

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-152-170>

УДК 551.582/583:551.586

Региональные особенности динамики показателей теплового комфорта на фоне изменения климата

А.А. Семёнова^{1,2}, М.М. Салтыкова¹, А.Д. Банченко¹

*¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Центр стратегического планирования и управления
медико-биологическими рисками здоровью»*

Федерального медико-биологического агентства, г. Москва, Россия;

*² Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
ASemenova@cspfmba.ru*

Выполнен анализ региональных изменений комфортности климата на территориях в различных природно-климатических зонах. Для оценки биоклиматических условий применялся универсальный индекс теплового комфорта (Universal Thermal Climate Index – UTCI). Для расчетов использовались 8-срочные данные шести метеорологических станций сети Росгидромета: температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность, температура поверхности почвы и облачность за 56 лет с 1966 по 2021 год. Установлено, что изменение климата и его комфортности для проживания населения происходит с разной скоростью в разных природно-климатических зонах, на всех территориях уменьшается холодовой стресс в холодный период года и увеличивается тепловой стресс в теплый период года. Отмечено, что среднегодовое общее количество экстремально дискомфортных дней за 56 лет уменьшилось. Основным фактором, определяющим выявленную динамику биоклиматического индекса UTCI и характерным как для городов, расположенных в континентальной части Российской Федерации, так и на побережье океанов, является повышение температуры воздуха в зимний и летний периоды и снижение скорости ветра в зимний период.

Ключевые слова: изменение климата, комфортность, тепловой комфорт, региональные особенности, здоровье населения, универсальный термический климатический индекс (UTCI)

Regional features of the dynamics of thermal comfort indicators in a changing climate

A.A. Semenova^{1,2}, M.M. Saltykova¹, A.D. Banchenko¹

¹ Federal State Budgetary Institution

*«Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks»
of the Federal medical and biological agency, Moscow, Russia;*

*² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ASemenova@cspfmba.ru*

The regional changes in climate comfort for the territories located in different climate zones are analyzed. The Universal Thermal Climate Index (UTCI) is used to assess bioclimatic conditions. The eight-time observation data on the following parameters from six Roshydromet weather stations were used for calculations: air temperature, wind speed, relative humidity, soil surface temperature, and cloudiness for 56 years from 1966 to 2021. It was found that climate change and its impact on human comfort in different climate zones occur at different rates. For all territories, cold stress decreases in the cold season, and heat stress increases in the warm season. It is noted that the average annual total number of extremely discomfort days has decreased over 56 years. The main factor determining the revealed dynamics of UTCI and characteristic for cities both in the continental part of Russian Federation and on the coast of the oceans is the air temperature rise in winter and summer and the wind speed decrease in winter.

Keywords: climate change, comfort, thermal comfort, regional features, public health, Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Введение

Разнообразие природно-климатических зон России обуславливает различные условия для жизни населения. Проживание в дискомфортных или экстремальных природно-климатических условиях способствует истощению адаптационных резервов организма человека, что может проявляться в ускоренном развитии экологически обусловленной патологии, осложненном течении как инфекционных, так и неинфекционных заболеваний, а также преждевременном старении [7, 9]. Кроме того, природно-климатические особенности местности оказывают существенное влияние на степень антропогенного загрязнения окружающей среды, например, высокая частота штилей или периодов времени с низкой скоростью ветра способствует увеличению загрязнения атмосферного воздуха. Это имеет наибольшее значение для крупных промышленных городов, а также для территорий, значительная часть населения которых занята на производствах с особо опасными условиями труда, поскольку дискомфортные климатические условия, загрязнение окружающей и производственной среды являются синергистами, негативно влияющими на состояние здоровья населения [8].

Тепловой комфорт – это такое сочетание метеорологических параметров, при котором терморегуляционная система организма испытывает минимальное напряжение при нормальном функционировании всех физиологических систем организма [4, 10]. Тепловой комфорт служит характеристикой благоприятности климата. Комфортность среды принято оценивать, используя биоклиматические индексы [12].

На большей части территории Российской Федерации последние десятилетия были самыми теплыми за весь период инструментальных наблюдений [11]. Кроме того, анализ многолетних изменений параметров ветра показал, что скорость приземного ветра почти на всей территории России имеет устойчивую тенденцию к снижению, наблюдается увеличение повторяемости слабого ветра и уменьшение повторяемости более сильного [1, 5, 6].

В работе В.В. Виноградовой [3] на основании использования универсального индекса теплового комфорта (Universal Thermal Climate Index – UTCI) проведена оценка биоклиматических условий на территории России в период с 2001 по 2015 год. Показано, что условия холодого стресса по UTCI наблюдались почти во всех регионах России от 8 до 11 месяцев в году, при этом в остальную часть года биоклиматические условия были нейтральными или комфортными. По сравнению с периодом 1961–1990 гг. сократились периоды экстремального и очень высокого холодого напряжения и увеличились периоды с нейтральными и комфортными тепловыми условиями. Вместе с тем сравнительный анализ региональных особенностей изменения биоклиматических условий не проводился. Кроме того, в условиях меняющегося климата актуальной является не только общая оценка динамики биоклиматических индексов в различных регионах России, но и анализ их зависимости от основных метеорологических показателей, таких как скорость ветра, влажность и температура воздуха на большом интервале времени.

В связи с этим, целью данного исследования было выявление и анализ региональных особенностей изменения показателей комфортности климата и их зависимости от метеопараметров на шести территориях в пяти различных природно-климатических зонах. Для анализа были выбраны те регионы, в которых расположены территории, подведомственные ФМБА России, значительная часть населения которых занята на производствах с особо опасными условиями труда и для которых динамика комфортности климатических условий может быть особенно значима.

Материалы и методы

В данном исследовании для оценки биоклиматических условий на выбранных территориях использовался универсальный индекс теплового комфорта (UTCI) [12, 13, 15, 18, 22, 26, 28]. Он основан на модели Fiala теплового баланса человека [19, 20, 21] и характеризует эквивалентную температуру окружающей среды в градусах Цельсия, которая оказывает такое же физиологическое воздействие на человека, как и фактическая температура окружающей среды [14, 15]. Отклонение UTCI от температуры атмосферного воздуха зависит от фактических значений температуры воздуха, средней лучистой температуры, скорости ветра и влажности [14, 15]. По сравнению с другими биоклиматическими индексами, UTCI использует более современную модель теплоизоляции одежды, что позволило разработчикам использовать подробную шкалу оценки физиологических реакций человека и успешно апробировать ее в различных климатических условиях [28].

