

## МИКРОКЛИМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ В ПРЕДЕЛАХ МИКРОРАЙОНОВ Г. МИНСКА

М. А. Алиева

кафедра почвоведения и ГИС факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, г. Минск, [m.alieva5030@gmail.com](mailto:m.alieva5030@gmail.com)

Т. В. Шлендер<sup>1</sup>, А. Е. Яротов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>кафедра общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, научный сотрудник НИИ центра мониторинга озоносферы Белорусского государственного университета, [timajaya@mail.ru](mailto:timajaya@mail.ru)

<sup>2</sup>кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии мира и образовательных технологий факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета

В работе исследуются показатели комфортности климата городского населения г. Минска и пригорода. Проблема комфортности климата актуальна не только в рамках всей страны, но и конкретных микрорайонов города. В предыдущих работах, посвященных комфортности климата городов Беларуси, полученные результаты индексов комфортности были рассчитаны без учета ориентации зданий по генплану города. В данной работе с помощью программных средств ГИС ArcGIS и биоклиматической модели SkyHelios получены значения индексов комфортности (РТ, РЕТ, UTCI) климата с учетом планировки зданий для четырех участков г. Минска и пригорода – ул. Кирова, Кольцова, Беды и Жемчужная (аг. Колодищи). Сделан вывод о важности учета высоты и плотности зданий при расчете индексов комфортности климата человека на конкретном участке города. Основные различия в температурах индексов наблюдаются летом, особенно в центре г. Минска (ул. Кирова), а также с северной или южной стороны зданий.

**Ключевые слова:** биометеорология; тепловые индексы; воспринимаемая температура; эквивалентно-физиологическая температура; универсальный индекс теплового комфорта.

Большая часть людей в мире проживает в городах – согласно Отчету Департамента по экономическим и социальным вопросам ООН уровень урбанизации в мире в 2018 г. составил 55 %. Продолжающийся рост городов, городского населения и распространение городского уровня жизни приведет к 75 % урбанизации населения мира к 2050 году [1]. Доля городского населения в 2022 г. в Беларуси составила 80,3 % [2]. Для повышения благоприятности проживания в городах по всему миру анализируются физиологически-термальные условия с использованием тепловых индексов, основанных на энергетическом балансе человека.

Изучение прямых и косвенных связей между геофизическими факторами среды и организмом человека – одна из задач биометеорологии человека, возникшей на стыке метеорологии, геофизики и биологии.

Базис биометеорологических исследований – это уравнение теплового баланса человека:

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0, \quad (1)$$

где  $M$  – скорость обмена веществ,  $W$  – теплоотдачи при физической работе,  $C$  – конвективный поток тепла,  $E_D$  – поток скрытого тепла, расходуемого на потоотделение,  $E_{Re}$  – сумма потоков тепла, направленных на нагрев и увлажнение вдыхаемого воздуха,  $E_{Sw}$  – поток тепла, идущий на испарение пота,  $S$  – аккумуляция энергии, используемой для нагревания или охлаждения организма из уравнения, описывающего поток тепла  $FSC$ , направленный через слой одежды от кожи к поверхности одежды

$$FSC = (1/I_{cl}) \times (T_{sk} - T_{cl}), \quad (2)$$

где  $I_{cl}$  – термостойкость одежды ( $K \cdot m^2 / Wt$ ),  $T_{cl}$  – средневзвешенная температура поверхности одежды,  $T_{sk}$  – средневзвешенная температура кожи [3].

Из тождества (1) можно выделить четыре группы факторов теплового баланса: физиологический, метеорологический, фактор теплозащитных свойств одежды, физических нагрузок.

**Воспринимаемая температура (Perceived Temperature - PT)** – эквивалент температуры, разработан для людей, находящихся в помещении, определяется как «температура воздуха некоторой эталонной среды, при котором тепловое восприятие такое же, как в реальной среде» [4, 5].

Индекс учитывает метеорологические параметры: температуру воздуха ( $T_a$ , °C), скорость ветра ( $v$ , м/с), давление водяного пара ( $VP$ , гПа) и среднюю температуру излучения ( $T_{mrt}$ , °C). в то время как физиологические параметры принимаются постоянными, фактор одежды – саморегулируемым.

Индекс широко применяется в исследованиях с участием Метеорологической службы Германии, а также в других странах. Интерпретация значения индекса имеет широкий температурный диапазон, в целом подходит для территории Беларуси [5,6] (табл. 1).

