода (2000-2022 гг.) по стационарным данным. Получены оценки и процента дней с тепловым и холодным стрессом и комфортом на территории России в условиях современного и будущего климата были использованы для проведения кластерного анализа с целью выделения на территории России квазиоднородных регионов по продолжительности благоприятных и неблагоприятных биоклиматических условий. С помощью метода кластеризации k -средних было выполнено биоклиматическое районирование территории России для периодов 2000-2022 гг., по данным метеорологической сети, и для периода 2040-2059 гг. – по данным 3-х глобальных климатических моделей CMIP6.

Метод кластерного анализа активно применяется в том числе в климатических и географических исследованиях (Гилязов, 2015; Золотокрылин и др., 1998; Поляков, Кужевская, 2012; Эзау, 1995). Кластерный анализ – это метод группировки объектов на кластеры (группы) на основе схожести их характеристик. Наиболее часто используются методы иерархической кластеризации и метод k -средних вероятностного подхода (Гилязов, 2015).

Метод k -средних заключается в разбиении множества элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров k . На каждой итерации перевычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения центра масс кластеров (https://en.wikipedia.org/wiki/Cluster_analysis). К достоинствам этого метода можно отнести относительную простоту и быстрдействие алгоритма, а также хорошую производительность на больших данных. Недостатком метода является необходимость заранее задать число кластеров. Для определения числа кластеров были использованы индекс Дэвиса-Боулдина и метод «локтя». Поскольку алгоритмы, которые создают кластеры с низкими внутрикластерными расстояниями (высокое внутрикластерное сходство) и высокими межкластерными расстояниями (низкое межкластерное сходство), будут иметь низкий индекс Дэвиса-Боулдина, алгоритм кластеризации, который создает набор кластеров с наименьшим индексом Дэвиса-Боулдина, считается лучшим алгоритмом на основе этого критерия (https://en.wikipedia.org/wiki/Cluster_analysis). По методу «локтя» вычисляется сумма внутрикластерных расстояний (SSE) для каждого значения k (число кластеров) и строится график зависимости суммы расстояний от k . Оптимальным считается значение k , при котором происходит резкое замедление уменьшения суммы расстояний. Оба метода показали, что оптимальное число кластеров равно четырем (рис. 1, табл. 3).

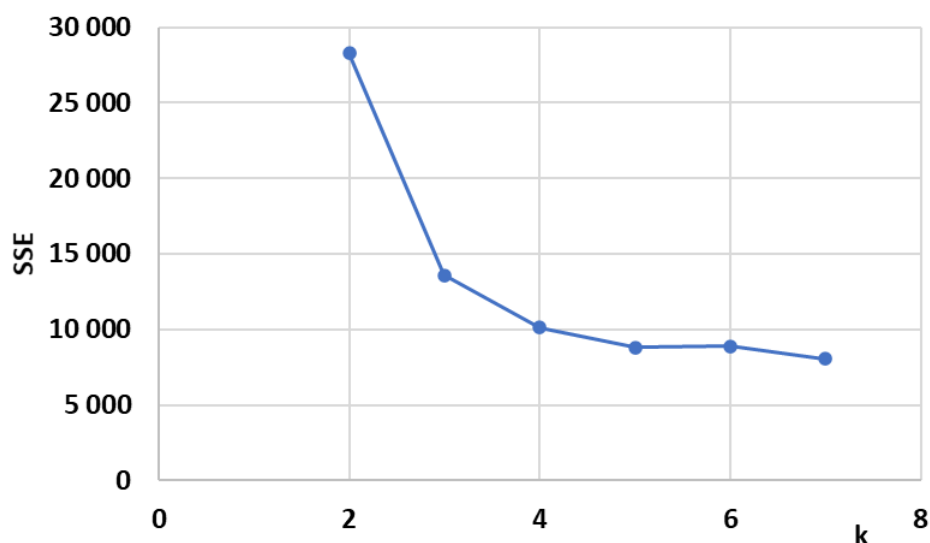


Рисунок 1. Метод локтя для определения оптимального числа кластеров

Figure 1. Elbow method to determine the optimal number of clusters

Таблица 3. Индекс Дэвиса-Боулдина для определения оптимального числа кластеров

Table 3. Davis-Bouldin index to determine optimal number of clusters

Число кластеров	Индекс Дэвиса-Боулдина
3	0.254
4	0.158
5	0.206

Результаты и дискуссия

Для современного (2000-2022 гг.) и будущего климата (2040-2059 гг.) были построены карты зимних и летних значений индекса (рис. 2). Как уже отмечалось в (Vinogradova, 2021), на территории России может наблюдаться большинство градаций UTCI, а точнее, все градации холодового стресса и почти все теплового. В современном климате зимой на всей территории отмечается холодовой стресс различных градаций: от экстремального – на Арктическом побережье Сибири до умеренного – на юге европейской территории. На азиатской части преобладает очень сильный и сильный холодовой стресс (на юге), а на европейской – сильный холодовой стресс и умеренный холодовой стресс южнее 50° с.ш. (рис. 2а). Зимой в будущем климате, по обоим сценариям на значительной территории будет преобладать экстремальный и очень сильный холодовой стресс (рис. 2б, в). Но зона экстремального холодового стресса будет наблюдаться на побережье Северного Ледовитого океана от Ямала до севера Чукотки (Grigorieva, et al., 2023), расширяясь на юг (при-