Шкала включает 10 категорий от экстремального холодого стресса до экстремального теплового стресса [14, 15]. Тепловой/холодовой стресс – это физиологическая реакция организма на значительное повышение/понижение температуры окружающей среды, когда человек не может

эффективно регулировать температуру тела. В табл. 1 представлена градация индекса UTCI [13–15].

Таблица 1. Градация индекса UTCI
Table 1. Gradation of the UTCI index

Градации теплового воздействия	Значение индекса UTCI
Экстремальный тепловой стресс	UTCI > 46°C
Очень сильный тепловой стресс	38°C < UTCI < 46°C
Сильный тепловой стресс	32°C < UTCI < 38°C
Умеренный тепловой стресс	26°C < UTCI < 32°C
Комфортные условия, тепловой нейтралитет, при данных условиях человек не испытывает ни холодовой, ни тепловой стресс	18°C < UTCI < 26°C
Слабый холодовой стресс	0°C < UTCI < 9°C
Умеренный холодовой стресс	-13°C < UTCI < 0°C
Сильный холодовой стресс	-27°C < UTCI < -13°C
Очень сильный холодовой стресс	-40°C < UTCI < -27°C
Экстремальный холодовой стресс	UTCI < -40°C

В данном исследовании для вычисления индекса UTCI была использована микроклиматическая модель RayManPro 3.1 [25]. В качестве входных использовались 8-срочные массивы данных шести метеорологических станций сети Росгидромета (база данных ВНИИГМИ-МЦД), находящиеся в открытом доступе [2]. Массивы исходных данных включали следующие показатели: температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность, температура поверхности почвы и общий балл облачности за 56 лет с 1966 по 2021 год. Для каждого массива производилась корректировка пропущенных значений. Наибольшее количество пропусков и некорректных значений было обнаружено в данных метеостанции Полярное (ЗАТО Александровск), оно составляло 3,27 % от всех значений.

Анализировались массивы значений индекса UTCI за 56 лет и входящие в него метеопараметры, а также продолжительность воздействия на человека биоклиматических условий различных градаций. Для этого оценивалось ежегодное количество дней, в течение которых хотя бы один раз регистрировались значения UTCI, соответствующие экстремальному или очень сильному холодовому стрессу, а также количество самых теплых дней, в течение которых хотя бы один раз регистрировались значения UTCI, соответствующие умеренному или сильному тепловому стрессу. Были проанализированы тренды изменения этих показателей за 56 лет, при этом оценивались значения тангенсов угла наклона соответствующих линейных регрессии. Кроме того, проводилось сравнение количества дней с тепловым/холодовым стрессом разных градаций в течение первых (I) 20 лет

(1966–1985 гг.) с соответствующим количеством за последние (II) 20 лет (2002–2021 гг.) периода наблюдений.

Для того чтобы оценить, динамикой какого из метеопараметров в большей степени обусловлены изменения UTCI за 56 лет, для каждой из территорий были оценены коэффициенты парной корреляции по Пирсону между индексом UTCI и метеопараметрами отдельно за все зимние и летние месяцы. Достоверными считались статистические показатели при $p < 0.05$.

Анализ региональных особенностей изменения комфортности климата и метеопараметров проводился для шести территорий, подведомственных ФМБА России, с различными природно-климатическими условиями. Поскольку в открытом доступе нет данных метеостанций, расположенных непосредственно на этих территориях (кроме метеостанции (м/с) Полярное), то для изучения динамики биоклиматических показателей в анализ были включены данные ближайших метеостанций, расположенных в сходных природных условиях и адекватно отражающих характеристики климата выбранных городов. В ходе исследования были проанализированы биоклиматические и метеорологические показатели для следующих территорий:

1). ЗАТО Александровск (Мурманская область) расположено в субарктическом поясе с умеренно-континентальным климатом, соответствующая м/с Полярное (69.20° с. ш., 33.48° в. д.) находится непосредственно в ЗАТО;

2). ЗАТО Саров (Нижегородская область) расположено в умеренном поясе с умеренно континентальным климатом, соответствующая м/с Краснослободск (54.43° с. ш., 43.77° в. д.) находится в 62 км от города;

3). Город Димитровград (Ульяновская область) также расположен в умеренном поясе с умеренно континентальным климатом, соответствующая м/с Чулпаново (54.50° с. ш., 50.41° в. д.) находится в 69 км;

4). ЗАТО Трёхгорный (Челябинская область) расположено в умеренном поясе с умеренно континентальным климатом с чертами континентального, соответствующая м/с Златоуст (55.17° с. ш., 59.67° в. д.) находится в 85 км;

5). ЗАТО Северск (Томская область) расположено в умеренном поясе с континентальным климатом, соответствующая м/с Томск (56.50° с. ш., 84.92° в. д.) находится на расстоянии 18 км;

6). ЗАТО Фокино (Приморский край) расположено в умеренном поясе с умеренно муссонным климатом, соответствующая м/с Владивосток (43.12° с. ш., 131.92° в. д.) находится на расстоянии 42 км.

Необходимо отметить, что хотя четыре метеостанции находятся на расстоянии более 40 км от соответствующих населенных пунктов, однако сходство рельефа и гидрологических особенностей местности позволяет оценивать динамику биоклиматических индексов и метеопараметров за 56 лет по данным этих метеостанций с достаточной точностью.

Использование базовых массивов данных, а не данных моделирования, по основным метеорологическим элементам обусловлено высоким уровнем их достоверности. Прямые эмпирические данные являются более точными и позволяют проследить локальные вариации метеопараметров, которые могут быть упущены в результатах климатического моделирования или данных реанализа. Инструментальные наблюдения дают ценные долгосрочные данные, позволяющие анализировать изменения и тенденции в климатической системе за период более 50 лет [27]. Кроме того, необходимо отметить, что данные реанализа для территорий со сложным рельефом (в настоящем исследовании это Александровск, Трёхгорный, Фокино) могут иметь значимые погрешности.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены статистические характеристики: медиана (Med), нижний и верхний квартили (Q1 и Q2), минимальное (Min) и максимальное (Max) значения среднесуточных значений индекса UTCI (отдельно для зимнего и летнего сезонов) за 56 лет с 1966 по 2021 год для каждого из шести населенных пунктов, включенных в исследование.