Таблица 1

**Термофизиологические значения результатов воспринимаемой температуры (PT) для Центральной Европы [5,6]**

PT (° C)	Тепловое восприятие	Градация физиологического стресса
$\geq +38$	Очень горячий	Экстремальный тепловой стресс
+32 - +38	горячий	Значительный тепловой стресс
+26 - +32	теплый	Умеренный тепловой стресс
+ 20 - +26	Слегка теплый	Слегка тепловой стресс
0 - +20	комфортный	Комфортный
-13 – 0	Слегка прохладный	Слегка холодовой стресс
-26 - -13	прохладный	Умеренный холодовой стресс
-39 - -26	холодный	Значительный холодовой стресс
< -39	Очень холодный	Экстремальный холодовой стресс

**Эквивалентно-физиологическая температура (Physiological Equivalent Temperature – PET)** – регулярно используемый показатель теплового комфорта человека, определяется как «температура воздуха, при которой в типичных условиях внутри помещения (без действия ветра и солнца) энергетический баланс человеческого тела сбалансирован с температурой тела и кожи снаружи» [7]. В отличие от вышперечисленных индексов данный индекс не учитывает фактор

одежды, а значит является «реальным климатическим индексом, описывающим тепловую среду в термофизиологически-взвешенном виде» [3]. Типичными (комнатными) условиями в этом случае считаются такие, когда средняя радиационная температура равна температуре воздуха ( $T_{mrt}=T_a$ ), скорость ветра  $v = 0,1$  м/с, парциальное давление –  $VP = 12$  гПа [6].

Эмпирически получены шкала значений индекса и соотнесенные уровни температурно-физиологического стресса для Центральной Европы (табл. 2). Шкала разработана для человека ростом 1,75 м, возраста 35 лет, весом 75 кг, внутренней теплопродукцией 80 Вт/м<sup>2</sup>, скоростью прогулки 4 км/ч, индексом одежды – 0,9. Наиболее важный фактор, колеблющийся индекс – это средняя температура излучения ( $T_{mrt}$ ), учитываются также скорость ветра ( $v$ ), температура воздуха ( $T_a$ ) и влажность воздуха ( $\phi$ ,  $VP$ ) [4].

Таблица 2

**Классы теплового ощущения для людей в Центральной Европе [7]**

РЕТ (°С)	Тепловое восприятие	Градации физиологического стресса
> +41	Очень горячий	Экстремальный тепловой стресс
+35 - +41	горячий	Сильный тепловой стресс
+29 - +35	теплый	Умеренный тепловой стресс
+ 23 - +29	Слегка теплый	Слегка тепловой стресс
+18 - +23	комфортный	Нет теплового стресса
+13 - +18	Слегка прохладный	Слегка холодовой стресс
+8 - +13	прохладный	Умеренный холодовой стресс
+4 - +8	холодный	Сильный холодовой стресс
≤ +4	Очень холодный	Экстремальный холодовой стресс

**Универсальный индекс теплового комфорта (UTCI)** может быть определен как «температура воздуха эталонной среды, которая могла вызвать бы такое динамическое напряжение физиологической модели, что и у реальной среды». Метеорологические условия сравниваются с эталонной средой с относительной влажностью 50%, без ветра, при условии, что  $T_{mrt}=T_a$ . Однако данный индекс представляет физиологические факторы немного по-другому: принимается только скорость передвижения (4 км/ч) и внутреннее тепловыделение 135 Вт/м<sup>2</sup>. Фактор одежды остаточный – автоматически адаптируется к текущим условиям (по погоде). Индекс не вычисляется напрямую, он очень сложен и требует высоких мощностей и времени. Регрессионное приближение упрощает вычисление также путем уменьшения вводных параметров:  $T_a$  (°C),  $VP$  (гПа),  $v$  (м/с) и  $T_{mrt}$  (°C). Считается, что все физиологические параметры определяются автоматически, есть интервальные ограничения на вводимые параметры ( $T_a \in [-50; +50]$ ,  $v \in [0,5; 17]$ ). При этом индекс очень чувствителен к изменению значения скорости ветра и средней температуры излучения, но не температуры воздуха. Для Центральной Европы также есть шкала значений с соотнесенными уровнями стресса (таблица 3).

