

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-132-147>
УДК 551.568

Поступила в редакцию 11.05.2026
Received 11.05.2026

БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ КОМФОРТНОСТЬ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ БЕЛАРУСИ

О. Ю. Круковская, С. В. Алисиевич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты оценки биоклиматической комфортности урбанизированных территорий Беларуси с использованием индекса UTCI. Для периода 2023–2025 гг. для всех городских населенных пунктов на основе данных реанализа и моделирования параметров подстилающей поверхности (фактор видимости неба, шероховатость) выявлены закономерности трансформации термического режима по сравнению с фоновыми условиями метеоплощадок. Установлено, что пространственное распределение индекса подчинено географической зональности (возрастание с северо-востока на юго-запад), которая нарушается в пределах городов под влиянием структуры землепользования. Показано превалирование комфортных условий (41,0 % времени) и отсутствие экстремальных категорий стресса в среднем в течение года, представлена внутригодовая динамика структуры термического стресса. Выявлено, что городская застройка повышает значения UTCI в среднем на 1,3...3,4 °C и увеличивает продолжительность комфортных условий на 5,7 п. п., а также приводит к модуляции экстремального термического стресса. Впервые показано, что для умеренного климата Беларуси в настоящее время морфология городов влияет на частоту и длительность волн тепла в летний период. Результаты работы демонстрируют специфику влияния урбанизации в умеренных широтах и могут быть использованы при планировании городской среды.

Ключевые слова: биоклиматическая комфортность; универсальный термический климатический индекс (UTCI); локальные климатические зоны (LCZ); городской микроклимат; тепловой комфорт; урбанизированные территории; волны тепла.

Для цитирования. Круковская О. Ю., Алисиевич С. В. Биоклиматическая комфортность урбанизированных территорий Беларуси // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 132–147.

BIOCLIMATIC COMFORT OF URBANIZED TERRITORIES IN BELARUS

O. Yu. Krukowskaya, S. U. Alisiyevich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The results of the bioclimatic comfort assessment of urbanized areas in Belarus using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) are presented. For the period 2023–2025, patterns of thermal regime transformation in all urban settlements were identified by comparing them with background meteorological station conditions, based on reanalysis data and modeling of surface parameters (sky view factor, roughness). It was established that the spatial distribution of the index follows geographical zonality (increasing from northeast to southwest), which is disrupted within cities under the influence of land-use patterns. The study demonstrates a prevalence of comfortable conditions (41.0 % of the time) and the absence of extreme stress categories on an annual average; the intra-annual dynamics of the thermal stress structure are also presented. It was revealed that urban development increases UTCI values by an average of 1.3...3.4 °C, which extends the duration of comfortable conditions by 5.7 p. p. Furthermore, a modulation effect on extreme thermal stress was observed. For the first time, it is shown that in the temperate climate of Belarus, urban morphology currently affects the frequency and duration of heat waves during the summer period. The results demonstrate the specific impact of urbanization in temperate latitudes and can be utilized in urban environment planning.

Keywords: bioclimatic comfort; Universal Thermal Climate Index (UTCI); local climate zones (LCZ); urban microclimate; thermal comfort; urbanized areas; heat waves.

For citation. Krukowskaya O. Yu., Alisiyevich S. U. Bioclimatic comfort of urbanized territories in Belarus. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 132–147.

Введение. Согласно данным наблюдений [1], с 1980-х годов отмечается выраженное потепление климата; десятилетие 2011–2020 гг. стало самым теплым за всю историю наблюдений. Сходная динамика отмечается и для Беларуси. При этом климатические условия и их изменения оказывают влияние не только на хозяйственную деятельность, но и на самочувствие и здоровье человека.

Биоклиматическая комфортность представляет собой состояние внешней среды, при котором под действием совокупности метеорологических факторов обеспечивается оптимальное тепловое состояние организма человека, механизмы терморегуляции испытывают минимальное напряжение. К настоящему моменту выполнено большое количество исследований, направленных на определение степени комфортности различных метеорологических условий для человека в открытой среде и градацию термических ощущений. Следствием таких исследований стало большое количество разработанных биоклиматических индексов. В метааналитической работе [1] в результате анализа 110 рецензируемых статей, опубликованных в 2001–2017 гг., приведен системный обзор 56 таких индексов. Показано, что наибольшее распространение получили индексы PMV, PET, UTCI, а другие используются значительно реже.

Универсальный термический климатический индекс (UTCI) разработан междисциплинарной группой экспертов из 23 стран в рамках проекта COST Action 730 и одобрен Международным обществом биометеорологии ISB [2]. Расчет индекса UTCI основан на модели теплообмена человека с окружающей средой (термофизиологической модели «Fiala») [3], которая рассматривает тело человека как сложную систему сегментов и узлов, восприимчивых к внешнему воздействию, с учетом как пассивной (теплофизические процессы теплообмена на поверхности кожи и внутри тканей), так и активной (нейрофизиологические реакции терморегуляции, такие как дрожь, потоотделение и изменение интенсивности кровотока) составляющих. Данный индекс рекомендован Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) как стандартный индекс для оценки теплового воздействия на население [4].

В Беларуси к настоящему моменту наиболее представлены два подхода оценки комфортности климата. Первый подход основан на распространенных международных индексах – эффективной температуре (TE) (температурно-влажностный), эквивалентно-эффективной температуре (ЭЭТ) (температурно-влажностно-ветровой), а также биоклиматическом индексе теплосодержания воздуха (БИТ), или энтальпии (i) (теплоощущения), и нашел свое отражение в работах В. Ф. Логинова с соавторами [5, 6]. Значения эффективной температуры, ЭЭТ и БИТ рассчитаны для всех доступных метеоданных для периода с 1966 по 2020 г., выполнена пространственная интерполяция для полного покрытия территории Беларуси. Показано устойчивое повышение биоклиматических индексов комфортности на протяжении рассматриваемого периода, связанное с активной фазой потепления климата. При этом рост индексов также связан со снижением средней скорости ветра и изменением испаряемости, обусловленным ростом температуры. Выполнен расчет индекса суровости погоды.

Второй подход к оценке комфортности разработан А. Н. Витченко и предполагает расчет комплексного весового интегрального бального показателя комфортности [7]. Показатель основан на учете показателей: сезонных летних (продолжительность комфортного периода, количество душных дней, средняя температура июля), зимних (средняя температура января, продолжительность дискомфорта, количество холодных дней) и круглогодичных (осадки, изменение погоды, период комфортной эксплуатации жилых помещений, метеорологический потенциал самоочищения атмосферы). Исходные данные для оценки – среднесуточная метеорологическая информация. Данная комплексная оценка, в отличие от индексной оценки, является вероятностной и целесообразной для года в целом, тогда как вышеуказанные показатели позволяют характеризовать условия в конкретный момент времени.

Цель работы – выполнить расчет показателя UTCI для всех урбанизированных территорий Беларуси с учетом организации городского пространства и на его основе определить климатический потенциал городов и городских поселков Беларуси, проанализировать его пространственную вариативность.

Исходные данные и методы исследования. Оценка климатического потенциала урбанизированных территорий основана на индексе климатической комфортности UTCI, преобразующем стандартные метеорологические данные в показатели теплового самочувствия человека на уровне пешехода в условиях реальной городской застройки. Для расчета использован оригинальный программный комплекс Bioklima 2.6.

Формула определения индекса UTCI:

$$UTCI = T_a + \Delta Offset(T_a, \Delta T, V, e_a), \quad (1)$$

где T_a – температура атмосферного воздуха (метеорологическая); $\Delta T = T_{mrt} - T_a$ – радиационная нагрузка как разница между радиационной и воздушной температурой; V – скорость ветра (на уровне 1,1 м); e_a – давление водяного пара.

Входными метеорологическими показателями при этом являются температура атмосферного воздуха T_a , радиационная температура T_{mrt} , скорость ветра на уровне 10 м $V_{10\text{ м}}$ и относительная влажность воздуха f .

Для целей данной работы расчет выполнен с учетом изменения входных параметров модели на урбанизированных территориях (притенения и отражения зданий и зеленых насаждений, шероховатость и альbedo поверхностей), что позволяет оценить реальную физиологическую нагрузку для населения. Условия урбанизированных территорий и локального микроклимата учтены посредством предварительного расчета указанных показателей. Значение радиационной температуры вычислено упрощенным полуэмпирическим методом, адаптированным для городской застройки с использованием радиационной поправки к температуре атмосферного воздуха отдельно для ночных и дневных условий. Теоретический передел доступной солнечной энергии и разделение расчетного времени суток установлены исходя из положения солнца для каждого расчетного срока и точек, соответствующих геометрическим центрам исследуемых населенных пунктов.