Таблица 2. Статистические характеристики значений индекса UTCI в зимний и летний периоды

Table 2. Statistical characteristics of the UTCI values index in winter and summer periods

Город	Сезон	Min	Q1	Med	Q2	Max
Александровск	Зима	-68.8	-38.2	-30.5	-23.0	5.7
	Лето	-31.0	-4.2	3.7	9.8	34.9
Саров	Зима	-65.3	-33.2	-24.3	-17	10.2
	Лето	-11.3	10.2	16.4	23.1	45.3
Димитровград	Зима	-66.7	-37.1	-29.8	-22.0	1.4
	Лето	-10.7	8.7	15.4	23.5	48.3
Трёхгорный	Зима	-69.5	-34.2	-25.4	-17.6	6.0
	Лето	-15.2	9.4	15.7	21.8	38.2
Северск	Зима	-69.8	-33.4	-25.8	-18.1	6.2
	Лето	-12.3	12.2	18.3	25.5	40.2
Фокино	Зима	-67.0	-46.3	-37.6	-27.3	9.1
	Лето	-18.0	3.5	10.4	16.5	37.9

Как видно из табл. 1, летом во всех городах, включенных в исследование, были зафиксированы дни как с холодным стрессом (минимальные значения UTCI меньше +9 °C), так и с очень сильным тепловым стрессом

(максимальные значения больше $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$). В городах, расположенных на берегах морей, в половине летних дней наблюдалось холодное воздействие разной степени интенсивности. Зимой во всех городах более чем в 75 % дней регистрировался сильный, очень сильный или экстремальный холодный стресс. При этом в Александровске, Димитровграде и Фокино очень сильный или экстремальный холодный стресс регистрировался более чем в половине зимних дней (наибольшее количество экстремально холодных дней в Александровске и Фокино).

Таким образом, можно предположить, что наименее комфортные условия наблюдаются в городах, расположенных на берегах океанов: Александровске и Фокино.

На рис. 1 и 2 показана ежегодная повторяемость количества дней с холодным и тепловым стрессом разной интенсивности, когда UTCI достигает соответствующих пороговых значений. Для отображения на рисунках для холодного и теплового стресса были выбраны по две градации UTCI с наибольшими отклонениями от комфортных условий, такие, что во всех городах, включенных в исследование, были дни с соответствующими значениями. Для холодного стресса это были следующие градации UTCI: сильный холодный стресс (серый цвет на рисунке) и экстремальный холодный стресс (черный цвет); для теплового стресса – умеренный (серый цвет на рисунке) и сильный тепловой стресс (черный цвет). Можно заметить, что во всех пунктах изменения комфортности происходили неравномерно. В большинстве городов прослеживается тенденция к уменьшению количества дней с холодным стрессом и увеличению количества дней с тепловым стрессом.

В табл. 3 приведены статистические характеристики (медиана, минимальное и максимальное значение) значений метеопараметров, включенных в исследование (отдельно для зимнего и летнего сезонов) за 56 лет.

Как видно из табл. 3, зимой самые низкие значения температуры воздуха и скорости ветра регистрируются в Северске, а самые высокие – в Александровске. Летом самые высокие значения температуры воздуха регистрировались в Сарове и Димитровграде, а самые низкие – в Александровске. При этом самые высокие значения скорости ветра регистрировались на морских побережьях: в Фокино и в Александровске, а самые низкие – на Южном Урале и в Западной Сибири: в Трёхгорном и Северске. В Фокино, расположенном в муссонном климате, зимой регистрировались самые низкие, а летом – самые высокие значения относительной влажности.

Для того чтобы оценить, изменение каких метеопараметров в наибольшей степени влияет на изменение биоклиматического индекса UTCI, были оценены коэффициенты парной корреляции по Пирсону между UTCI и каждым из метеопараметров, включенных в анализ. Эти коэффициенты отдельно для летнего и зимнего периодов представлены в табл. 4. Поскольку показатели температуры воздуха и почвы непосредственно связаны, то в табл. 4 представлены только показатели температуры воздуха.

