

Electronic databases and results of numerical simulations in defining specialized climate indices

Krakovska S.V., Palamarchuk L.V., T.N. Shpytal

Methodical approaches to the estimation accuracy of electronic databases and results obtained using regional numerical models in definition of special climatic indicators are presented. Verification of electronic databases showed their satisfactory accuracy and acceptability for climate indices calculations and for tests of the numerical simulation results. The accuracy is evaluated for the duration and the average temperature of the heating period in Ukraine and in its separate regions based on the REMO model data and on the ensemble of 10 regional climate models (RCMs). It is shown that the assumption of a higher accuracy of the calculations in the ensemble of models in comparison with separate RCM could be not really the case for some specialized climate indices. Therefore, check the accuracy of used datasets (verification) before to determine prognostic climate indices, is definitely required and highly recommended.

Keywords: verification of the data; electronic databases; regional numerical models; ensemble of models; special climatic indices.

Надійшла до редколегії 12.09.2016

УДК 551.586

Шевченко О.Г.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БІОКЛІМАТИЧНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ОЦІНКИ КОМФОРТНОСТІ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА В ТЕПЛІЙ ПЕРІОД

Ключові слова: біокліматичні індекси, урбанізоване середовище, біоклімат, тепловий комфорт.

Вступ. Погода та клімат може здійснювати суттєвий вплив не лише на окремі галузі господарства, а також визначати комфортність (або дискомфортність) для проживання окремих територій нашої планети та, відповідно, впливати на самопочуття людей, на розселення людства, розвиток рекреації та туризму на певних територіях.

В контексті розгляду впливу клімату на людський організм ключовим є термін «біоклімат» – що являє собою сукупність характеристик клімату, які визначають його комплексний вплив на організм людини на певній території. З метою оцінки особливостей біоклімату найчастіше використовують комплексні показники, що називаються біокліматичними індексами (БІ). БІ характеризують особливості теплової структури середовища і є опосередкованим індикатором стану теплового поля, що оточує людину.

В умовах глобальної зміни клімату, що проявляється перш за все в зростанні температури повітря, в жарких кліматах та в регіонах з помірним кліматом в теплий період року зростає кількість днів з тепловим стресом. Крім того, у великих містах мікрокліматичні особливості призводять до локального підвищення температури в їх центральній частині – виникнення явища острова тепла і тому мешканці міст зазнають ще сильнішого теплового стресу порівняно з мешканцями прилеглих сільських територій. Саме тому оцінка біоклімату великих міст в теплий період останнім часом привертає до себе увагу багатьох дослідників. Адже, достовірні результати дослідження частоти прояву днів з тепловим стресом є підґрунтям для розробки та впровадження заходів адаптації до спеки.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є здійснення порівняльного аналізу різних біокліматичних індексів з метою визначення найбільш оптимального

Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2016. – Т.3(42)

для оцінки комфортності урбанізованого середовища в теплий період.

Виклад основного матеріалу. Біокліматичні індекси тісно пов'язані з поняттям теплового комфорту, оскільки клімат та погода впливають перш за все, на термічний стан організму, а його функціональна діяльність значною мірою залежить від умов теплообміну з оточуючим середовищем. Досягнення теплового комфорту організму людини залежить від трьох груп чинників – фізіологічного стану організму, умов оточуючого середовища та одягу з відповідною термоізоляцією.

Вплив фізіологічного стану організму на тепловий комфорт перш за все проявляється через теплопродукцію організму та процес терморегуляції. Теплопродукція залежить від фізичного навантаження та збільшується з ростом м'язової активності. За повного спокою теплопродукція підтримується на найнижчому рівні і відповідає значенню «основного обміну», який приблизно дорівнює 80 Вт. Величина надлишку чи дефіциту тепла в організмі людини вказує на відхилення теплообміну людського організму з оточуючим середовищем від оптимального фізіологічного стану.

Серед умов оточуючого середовища найважливішу роль у формуванні тепловідчуття людини відіграють температура та вологість повітря, швидкість вітру, сонячна радіація та ін.