близительно до 65° с.ш.) на севере Красноярского края по сценарию SSP1-2.6 (рис. 2б). По сценарию SSP5-8.5 область экстремального холодого стресса сокращается на Арктическом побережье Якутии и наблюдается на Арктических островах (рис. 2в). Очень сильный холодого стресс будет отмечаться на севере европейской территории, на Урале, в азиатской части страны, кроме юга Западной и Центральной Сибири (за исключением горного Алтая) и южной половины Камчатки. На большей части европейской территории, на юге Сибири и Камчатки зимние условия по индексу UTCI будут охарактеризованы как сильный холодого стресс. Умеренный холодого стресс будет наблюдаться южнее 50° с.ш. европейской территории по обоим сценариям (рис. 2б, в). По сценарию SSP5-8.5 область очень сильного холодого стресса сокращается на северо-западе европейской территории, а на юге расширяется область умеренного холодого стресса (рис. 2в). Те же тенденции снижения частоты холодого стресса отмечаются в городах Северной Европы (Antonescu et al., 2021; Founda et al., 2019).

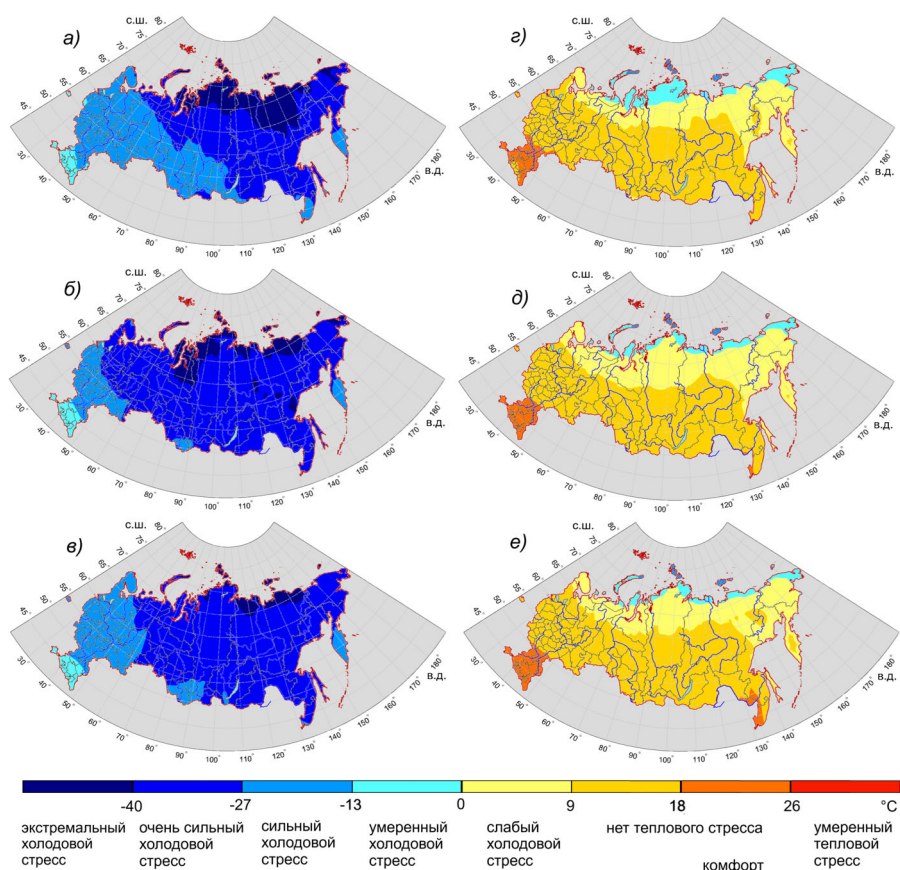


Рисунок 2. Средние значения UTCI зимой (декабрь-февраль) (а, б, в) и летом (июнь-август) (г, д, е) для периода 2000-2022 гг. (а, г) и для периода 2040-2059 гг. по сценарию SSP1-2.6 (б, д) и сценарию SSP5-8.5 (в, е) – среднее по трем моделям

Figure 2. Average UTCI values in winter (December-February) (a, b, c) and summer (June-August) (y, d, e) for the period 2000-2022 (a, d) and for the period 2040-2059 for scenario SSP1-2.6 (b, d) and scenario SSP5-8.5 (c, e) – average for three models