В работах Витченко А.Н. посвященных комфортности климата городов Беларуси разработана оригинальная методика геоэкологической оценки комфортности климата городов, под которой понимают определение степени его

благоприятности по отношению к организму человека с учетом естественного потенциала самоочищения атмосферы и влияния климата на режим эксплуатации сооружений городской застройки [9]. Также сделан вывод о том, что в г. Минске отмечается устойчивая тенденция к повышению количества дней с нормальной эквивалентно-эффективной температурой воздуха от 17 до 21 °С и среднемесячной температуры воздуха в июле и январе, а также интегрального показателя комфортности климата [10].

Таблица 3

**Классификация теплового стресса индекса UTCI [8]**

UTCI (°C)	Категории термального стресса
$\geq +46$	Экстремально тепловой стресс
+38 - +46	Очень сильный тепловой стресс
+32 - +38	Сильный тепловой стресс
+26 - +32	умеренный
+9 - +26	Нет теплового стресса
0 - +9	Мягкий холододовый стресс
-13 - 0	Умеренный холододовый стресс
-27 - -13	Сильный холододовый стресс
-40 - -27	Очень сильный холододовый стресс
< -40	Экстремальный холододовый стресс

Полученные оценки комфортности по городам Беларуси важны для общей картины изменения комфортности климата и адаптации к его изменению, но данные исследования не учитывают локальный масштаб с учетом городской застройки, т.к. данные исследований были основаны на результатах наблюдений метеостанций, расположенных в одной точке города или вообще за городом. В связи с этим возникает потребность рассмотрения распределения данных параметров по районам города, имеющим различные климатические характеристики. Например, как это сделано в работах Матзаракиса А., где с использованием био-климатических моделей RayMan и SkyHelios рассчитаны индексы комфортности как для всего европейского региона, так и для отдельных участков городов [11,12].

В данной работе сделан акцент на микромасштабные изменения характеристик комфортности климата в условиях конкретных кварталов г. Минска с учетом расположения, ориентации и высоты зданий с использованием численной модели SkyHelios. Модель SkyHelios – открытое программное обеспечение для построения микромасштабных климатических характеристик, подразумевающих прежде всего вычисление фактора обзора неба (SVF – показателя закрытости горизонта), на его основе оценивается продолжительность солнечного сияния, затенение и радиация в каждой точке. Программа позволяет получить значения вышеописанных тепловых индексов в рамках заданного пространства с учетом городской застройки.

Данные Open Street Map были скачаны на территорию 4 микрорайонов в разных частях г. Минска, где есть метеодатчики, которые производят наблюдения за температурой воздуха, влажностью и скоростью ветра и предоставляют

открытый доступ к данным на сайте rp5.ru [<https://rp5.by/>]. Далее шейп - файлы территорий были загружены в модель SkyHelios, где в опциях была указана этажность зданий. Затем была определена размерность сети пространства – 4 на 4 м. Далее полученные файлы обрабатывались в итоговые картосхемы в программных средствах ArcGIS и Adobe Illustrator.

Метеодатчики выбирались те, где были доступны данные скорости ветра, так как в модели нужно указывать этот параметр. В связи с этим были выбраны территории с датчиками по улицам Кирова, 28; Леонида Беды, 38; Кольцова, 19А и аг.Колодищи, ул. Жемчужная, 22. Были выбраны даты в различный сезон года – это 13.00 UTC на 5 мая, 5 августа и 5 ноября 2022 года (таблица 4). Данные были получены в виде точечного шейп-файла регулярной сети 4 на 4 метра, на основе данных составлены картосхемы распределения индексов в микрорайонах, разбитого путем естественных границ на три класса (рисунки 1, 2 и 3).

Таблица 4

**Метеопоказатели по данным датчиков Rp5  
для построения микроклиматических моделей**

Адрес датчика	Дата	Время UTC	T, C°	φ, %	v, м/с	WD
г. Минск, ул. Кирова, 28	5 мая 2022	13:00	11,0	43	1	ЮЮЗ
	5 августа 2022		27,1	65	2	СВ
	5 ноября 2022		4,9	85	3	В
г. Минск, ул. Леонида Беды, 38	5 мая 2022	13:00	15,1	43	1	ЮЮЗ
	5 августа 2022		30,9	59	2	СВ
	5 ноября 2022		4,2	86	3	В
г. Минск, ул. Кольцова, 19А	5 мая 2022	13:00	11,6	33	1	ЮЮЗ
	5 августа 2022		27,9	50	2	СВ
	5 ноября 2022		3,2	81	3	В
аг. Колодищи, ул. Жемчужная, 22	5 мая 2022	13:00	12,5	32	1	ЮЮЗ
	5 августа 2022		27,8	56	2	СВ
	5 ноября 2022		2,8	89	3	В

В итоге были получены картосхемы индексов комфортности (РТ, РЕТ и UTCI) для различных микрорайонов г. Минска и пригорода (рисунки 1–3).