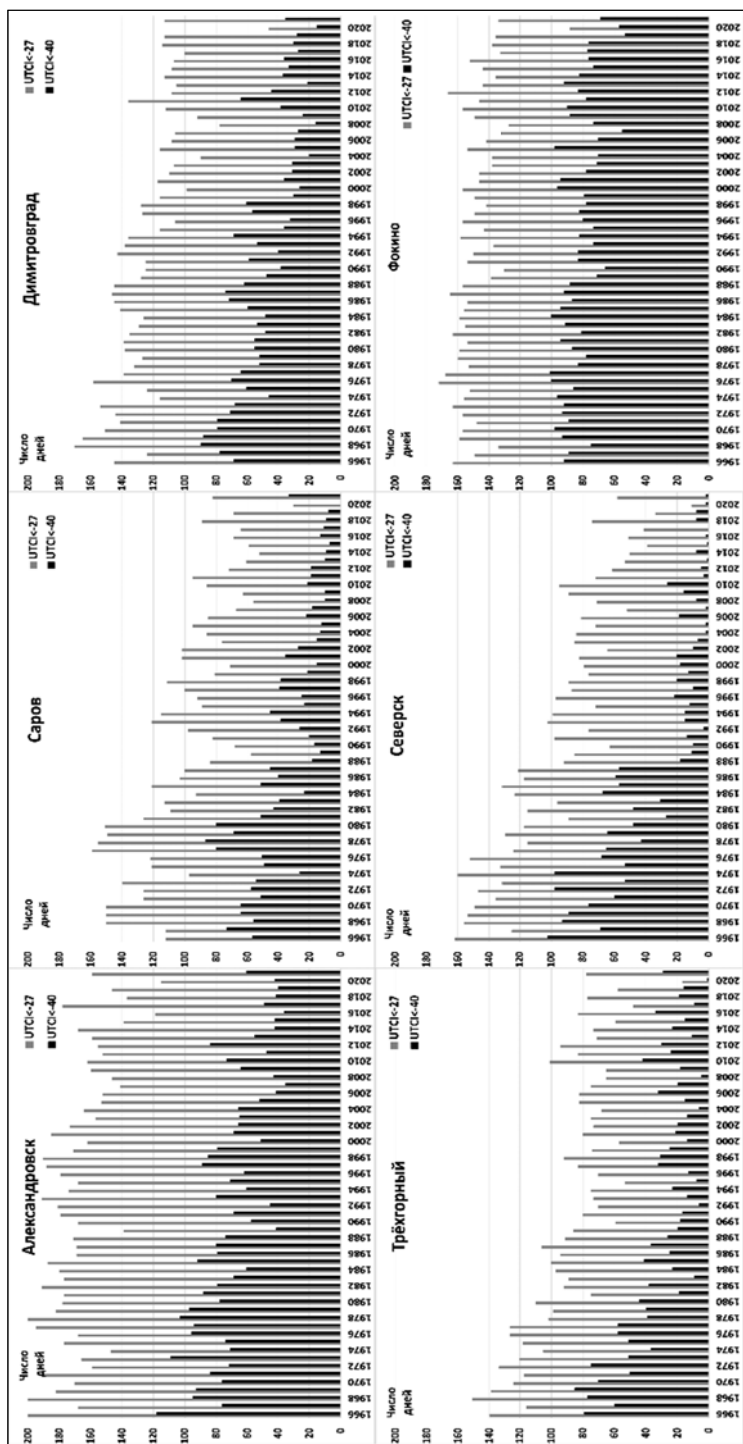


Рис. 1. Количество дней с очень сильным (серый) и экстремальным (черный) холодным стрессом. По оси абсцисс отмечены годы с 1966 по 2021, по оси ординат – среднее за год количество дней с холодным стрессом.

Fig. 1. Number of days with very strong (gray) and extreme (black) cold stress. The years from 1966 to 2021 are marked on the abscissa axis, and the average number of days with cold stress per year on the ordinate axis.

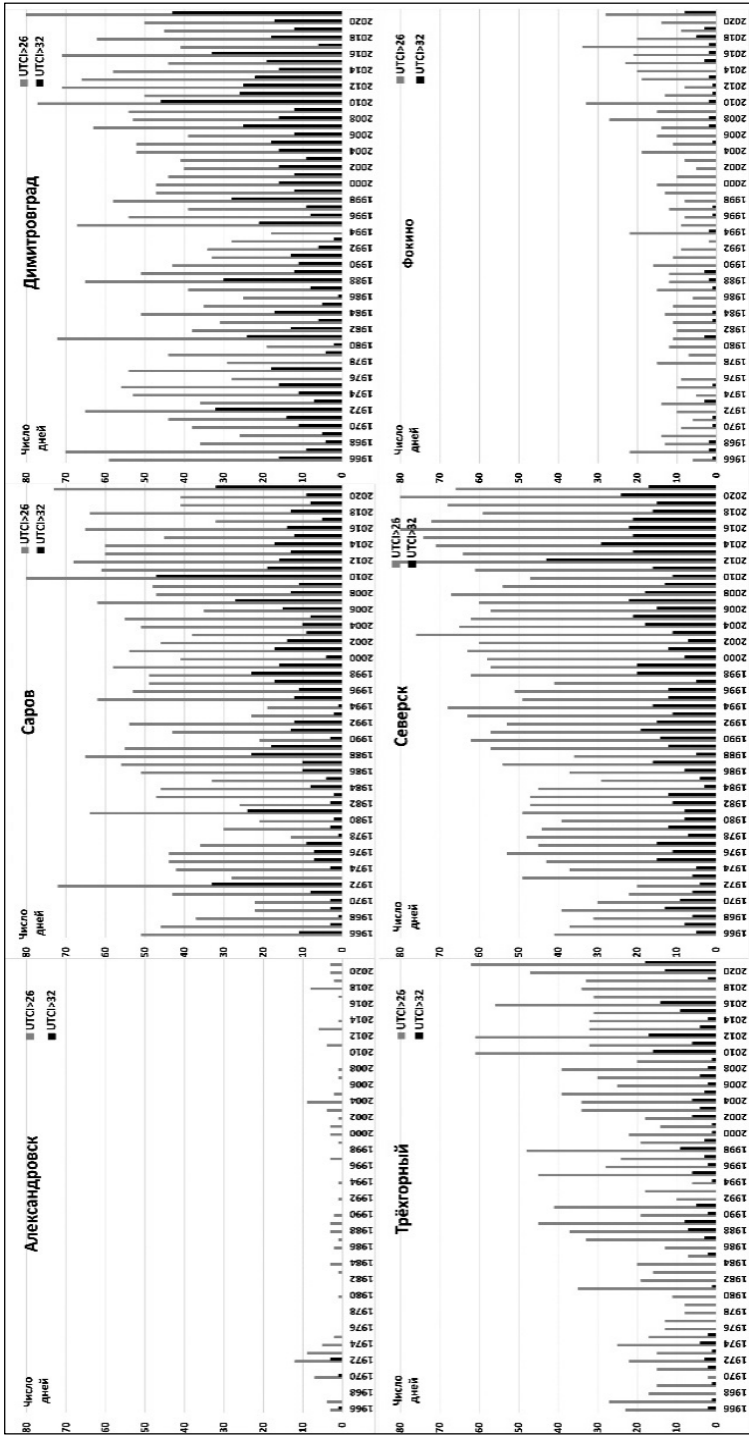


Рис. 2. Количество дней с умеренным (серый цвет) и сильным (черный цвет) тепловым стрессом. По оси абсцисс отмечены годы с 1966 по 2021, по оси ординат – среднее за год количество дней с тепловым стрессом.

Fig. 2. Number of days with moderate (gray) and severe (black) heat stress. The x-axis shows the years from 1966 to 2021, and the y-axis shows the average number of days with heat stress per year.