Летом (июнь-август) индекс UTCI представлен тремя градациями: от умеренного холодного стресса на Арктических островах и на побережье Северного Ледовитого океана до градации «нет теплового стресса», которая занимает большую часть России. Зона комфорта, значения UTCI от +18 до +26°C, занимает южную часть европейской территории, южнее 50° с.ш. и самый юг Приморского края (рис. 2г). Для сценариев будущего климата индекс UTCI представлен теми же градациями (рис. 2д, е). На большей части территории России преобладают условия отсутствия теплового стресса, включая комфорт, а севернее 65° с.ш. – слабого и умеренного холодного стресса. Область комфорта будет расширяться по сценарию SSP5-8.5, по сравнению со сценарием SSP1-2.6, на юге европейской территории и Приморского края, при этом все «более теплые» градации UTCI сдвигаются на север, примерно на 1-2° широты (рис. 2е). Но на юге европейской территории в дневные часы могут наблюдаться условия умеренного теплового стресса (Vinogradova, 2021). Это согласуется с прогнозами для южных городов Центральной Европы, где периоды сильной жары станут более частыми и интенсивными в будущем климате (Guerreiro et al., 2018).

Полученные оценки и проценты дней с тепловым, холодным стрессом и отсутствием теплового стресса позволили выделить методом кластеризации k-средних на территории России четыре квазиоднородные района по продолжительности благоприятных и неблагоприятных биоклиматических условий (рис. 3).

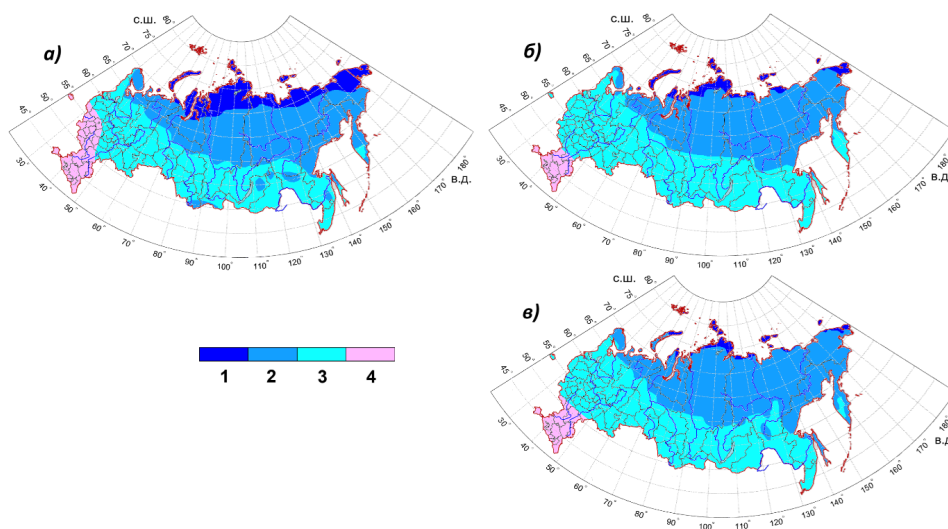


Рисунок 3. Квазиоднородные биоклиматические районы по индексу UTCI для периода 2000-2022 гг. (а) и для периода 2040-2059 гг. – по сценарию SSP1-2.6 (б) и сценарию SSP5-8.5 (в)

Figure 3. UTCI quasi-heterogeneous bioclimatic regions for period 2000-2022 (a) and for period 2040-2059 under scenario SSP1-2.6 (b) and scenario SSP5-8.5 (c)

Первому району присущи наиболее суровые условия. Здесь средняя продолжительность холодного стресса, самых суровых градаций (от экстремального до сильного) составляет около 70%, т.е. более 8 месяцев в году.

Дней с тепловым стрессом (жарой) здесь вообще нет, а условия «нет теплового стресса» отмечаются в среднем 5% дней, или 15 дней в году. В современном климате (2000-2022 гг.) этот район охватывает Арктическое побережье и острова, полуострова Таймыр и Чукотка (рис. 3а). В середине XXI века по обоим сценариям южная граница этого района сдвигается на север и по сценарию SSP5-8.5 такие условия будут отмечаться только на Арктических островах (рис. 3б, в). Границы этого района во многом совпадают с границами абсолютно дискомфортной зоны на картах «Районирования территории России по природным условиям жизни населения» (Золотокрылин и др., 2012, Виноградова и др., 2022).

Большая часть второго района расположена на северо-востоке страны и характеризуется чуть менее суровыми условиями. Средняя продолжительность сильного холодого стресса здесь более полугода, а условий без холодого стресса – около 10% дней, т.е. более месяца. Жарких дней здесь может быть менее 1% процента дней. В оставшуюся часть года здесь отмечается умеренный холодого стресс (от 0 до -13°CUTCI).