Людина використовує одяг для підтримання умов теплового комфорту. Теплозахисні властивості одягу залежать від природи волокон та кількості газу, що міститься між волокнами. Теплоізоляційні властивості одягу оцінюють на основі вимірювань дифузії тепла в одязі, в одиницях КЛО (від англ. clothes – одяг). Тепловий комфорт одягу можна визначити шляхом додавання теплових опорів окремих складових одягу.

Крім вище описаних трьох груп чинників, на тепловий комфорт можуть впливати деякі інші – стать та вік людини, місце проживання, відмінності в культурі та національних особливостях, стан здоров'я індивідуума, ступінь акліматизації, сезон року та ін.

Значний інтерес до проблеми впливу метеорологічних параметрів на людину призвів до виникнення великої кількості БІ, що ґрунтуються на різних підходах до оцінки чинників, що визначають стан теплового комфорту. Проте, на теренах колишнього Радянського Союзу, сьогодні, як і кілька десятиліть тому, активно використовуються найпростіші БІ індекси, що запропоновані багато років тому та враховують лише метеорологічні параметри, або метеорологічні параметри та частково – теплоізоляційні властивості одягу. Найбільш поширеними з них є група індексів ефективних температур, зокрема – ефективна температура (ЕТ). Сутність цього індексу ґрунтується на тому, що однакове тепловідчуття може бути за різноманітних поєднань метеорологічних елементів.

В біокліматичному індексі «Еквівалентно-ефективна температура» (ЕЕТ) враховується вплив на тепловідчуття людини трьох метеорологічних параметрів – температури та вологості повітря і швидкості вітру. Теоретичні розрахунки ЕЕТ проводяться для «напіводягненої» (роздягнутої до поясу) людини за різними формулами. Однією з найпоширеніших є формула А. Міссенарда:

$$EET = 37^{\circ}C - (37^{\circ}C - T)/(0,68 - 0,0014 f + (1/(1,76 + 1,4 V^{0,75}) - 0,29 T (1 - f/100))$$

де f , T , V – відповідно вологість та температура повітря і швидкість вітру.

Оскільки тепловідчуття одягнутої та оголеної людини за одних і тих же метеорологічних умов є різним, І.В.Бутьєвою для аналітичної оцінки тепловідчуття одягнутої людини була запропонована формула нормальної еквівалентно-

ефективної температури (HEET):

$$HEET = 0,8 \times EET + 7^{\circ}C$$

Усі вищеописані індекси ефективних температур мають значний недолік – в них не враховується тепловідчуття людини за рахунок нагрівання тіла при надходженні сонячної радіації, що є дуже важливим в літній період, таким чином їх використання має обмежуватися лише розрахунком тепловідчуття для людини, що перебуває на затінених територіях. Хоча, звісно, в реальних умовах людина досить часто потрапляє під вплив сонячної радіації, тому, наприклад, якщо використовувати дані Бі для характеристики біоклімату певної території, відразу є зрозумілим, що така оцінка не буде об'єктивною. Саме з метою мінімізації вищезазначених недоліків, була розроблена радіаційно-еквівалентно-ефективна температура (PEET), яка враховує вплив на тепловідчуття людини чотирьох метеорологічних елементів – температури та вологості повітря, швидкості вітру та сонячної радіації. PEET може бути розрахована за емпіричною формулою Є. Г. Головіної та В. І. Русанова [3]:

$$PEET = 125 \lg (1 + 0,02T + 0,001 (T - 8)(f - 60) - 0,045 (33 - T) \sqrt{V} + 1,129\beta)$$

де $\beta = \varepsilon(1 - \alpha)$ – поглинута поверхнею тіла сонячна радіація в кВт/м², $\alpha = 0,11$ – альbedo шкіри, ε – інтенсивність сонячної радіації, f , T , V – відповідно вологість та температура повітря і швидкість вітру.

Або за наближеним співвідношенням І.В. Бутьєвої:

$$PEET = HEET + 6,2^{\circ}C$$

Ще одним поширеним на теренах колишнього Радянського Союзу Бі є біологічно-активна температура (БАТ). В літературі зазначається, що БАТ враховує вплив комплексу температури повітря, відносної вологості, швидкості вітру, сумарної сонячної радіації, та довгохвильової радіації від підстильної поверхні, атмосфери та всіх оточуючих предметів (стін будівель, зелених насаджень, водойм, тощо) на людину [2]. Розрахувати БАТ можна за наступними формулами:

$$BAT = 100 \lg [1 + 0,02T + 0,001 (T - 8)(f - 60) - 0,045(33 - T)\sqrt{V} + 0,185 \beta] + 9^{\circ}$$

де f , T , V – відповідно вологість та температура повітря і швидкість вітру, $\beta = \varepsilon(1 - \alpha)$ – поглинута поверхнею тіла сонячна радіація в кВт/м², α – альbedo шкіри, ε – інтенсивність сонячної радіації [1],

або: $BAT = 9^{\circ}C + 0,8 HEET$ [3].