Таблица 3 Статистические характеристики основных метеорологических параметров: медиана, минимальное и максимальное значение (в скобках)
Table 3. Statistical characteristics of the main meteorological parameters median, minimum and maximum values (in parentheses)

Населенный пункт	Температура		Скорость ветра		Относительная влажность	
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето
Александровск	-8.3 (-32.4; 15.2)	9.7 (-2.5; 32.7)	5 (0; 29)	4 (0; 28)	86 (39; 100)	80 (29; 100)
Саров	-7.9 (-42; 9.7)	17.9 (-1.4; 39.2)	3 (0; 25)	2 (0; 20)	86 (37; 100)	70 (24; 100)
Димитровград	-8.4 (-45.1; 8.9)	17.9 (-3.1; 39.8)	4 (0; 24)	2 (0; 18)	84 (39; 100)	75 (28; 100)
Трёхгорный	-11.9 (-43.9; 11.9)	15 (-2.7; 34.7)	2 (0; 27)	1 (0; 18)	81 (31; 100)	78 (30; 100)
Северск	-15.5 (-47.8; 6.6)	16.5 (-2.1; 35.2)	2 (0; 20)	2 (0; 17)	80 (35; 98)	75 (24; 99)
Фокино	-10.6 (-29.7; 9.3)	17.2 (4.8; 32.7)	6 (0; 28)	5 (0; 26)	55 (30; 100)	95 (35; 100)

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между индексом UTCI и метеопараметрами

Table 4. Correlation coefficients between the UTCI index and meteorological parameters

Населенный пункт	Температура	Скорость ветра	Относительная влажность
Зима			
Александровск	0.804	-0.637	-0.395
Саров	0.64	-0.65	0.29
Димитровград	0.525	-0.589	0.353
Трёхгорный	0.715	-0.750	-0.013
Северск	0.708	-0.572	0.266
Фокино	0.696	-0.844	0.110
Лето			
Александровск	0.789	-0.586	-0.463
Саров	0.85	-0.34	-0.53
Димитровград	0.895	-0.175	-0.559
Трёхгорный	0.830	-0.388	-0.521
Северск	0.868	-0.337	-0.508
Фокино	0.804	-0.637	-0.395

Коэффициенты парной корреляции (R) между значениями индекса UTCI и показателями скорости ветра и температуры воздуха достоверно отличаются от 0 для всех населенных пунктов как в летний, так и в зимний период. Как видно из табл. 4, в зимний период индекс UTCI в наибольшей степени связан, т. е. регистрируются наибольшие значения коэффициентов

корреляции (больше 0,5), с температурой воздуха (прямая зависимость) и скоростью ветра (обратная зависимость), а в летний период – с температурой и влажностью воздуха для континентальных городов и температурой и скоростью ветра для городов на побережье океанов (Александровск и Фокино). В остальных случаях статистическая связь в соответствии с классификацией Чеддока [16] была слабой или умеренной ($R < 0,5$). Коэффициенты корреляции между индексом UTCI и общим баллом облачности не превосходили 0,32.

Таким образом, в разных городах изменение метеопараметров вносило различный вклад в изменение индекса UTCI.

Таблица 5. Статистические характеристики анализируемых выборок количества дней с холодным стрессом разных градаций в течение первых (I) и последних (II) 20 лет периода наблюдения: медиана, нижний и верхний квартили (в скобках), p – уровень достоверности различия

Table 5. Statistical characteristics of the analyzed samples of days with different grades of the cold stress during the first (I) and last (II) 20 years of the observation period: median, lower and upper quartiles (in parentheses), p – significance level

Населенный пункт	UTCI < -27°C			UTCI < -40°C		
	I	II	p	I	II	p
Александровск	179 (169; 191)	154 (144; 161)	0.0001	86 (75; 95.5)	48 (42; 65)	0.0000
Саров	126 (112.5; 150)	71 (62; 86)	0.0000	55 (50; 67)	13 (10; 19)	0.0000
Димитровград	139 (128; 148)	108 (103; 113)	0.0000	63 (54; 75)	30 (26; 36)	0.0000
Трёхгорный	116.5 (100; 126)	74 (65; 82)	0.0000	51 (39; 65)	19 (13; 27)	0.0000
Северск	13 (120; 151)	63 (50.5; 77.5)	0.0000	65 (51; 83)	4 (2; 8)	0.0000
Фокино	157 (154; 162)	140 (135; 148)	0.0001	92 (87; 95)	76 (70; 83)	0.0001

Для того чтобы проанализировать, насколько и достоверно ли изменилось количество дней с дискомфортными погодными условиями (т. е. количество дней с тепловым и холодным стрессом) в течении всего периода наблюдений, было проведено сравнение количества дней со стрессом в первое и последнее 20-летие (1966–1985 и 2002–2021) периода наблюдений. Результаты сравнения количества дней с сильным холодным ($UTCI < -27^\circ C$) и экстремальным холодным ($UTCI < -40^\circ C$) стрессом представлены в табл. 5, умеренным тепловым ($UTCI > 26^\circ C$), с сильным тепловым ($UTCI > 32^\circ C$) стрессом – в табл. 6.

В табл. 7 представлены результаты сравнения суммарного среднегодового количества дней с наибольшими градациями теплового и холодного стресса. Оценивалось среднее за первые и среднее за последние 20 лет количество дней в году, когда индекс UTCI был меньше $-27^\circ C$ или больше

26 °С, а также когда индекс UTCI был меньше -40 °С или больше 32 °С (табл. 7).

Таблица 6. Статистические характеристики анализируемых выборок количества дней с тепловым стрессом разных градаций в течение первых (I) и последних (II) 20 лет периода наблюдения: медиана, нижний и верхний квартили (в скобках), p – уровень достоверности различия

Table 6. Statistical characteristics of the analyzed samples of days with different grades of the heat stress during the first (I) and last (II) 20 years of the observation period: median, lower and upper quartiles (in parentheses), p – significance level

Населенный пункт	UTCI >26°C			UTCI >32°C		
	I	II	p	I	II	p
Александровск	0.5 (0; 3.5)	1 (0; 3.5)	0.55178	0 (0; 0)	0 (0; 0)	0.4249
Саров	40 (27; 46)	53 (43; 63)	0.00267	3 (2.5; 8)	13 (9.5; 16.5)	0.0001
Димитровград	41 (33; 55)	53 (45; 65)	0.0193	10 (5; 16)	18 (14; 25)	0.0016
Трёхгорный	16 (12; 21)	34 (31; 43)	0.0000	0.5 (0; 2)	4 (2; 11)	0.0001
Северск	42 (34; 47)	66 (60; 73)	0.0000	8 (5.5; 11.5)	18 (15; 21.5)	0.0000
Фокино	11 (8; 13)	17 (12; 22)	0.0031	0.5 (0; 1)	1.5 (0; 2)	0.1478

Таблица 7. Статистические характеристики анализируемых выборок среднегодового количества дней с крайними градациями холодогового и теплового стресса в течение первых (I) и последних (II) 20 лет периода наблюдения: медиана, нижний и верхний квартили (в скобках), p – уровень достоверности различия.