В современном климате этот район расположен на севере европейской территории, расширяясь на юг на азиатской территории приблизительно до 65° с.ш. и до 50° с.ш. в Магаданской области (рис. 3а). В 2040-2059 гг. на азиатской части страны можно ожидать продвижение этого района как в северном, так и в южном направлении приблизительно до 60° с.ш. (рис. 3б, в). Южную границу этого района можно соотнести с южной границей неблагоприятной зоны на карте (Золотокрылин и др., 2012).

Третий район занимает значительную часть территории России, как в современном, так и в будущем климате (рис. 3). Для него характерна продолжительность сильного холодого стресса около 40% дней в году, или около 5 месяцев; благоприятные условия с градацией «нет теплового стресса» длятся примерно 3 месяца, а тепловой (жаркий) стресс – до одной недели. В современных условиях на европейской территории этот район занимает восточную часть европейской территории, а западную ее часть относят к четвертому району. В будущем климате третий район занимает большую часть европейской территории (рис. 3).

В начале XXI века четвертый район занимает западную и южную часть европейской территории, соответствуя благоприятной зоне на карте «Районирования территории России по природным условиям жизни населения» (Золотокрылин и др., 2012), а в середине XXI века – только на южную ее часть (рис. 3). В этом районе длительность сильного холодого стресса составляет полтора-два месяца. Больше четырех месяцев условия здесь соответствуют градации «нет теплового стресса», а жаркий стресс может длиться полмесяца и более.

На рис. 4 представлено изменение площадей биоклиматических районов в современном и модельном климатах. В первую очередь обращает на себя внимание значительное уменьшение площади первого района в середине XXI века на 9 процентных пунктов (п.п.) по сценарию SSP1-2.6 и на 13 п.п. по сценарию SSP5-8.5 по сравнению с современным климатом. Площадь второго и

третьего районов увеличивается в 2040-2059 гг. по обоим сценариям, причем площадь второго района увеличится в основном за счет сокращения первого района. В будущем климате площадь третьего района увеличивается на 2 п.п. по сценарию SSP1-2.6 и на 8 п.п. по сценарию SSP5-8.5 за счет продвижения этого района на север. В середине XXI века площадь четвертого района уменьшается, поскольку, по модельным прогнозам, к нему не относятся западные районы европейской части России. Но по сценарию SSP5-8.5 площадь этого района станет больше, по сравнению со сценарием SSP1-2.6, за счет его расширения на север.

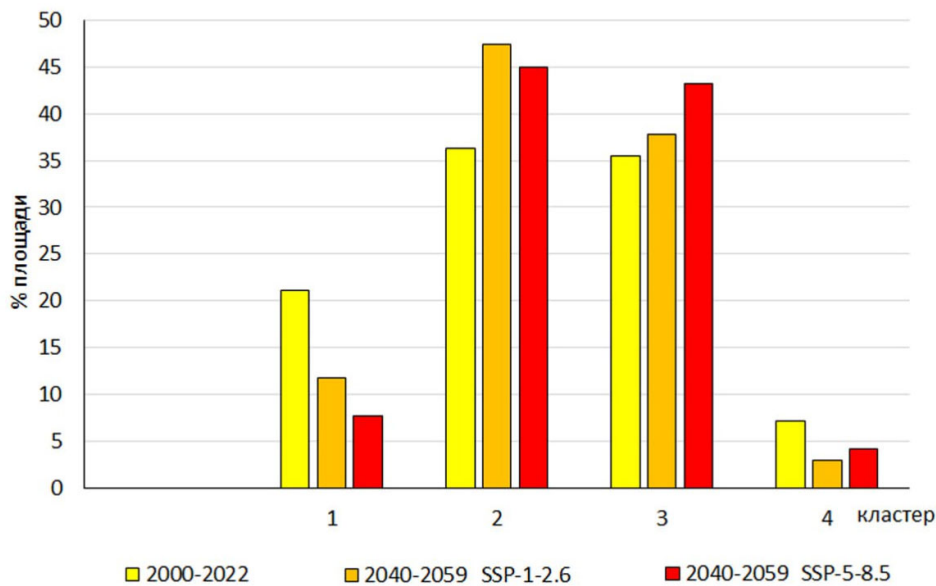


Рисунок 4. Площадь биоклиматических районов по индексу UTCI (% от территории России) для периода 2000-2022 гг. и для периода 2040-2059 гг. по сценариям SSP1-2.6 и сценарию SSP5-8.5

Figure 4. The area of bioclimatic regions according to the UTCI index (% of the territory of Russia) for the period 2000-2022 and for the period 2040-2059 according to SSP1-2.6 scenarios and scenario SSP5-8.5

Заключение

По-прежнему можно констатировать, что как в современном, так и в будущем климате в России будет преобладать холодовой стресс различных градаций, но в середине XXI века (2040-2059 гг.) можно ожидать увеличения числа дней с тепловым стрессом, особенно на юге и по сценарию SSP5-8.5.

Проведенное биоклиматическое районирование на основании продолжительности периодов с тепловым и холодовым стрессом и нейтральных условий позволили выделить на территории России четыре района, границы которых во многом соответствуют карте «Районирования территории России по природным условиям жизни населения» (Золотокрылин и др., 2012).