Дневное радиационное изменение температуры рассчитано по формуле согласно [8] с учетом поправок [9]:

$$dTr^d = (0,308 \cdot (S_{glob_{est}} (1 - alb_{city}) \cdot svf_{dynamic})) / 6, \quad (2)$$

где $S_{glob_{est}}$ – максимальное значение поступающей солнечной радиации с учетом даты, времени и облачности, Вт/м²; alb_{city} – средневзвешенное значение альbedo для населенного пункта с учетом структуры землепользования и осредненных значений показателя для различных локальных климатических зон; $svf_{dynamic}$ – динамическое средневзвешенное значение фактора видимого неба для населенного пункта с учетом структуры землепользования, растительности, сезона и осредненных значений показателя для различных локальных климатических зон.

Ночное радиационное изменение температуры (радиационное выхолаживание) определено исходя из облачности cl и фактора видимого неба методом упрощенной линеаризации радиационного баланса по Клаусу [8, 10, 11]:

$$dTr^n = -4 \cdot (1 - cl / 8) \cdot svf_{dynamic}, \quad (3)$$

Подаваемое в расчет значение скорости ветра на урбанизированных территориях скорректировано с учетом шероховатости поверхности z_0 с использованием нижнего порога ограничения 0,5 м/с для корректного расчета [2].

Значение динамического $svf_{dynamic}$ получено путем корректировки базового значения svf в зависимости от сезона и доли озелененных территорий.

Для выполнения расчета для всех городских населенных пунктов (городов, поселков городского типа, рабочих и курортных поселков, далее – городов) Беларуси в качестве исходных использованы данные метеорологического реанализа ERA5 с учетом поправки скорости ветра [12]. Расчет выполнен для четырех сроков в сутки – 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 часов – для периода с 2023 по 2025 г., выбранного для репрезентации современных условий со сглаживанием за трехлетний период.

Учет структуры землепользования в городах проведен на основании локальных климатических зон (LCZ) [13]. Значения площадей зон для населенных пунктов вычислены посредством обработки данных «Global map of Local Climate Zones» [14] по административным границам, установленным в Публичной кадастровой карте. С учетом площадей зон в пределах городов и их характеристик получены средневзвешенные значения альbedo, шероховатости поверхности и базового значения фактора видимости неба svf . Базовые значения характеристик локальных климатических зон, использованные в расчете согласно работе [13] и подтвержденные в работах [15, 16], представлены в табл. 1.

Для оценки влияния индивидуальной структуры землепользования каждого города для всех проанализированных сроков выполнен расчет значения индекса UTCI, который можно ожидать на метеоплощадке при таких значениях метеорологических параметров, – фонового метеорологического значения $UTCI_i^{bg}$. Для условной метеорологической площадки приняты стандартная шероховатость для открытой травы $z_0_{bg} = 0,01$, альbedo травы $alb_{bg} = 0,22$ и фактор видимости неба открытого небосвода $svf_{bg} = 0,98$. Рассчитано изменение индекса UTCI в среднем для города относительно фонового значения:

$$UTCI_i^d = UTCI_i - UTCI_i^{bg}. \quad (4)$$

Для оценки интерпретации полученных результатов выделены категории термического стресса (табл. 2), определена среднегодовая продолжительность периодов разного уровня: доля времени (%) и число дней, когда наблюдались различные уровни термического стресса.

Таблица 1. Характеристики зон LCZ, использованные в расчете**Table 1. Characteristics of LCZ zones used in the calculation**

Код LCZ	Зона	Базовое значение фактора видимости неба svf	Альбе́до	Шероховатость поверхности z_0
LCZ 1	Плотная высотная (Compact high-rise)	0,30	0,15	0,850
LCZ 2	Плотная среднеэтажная (Compact mid-rise)	0,45	0,18	0,700
LCZ 3	Плотная малоэтажная (Compact low-rise)	0,40	0,20	0,500
LCZ 4	Разомкнутая высотная (Open high-rise)	0,60	0,18	0,450
LCZ 5	Разомкнутая среднеэтажная (Open mid-rise)	0,65	0,20	0,350
LCZ 6	Разомкнутая малоэтажная (Open low-rise)	0,75	0,22	0,300
LCZ 7	Малоэтажная застройка из легких материалов (Lightweight low-rise)	0,35	0,15	0,400
LCZ 8	Крупногабаритная низкая (Large low-rise)	0,85	0,12	0,250
LCZ 9	Разреженная застройка (Sparsely built)	0,85	0,25	0,150
LCZ 10	Тяжелая промышленность (Heavy industry)	0,75	0,15	0,400
LCZ A	Плотный лес (Dense trees)	0,20	0,18	0,800
LCZ B	Редколесье (Scattered trees)	0,65	0,20	0,400
LCZ C	Кустарники (Bush, scrub)	0,80	0,22	0,200
LCZ D	Низкая растительность (Low plants)	0,95	0,22	0,050
LCZ E	Голая почва/песок (Bare soil/sand)	0,95	0,20	0,010
LCZ F	Плотная запечатанная почва (Bare paved)	0,95	0,18	0,005
LCZ G	Вода (Water)	0,98	0,07	0,001

Таблица 2. Стандартная шкала термического стресса UTCI [17, 18]**Table 2. Standard UTCI thermal stress scale [17, 18]**

Диапазон UTCI, °C	Категория (уровень) термического стресса	Физиологическая интерпретация
Выше +46	Экстремальный тепловой стресс	Критический риск теплового удара
+38...+46	Очень сильный тепловой стресс	Сильное напряжение системы терморегуляции
+32...+38	Сильный тепловой стресс	Ощутимый дискомфорт, перегрев
+26...+32	Умеренный тепловой стресс	Начало дискомфорта, потоотделение
+9...+26	Отсутствие термического стресса	Зона биоклиматического комфорта
0...+9	Слабый холодовой стресс	Легкое ощущение прохлады
-13...0	Умеренный холодовой стресс	Сужение сосудов, метаболическая адаптация
-27...-13	Сильный холодовой стресс	Дрожь, риск обморожения при длительном пребывании
-40...-27	Очень сильный холодовой стресс	Высокий риск гипотермии
Ниже -40	Экстремальный холодовой стресс	Опасность для жизни при кратком пребывании

Для определения зависимости размещения урбанизированных территорий от характерного для них значения индекса выполнен пространственный анализ распределения величины показателя. Для анализа применен инструмент «Пространственная автокорреляция» в программной среде ESRI ArcGIS, использующий статистический показатель Global Moran's I.

Далее для выявления и визуализации кластеризации распределения значений проведен анализ статистически значимых горячих и холодных точек и пространственных выбросов на основе показателя Anselin Local Moran's I (инструмент «Оптимизированный анализ выбросов»).

Выполнен расчет продолжительности «волн тепла» (heatwaves) как числа дней с сильным тепловым стрессом в полуденные часы на протяжении трех дней последовательно (по критерию ВОЗ, как периодов с доказанными негативными последствиями для здоровья населения [4]). Использованы установленные в работе [19] критерии волн тепла (heatwaves) по показателю UTCI.

Результаты и их обсуждение. Согласно полученным результатам, разовые значения UTCI за исследуемый период в городах Беларуси находились в диапазоне $-31.0...+42.2$ °C, медианное значение составило $+8.4$ °C (рис. 1). Максимумы расчетных значений индекса наблюдаются около $0...+5$ °C и $+17...+19$ °C. Межгодовые различия в распределении выражены слабо, несколько более высоким диапазоном значений, а также смещением первого максимума (около 5 °C) в область более высоких значений отличается 2025 г.

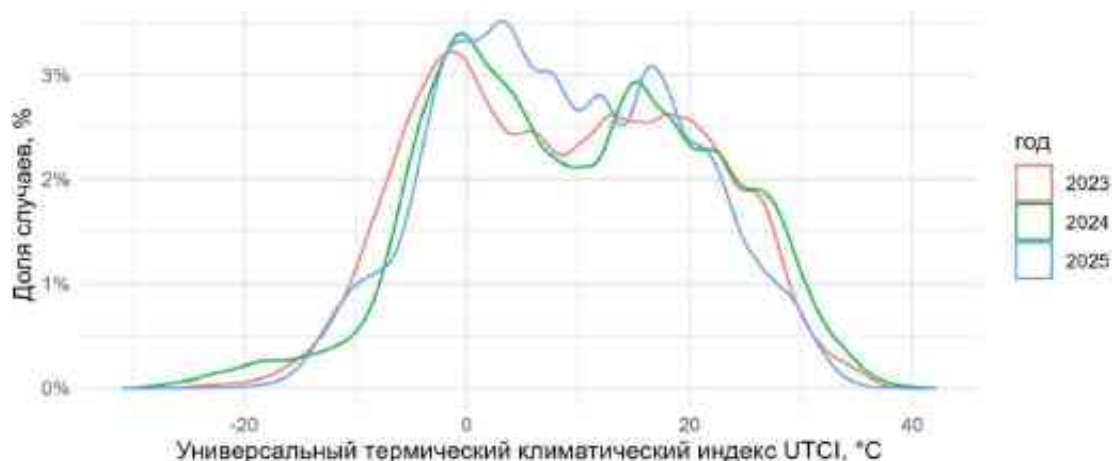


Рис. 1. Гистограмма распределения разовых значений индекса UTCI в городах Беларуси

Fig. 1. Histogram of the distribution of single UTCI values in cities of Belarus

Внутригодовое распределение разовых значений UTCI в городах Беларуси за рассматриваемый период демонстрирует ожидаемую выраженную сезонность. Среднее значение увеличивается от $-4,8$ °C в январе до $+3,3$ °C в марте и $+15,0$ °C в мае, достигая максимума в июле в размере $+22,4$ °C, в дальнейшем сокращаясь до $+17,0$ °C в сентябре и $-2,8$ °C в декабре (табл. 3). Средние значения UTCI выше, чем средние значения температуры атмосферного воздуха с апреля по сентябрь (на $0,7-2,5$ °C), в остальные месяцы – ниже (на $0,3-3,3$ °C). Причем различие значений месячного осреднения характеризуется выраженным внутригодовым ходом с минимумом в январе и максимумом в июле.