Table 7. Statistical characteristics of the analyzed samples of the average annual number of days with extreme gradations of cold and heat stress during the first (I) and last (II) 20 years of the observation period: median, lower and upper quartiles (in parentheses), p – significance level

Населенный пункт	-27°C > UTCI или UTCI > 26°C			40°C > UTCI или UTCI > 32°C		
	I	II	p	I	II	p
Александровск	180.5 (176; 191)	155.5 (146; 163.5)	0.0000	86 (75.5; 95.5)	48 (41.5; 64.5)	0.0000
Саров	168 (159; 175.5)	125 (110.5; 149)	0.0000	63 (54.5; 75.5)	23.5 (20.5; 37.5)	0.0000
Димитровград	185.5 (172; 193.5)	163 (146.5; 177)	0.0006	76 (60; 88.5)	47 (38; 61)	0.0001
Трёхгорный	131 (110.5; 141)	105 (91; 118)	0.0022	52 (39.5; 65.5)	21.5 (16.5; 32)	0.0002
Северск	168.5 (161; 183.5)	133 (115; 140)	0.0000	73 (59; 92)	23.5 (20.5; 27.5)	0.0000
Фокино	167.5 (165.5; 171.5)	158.5 (152.5; 166)	0.0061	93 (87; 96.5)	78 (70.5; 83)	0.0001

Кроме того, были проанализированы тренды изменения за 56 лет количества дней с дискомфортными погодными условиями, при этом оценивались скорости изменения количества дней со стрессом разных градаций (значения тангенсов угла наклона соответствующих линий регрессии за 56 лет) (табл. 8).

Как можно видеть из табл. 5–8, в Северске в течение 56 лет с наибольшей скоростью происходило увеличение в летний период количества дней с тепловым стрессом (умеренным и сильным) и уменьшение в зимний период количества дней с холодным стрессом. Также в Северске в последние 20 лет периода наблюдений среднегодовое суммарное количество дней с наибольшими градациями теплового и холодного стресса уменьшилось по сравнению с первыми 20 годами почти на 50 дней (с экстремальным холодным стрессом уменьшилось на 59 дней, а с сильным тепловым стрессом увеличилось на 11 дней), что составляет более трети дней, т. е. климатические условия в Северске стали более комфортными (табл. 6). Указанная динамика биоклиматического индекса в наибольшей степени была обусловлена ростом температуры и снижением скорости ветра как в зимний, так и в летний период, а также увеличением влажности воздуха в зимний период (табл. 3).

Наименьшие изменения UTCI выявлены в городах на побережье океанов (Александровск и Фокино). В этих городах зарегистрировано наибольшее количество дней с холодным стрессом и наименьшее с тепловым (табл. 1 и 4). В Александровске в последние 20 лет наблюдения среднегодовое суммарное количество дней с наибольшими градациями теплового и холодного стресса уменьшилось по сравнению с первыми 20 годами на 31 день (с экстремальными холодным стрессом уменьшилось на 31 день, а с сильным тепловым стрессом не изменилось). В Фокино также уменьшилось количество дней с экстремальными холодным стрессом на 15 дней и при этом увеличилось количество дней с тепловым стрессом на 1 день. Таким образом, климатические условия в Александровске и Фокино также стали более комфортными, хотя изменения существенно менее выражены, чем в Северске. Стоит отметить, что изменение комфортности обусловлено именно уменьшением холодного стресса. На это в наибольшей степени повлиял рост температуры и снижение скорости ветра как в зимний, так и в летний период (табл. 4).

В остальных трех городах (Димитровграде, Сарове и Трёхгорном) также происходило увеличение в летний период количества дней с тепловым стрессом (умеренным и сильным) и уменьшение в зимний период количества дней с холодным стрессом. Указанная динамика биоклиматического индекса в наибольшей степени была обусловлена ростом температуры как в зимний, так и в летний период, а также снижением скорости ветра в зимний период и относительной влажности воздуха в летний (табл. 4).

Таким образом, как можно видеть из таблиц, наибольшие изменения показателей комфортности климата произошли в Северске, наименьшие – в Александровске.

Таблица 8. Среднее количество $M_{дн}$ дней за 56 лет с очень сильным и экстремальным холодовым стрессом и умеренным и сильным тепловым стрессом, а также скорости изменений этих параметров (тангенсы угла наклона линии регрессии) с указанием доверительного интервала (в скобках)

Table 8. Average number of days with very strong and extreme cold stress and moderate and severe heat stress, as well as the rate of change of these parameters (the slope (tangent of angle) of regression line) over 56 years with a confidence interval. Confidence intervals are shown in parentheses

Населенный пункт	Холодовой стресс				Тепловой стресс			
	UTCI < -27°C		UTCI < -40°C		UTCI > 26°C		UTCI > 32°C	
	$M_{дн}$	Tg(α) (Q1;Q3)	$M_{дн}$	Tg(α) (Q1;Q3)	$M_{дн}$	Tg(α) (Q1;Q3)	$M_{дн}$	Tg(α) (Q1;Q3)
Александровск	169	-0.75 (-1.02; - 0.49)	69	-0.90 (-1.13;-0.67)	2	-0.01 (-0.06; 0.03)	0	-0.01 (-0.01; 0.00)
Саров	98	-1.47 (-1.78; - 1.15)	33	-1.08 (-1.30;-0.87)	46	0.39 (0.15; 0.62)	11	0.22 (0.08; 0.36)
Димитровград	124	-0.99 (-1.24; - 0.75)	48	-0.95 (-1.15;-0.76)	48	0.31 (0.07; 0.55)	14	0.26 (0.11; 0.41)
Трёхгорный	88	-1.25 (-1.52; - 0.98)	31	-0.90 (-1.14;-0.66)	27	0.55 (0.35; 0.74)	4	0.14 (0.08; 0.21)
Северск	95	-1.98 (-2.23; - 1.73)	31	-1.61 (-1.87;-1.35)	54	0.74 (0.59; 0.89)	13	0.28 (0.19; 0.38)
Фокино	149	-0.44 (-0.63; - 0.25)	83	-0.39 (-0.54;-0.23)	13	0.20 (0.10; 0.31)	1	0.03 (0.00; 0.05)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что климат изучаемых городов менялся с разной скоростью и становился менее суровым и более комфортным для проживания. Данные результаты согласуются с предыдущими исследованиями [3, 23, 24].