В будущем климате можно ожидать существенное уменьшение площади первого района с наихудшими биоклиматическими условиями по индексу UTCI. Для сценария SSP5-8.5 возможно расширение наиболее «теплого» – четвертого района – на север, по сравнению со сценарием SSP1-2.6 и увеличения площади третьего района, в основном, за счет более неблагоприятного второго.

Полученные результаты позволяют лучше оценить продолжительность различных градаций теплового стресса на территории России и его изменения в будущем климате, что имеет важное значение, поскольку может привести к более целенаправленным действиям, которые могли бы быть приняты политиками в стратегиях адаптации, особенно в южных городах, где население особенно уязвимо к тепловому риску, и на северо-востоке страны, где по-прежнему значительно воздействие холодного стресса. Прогнозируемые изменения повторяемости оптимальных тепловых условий (отсутствие теплового и холодного стресса), помимо влияния на качество жизни и самочувствие людей, будет способствовать возможному перераспределению туристских потоков в регионы с преобладанием оптимальных тепловых условий большую часть года.

«Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024)».

Список литературы

Виноградова, В.В. (2019) Универсальный индекс теплового комфорта на территории России, *Известия РАН серия геогр.*, № 2, с. 3-19.

Виноградова, В.В., Глезер, О.Б., Грачева, Р.Г., Дорина, А.Л., Золотокрылин, А.Н., Котов, А.В., Куричев, Н.К., Моргунов, Б.А., Поташников, В.Ю., Птичников, А.В., Проскурякова, Л.Н., Сафонов, Г.В., Сафонова, Ю.А., Семкина, А.А., Семилетов, И.П., Сизонов, А.Г., Стеценко, А.В., Титкова, Т.Б., Шахова, Н.Е., Шелудков, А.В. (2022) *Воздействие изменения климата на человеческий потенциал, экономику и экосистемы*, М., Издательский дом НИУ ВШЭ, 76 с.

Володин, Е.М., Мортиков, Е.В., Кострыкин, С.В., Галин, Б.Я., Лыкосов, В.Н., Грицун, А.С., Дианский, Н.А., Гусев, А.В., Яковлев, Н.Г. (2017) Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 53, № 2, с. 164-178.

Гилязов, А.Ф. (2015) Кластерный анализ как инструмент районирования территории по крупности речных наносов (на примере бассейна Волги), *Вестник Удмуртского университета*, т. 25, вып. 2, с. 149-158.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год (2024), М., Росгидромет, 104 с.

Золотокрылин, А.Н., Коняев, К.В., Эзау, И.Н. (1998) Сравнение синоптической и формальной классификаций крупномасштабной циркуляции атмосферы Северного полушария, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 34-44.

Золотокрылин, А.Н., Кренке, А.Н., Виноградова, В.В. (2012) *Районирование России по природным условиям жизни населения*, М., Геос, 156 с.

Полякова, Д.В., Кужевской, И.В. (2012) Применение кластерного анализа для оценки температурно-влажностных условий в период активной вегетации на территории юга Западной Сибири и его связь с гидротермическим коэффициентом Т.Г. Селянинова, *Вестник Томского государственного университета*, с. 188-192.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Под ред. В.М. Катцова (2022), Санкт-Петербург, Росгидромет, Научно-технологические технологии, 676 с.

Эзау, И.Н. (1995) Кластерный анализ данных наблюдений и результатов численных экспериментов с моделью ОЦА, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 40-53.

Antonescu, B., Mărmureanu, L., Vasilescu, J., Marin, C., Andrei, S., Boldeanu, M., Ene, D., Țilea, A. (2021) A 41-year bioclimatology of thermalstress in Europe, *Int. J. Climatol.*, vol. 41, pp. 3934-3952, <https://doi.org/10.1002/joc.7051>.

Bilgin, B., Acar, S., Demiralay, Z. et al. (2024) A synthetic approach to the Holiday Climate Index for the Mediterranean Coast of Türkiye, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 68, pp. 1773-1787, <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02704-7>.

Błażejczyk, K., Błażejczyk, A. (2014) Assessment of bioclimatic variability on regional and local scales in central Europe using UTCI, *Scientific annals of "Alexandru Ioan Cuza" University of Iași*, Geography series, vol. 60, no. 1, pp. 67-82.

Błażejczyk, K., Kunert, A. (2011) *Bioclimatic principles of recreation and tourism in Poland*, 2nd edn, Monografie IGiPZ PAN, Warszawa, (In Polish).

Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Kunert, A. (2010) Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale, *Miscelanea Geographica*, no. 14, pp. 91-102.

Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., Kampmann, B. (2013) An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Geographia Polonica*, vol. 86, no. 1, pp. 5-10.

Bröde, P., Jendritzky, G., Fiala, D., Havenith, G. (2010) *The universal thermal climate index UTCI in operational use. Proceedings of conference, adapting to change: new thinking on comfort Cumberland Lodge*, Windsor, UK, 9-11, April 2010.