Воспринимаемая температура (РТ) в мае для представленных микрорайонов отражает комфортный уровень термально-физиологического стресса (значения

до 20<sup>0</sup>C). В августе наблюдаются средне-теплый уровень термально-физиологического стресса для внутригородских микрорайонов (ул. Кирова и Леонида Беды) и легко-теплый уровень для периферийных (ул. Кольцова г. Минска и ул. Жемчужная аг. Колодищи). Ноябрьские погодные условия также характеризуются комфортностью во всех локациях (рисунок 1).

В центре города, по улице Кирова летом наблюдается, особенно с южной стороны, увеличение теплового стресса, в отличие от остальных рассматриваемых участков, где наблюдается с северной стороны охлаждение. А весной и осенью наличие высотных зданий создает тепловой эффект возле или между самими зданиями.

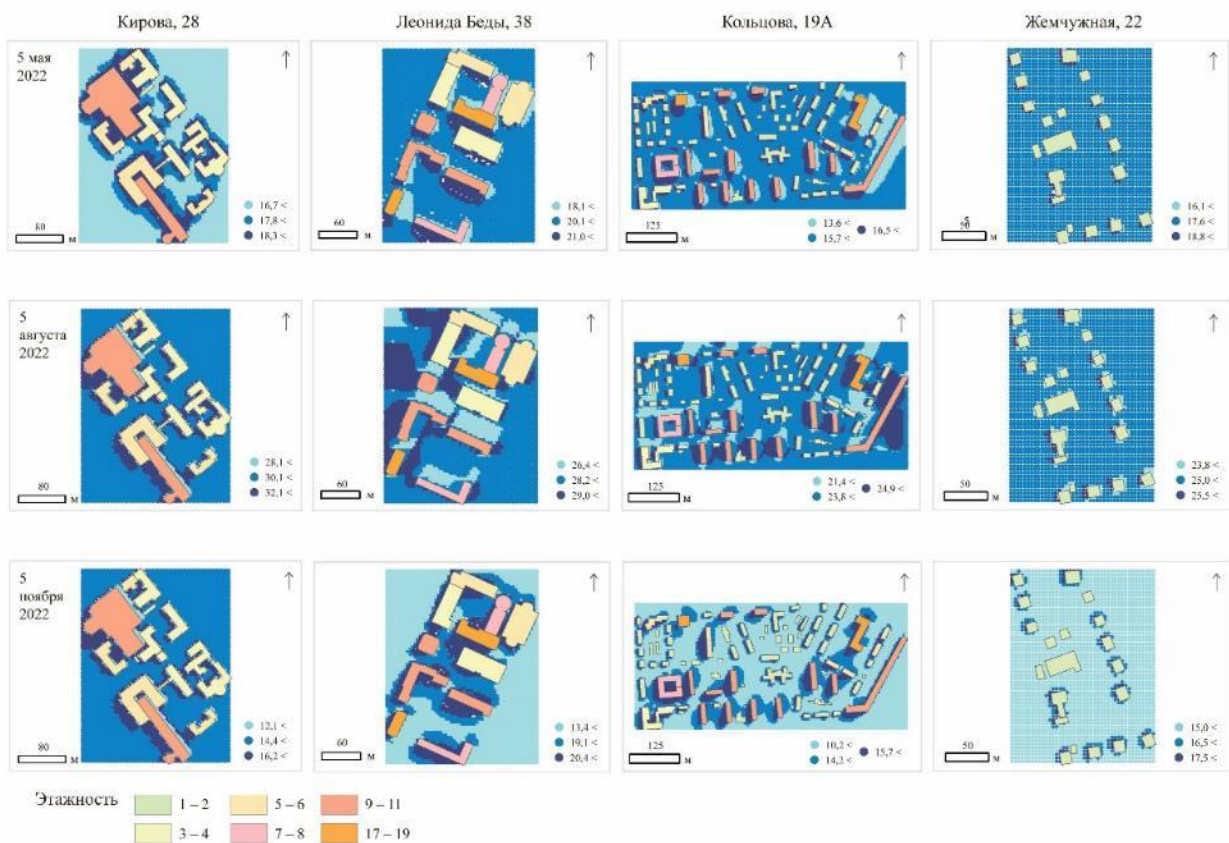


Рис. 1. Воспринимаемая температура по микрорайонам г. Минска и пригорода