Розглянувши, існуючі формули для розрахунку БАТ можливість врахування довгохвильової радіації цим Бі, викликає значні сумніви, адже, в жодній формулі для його розрахунку не використовується інформація про довгохвильову радіацію.

Отже, вищеописані біокліматичні індекси, хоча й переважно дуже прості у розрахунках, але мають суттєвий недолік – із трьох груп чинників, що впливають на тепловідчуття людини, вони враховують лише окремі чинники навколишнього середовища, а деякі з них враховують ще й теплоізоляційні властивості одягу, але ніяк не враховується фізіологія людини (вони не мають жодного зв'язку з рівнянням теплового балансу людини). Таким чином, ці індекси не дають змоги отримати об'єктивні оцінки тепловідчуття людини за певних поєднань метеорологічних

параметрів і, відповідно, належним чином оцінити біоклімат території.

Фізіологічно-еквівалентна температура. Протягом останніх кількох десятиліть в усьому світі для біокліматичних оцінок використовують Бі, що ґрунтуються на енергетичному балансі людського організму. Серед європейських вчених на сьогоднішній день одним з найпопулярніших Бі є фізіологічно-еквівалентна температура (ФЕТ) (Physiological Equivalent Temperature – PET) запропонований Р. Норре [7]. Н. Lee та ін. [8] зазначають, що на за допомогою даного Бі здійснено оцінки біоклімату в різних куточках нашої планети. С.В. Ткачук [4], провівши аналітичний огляд Бі також дійшов до висновку, що ФЕТ є дуже вдалим універсальним біокліматичним індексом, адже, в ньому враховано повне рівняння теплового балансу, температура внутрішніх органів, інтенсивність потовиділення, вологість шкіри та вплив метеорологічних параметрів. Індекс може використовуватися для будь-якого клімату і, як для середньостатистичної людини, так і для кожного окремого індивідуума. Свідченням переваг та універсальності ФЕТ, є не лише його значне поширення серед науковців-метеорологів, а також те, що Директива Німецької асоціації інженерів (*Verein Deutscher Ingenieure (VDI) – нім.*) № 3787, частина II «Методи біокліматичної оцінки клімату для людини та якості повітря для міського та регіонального планування, частина I: клімат» (VDI, 1998), рекомендує використання ФЕТ для оцінки термальних компонентів різних кліматів.

ФЕТ – відповідає температурі повітря, яка необхідна для відтворення в типовому приміщенні у середньостатистичної людини таких же значень температури шкіри та внутрішніх органів, що і в умовах, в яких вона перебуває. За типові умови в приміщенні беруться наступні: середня радіаційна температура дорівнює температурі повітря, швидкість вітру – 0,1 м/с, парціальний тиск водяної пари – 12 гПа (що приблизно дорівнює відносній вологості 50 % за температури повітря 20,0°C) [7]. Одиницями вимірювання ФЕТ є °С, що робить даний індекс дуже зручним для використання. Комфортним умовах відповідають значення ФЕТ в межах 18,1–23,0°C.

Основою для розрахунків фізіологічно-еквівалентної температури є Мюнхенська модель енергетичного балансу людини (Munich energy balance model for individuals – MEMI). Модель MEMI базується на рівнянні енергетичного балансу тіла людини:

$$M+W+R+C+E_D+E_{Re}+E_{Sw}+S=0$$

де M – швидкість обміну речовин (метаболізм), W – енергія, що утворюється за рахунок фізичної роботи, R – випромінювання тіла, C – конвективний потік тепла, E_D – латентні потоки тепла для випаровування води, з шкіри, E_{Re} – це сума потоків тепла для нагрівання та зволоження повітря, яке вдихається, E_{Sw} – потік тепла для випаровування поту, S – це потік тепла для підтримання температури (охолодження або нагрівання) тіла. Окремі члени цього рівняння мають позитивний знак, якщо вони призводять до надходження енергії до тіла або негативний – якщо енергія тілом втрачається (M – завжди позитивна, W , E_D та E_{Sw} – завжди негативні). Одиниці вимірювання потоків тепла – вати.