Таблица 3. Статистические характеристик распределения разовых значений UTCI в городах Беларуси по месяцам

Table 3. Statistical characteristics of the distribution of single UTCI values in cities of Belarus by month

Параметр / Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число разовых значений	74 400	68 000	74 400	72 000	74 400	72 000	74 400	74 400	72 000	74 400	72 000	74 400
Среднее арифметическое значение	-4,8	-3,3	3,3	10,1	15	19,9	22,4	21,1	17	7,4	1,1	-2,8
Стандартное отклонение	7	5,7	6,8	7,9	7,6	6,4	5,8	6,3	6,4	5,2	5,7	4,8
Медиана	-3,4	-3,4	2,8	9,9	15,2	20,1	22,4	20,8	16,4	7,1	1,4	-2,4
Усеченное среднее (10 %)	-4,2	-3,4	3,1	10,1	15	19,9	22,4	20,9	16,9	7,3	1,3	-2,7
Медианное абсолютное отклонение	5,6	5,5	6,5	7,7	8,3	6,7	6,1	6,4	5,5	5,2	5,5	4,6
Минимум	-31,0	-26,1	-23	-14,9	-5,4	0,2	3,1	4,8	-3,8	-8,9	-21	-19,7
Максимум	15,5	18,6	28,9	31,8	33	37,5	42,2	38,7	34,6	26	18,2	13,6
Размах	46,5	44,7	51,9	46,7	38,4	37,3	39,1	33,9	38,4	34,9	39,2	33,3
Асимметрия	-0,8	0,1	0,4	0	-0,1	-0,1	0	0,2	0,1	0,3	-0,3	-0,3
Экссесс	0,5	0,2	0,1	-0,1	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,2	-0,1	0,3	-0,1

Обращает на себя внимание широкий размах разовых значений UTCI, как правило более широкий в зимние и весенние месяцы. В частности, в январе значение UTCI находилось в диапазоне от $-31,0$ до $+15,5$ °C. Высокие положительные значения в отдельные дни отмечены на юге Беларуси. Например, одно из наиболее высоких значений индекса в зимний период наблюдалось в Малорите 28 февраля 2024 г. при слабом ветре, температуре атмосферного воздуха $+13,4$ °C и в отсутствие облачности.

Величина среднемесячного размаха наибольшая в январе, апреле и марте, характеризуется тенденцией к сокращению до летнего минимума в августе. Вариативность, выраженная показателем стандартного отклонения, наибольшая в весенние месяцы (до 7,9 в мае), наименьшая – в декабре (4,8).

С учетом шкалы теплового стресса (см. табл. 2), суммарно для городов Беларуси характерно следующее распределение условий термического стресса: условия комфорта (отсутствия теплового стресса) наблюдаются 41,0 % времени, легкого холодового стресса – 25,4, умеренного холодового стресса – 24,1, умеренного теплового стресса – 6,6, сильного теплового стресса – 1,0, сильного холодового стресса – 1,8, очень сильного теплового стресса и очень сильного холодового стресса – по 0,05 %. Во внутригодовом ходе присутствует выраженная динамика. Условия термического комфорта в разных соотношениях наблюдаются во все месяцы года: минимально – в зимние месяцы (0,3–1,9 % времени), максимально – в сентябре и июне (78,8 и 78,0 % соответственно). В зимние месяцы формируется дискомфорт отрицательных температур, а летние – положительных. Условия очень сильного холодового стресса наблюдаются только в январе, сильного холодового стресса – в ноябре – декабре и январе – марте (максимум в январе), сильного теплового – с мая по сентябрь (максимум в августе), очень сильного – в июле и августе. Случаи условий экстремального теплового и холодового стресса в рассматриваемый период в городах Беларуси не выявлены (рис. 2).

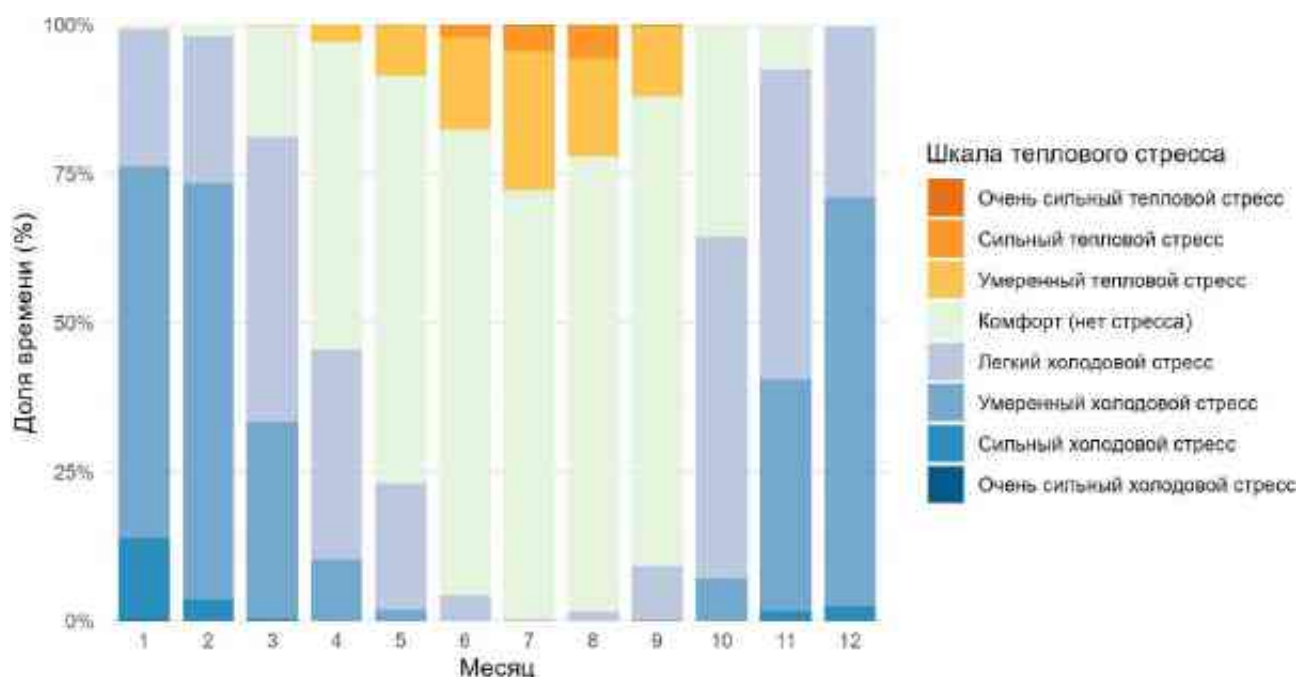


Рис. 2. Структура термического стресса UTCI по месяцам

Fig. 2. UTCI thermal stress structure by month

Биоклиматическая комфортность отдельных городов. Условия термического комфорта характеризуются выраженной не только внутригодовой, но и пространственной вариабельностью. Среднегодовое значение индекса UTCI в городах Беларуси находится в диапазоне от $+7,5$ до $+11,0$ °C (рис. 3, а). Значения показателя имеют выраженную пространственную структуру, с закономерным преобладающим ростом в меридиональном направлении: для городов, расположенных южнее 53° с. ш., UTCI составляет в среднем $+9,6$ °C, между 53° и 55° с. ш. – $+8,6$ °C, севернее 55° с. ш. – $+8,3$ °C. Апостериорные сравнения с использованием критерия Тьюки (Tukey HSD) показали значимые различия между средними значениями для групп ($p < 0,001$).