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B. et al. (2012) Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI) *Int. J. Biometeorol*, vol. 56, no. 3, pp. 481-494, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2021) CMIP6 climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi: 10.24381/cds.c866074c (Accessed on February-2023).

De Freitas. C.R., Grigorieva. E.A. (2017) A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices, *Int. J. Biometeorol*, vol. 61, pp. 487-512, [http, doi: org/ 10. 1007/s00484-016-1228-6](http://doi.org/10.1007/s00484-016-1228-6).

Di Napoli C., Pappenberger F., Cloke H.L. (2018) Assessing heat related health risk in Europe via the Universal Thermal ClimateIndex (UTCI), *Int. J. Biometeorol*, vol. 62, pp. 1155-1165, [https:// doi. org/10. 1007/s00484-018-1518-2](https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2).

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G. (2012) UTCIFialamultinode model human heat transfer and thermal comfort, *Int. J. Biometeorol*, vol. 56, pp. 429-441.

Founda, D., Pierros, F., Katavoutas, G., Keramitsoglou, I. (2019) Observed trends in thermal stress at European cities with different background climates, *Atmosphere*, no. 10, pp. 436, <https://doi.org/10.3390/atmos10080436>.

Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F. Westra, S., Allan, R.P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Do, H.X., Guerreiro, S., Haerter, J.O., Kendon, E.J., Lewis, E., Schaer, C., Sharma, A., Villarini, G., Wasko, C., Zhang, X. (2021) Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes, *Nature Reviews Earth & Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>.

Grigorieva, E.A. Alexeev, V.A. Walsh, J.E. (2023) Universal thermal climate index in the Arctic in an era of climate change, Alaska and Chukotka as a case study, *Int J Biometeorol*, vol. 67, pp. 1703-1721, <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02531-2>.

Guerreiro, S.B., Dawson, R.J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A. (2018) Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities, *Environ Res Lett.*, no. 13, pp. 034009, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>.

IPCC (2021) *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in V.P. Masson-Delmotte, A. Zhai, S.L. Pirani, C. Connors, S. Péan, N. Berger, Y. Caud, L. Chen, M.I. Goldfarb, M. Gomis, K. Huang, E. Leitzell, J.B.R. Lonnoy, T.K. Matthews, T. Maycock, O. Waterfield, R.Yu. Yelekçi, B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32.

Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E. (eds.) (2009) *Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being*, Final Report COSTAction 730.

Jendritzky, G., De Dear, R., Havenith, G. (2012) UTCI – why another thermalindex, *Int. J. Biometeorol*, vol. 56, no. 3, pp. 421-428.

Katavoutas, G., Founda, D., Varotsos, K.V., Giannakopoulos, Ch. (2022) Climate change impacts on thermal stress in four climatically diverse European cities, *Int J Biometeorol.*, vol. 66, pp. 2339-2355, <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02361-8>.

Mauritsen, T., Roeckner, E. (2020) Tuning the MPI-ESM1.2 Global Climate Model to Improve the Match With Instrumental Record Warming by Lowering Its Climate Sensitivity, *JAMES*, vol. 12, is. 5, <https://doi.org/10.1029/2019MS002037>.

NASEM (2016) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016) *Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change*, Washington, DC: The National Academies Press, 144 p., doi: 10.17226/21852.

Pappenberger, F., Jendritzky, G., Staiger, H., Dutra, E., Di Giuseppe, F., Richardson, D.S. (2015) Global forecasting of thermal health hazards: The skill of probabilistic predictions of the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Int. J. Biometeorol*, vol. 59, no. 3, pp. 311-323, <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-014-0843-3>.

Pappenberger, F., Hannah, L.C. (2018) Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Int. J. Biometeorol*, <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>.

Vinogradova, V.V. (2021) Using the Universal Thermal Climate Index UTCI for the assessment of bioclimatic conditions in Russia, *Int. J. Biometeorol*, vol. 65, pp. 1473-1483, <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01901-4>.

Staiger, H., Laschewski, G., Matzarakis, A. (2019) Selection of Appropriate Thermal Indices for Applications in Human Biometeorological Studies, *Atmosphere*, no.10, pp. 18, doi:10.3390/atmos10010018.

Williams, K.D., Copley, D., Blockley, E.W., Bodas-Salcedo, A., Calvert, D., Comer, R., Davis, P., Graham, T., Hewitt, H.T., Hill, R., Hyder, P., Ineson, S. et al. (2017) *The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations* *JAMES*, <https://doi.org/10.1002/2017MS001115>.

WMO (2019) *The Global Climate in 2015-2019*, 24 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9936.

WMO (2021) *State of the Global Climate 2020*, WMO, no. 1264, 56 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618.

References

Vinogradova, V.V. (2019) Universal'nyj indeks teplovogo komforta na territorii Rossii. [Universal Thermal Comfort Index in Russia], *Izvestiya RAN seriya geogr.*, no. 2, pp. 3-19.