Важливими є також термо-фізіологічні параметри: тепловий опір одягу (в одиницях Кло) та активність людини (у Вт).

Розрахунок ФЕТ включає в себе наступні кроки:

- розрахунок теплового режиму тіла (за MEMI) для заданої комбінації метеорологічних параметрів;
- введення розрахованих значень середньої температури шкіри та внутрішньої

температури тіла в модель MEMI та вирішення системи рівнянь енергетичного балансу людини, для температури повітря за наступних параметрів $V=0,1$ м/с, $VP=12$ гПа та $T_{c.p.}=T_{пов.}$

Температура та вологість повітря і швидкість вітру є загальновідомими метеорологічними величинами, спостереження за якими проводяться на усіх метеорологічних станціях світу, а от середня радіаційна температура є менш вживаним параметром і потребує деякого пояснення, адже цей параметр є одним з найважливіших для розрахунків енергетичного балансу людського тіла влітку під час сонячної погоди, особливо в межах забудованого міського середовища.

Для розрахунків $T_{c.p.}$ важлива не лише інформація про енергетичні потоки території, а й про властивості та розміри випромінюючих поверхонь, а також фактор відкритого неба ($\Phi_{ВН}$). Середня радіаційна температура варіюється від точки до точки, а також в одній і тій же точці змінюється залежно від положення тіла людини. Радіаційні потоки суттєво відрізняються у відкритому просторі, порівняно з ситуацією у приміщенні і за сонячної погоди $T_{c.p.}$ може бути більш ніж на 30°C вищою, ніж температура повітря, в той час як у приміщенні – вони приблизно однакові [5].

Існує багато способів визначити або розрахувати середню радіаційну температуру. У 1992 р. автором ФЕТ Р. Норре був запропонований порівняно нескладний метод розрахунку середньої радіаційної температури, що набув значного поширення при розрахунку біокліматичних індексів у міському середовищі [6]. За Р. Норре середня радіаційна температура у відповідності з законом Стефана-Больцмана може бути розрахована за наступною формулою:

$$T_{c.p.} = \sqrt[4]{\frac{K_{abs}^* + L_{abs}^*}{\epsilon_p \times \sigma}} - 273,15.$$

K_{abs}^* – це сума потоків короткохвильової радіації від тривимірного середовища, що поглинається організмом еталонної людини, L_{abs}^* – це сума потоків довгохвильової радіації від тривимірного середовища, що поглинається організмом еталонної людини, ϵ_p – коефіцієнт довгохвильового випромінювання, σ – стала Стефана-Больцмана.

На думку N. Contor та J. Unger [5] усі існуючі методи розрахунку $T_{c.p.}$ можуть бути класифіковані на дві групи: I група методів – методи, що ґрунтуються на вимірюванні усіх потоків випромінювання в середовищі для якого розраховується $T_{c.p.}$ та II група – методи, що ґрунтуються на моделюванні радіаційного середовища з використанням комп'ютерів та відповідного програмного забезпечення (RayMan, Envi-Met та SOLWEIG). Крім того, варто відмітити, що такі моделі як RayMan та Envi-Met, дають можливість не лише змоделювати значення $T_{c.p.}$, а також відразу отримати значення деяких біокліматичних індексів, включно з ФЕТ.

Для розрахунку біокліматичних індексів, що можуть використовуватися для оцінки комфортності урбанізованого середовища, та подальшого їх порівняльного аналізу, в даній роботі були використані дані спостережень на метеорологічній станції Київ о 12:00 год за 1 червня – 31 серпня 2005–2014 рр. Була розрахована ЕЕТ (за формулою А. Міссенарда), НЕЕТ (за формулою І. В. Бутьєвої), РЕЕТ (за формулою І. В. Бутьєвої), БАТ та ФЕТ. Для моделювання останньої – була використана модель RayMan (версія 2.0).