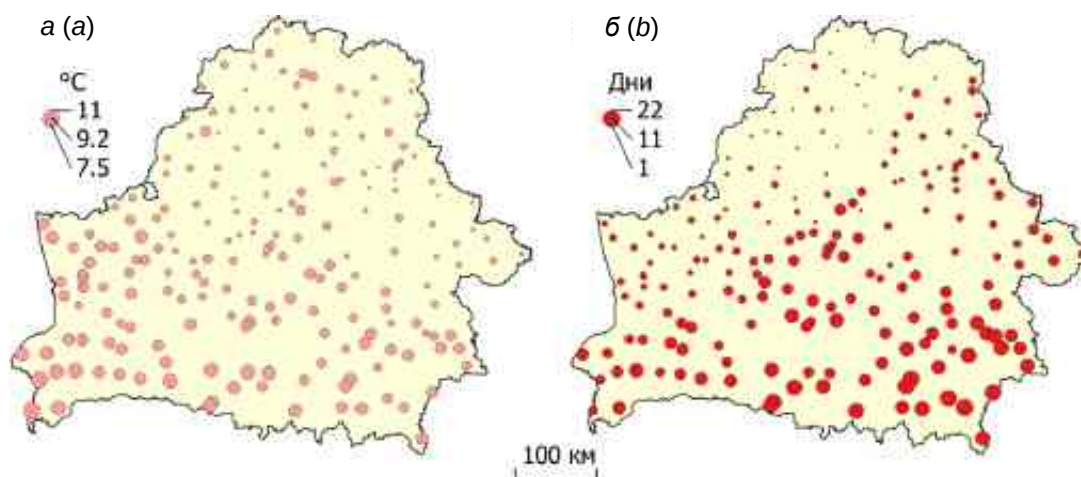


Рис. 3. Показатели термического комфорта в городах Беларуси:
а – среднегодовое значение индекса UTCI, °C; б – общая продолжительность волн тепла, дни

Fig. 3. Thermal comfort indicators in cities of Belarus:
a – mean annual UTCI value, °C; b – total duration of heat waves, days

Пространственный анализ средних значений индекса UTCI для городов показал высокий уровень кластеризации значений (индекс Морана 0,636) с вероятностью случайного пространственного распределения менее 1 %. Следовательно, нулевая гипотеза о случайности распределения может быть отброшена и сделан вывод о закономерности пространственного распределения населенных пунктов в зависимости от величины индекса.

По результатам выявления статистически значимых горячих и холодных точек и пространственных выбросов, рассматриваемые населенные пункты группируются по показателю UTCI следующим образом: кластер высоких значений занимает юго-западную и южную часть Беларуси; средних – центральную; северная – северо-восточная часть характеризуется низкими значениями индекса, за исключением нескольких городов со средними значениями. К кластеру высоких значений отнесены 48 населенных пунктов, расположенных в Брестской, Гомельской и Гродненской областях; к кластеру низких значений – 69 населенных пунктов в Витебской, Минской, Могилёвской и Гродненской областях. По результатам выполненного анализа г. Минск отнесен к кластеру низких значений. Показатели значительной части городов характеризуются промежуточными значениями, не позволяющими отнести их к группе (кластеру) горячих и холодных точек. Среднее значение UTCI для кластера высоких значений (группы горячих точек) достигает +9,8 °C, диапазон – +9,1...+11,0 °C, кластера низких значений (группы холодных точек) – +8,2 °C, диапазон – +7,5...+8,9 °C. Наблюдается рост показателя с северо-востока на юго-запад, что в целом соответствует характерной зональности климата для территории Беларуси. Аналогично разделению по широтным границам (51°, 53°, 55° с. ш.) для выделенных кластеров подтверждено статистически достоверное различие средних значений UTCI по результатам теста Тьюки. Таким образом, распределение городов по величине индекса UTCI подчиняется географической зональности (рис. 4).

При этом, исходя из основных задач используемых методов анализа, выделяется несколько пространственных выбросов значений – населенных пунктов, которые характеризуются статистически значимым отличием показателя от наблюдаемой закономерности распределения (z -оценка менее –1,96, доверительный интервал 95 %): в кластере низких значений – к. п. Нарочь ($z = -2,7$), в кластере высоких значений – Порозово ($z = -2,7$), Василевичи ($z = -2,6$), Коссово ($z = -2,3$), Озаричи ($z = -2,2$). Данное отличие может свидетельствовать о сильном влиянии на значение индекса особенностей структуры этих урбанизированных территорий, которое превалирует над влиянием географической зональности.

Помимо выделенных пространственных выбросов обращает на себя внимание также то, что выявленные кластеры – группы горячих и холодных точек – охватывают не всю область высоких и низких значений соответственно, а учитывают в силу методики взаимное пространственное расположение населенных пунктов и соответствующих им значений показателей. В частности, 11 городов Витебской области (Лынтупы, Бешенковичи, Освея, Езерище, Россоны, Шумилино, Ветрино, Оболь, Верхнедвинск, Полоцк, Новополоцк), расположенные на север от кластера низких значений, характеризуются среднегодовыми значениями UTCI от 8,1 до 9,2. Следовательно, проведенный анализ показал наличие зональности и для детального ее описания по производным показателям целесообразно использовать указанную выше широтную группировку городов.

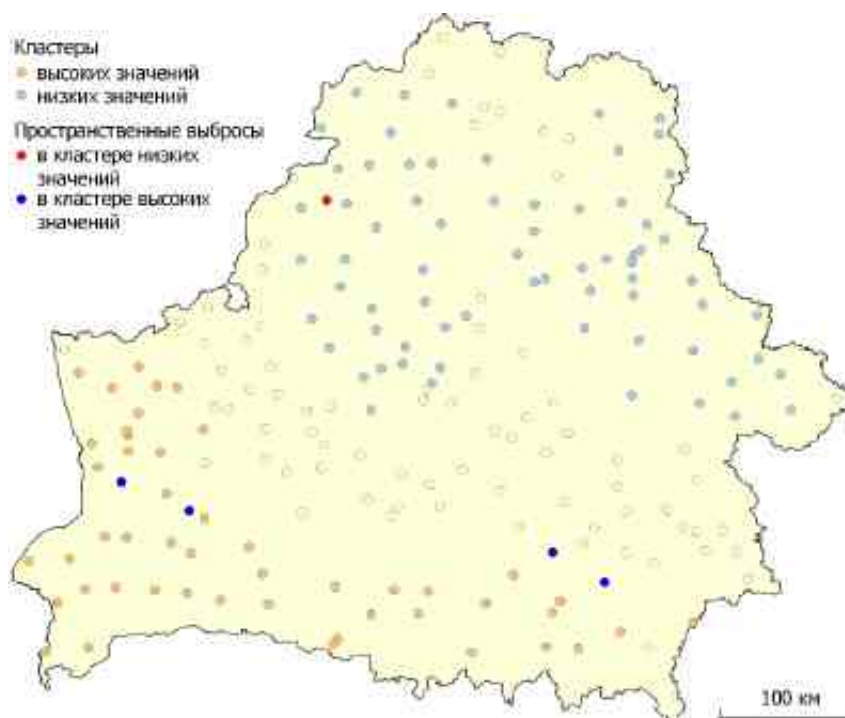


Рис. 4. Распределение городских населенных пунктов Беларуси по кластерам по среднегодовому значению UTCI

Fig. 4. Distribution of urban settlements in Belarus by clusters based on the mean annual UTCI value

Суммарно за год в отдельных городах Беларуси длительность комфортных условий (отсутствие термического стресса) находится в диапазоне от 37,7 до 46,7 %, умеренного теплового стресса – от 3,1 до 8,3, сильного теплового стресса – от 0,1 до 1,9, очень сильного теплового стресса – от 0,02 до 0,21, легкого холодного стресса – от 22,3 до 32,6, умеренного холодного стресса – от 15,1 до 28,4, сильного холодного стресса – от 0,3 до 3,8, очень сильного холодного стресса – от 0,02 до 0,09 % (среднее 0,05 %).

Число дней в году, в течение которых метеорологические условия лежат в границах диапазона комфорта, в городах составляет от 218 до 259 дней и преимущественно также возрастает в меридиональном направлении с севера на юг. Для городов, расположенных южнее 53° с. ш., комфортные условия отмечаются в среднем для 241 дня (от 228 до 259 дней), между 53° и 55° с. ш. – для 231 (от 219 до 245 дней), севернее 55° с. ш. – для 224 дней (от 218 до 228 дней). Города, расположенные южнее 53° с. ш., отличаются относительно меньшее число дней с условиями холодного стресса и сильнее выраженное большее число дней с условиями теплового стресса, т. е. более контрастные условия по климатической комфортности.

Города с наибольшим числом (250 и более) дней в условиях биоклиматического комфорта – Брест, Домачево, Малорита, Высокое, Жабинка, Кобрин, Пинск – расположены в Брестской области. В то же время города с наименьшим числом (220 и менее) дней с комфортными биоклиматическими условиями находятся в Витебской и Могилёвской областях – Сураж, Копысь, Коханово, Мстиславль, Дрибин, Шарковщина, Круглое.

Условия очень сильного холодного стресса наблюдались за рассматриваемый период для 39,5 % урбанизированных территорий (79 городов из 200), причем для большей части из них (76 городов) и всех из них по 1–2 дня в отдельные годы. В среднем 3 дня в условиях очень сильного холодного стресса характерны для трех городов в Гомельской области, таких как Уваровичи, Стрешин и Озаричи (рис. 5, а). Пространственная структура числа дней в условиях очень сильного холодного стресса выражена менее однородно, чем для числа дней комфортных условий. С одной стороны, число городов, где встречается очень сильный холодный стресс, убывает в меридиональном направлении: из общего числа городов, где отмечается очень сильный холодный стресс, 26 расположены севернее 55° с. ш., 35 – между 53 и 55° с. ш., 18 – южнее 55° с. ш. С другой стороны, города с наибольшей продолжительностью очень сильного холодного стресса находятся на юго-востоке страны. Это подчеркивает многофакторность формирования биоклиматического комфорта на урбанизированных территориях.