Вместе с тем необходимо отметить, что снижение скорости ветра, которое отмечалось во всех городах и в зимний, и в летний сезоны (за исключением летнего сезона в Александровске), может приводить к ухудшению экологической ситуации, поскольку в городах с развитой промышленностью и транспортной сетью оно способствует накоплению вредных примесей в атмосфере. Это, в свою очередь, способствует увеличению риска обострения хронических заболеваний и преждевременной смертности населения.

Заключение

Результаты данного исследования показали, что в разных природно-климатических зонах изменение климата и его комфортности для проживания населения происходит с разной скоростью. В целом, на всех территориях уменьшается холодовой стресс в зимний период года и увеличивается тепловой стресс в летний период года. При этом среднегодовое суммарное количество дней с наибольшими градациями теплового и холодого стресса уменьшалось.

Основным фактором, определяющим выявленную динамику биоклиматического индекса UTCI и характерным как для городов, расположенных в континентальной части России, так и на побережье океанов, является увеличение температуры воздуха в зимний и летний периоды и снижение скорости ветра в зимний период. Снижение скорости ветра в летний период характерно только для городов, расположенных на побережьях океанов. При этом необходимо отметить, что эти города расположены в разных природно-климатических зонах. Один из них (ЗАТО Александровск) расположен в атлантико-арктической зоне умеренного климата (в Кольском заливе Баренцева моря), а второй (ЗАТО Фокино) – в Приморье в условиях умеренно муссонного климата. Для городов, расположенных в континентальной части России, помимо увеличения температуры воздуха и снижения скорости ветра в зимний период, характерно снижение влажности в летний период.

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить региональные особенности изменения климата и его комфортности в шести населенных пунктах, расположенных в различных природно-климатических зонах, а также продемонстрировать наличие экологически неблагоприятных тенденций в зимний период в городах, расположенных в континентальной части России.

Работа выполнялась в рамках государственного задания Рег. № НИОКТР 123040500002-3

Список литературы

1. Булыгина, О.Н., Коришнова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия // Труды ГГО. 2013. № 568. С. 156-172.
2. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549.
3. Виноградова В.В. Универсальный индекс теплового комфорта на территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 2. С. 3-19. DOI: 10.31857/S2587-5566201923-19.
4. Исаев А.А. Экологическая климатология: 2-е изд. М.: Научный мир, 2003. 458 с.
5. Кижнер Л.И., Серая Н.Ю. Изменение режима ветра в Томске в начале XXI века // Труды ГГО. 2015. № 576. С. 102-113.
6. Меццарская А.В., Еремин В.В., Баранова А.А., Майстрова В.В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология. 2006. № 9. С. 46-58.
7. Ревич Б.А. Изменение здоровья населения России в условиях меняющегося климата // Проблемы прогнозирования. 2008. № 3. С. 140-150.
8. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Семутникова Е.Г. Климатические условия и качество атмосферного воздуха как факторы риска смертности населения Москвы // Медицина труда и промышленная экология. 2008. № 7. С. 29-35.
9. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Изменения климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых регионах России // Проблемы прогнозирования. 2012. № 2. С. 122-139.
10. Стефанович А.А., Воскресенская Е.Н. Современные методы оценки комфортности биоклиматических условий курортных местностей // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1. № 43. С. 7-17. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-7-17.
11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Росгидромет. СПб: Научно-технические технологии, 2022. 124 с.
12. Binarti F, Koerniawan M.D, Triyadi S, Utami S.S., Matzarakis A. A review of outdoor thermal comfort indices and neutral ranges for hot-humid regions // Urban Climate. 2020. Vol. 31. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100542.
13. Blazejczyk K., Epstein Y., Jendritzky G. et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices. // Int. J. Biometeorol. 2012. Vol. 56. P. 515-535. DOI: 10.1007/s00484-011-0453-2.
14. Bröde P., Krüger E. L., Rossi F.A. Assessment of urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate index UTCI // XIV International conference on environmental ergonomics, Greece, January, 2011. P. 338-341.
15. Bröde P., Fiala D., Blazejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index UTCI // Int. J. Biometeorol. 2012. Vol. 56. P. 481-494.
16. Chaddock R.E. Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin Company, 1925. 471 p.

17. *de Freitas C.R., Grigorieva E.A.* A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices // *Int. J. Biometeorol.* 2015. Vol. 59. P. 109-120. DOI: 10.1007/s00484-014-0819-3
18. *de Freitas C.R., Grigorieva E.A.* A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices // *Int. J. Biometeorol.* 2017. Vol. 61, no. 3. P. 487-512. DOI: 10.1007/s00484-016-1228-6.
19. *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. P. 1957-1972.
20. *Fiala D., Lomas, K.J., Stohrer M.* First Principles Modeling of Thermal Sensation Responses in Steady-State and Transient Conditions // *ASHRAE Transactions.* 2003. Vol. 109, no. 1. P. 179-186.
21. *Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G.* UTCI-Fiala multi-node model human heat transfer and thermal comfort // *Int. J. Biometeorol.* 2012. Vol. 56, no. 3. P. 429-441.
22. *Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., Batchvarova E.,* Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being. Final Report COST Action 730. Freiburg. 2009. P. 1-26.
23. *Konstantinov P., Tattimbetova D., Varentsov M., Shartova N.* Summer Thermal Comfort in Russian Big Cities (1966-2015) // *Geographica Pannonica.* 2021. Vol. 25. P. 35-41. DOI: 10.5937/gp25-29440.
24. *Konstantinov P., Varentsov M., Shartova N.* North Eurasian thermal comfort indices dataset (NETCID): New gridded database for the biometeorological studies // *Environmental Research Letters.* 2022. Vol. 17, no. 8. DOI: 10.1088/1748-9326/ac7fa9.
25. *Matzarakis A., Rutz F., Mayer H.* Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model // *Int. J. Biometeorol.* 2007. Vol. 51. P. 324-327. DOI: 10.1007/s00484-006-0061-8.
26. *Potchter O, Cohen P, Lin T.P., Matzarakis A.* Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification // *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 1. P. 631-632, 390-406. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.276.
27. *Raäisaänen J.* How reliable are climate models? *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2007. Vol. 59, no. 1. P. 2-29. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2006.00211.x
28. *Richards M., Havenith G.* Progress Towards the Final UTCI Model // *Mekjavic IB; Kounalakis, SN Taylor, NAS (eds.): Environmental Ergonomics XII, August 19-24, 2007. Piran Slovenia. Ljubljana, Biomed.* 2007. P. 521-524.