Vinogradova, V.V., Glezer, O.B., Gracheva, R.G., Dorina, A.L., Zolotokrylin, A.N., Kotov, A.V., Kurichev, N.K., Morgunov, B.A., Potashnikov, V.Yu., Ptichnikov, A.V., Proskuryakova, L.N., Safonov, G.V., Safonova, Yu.A., Semakina, A.A., Semiletov, I.P., Sizonov, A.G., Stecenko, A.V., Titkova, T.B., Shahova, N.E., Sheludkov, A.V. (2022) *Vozdejstvie izmeneniya klimata na chelovecheskij potencial, ekonomiku i ekosistemy*. [The impact of climate change on human potential, economies and ecosystems], Moscow, Russia, 76 p.

Volodin, E.M., Mortikov, E.V., Kostykin, S.V., Galin, B.Ya., Lykosov, V.N., Gricun, A.S., Dianskij, N.A., Gusev, A.V., Yakovlev, N.G. (2017) *Vosproizvedenie sovremennogo klimata v novej versii modeli klimaticheskoy sistemy IVM RAN*. [Reproduction of the Modern Climate in the New Version of the Climate System Model of the Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences], *Izvestiya RAN, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 53, no. 2, pp. 164-178.

Gilyazov, A.F. (2015) *Klasternyj analiz kak instrument rajonirovaniya territorii po krupnosti rechnyh nanosov (na primere bassejna Volgi)* [Cluster Analysis as a Tool for Zoning Areas Based on River Sediment Size (Case Study of the Volga Basin)], *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, vol. 25, is. 2, pp. 149-158.

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2023 god. [Climate Report for the Russian Federation for 2023] (2024), Rosgidromet, Moscow, Russia, 104 p.

Zolotokrylin, A.N., Konyaev, K.V., Ezau, I.N. (1998) *Sravnenie sinopticheskoy i formal'noj klassifikacij krupnomasshtabnoj cirkulyacii atmosfery Severnogo polushariya*. [Comparison of Synoptic and Formal Classifications of Large-Scale Atmospheric Circulation in the Northern Hemisphere], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 34-44.

Zolotokrylin, A.N., Krenke, A.N., Vinogradova, V.V. (2012) *Rajonirovanie Rossii po prirodnyh usloviyam zhizni naseleniya* [Zoning of Russia Based on Natural Living Conditions], GEOS, Moscow, Russia, 156 p.

Polyakova, D.V., Kuzhevskoj, I.V. (2012) *Primenenie klasternogo analiza dlya ocenki temperaturno-vlazhnostnyh uslovij v period aktivnoj vegetacii na territorii yuga Zapadnoj Sibiri i ego svyaz' s gidrotermicheskim koefitsientom T.G. Selyaninova*. [Application of Cluster Analysis for Assessing Temperature and Humidity Conditions during the Active Vegetation Period in Southern Western Siberia and Its Relation to Selianinov's Hydrothermal Coefficient], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, pp. 188-192.

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation] (2022) in V.M. Katcova (ed), Roshydromet, High-Tech Technologies, St. Petersburg, Russia, 676 p.

Ezau, I.N. (1995) *Klasternyj analiz dannyh nablyudenij i rezul'tatov chislennyh eksperimentov s model'yu OCA*. [Cluster Analysis of Observation Data]

and Results of Numerical Experiments with a GCM Model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 40-53.

Antonescu, B., Mărmureanu, L., Vasilescu, J., Marin, C., Andrei, S., Boldeanu, M., Ene, D., Țilea, A. (2021) A 41-year bioclimatology of thermal stress in Europe, *Int. J. Climatol.*, vol. 41, pp. 3934-3952, <https://doi.org/10.1002/joc.7051>.

Bilgin, B., Acar, S., Demiralay, Z. et al. (2024) A synthetic approach to the Holiday Climate Index for the Mediterranean Coast of Türkiye, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 68, pp. 1773-1787, <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02704-7>.

Błażejczyk, K., Błażejczyk, A. (2014) Assessment of bioclimatic variability on regional and local scales in central Europe using UTCI, *Scientific annals of "Alexandru Ioan Cuza" University of Iași*, Geography series, vol. 60, no. 1, pp. 67-82.

Błażejczyk, K., Kunert, A. (2011) *Bioclimatic principles of recreation and tourism in Poland*, 2nd edn, Monografie IGiPZ PAN, Warszawa, (In Polish).

Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Kunert, A. (2010) Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale, *Miscelanea Geographica*, no. 14, pp. 91-102.

Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., Kampmann, B. (2013) An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Geographia Polonica*, vol. 86, no. 1, pp. 5-10.

Bröde, P., Jendritzky, G., Fiala, D., Havenith, G. (2010) *The universal thermal climate index UTCI in operational use. Proceedings of conference, adapting to change: new thinking on comfort Cumberland Lodge*, Windsor, UK, 9-11, April 2010.