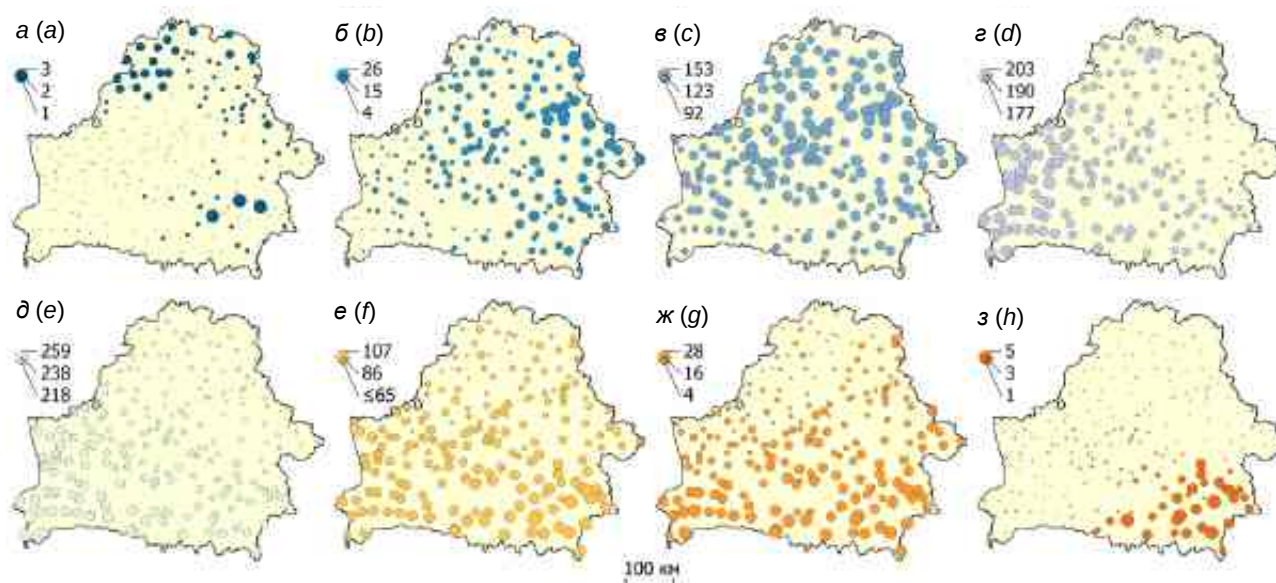


Рис. 5. Среднее число дней с различными категориями термического стресса в городах Беларуси:
а – очень сильного холодного; **б** – сильного холодного; **в** – умеренного холодного;
г – легкого холодного; **д** – отсутствия стресса; **е** – умеренного теплового;
ж – сильного теплового; **з** – очень сильного теплового

Fig. 5. Mean number of days with different thermal stress categories in cities of Belarus:
a – very strong cold stress; **b** – strong cold stress; **c** – moderate cold stress; **d** – slight cold stress;
e – no thermal stress; **f** – moderate heat stress; **g** – strong heat stress; **h** – very strong heat stress

Среди городов, где разово отмечаются условия очень сильного холодного стресса, крупнейшими являются Витебск, Орша, Новополоцк, Полоцк и суммарно проживает 1129,3 тыс. человек.

Градации термического комфорта от сильного холодного стресса до очень сильного теплового стресса наблюдаются в различном соотношении во всех городах (рис. 5, б–з). Для городов, расположенных южнее 53° с. ш., сильный холодный стресс характерен в среднем для 12 дней, между 53° и 55° с. ш. – для 13, севернее 55° с. ш. – для 14 дней. Умеренный холодный стресс для городов, расположенных южнее 53° с. ш., характерен для 125 дней, между 53° и 55° с. ш. – для 136, севернее 55° с. ш. – для 137 дней.

Для градаций термического стресса, смещенных от комфорта в область более высоких температур, меридиональное распределение числа дней, когда отмечаются определенные условия, противоположное: умеренный тепловой стресс в городах, расположенных южнее 53° с. ш., наблюдается в среднем для 241 дня в году, между 53 и 55° с. ш. – для 231, севернее 55° с. ш. – для 224 дней. Сильный тепловой стресс в городах, расположенных южнее 53° с. ш., наблюдается в среднем для 22 дней в году, между 53 и 55° с. ш. – для 13, севернее 55° с. ш. – для 8 дней.

Очень сильный тепловой стресс зафиксирован в 85 городах страны. В региональном разрезе наибольшее число таких городов сосредоточено в Гомельской (33), Минской (23) и Брестской (15) областях. В Гродненской и Могилёвской областях отмечено по 7 таких городов, в то время как в Витебской области подобные условия за рассматриваемый период не регистрировались. Такие условия закономерно отмечаются в большей доле городов кластера высоких значений (30,7 %), чем для кластера низких значений (13,4 %).

Суммарная численность населения в городах с проявлениями очень сильного теплового стресса составляет 2558,0 тыс. человек. Самые крупные из них – Гомель, Брест, Бобруйск, Барановичи, Пинск и Мозырь.

Очень сильный тепловой стресс, так же как и очень сильный холодный стресс, носит в Беларуси эпизодический характер и фиксируется лишь в отдельные дни. В среднем число дней в году, когда отмечается очень сильный тепловой стресс, для городов, расположенных южнее 53° с. ш., составляет 2 дня, а между 53 и 55° с. ш. и севернее 55° с. ш. – 1 день.

Результаты исследования лишь отчасти согласуются с выводами о биоклиматических условиях, полученных на основании ЭЭТ по Айзенштату и индексу суровости климата для периода 1966–2019 гг. [5]. В частности, согласно обоим исследованиям, наиболее комфортные условия (максимальное ЭЭТ по Айзенштату и минимальное значение индекса суровости) характерны для к. п. Нарочь.

Волны тепла. Эпизоды, когда дневные значения UTCI превышают $+32^{\circ}\text{C}$ и относятся к градациям сильного и очень сильного теплового стресса на протяжении 3 дней, представляют собой волны тепла [4, 19]. Волны тепла за рассматриваемый период наблюдались в отдельные годы во всех городах Беларуси. При этом не во всех городах волны тепла наблюдались ежегодно.

В среднем в течение года в городах Беларуси наблюдается две волны тепла общей средней продолжительностью 10 дней, в том числе в 2023 г. – две волны продолжительностью 9 дней, в 2024 г. – четыре волны продолжительностью 18 дней. В 2025 г. от одной до трех волн тепла отмечено в 55 городах (три волны тепла – в 9 городах, две волны тепла – в 15, и одна волна тепла – в 11 городах), их средняя продолжительность составила 5 дней. 2024 г., наоборот, отмечен наибольшим числом и продолжительностью волн тепла в городах. Максимальное число волн тепла в год в отдельных городах составило 6 случаев. Такое число волн отмечено в 24 городах в Брестской (16 городов), Гродненской (2 города) и Минской (6 городов) областях. В 2023 г. в отдельных городах отмечено до пяти волн тепла, а в 10 городах – более пяти волн.

За рассматриваемый период средняя суммарная продолжительность волн тепла в городах находилась в диапазоне от 1 до 22 дней (см. рис. 3, б). Средняя продолжительность волн тепла менее 3 дней характерна для городов, где волны тепла отмечались не ежегодно.

Суммарная продолжительность волн тепла за год в городах Беларуси возрастает в направлении с северо-запада на юго-восток. При этом сохраняется и выраженная широтная градация: для городов, расположенных южнее 53° с. ш. продолжительность волн тепла за год в среднем за период составляет 16 дней, между 53 и 55° с. ш. – 8, севернее 55° с. ш. – 4 дня. Большая часть населения Беларуси проживает в городах с общей годовой продолжительностью волн тепла до 10 дней – 4446,4 тыс. человек (в 108 городах), 2538,6 тыс. человек – в 87 городах с продолжительностью волн тепла от 10 до 20 дней в год и 172,3 тыс. человек – в 5 городах (Столин, Брагин, Калинковичи, Мозырь и Хойники) с продолжительностью волн тепла 20 дней в год и выше.

Максимальная продолжительность единичной волны тепла в городах Беларуси находится в диапазоне от 3 до 12. Волны тепла максимальной продолжительностью 3 дня – минимальный период, характеризуемый как волна тепла, есть только в одном городском населенном пункте – к. п. Нарочь. Максимальная продолжительность волн тепла до 5 дней включительно характерна для 55 городов с общей численностью населения 2976,1 тыс. человек (включая Минск и Витебск), от 5 до 10 дней – для 116 городов с общей численностью населения 3040,6 тыс. (включая Брест, Гродно, Могилёв), свыше 10 дней – для 29 городов с общей численностью населения 1140,5 тыс. человек (включая Гомель).