В біокліматології для оцінки впливу клімату на людський організм інколи можуть використовуватися усереднені значення біокліматичного індексу. Проте, оскільки різні біокліматичні індекси мають різні одиниці вимірювання, різну кількість

градацій для визначення комфортності/дискомфортності середовища та інші відмінності, то лише числове вираження біокліматичного індексу не завжди є показовим і тим більше числові значення різних БІ не можуть порівнюватися між собою. Найчастіше отримані значення БІ за якийсь період відносять до певної градації (наприклад, комфортної погоди, погоди з тепловим стресом, тощо) і розраховують повторюваність днів, що належать до цієї градації за обраний часовий відрізок. Нами для порівняння обраних БІ в даній роботі був використаний саме такий підхід. Як вже згадувалося вище, різні індекси мають різну кількість градацій, проте, для порівняння, отримані нами значення кожного БІ ділилися лише на три градації – комфортна погода, усі значення індексу, які вище – належали до теплового стресу (без розподілу на слабкий тепловий стрес, сильний і т.д.), а всі значення, що нижче комфортної погоди належали до градації «холодового стресу».

Як свідчать отримані результати, за індексом ЕЕТ спостерігаються досить значні розбіжності з індексом ФЕТ (що був взятий у якості еталонного). Якщо аналізувати значення ЕЕТ та ФЕТ за кожен день, то простежується закономірність – в більшості випадків, в дні, коли за ЕЕТ фіксується холодний стрес, за ФЕТ – комфортна погода, в дні коли за ЕЕТ – комфорт, за ФЕТ – вже тепловий стрес. В окремі дні навіть за ЕЕТ відмічався холодний стрес, а за ФЕТ – вже тепловий. Слід зазначити, що за ЕЕТ спостерігається значно більше днів з холодним стресом, ніж за ФЕТ, а за тепловим стресом – навпаки.

Неспівпадіння повторюваності комфортної погоди в окремі місяці за цими двома БІ становить до 37 %, а середнє значення – 15,0 %. Що є закономірним, адже, еквівалентно-ефективна температура використовується для оцінки тепловідчуття напіводягнутої людини. Недосконалість ЕЕТ, як біокліматичного індексу підтверджується й результатами біокліматичних досліджень інших вчених. Наприклад, за даними Андрєєва С.С. [1], за коефіцієнтом інформативності (КІНФ), який може бути оцінений від 2 до 5 балів (де 5 – це найбільш інформативний показник, а 2 відповідно – найменш), еквівалентно-ефективна температура оцінюється в 3 бали.

Коефіцієнт інформативності НЕЕТ також є низьким і теж становить 3 бали [1]. Як і в випадку з ЕЕТ, за нормально-еквівалентно-ефективною температурою повторюваність днів з комфортною погодою, тепловим та холодним стресом за досліджуваний період суттєво відрізняється від аналогічних за ФЕТ (табл. 1). Неспівпадіння повторюваності комфортної погоди в окремі місяці за цими двома БІ становить до 51 %, а середнє значення – 25,0 %. Крім того, варто відмітити, що в усі місяці (за виключенням червня 2009 р.) повторюваність днів з комфортною погодою вища за НЕЕТ, ніж за ФЕТ – тобто, ті дні, що за ФЕТ належать до днів з тепловим чи холодним стресом за НЕЕТ класифікуються як комфортні. Повторюваність днів з тепловим стресом була вищою за ФЕТ (що є закономірним, адже, в НЕЕТ не враховується нагрівання людського тіла за рахунок надходження сонячної радіації, що є важливим чинником для формування теплового балансу людського тіла в теплий період року), різниця повторюваності днів з тепловим стресом за даними БІ в середньому становила понад 30 %, а в окремі місяці сягала 50 %.

Результати розрахунків повторюваності днів з холодним стресом за БАТ суттєво відрізняються не лише від ФЕТ, але й від розглянутих раніше БІ – за БАТ за досліджувані 10 років календарного літа в Києві не було зафіксовано жодного дня з холодним стресом. Відмінності в повторюваності комфортної погоди за БАТ та ФЕТ в середньому становлять 13,4 %, проте, в окремі місяці сягають понад 35 %.