Эквивалентно-физиологическая температура (PET) характеризует майскую погоду в микрорайонах от средне- и легко-холодной до комфортной по уровню термально-физиологического стресса. В августе оценка стресса – легко-, средне- и значительно теплый. В ноябре – легко-холодный уровень термально-физиологического стресса. Но, возле зданий значения температуры теплового стресса увеличиваются осенью и весной до комфортных, а летом снижаются до слегка теплового порога с северной стороны, кроме ул. Кирова, где летом наблюдается повышение температуры возле зданий до горячего порога теплового стресса, особенно с южной стороны (рисунок 2).

Согласно классификации теплового стресса по универсальному индексу теплового комфорта (UTCI), диапазон значений по микрорайонам в мае и ноябре (рисунок 3) отражает отсутствие теплового стресса, в августе средне-теплый

уровень стресса наблюдается только в «центральной» микрорайоне на ул. Кирова, во всех остальных – отсутствует.

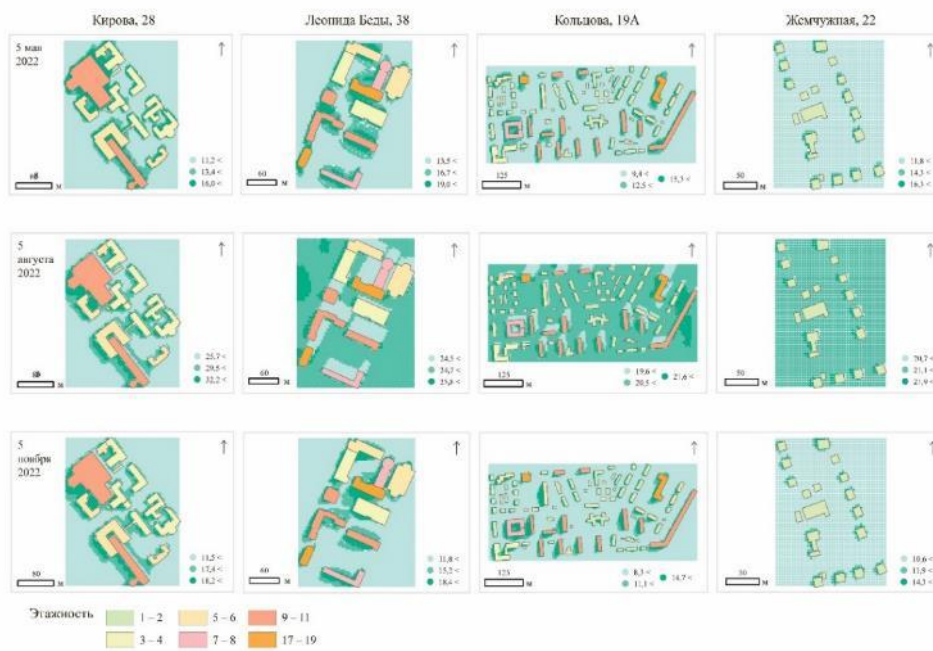


Рис. 2. Эквивалентно-физиологическая температура по микрорайонам г. Минска и пригорода