Убывание в меридиональном направлении также выражено и для максимальной продолжительности единичной волны тепла: для городов, расположенных южнее 53° с. ш. значение этого показателя составляет в среднем 10 дней, между 53 и 55° с. ш. – 6, севернее 55° с. ш. – 5 дней.

Максимальная зарегистрированная продолжительность единичной волны тепла составила 12 дней и наблюдалась в Столине с 24 августа по 4 сентября 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+28,6$ до $+32,3^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,0$ до $+36,4^{\circ}\text{C}$ в условиях практически ясного неба, слабого ветра и штиля, относительной влажности воздуха 22,0–40,2 %.

Волны тепла продолжительностью 11 дней наблюдались в 2024 г. в 29 городах, большинство которых расположено в Гомельской области. Наиболее населенные города, где отмечены волны тепла продолжительностью до 11 дней:

– Гомель – с 8 по 18 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+27,1$ до $+34,2^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+33,8$ до $+40,1^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и штиля, относительной влажности воздуха 38,6–69,4 %;

– Пинск – с 24 августа по 3 сентября 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+27,4$ до $+30,9^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,1$ до $+34,7^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и штиля, относительной влажности воздуха 28,0–48,8 %;

– Мозырь – с 18 по 18 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+36,5^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+33,1$ до $+41,6^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и относительной влажности воздуха 31,0–71,9 %;

– Жлобин – с 8 по 18 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+34,1^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,5$ до $+39,6^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и относительной влажности воздуха 38,4–74,1 %;

В Минске за указанный период отмечено две волны тепла продолжительностью 3 и 5 дней:

– с 15 по 19 августа 2023 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+36,5^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,7$ до $+35,3^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и относительной влажности воздуха 43,4–52,5 %;

– с 11 по 13 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+36,5^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+33,5$ до $+36,7^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и штиля, и относительной влажности воздуха 49,0–65,2 %.

Полученные значения в целом согласуются с имеющимися немногочисленными к настоящему времени оценками для других стран Европы. В частности, в работе [19] показано, что в Польше для условий метеорологических станций без учета влияния города в среднем за период с 2016–2018 гг. число волн тепла находилось в диапазоне от 0 до 6. Наиболее продолжительные волны тепла (до 16 дней) регистрировались в 1994, 2006, 2010 и 2015 г. В то же время полученные результаты исследований для других регионов [19, 20] указывают на высокую межгодовую вариабельность количества и продолжительности волн тепла. В городах Беларуси в течение рассматриваемого периода динамика числа и продолжительности волн тепла неустойчива, разнонаправлена и требует более детального изучения.

Вклад урбанизации в биоклиматическую комфортность. Общегеографические закономерности распределения индекса для городов нарушаются за счет изменения условий на урбанизированных территориях. Чтобы учесть этот «эффект города», расчет индекса $UTCI$ проводили на базе данных метеоплощадок ($UTCI^{bg}$). В среднем для городов Беларуси значения индекса $UTCI^{bg}$ составили от +5,3 до +8,6 °C. Наблюдается выраженный пространственный тренд: значения индекса $UTCI^{bg}$ возрастают в направлении с северо-востока на юго-запад. Данная динамика отражает фундаментальные географические закономерности регионального климата, так как использование метеорологических данных в сочетании с параметрами поверхности, типичными для метеоплощадок, позволяет исключить влияние неоднородности городской застройки и специфики землепользования. Сходные диапазоны значений получены и для сопредельных с Беларусью территорий Польши [21], при общем зональном градиенте с северо-востока на юго-запад, нарушаемом в горных районах страны на юге и юго-западе, где достигаются наиболее низкие отрицательные среднегодовые значения индекса.

Разность значений индекса в условиях городской застройки и фоновых условий ($UTCI^d = UTCI^{urb} - UTCI^{bg}$) в среднем в течение года находилась в диапазоне от +1,3 до +3,4 °C. Это свидетельствует о смещении микроклимата городов в область более высоких значений тепловой нагрузки за счет влияния застройки. К числу городов с минимальным антропогенным приращением индекса за счет структуры землепользования относятся Радунь, Брагин и Любча.

Ряд населенных пунктов, для которых пространственный анализ выявил статистически значимое отклонение от соседних городов, входящих в кластер высоких значений (Порозово, Васи́леви́чи, Косово, Озаричи), характеризуются умеренными значениями $UTCI^d$ (от +1,5 до +1,6 °C). В то же время для к. п. Нарочь, продемонстрировавшего значимое отличие от кластера низких значений, зафиксирован наиболее высокое среди городов Беларуси значение $UTCI^d$.

Выявленные мезомасштабные различия детерминированы средневзвешенными значениями фактора видимости неба (svf) и параметра шероховатости поверхности (z_0). Это подтверждает гипотезу о нарушении географической зональности в пространственном распределении климатической комфортности под воздействием структуры землепользования. Трансформация метеорологических условий при смене типов землепользования (на примере конверсии промышленных зон в лесопарковые кластеры в Гомеле) детально подтверждена методами численного мезомасштабного моделирования в работе [22].

Для отдельных населенных пунктов и расчетных сроков значение $UTCI^d$ находилось в диапазоне от –6,7 до +17,2 °C при медианном значении +2,0 °C. Максимальные положительные аномалии индекса зафиксированы в холодный период, что обусловлено существенным снижением скорости ветра под влиянием городской морфологии и структуры землепользования. К числу населенных пунктов, где наиболее часто значение индекса на +10 °C и более выше относительно условий метеоплощадок, относятся к. п. Нарочь, г. п. Зелёный Бор, Берёзовка, Елизово. Указанные города характеризуются высокими значениями параметра шероховатости поверхности, что объясняется значительной долей древесной растительности в пределах их границ (классы LCZ A и LCZ B). Высокая плотность растительного покрова способствует более интенсивному снижению скорости ветра (эффекту аэродинамической тени), что в условиях низких температур приводит к значительному сокращению ветрового охлаждения и, как следствие, к росту тепловой комфортности по шкале $UTCI$.

Среднемесячные приращения индекса в городах изменяются в диапазоне от +0,1 до +4,3 °C (рис. 6), при этом распределение $UTCI^d$ характеризуется выраженной сезонной и суточной вариабельностью. Максимальный прирост значений фиксируется в зимний период, что в условиях отрицательных температур воздуха способствует повышению биоклиматической комфортности среды. Наиболее отчетливо данный эффект проявляется в утренние и вечерние часы. В марте среднее избыточное значение индекса в городах составляет +3,0 °C с локальными максимумами в вечернее и ночное время. В период с мая по август средний прирост $UTCI$ относительно фоновых условий не превышает +1,0 °C. Суточный ход в этот сезон характеризуется инверсионным характером: в вечерние и ночные часы наблюдаются слабopоложительные аномалии (до +2,2 °C), в то время как в утренние и дневные часы изменение индекса становится преимущественно отрицательным (до –1,3 °C).

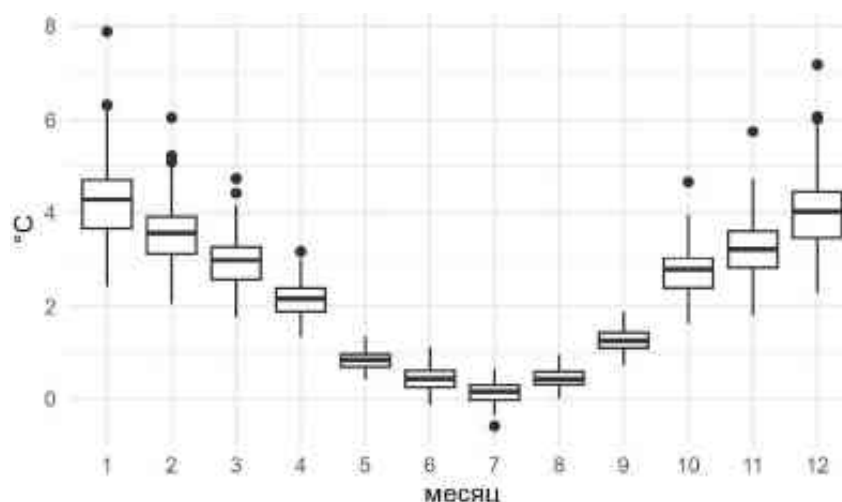


Рис. 6. Внутригодовая динамика изменения индекса UTCI ($UTCId$) в городах Беларуси относительно условий метеорологических площадок

Fig. 6. Intra-annual dynamics of the UTCI change ($UTCId$) in cities of Belarus relative to meteorological station conditions

В осенние месяцы средние значения $UTCId$ находятся в диапазоне от +1,2 до +3,2 °C, демонстрируя устойчивую тенденцию к росту по мере приближения к зимнему сезону. В суточном разрезе сохраняется общая закономерность: повышенные значения приурочены к ночному, вечернему и утреннему периодам, в то время как дневные минимумы отражают снижение антропогенного вклада в формирование биоклиматического комфорта.