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B. et al. (2012) Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI) *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, pp. 481-494, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2021) CMIP6 climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi: 10.24381/cds.c866074c (Accessed on February-2023).

De Freitas. C.R., Grigorieva. E.A. (2017) A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 61, pp. 487-512, <http://doi.org/10.1007/s00484-016-1228-6>.

Di Napoli C., Pappenberger F., Cloke H.L. (2018) Assessing heat related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Int. J. Biometeorol.*, vol. 62, pp. 1155-1165, <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>.

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G. (2012) UTCI-Fiala multi-node model human heat transfer and thermal comfort, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, pp. 429-441.

Founda, D., Pierros, F., Katavoutas, G., Keramitsoglou, I. (2019) Observed trends in thermal stress at European cities with different background climates, *Atmosphere*, no. 10, pp. 436, <https://doi.org/10.3390/atmos10080436>.

Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F. Westra, S., Allan, R.P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Do, H.X., Guerreiro, S., Haerter, J.O., Kendon, E.J., Lewis, E., Schaer, C., Sharma, A., Villarini, G., Wasko, C., Zhang, X. (2021) Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes, *Nature Reviews Earth & Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>.

Grigorieva, E.A., Alexeev, V.A., Walsh, J.E. (2023) Universal thermal climate index in the Arctic in an era of climate change, Alaska and Chukotka as a case study, *Int. J. Biometeorol*, vol. 67, pp. 1703-1721, <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02531-2>.

Guerreiro, S.B., Dawson, R.J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A. (2018) Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities, *Environ Res Lett.*, no. 13, pp. 034009, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>.

IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in V., P. Masson-Delmotte, A. Zhai, S.L. Pirani, C. Connors, S. Péan, N. Berger, Y. Caud, L. Chen, M. I. Goldfarb, M. Gomis, K. Huang, E. Leitzell, J.B.R. Lonnoy, T.K. Matthews, T. Maycock, O. Waterfield, R. Yu. Yelekçi, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32.

Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E. (eds.) (2009) Towards a *Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being*, Final Report COST Action 730.

Jendritzky, G., De Dear, R., Havenith, G. (2012) UTCI – why another thermal index, *Int. J. Biometeorol*, vol. 56, no.3, pp. 421-428.

Katavoutas, G., Founda, D., Varotsos, K.V., Giannakopoulos, Ch. (2022) Climate change impacts on thermal stress in four climatically diverse European cities, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 66, pp. 2339-2355, <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02361-8>.

Mauritsen, T., Roeckner, E. (2020) Tuning the MPI-ESM1.2 Global Climate Model to Improve the Match With Instrumental Record Warming by Lowering Its Climate Sensitivity, *JAMES*, vol. 12, is. 5, <https://doi.org/10.1029/2019MS002037>.

NASEM (2016) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016) *Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change*, Washington, DC: The National Academies Press, 144 p., doi: 10.17226/21852.

Pappenberger, F., Jendritzky, G., Staiger, H., Dutra, E., Di Giuseppe, F., Richardson, D.S. (2015) Global forecasting of thermal health hazards: The skill of probabilistic predictions of the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Int. J.*

Biometeorol., vol. 59, no. 3, pp. 311-323, <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-014-0843-3>.

Pappenberger, F., Hannah, L.C. (2018) Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Int. J. Biometeorol.*, <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>.

Vinogradova, V.V. (2021) Using the Universal Thermal Climate Index UTCI for the assessment of bioclimatic conditions in Russia, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 65, pp. 1473-1483, <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01901-4>.

Staiger, H., Laschewski, G., Matzarakis, A. (2019) Selection of Appropriate Thermal Indices for Applications in Human Biometeorological Studies, *Atmosphere*, no. 10, pp. 18, doi:10.3390/atmos10010018.

Williams, K.D., Copsey, D., Blockley, E.W., Bodas-Salcedo, A., Calvert, D., Comer, R., Davis, P., Graham, T., Hewitt, H.T., Hill, R., Hyder, P., Ineson, S. et al. (2017) *The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations JAMES*, <https://doi.org/10.1002/2017MS001115>.

WMO (2019) *The Global Climate in 2015-2019*, 24 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9936.

WMO (2021) *State of the Global Climate 2020*, WMO, no. 1264, 56 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618.

Статья поступила в редакцию (Received): 22.10.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 31.10.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.12.2024.

Для цитирования / For citation:

Виноградова, В.В., Титкова, Т.Б. (2025) Биоклиматическое районирование России с использованием Универсального термического климатического индекса (UTCI) в условиях современного и будущего климатов, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 11, № 1, с. 55-74, doi:10.21513/2410-8758-2025-1-55-74.

Vinogradova, V.V., Titkova, T.B. (2025) Bioclimatic zoning of Russia using the universal thermal index (UTCI) in current and future climates, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 11, no. 1, pp. 55-74, doi:10.21513/2410-8758-2025-1-55-74.