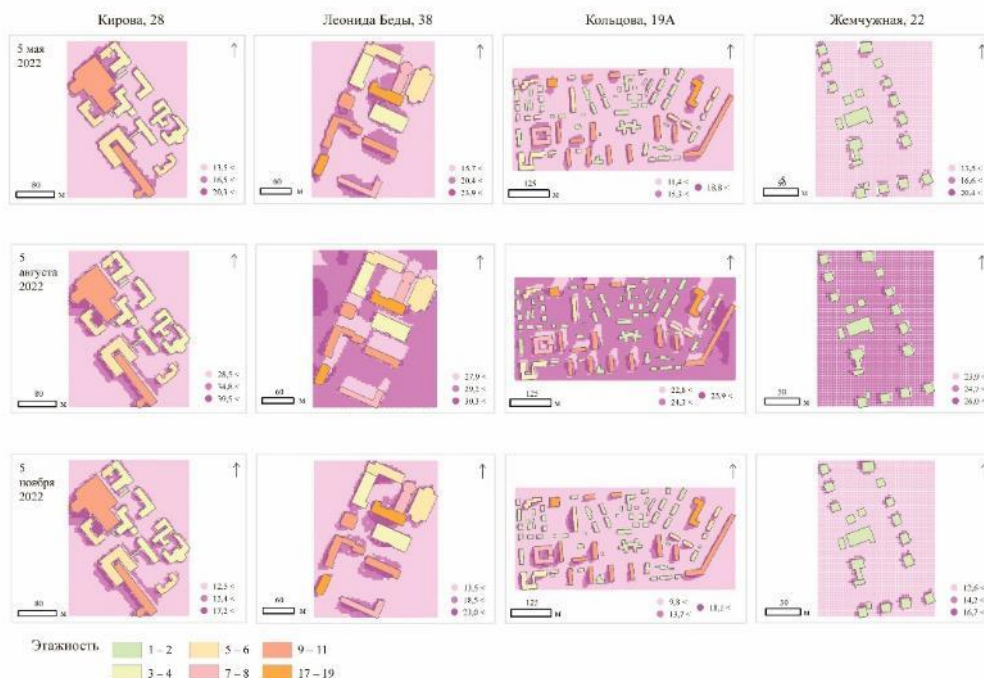


Рис. 3. Универсальный индекс теплового комфорта по микрорайонам г. Минска и пригорода

Наличие городской застройки весной и осенью на улицах Беды, Кольцова и Жемчужная повышает температуру теплового стресса на 5-6 °С, а летом – снижает на 2 °С, но в целом это не влияет на тепловое восприятие человека. На улице Кирова схожая ситуация, только летом наоборот – наблюдается повышение температуры теплового стресса на 7 °С, до умеренного теплового стресса.

Таким образом, впервые получены модельные оценки индексов комфортности (РТ, РЕТ и UTCI) для различных микрорайонов г. Минска и пригорода в весенний, летний и осенний период по полудню. Сравнительный анализ показал, что наличие зданий и их высота может менять порог степени комфортности в разные его стороны.

На пригородной территории, агрогородка Колодищи, с одноэтажными зданиями, наблюдается меньшие амплитуды изменений температур и соответственно порогов теплового стресса. Другими словами, чем выше здание и плотность расположения этих зданий, тем больше будет изменяться по площади температура комфортности климата человека на данном участке. Полученные тестовые результаты индексов комфортности для г. Минска являются основой для дальнейшего изучения данной проблемы – комфортности климата населения городов, рационального планирования городской застройки и пр.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations.
2. World Population Review [Электронный ресурс] – Режим доступа: Most Urbanized Countries 2022 (worldpopulationreview.com) – Дата доступа: 20.05.2022.
3. Höppe P. R. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment /P.R. Höppe// Int J Biometeorol 1999 V.43, P. 71–7.
4. VDI, (2008): VDI Guideline 3787, Part 2: Environmental Meteorology. Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level. Part I: Climate. VDI.
5. Staiger H.; Laschewski G.; and Graetz A. The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics/ H.Staiger, G.Laschewski, A. Graetz//International Journal of Biometeorology- 2012 - 56(1) – p.165–176
6. Matzarakis A.; Mayer H.; and Iziomon M.G. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature/ A. Matzarakis, H. Mayer, M.G. Iziomon// International Journal of Biometeorology – 1999 –43(2) – p.76–84
7. Błażejczyk K.; Jendritzky G.; Bröde P.; Fiala D.; Havenith G.; Epstein Y.; Psikuta A.; and Kampmann B. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI)/ K. Błażejczyk//Geographia Polonica – 2013 – 86(1).
8. Витченко А. Н., Телеш И. А. Методика геоэкологической оценки комфортности климата городов // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. 2007. № 2. С. 99–104.
9. Витченко А. Н., Телеш И. А. Современные тенденции изменения комфортности климата в городе Минске // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 2. – С. 103–113.
10. Matzarakis A., Georgiadis T., Rossi F. Thermal bioclimate analysis for Europe and Italy. II Nuovo Cimento. – 2007. - Vol. 30. – P. 623–632.
11. Matzarakis A, Endler C. Physiologically equivalent temperature and climate change in Freiburg. Eighth Symposium on the Urban Environment. American Meteorological Society, Phoenix, AZ, 10–15 January 2009, Vol. 4.2, – P. 1–8.