Отрицательные значения $UTCId$ отмечены для 15,5 % случаев от общего объема выборки, в разрезе отдельных населенных пунктов этот показатель находится в диапазоне от 6,4 до 22,9 %. Наиболее часто эффект смещения показателя биоклиматической комфортности в область более низких значений на счет структуры землепользования урбанизированных территорий наблюдается в к. п. Нарочь, Домачево, Езерище, Берёзовка и Видзы. Напротив, минимальная повторяемость отрицательных аномалий характерна для таких городов, как Смолевичи, Фаниполь, Несвиж и Дзержинск.

Примечательно, что высокая частота отрицательных изменений индекса в городе не имеет прямой корреляционной связи с его средними значениями. Величина и вектор трансформации биоклиматической комфортности, несмотря на расчет на основе ограниченного набора параметров, являются следствием уникальной суперпозиции факторов: структуры землепользования, текущих метеорологических условий, географического положения объекта, а также сезонности и высоты стояния Солнца. Сложная природа выявленных взаимодействий обуславливает необходимость дальнейших детальных исследований в данной области.

Распределение категорий термического стресса на урбанизированных территориях также демонстрирует значимые отличия от фоновых условий метеоплощадок. За счет структуры землепользования в городах продолжительность комфортных условий (категория «отсутствие термического стресса») увеличивается на 3,2–12,2 п. п. (в среднем на 5,7 п. п.). Также отмечается рост повторяемости условий легкого холодового стресса в диапазоне от 2,0 до 11,6 п. п. (в среднем на 4,4 п. п.).

Для категорий, характеризующихся выраженным термическим дискомфортом, в городской среде наблюдается обратная тенденция – сокращение их продолжительности. Так, повторяемость условий умеренного холодового стресса снижается в среднем на 5,3 п. п., сильного холодового стресса – на 3,6, очень сильного – на 0,2 п. п. Аналогичная динамика прослеживается и для теплового стресса: продолжительность умеренного, сильного и очень сильного теплового стресса сокращается в среднем на 0,2; 0,8 и 0,1 п. п. соответственно.

В течение года в городах, при идентичных исходных метеорологических параметрах, фиксируется в среднем на 12 дней больше с дневными значениями UTCI выше +32 °C по сравнению с условиями метеоплощадок. Поскольку данный порог является первичным условием для выделения волн тепла, учет структуры землепользования существенно меняет статистику данных явлений. Без учета структуры землепользования в условиях метеоплощадок средняя продолжительность волн тепла больше на 10–19 дней, их среднегодовое число в городах – на 2–3, максимальная продолжительность единичной волны тепла – на 12–22 дня.

Таким образом, согласно полученным результатам, в настоящее время структура землепользования урбанизированных территорий Беларуси способствует формированию более комфортных биоклиматических условий относительно фона (метеорологическая площадка). Влияние городской среды носит комплексный характер и выражается не только в сокращении периодов дискомфорта, обусловленного низкими температурами, но и в снижении частоты и продолжительности волн тепла. Учет параметров городской застройки и специфики подстилающей поверхности (в сравнении с условиями открытых метеоплощадок) демонстрирует сокращение расчетной длительности волн тепла, что подчеркивает защитную роль городской морфологии в летний период. Для городов умеренного климата Беларуси результаты оценки влияния урбанизации на биоклиматическую комфортность отличаются от единичных в настоящее время исследований других регионов [23], где в условиях изначально более теплого климата выражено влияние городских островов тепла и показано снижение биоклиматической комфортности в городах. Дальнейшего детального изучения требует сопряженный анализ интенсивностей городских островов тепла, определяемых по температуре поверхности, и интегральных показателей биоклиматического комфорта населения.

Выводы.

1. Зафиксированная пространственная дифференциация свидетельствует о том, что распределение биоклиматической комфортности городов Беларуси подчинено четко выраженной зональности. Значения индекса UTCI последовательно возрастают в направлении с северо-востока на юго-запад, отражая фоновые климатические градиенты региона, при этом средние годовые значения для городских территорий зафиксированы в диапазоне от +7,5 до +11,0 °C.

2. Наблюдаемое нарушение географической зональности биоклиматических условий определяется уникальностью структуры землепользования каждого населенного пункта. Применение в расчетах параметров подстилающей поверхности, таких как фактор видимости неба и шероховатость, позволило выявить существенные отклонения индекса UTCI от фоновых градиентов, что доказывает значимость планировочной структуры города как фактора формирования биоклиматического комфорта.

3. Выявленная внутригодовая вариабельность биоклиматических условий в городах характеризуется существенным размахом значений UTCI (от -31,0 до +42,2 °C) и сезонной трансформацией характера аномалий. Структура термического режима меняется от преобладания агрессивных холодных воздействий зимой к доминированию теплых нагрузок в летний период, при этом пик изменчивости приходится на май. Несмотря на превалирование комфортных условий (для 41,0 % времени), в городах эпизодически фиксируются категории сильного (для 1,8 % – холодового; для 1,0 % – теплового) и очень сильного стресса (менее 0,10 % суммарно). Данные нагрузки носят строго сезонный характер: экстремальное охлаждение ограничено периодом с ноября по март (максимум в январе), а интенсивный перегрев – периодом с мая по сентябрь (максимум в августе), при этом случаи экстремального стресса в городах Беларуси не выявлены.

4. Зафиксированный эффект термальной оптимизации указывает на роль городской среды как термального буфера в условиях умеренного климата Беларуси. Трансформация метеорологического режима за счет застройки приводит к росту средних значений UTCI на +1,3...+3,4 °C, что обеспечивает увеличение продолжительности комфортных условий в среднем на 5,7 п. п. и сокращение периодов холодового стресса (от умеренного до очень сильного) в среднем суммарно на 9,2 п. п., более отчетливо проявляющееся в зимний период и ночные часы.

5. Показанное сокращение продолжительности условий теплового стресса (от умеренного до очень сильного суммарно) в среднем на 1,1 п. п. (с 8,1 до 7,6 %), а также сокращение общей продолжительности волн тепла на 10–19 дней и их повторяемости на 2–3 единицы в условиях городской застройки свидетельствуют о модуляции экстремальных состояний за счет структуры землепользования на современном этапе для городов Беларуси. В отличие от регионов с жарким климатом в городах Беларуси зафиксировано снижение частоты и кумулятивной продолжительности волн тепла по сравнению с открытыми площадками, что обусловлено защитными свойствами городской морфологии и растительности (классы LCZ A и LCZ B), нивелирующими тепловую нагрузку в дневные часы.

Полученные значения представляют собой количественные оценки биоклиматического комфорта в городах Беларуси. Показано многокомпонентное положительное разное интенсивности влияние урбанизации на климатическую комфортность, выявленное относительно условий метеоплощадки. Полученные результаты целесообразно дополнить углубленным изучением структуры биоклиматического комфорта на следующих этапах, а также изучением их более долгосрочной динамики и с учетом климатических прогнозов. Результаты оценки могут служить основой для изучения климатического потенциала городов и уточнения планов развития населенных пунктов с учетом биоклиматической комфортности.

Благодарности.

Работа выполнена в рамках задания 1.01 «Геоэкологические риски: прогнозы, оценки последствий, способы адаптации и снижения негативных воздействий» научно-исследовательской работы 3 «Разработать научные основы рационального использования геоэкологического потенциала урбанизированных территорий Беларуси» государственной программы научных исследований «Рациональное природопользование» на 2026–2030 годы.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of task 1.01 “Geoecological risks: forecasts, impact assessments, adaptation methods and reduction of negative impacts” of research work 3 “Develop scientific foundations for the rational use of the geoecological potential of urbanized territories of Belarus” of the state scientific research program “Rational Nature Management” for 2026–2030.