References

1. *Bulygina, O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N.* *Izmeneniya rezhima vetra na territorii Rossii v poslednie desyatletiya. Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2013, vol. 568, pp. 156-172 [in Russ.].
2. *Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M.* *Opisanie mas-siva srochnyh dannyh ob osnovnyh meteorologicheskikh parametrah na stanciyah Rossii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2014620549* [in Russ.].
3. *Vinogradova V.V.* *Universal'nyj indeks teplovogo komforta na territorii Rossii // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya.* 2019, vol. 2, pp. 3-19. DOI: 10.31857/S2587-5566201923-19 [in Russ.].

4. Isaev A.A. *Ekologicheskaya klimatologiya*: 2-e izd. Moscow, Nauchnyy mir publ., 2003, 458 p. [in Russ.].

5. Kizhner L.I., Seraya N.Yu. *Izmenenie rezhima vetra v Tomske v nachale XXI veka. Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2015, vol. 576, pp. 102-113 [in Russ.].

6. Meshcherskaya A.V., Eremin V.V., Baranova A.A., Majstrova V.V. Wind Variation in Northern Russia in the Second Half the 20th Century from Surface and Upper-Air Data. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2006, vol. 9, pp. 46-58 [in Russ.].

7. Revich B.A. *Izmenenie zdorov'ya naseleniya Rossii v usloviyah menyayushchegosya klimata // Problemy prognozirovaniya*, 2008, vol. 3, pp. 140-150 [in Russ.].

8. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Semutnikova E.G. Klimaticheskie usloviya i kachestvo atmosfernogo vozduha kak faktory riska smertnosti naseleniya Moskvy // *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2008, vol. 7, pp. 29-35 [in Russ.].

9. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. *Izmeneniya klimata, volny zhary i holoda kak faktory riska povyshennoj smertnosti naseleniya v nekotoryh regionah Rossii. Problemy prognozirovaniya*, 2012, vol. 2, pp. 122-139 [in Russ.].

10. Stefanovich A.A., Voskresenskaya E.N. Modern methods for assessing the comfort of bioclimatic conditions of resort areas. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy [Environmental control systems]*, 2021, vol. 1, no. 43, pp. 7-17. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-7-17.

11. Tretij ochenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. *Obshchee rezyume. Rosgidromet. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii publ.*, 2022, 124 p. [in Russ.].

12. Binarti F, Koerniawan M.D, Triyadi S, Utami S.S., Matzarakis A. A review of outdoor thermal comfort indices and neutral ranges for hot-humid regions. *Urban Climate*, 2020, vol. 31. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100542.

13. Blazejczyk K., Epstein Y., Jendritzky G. et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, pp. 515-535. DOI: 10.1007/s00484-011-0453-2.

14. Bröde P., Krüger E. L., Rossi F.A. Assessment of urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate index UTCI. XIV International conference on environmental ergonomics, Greece, January, 2011, pp. 338-341.

15. Bröde P., Fiala D., Blazejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index UTCI. *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, pp. 481-494.

16. Chaddock R.E. Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin Company, 1925, 471 p.

17. de Freitas C.R., Grigorieva E.A. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *Int. J. Biometeorol.*, 2015, vol. 59, pp. 109-120. DOI: 10.1007/s00484-014-0819-3

18. de Freitas C.R., Grigorieva E.A. A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. *Int. J. Biometeorol.*, 2017, vol. 61, no. 3, pp. 487-512. DOI: 10.1007/s00484-016-1228-6.

19. 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.

20. Fiala D., Lomas, K.J., Stohrer M. First Principles Modeling of Thermal Sensation Responses in Steady-State and Transient Conditions. ASHRAE Transactions, 2003, vol. 109, no. 1, pp. 179-186.

21. Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G. UTCI-Fiala multi-node model human heat transfer and thermal comfort. *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 429-441.

22. Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., Batchvarova E. Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being. Final Report COST Action 730. Freiburg, 2009, pp. 1-26.

23. Konstantinov P., Tattimbetova D., Varentsov M., Shartova N. Summer Thermal Comfort in Russian Big Cities (1966-2015). *Geographica Pannonica*, 2021, vol. 25, pp. 35-41. DOI: 10.5937/gp25-29440.

24. Konstantinov P., Varentsov M., Shartova N. North Eurasian thermal comfort indices dataset (NETCID): New gridded database for the biometeorological studies. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, no. 8. DOI: 10.1088/1748-9326/ac7fa9.

25. Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model. *Int. J. Biometeorol.*, 2007, vol 51, pp. 324-327. DOI: 10.1007/s00484-006-0061-8.

26. Potchter O, Cohen P, Lin T.P., Matzarakis A. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Sci. Total Environ.*, 2018, vol. 1, pp. 631-632, 390-406. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.276.

27. Räisänen J. How reliable are climate models? *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2007, vol. 59, no. 1, pp. 2-29. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2006.00211.x

28. Richards M., Havenith G. Progress Towards the Final UTCI Model // In: Mekjavic, IB; Kounalakis, SN; Taylor, NAS (eds.): Environmental Ergonomics XII, August 19-24, 2007. Piran Slovenia. Ljubljana, Biomed. 2007, pp. 521-524.

*Поступила 07.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;
принята в печать 10.04.2024.*

*Submitted 07.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;
accepted for publication 10.04.2024.*