Список использованных источников

1. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification / O. Potchter, P. Cohen, T. Lin, A. Matzarakis // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 631–632. – P. 390–406. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.276.
2. An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI) / K. Błażejczyk, G. Jendritzky, P. Bröde [et al.] // *Geographia Polonica*. – 2013. – Vol. 86, № 1. – P. 5–10. – DOI: 10.7163/GPol.2013.1.
3. Fiala, D. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system / D. Fiala, K. J. Lomas, M. Stohrer // *Journal of Applied Physiology*. – 1999. – Vol. 87, № 5. – P. 1957–1972. – DOI: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.
4. Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention / World Health Organization. Regional Office for Europe. – Copenhagen : WHO, 2021. – 190 p.
5. Особенности изменения комфортности климата Беларуси для человека по месяцам и сезонам года / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков, П. О. Зайко, О. Г. Савич-Шемят // *Природопользование*. – 2022. – № 1. – С. 5–21. – DOI: 10.47612/2079-3928-2022-1-5-21.
6. Логинов, В. Ф. Изменение биоклиматического потенциала Республики Беларусь / В. Ф. Логинов, О. Г. Савич-Шемят, М. А. Хитриков // *Природные ресурсы*. – 2022. – № 1. – С. 5–14.
7. Витченко, А. Н. Геоэкологическая оценка комфортности климата крупных городов Беларуси / А. Н. Витченко, И. А. Телеш // *Вестник БГУ. Серия 2*. – 2008. – № 3. – С. 73–78.
8. Matzarakis, A. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model / A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer // *International Journal of Biometeorology*. – 2007. – Vol. 51, № 4. – P. 323–334. – DOI: 10.1007/s00484-006-0061-8.
9. Holmer, B. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI / B. Holmer, U. Postgård, M. Ericksson // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2001. – Vol. 68, № 1–2. – P. 33–40. – DOI: 10.1007/s007040170051.
10. Froehlich, D. Estimation of human-biometeorological conditions in south west Germany for the assessment of mitigation and adaptation potential / D. Froehlich, A. Matzarakis // *Conference Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate*. – 2015. – P. 1–6.
11. Kasten, F. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud / F. Kasten, G. Czeplak // *Solar Energy*. – 1980. – Vol. 24, № 2. – P. 177–189. – DOI: 10.1016/0038-092X(80)90391-6.
12. Molina, M. O. Comparison of ERA5 surface wind speed climatologies over Europe with observations from the HadISD dataset / M. O. Molina, C. Gutiérrez, E. Sánchez // *International Journal of Climatology*. – 2021. – Vol. 41, № 10. – P. 4864–4878. – DOI: 10.1002/joc.7103.
13. Stewart, I. D. Local climate zones for urban temperature studies / I. D. Stewart, T. R. Oke // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 93, № 12. – P. 1879–1900. – DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
14. Global map of Local Climate Zones / M. Demuzere, J. Kittner, A. Martilli [et al.] // *Earth System Science Data*. – 2022. – Vol. 14, iss. 8. – DOI: 10.5194/essd-14-3835-2022.
15. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones / A. Middel, K. Häb, A. J. Brazel [et al.] // *Landscape and Urban Planning*. – 2014. – Vol. 122. – P. 16–28. – DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.004.
16. Impact of sky view factor on seasonal microclimate and thermal comfort variability across urban campus streets and buildings / Z. Yao, P. Wang, Y. Tian [et al.] // *Urban Climate*. – 2025. – Vol. 60. – P. 1–20. – DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102315.
17. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden disease / A. R. Garcia [et al.]. – Geneva : WHO, 2016. – 121 p.
18. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI) / P. Bröde, D. Fiala, K. Błażejczyk [et al.] // *International Journal of Biometeorology*. – 2012. – Vol. 56, № 3. – P. 481–494. – DOI: 10.1007/s00484-011-0454-1.

19. Tomczyk, A. M. Human-biometeorological conditions during heat waves in Poland / A. M. Tomczyk, E. Bednorz, A. Matzarakis // *International Journal of Climatology*. – 2020. – Vol. 40, № 12. – P. 5043–5055. – DOI: 10.1002/joc.6503.
20. Vinogradova, V. V. Universal Thermal Climate Index (UTCI) in the middle of the 21st century according to model forecasts / V. V. Vinogradova // *Bulletin of the RAS Geography*. – 2025. – Vol. 89, № 3. – P. 63–74. – DOI: 10.7868/S2658697525030066.
21. Kuchcik, M. Long-term changes in hazardous heat and cold stress in humans: multi-city study in Poland / M. Kuchcik, K. Błażejczyk, A. Halaś // *International Journal of Biometeorology*. – 2021. – Vol. 65, № 9. – P. 1567–1578. – DOI: 10.1007/s00484-020-02069-7.
22. Лысенко, С. А. Метеорологическое моделирование городских «островов тепла» на территории Беларуси в условиях современного глобального потепления / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 2. – С. 134–143. – DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-2-134-143.
23. Solanki, P. Optimizing sky view factor and vegetation to mitigate urban heat in hot-humid climates / P. Solanki, L. R. Amirtham, C. Deb // *Build. Environ.* – 2025. – Vol. 268. – P. 1121–1135. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112135.

References

1. Potchter O., Cohen P., Lin T., Matzarakis A. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 631–632, pp. 390–406, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.276.
2. Błażejczyk K., Jendritzky G., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Epstein Y., Psikuta A., Kampmann B. An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 5–10, DOI: 10.7163/GPol.2013.1
3. Fiala D., Lomas K. J., Stohrer M. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*, 1999, vol. 87, no. 5, pp. 1957–1972, DOI: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.
4. WHO. Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe Publ., 2021, 190 p.
5. Loginov V. F., Khitrykov M. A., Zaiko P. O., Savich-Shemet O. G. *Osobennosti izmeneniya komfortnosti klimata Belarusi dlya cheloveka po mesyatsam i sezonam goda* [Specifics of changes in the climate comfort of Belarus for humans by months and seasons of the year]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 5–21, DOI: 10.47612/2079-3928-2022-1-5-21. (in Russian)
6. Loginov V. F., Savich-Shemet O. G., Khitrykov M. A. *Izmenenie bioklimaticheskogo potentsiala Respubliki Belarus'* [Change in the bioclimatic potential of the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2022, no. 1, pp. 5–14. (in Russian)
7. Vitchenko A. N., Telesh I. A. *Geoekologicheskaya otsenka komfortnosti klimata krupnykh gorodov Belarusi* [Geoeological assessment of climate comfort in large cities of Belarus]. *Vestnik BGU. Seriya 2 = Bulletin of BSU. Series 2*, 2008, no. 3, pp. 73–78. (in Russian)
8. Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 2007, vol. 51, no. 4, pp. 323–334, DOI: 10.1007/s00484-006-0061-8.
9. Holmer B., Postgård U., Ericksson M. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theoretical and Applied Climatology*, 2001, vol. 68, no. 1–2, pp. 33–40, DOI: 10.1007/s007040170051.
10. Froehlich D., Matzarakis A. Estimation of human-biometeorological conditions in south west Germany for the assessment of mitigation and adaptation potential. *Conference Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate*, 2015, pp. 1–6.
11. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 1980, vol. 24, no. 2, pp. 177–189, DOI: 10.1016/0038-092X(80)90391-6.
12. Molina M. O., Gutiérrez C., Sánchez E. Comparison of ERA5 surface wind speed climatologies over Europe with observations from the HadISD dataset. *International Journal of Climatology*, 2021, vol. 41, no. 10, pp. 4864–4878, DOI: 10.1002/joc.7103.
13. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
14. Demuzere M., Kittner J., Martilli A., Mills G., Moede C., Stewart I. D., van Vliet J., Bechtel B. Global map of Local Climate Zones. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, iss. 8. DOI: 10.5194/essd-14-3835-2022.
15. Middel A., Häb K., Brazel A. J., Martin C. A., Guhathakurta S. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 2014, vol. 122, pp. 16–28, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.004.

16. Yao Z., Wang P., Tian Y., Zhang Y., Zhang Q., Wang X., Wang P., Han Q. Impact of sky view factor on seasonal microclimate and thermal comfort variability across urban campus streets and buildings. *Urban Climate*, 2025, vol. 60, pp. 1–20, DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102315.
17. Garcia A. R. et al. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden disease. Geneva, WHO Publ., 2016, 121 p.
18. Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 481–494, DOI: 10.1007/s00484-011-0454-1.
19. Tomczyk A. M., Bednorz E., Matzarakis A. Human-biometeorological conditions during heat waves in Poland. *International Journal of Climatology*, 2020, vol. 40, no. 12, pp. 5043–5055, DOI: 10.1002/joc.6503.
20. Vinogradova V. V. Universal Thermal Climate Index (UTCI) in the middle of the 21st century according to model forecasts. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2025, vol. 89, no. 3, pp. 406–419, DOI: 10.7868/S2658697525030066.
21. Kuchcik M., Błażejczyk K., Halaś A. Long-term changes in hazardous heat and cold stress in humans: multi-city study in Poland. *International Journal of Biometeorology*, 2021, vol. 65, no. 9, pp. 1567–1578, DOI: 10.1007/s00484-020-02069-7.
22. Lysenko S. A., Zaiko P. A. *Meteorologicheskoe modelirovanie gorodskih "ostrovov tepla" na territorii Belarusi v usloviyah sovremennogo global'nogo potepeleniya* [Meteorological modeling of urban "heat islands" on the territory of Belarus under modern global warming]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 2, pp. 134–143 (in Russian), DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-2-134-143. (in Russian)
23. Solanki P., Amirtham L. R., Deb C. Optimizing sky view factor and vegetation to mitigate urban heat in hot-humid climates. *Building and Environment*, 2025, vol. 268, pp. 1121–1135, DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112135.

Информация об авторах

Крукотская Ольга Юрьевна – кандидат географических наук, заведующий лабораторией оптимизации геосистем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: olgakrukowskaya@gmail.com

Алисиевич Святослав Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории оптимизации геосистем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: geo.sviatalv@gmail.com

Information about the authors

Olga Yu. Krukowskaya – Ph. D. (Geography), Head of Laboratory of Geosystem Optimization, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: olgakrukowskaya@gmail.com

Sviataslau U. Alisiyevich – Junior Researcher, Laboratory of Geosystem Optimization, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: geo.sviatalv@gmail.com