Таблиця 1 Повторюваність (%) комфортної погоди, холодового та теплового стресу протягом календарного літа 2005-2014 рр. в м. Києві за різними БІ

Рік	БІ	Червень			Липень			Серпень		
		Хол. стрес	комф	Тепл. стрес	Хол. стрес	комф	Тепл. стрес	Хол. стрес	комф	Тепл. стрес
2005	НЕЕТ	46,7	46,7	6,7	0,0	48,4	51,6	3,2	64,5	32,3
	БАТ	0,00	10,00	90,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
	РЕЕТ	10,0	43,3	46,7	0,0	3,2	96,8	0,0	9,7	90,3
	ФЕТ	20,0	33,3	46,7	0,0	3,2	96,8	0,0	12,9	87,1
2006	НЕЕТ	43,3	30,0	26,7	12,9	35,5	51,6	9,7	51,6	38,7
	БАТ	0,00	20,00	80,00	0,00	0,00	100,00	0,00	6,45	93,55
	РЕЕТ	20,0	29,0	51,0	3,2	9,7	87,1	9,7	9,7	80,6
	ФЕТ	23,3	26,7	50,0	6,5	22,6	71,0	9,7	12,9	77,4
2007	НЕЕТ	13,3	53,3	33,3	12,9	25,8	61,3	6,5	38,7	54,8
	БАТ	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
	РЕЕТ	6,7	16,7	76,7	0,0	19,4	80,6	0,0	19,4	80,6
	ФЕТ	10,0	13,3	76,7	6,5	16,1	77,4	0,0	19,4	80,6
2008	НЕЕТ	6,7	70,0	23,3	3,2	61,3	35,5	12,9	29,0	58,1
	БАТ	0,00	0,00	100,00	0,00	3,23	96,77	0,00	6,45	93,55
	РЕЕТ	0,0	30,0	70,0	3,2	16,1	80,6	6,5	9,7	83,9
	ФЕТ	0,0	26,7	73,3	3,2	19,4	77,4	9,7	12,9	77,4
2009	НЕЕТ	26,7	16,7	56,7	3,2	58,1	38,7	3,2	64,5	32,3
	БАТ	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	3,23	96,77
	РЕЕТ	3,2	23,3	73,4	0,0	12,9	87,1	3,2	22,6	74,2
	ФЕТ	10,0	16,7	73,3	0,0	16,1	83,9	3,2	38,7	58,1
2010	НЕЕТ	3,3	41,9	54,7	3,2	12,9	83,9	6,5	25,8	67,7
	БАТ	0,00	0,00	100,00	0,00	3,23	96,77	0,00	3,23	96,77
	РЕЕТ	0,0	3,3	96,7	3,2	0,0	96,8	3,2	6,5	90,3
	ФЕТ	0,0	10,0	90,0	3,2	0,0	96,8	6,5	9,7	83,9
2011	НЕЕТ	16,7	30,0	53,3	3,2	35,5	61,3	9,7	61,3	29,0
	БАТ	0,00	6,67	93,33	0,00	0,00	100,00	0,00	3,23	96,77
	РЕЕТ	6,7	13,3	80,0	0,0	16,1	83,9	3,2	16,1	80,6
	ФЕТ	6,7	13,3	80,0	0,0	16,1	83,9	6,5	22,6	71,0
2012	НЕЕТ	13,3	40,0	46,7	0,0	38,7	61,3	25,8	35,5	38,7
	БАТ	0,00	3,33	96,67	0,00	0,00	100,00	0,00	9,68	90,32
	РЕЕТ	6,7	30,0	63,3	0,0	6,5	93,5	9,7	19,4	71,0
	ФЕТ	13,3	20,0	66,7	0,0	9,7	90,3	12,9	19,4	67,7
2013	НЕЕТ	0,0	40,0	60,0	6,5	54,8	38,7	19,4	29,0	51,6
	БАТ	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	9,68	90,32
	РЕЕТ	0,0	3,3	96,7	3,2	9,7	87,1	9,7	16,1	74,2
	ФЕТ	0,0	6,7	93,3	6,5	12,9	80,6	12,9	12,9	74,2
2014	НЕЕТ	33,3	56,7	10,0	0,0	29,0	71,0	16,1	25,8	58,1
	БАТ	0,00	6,67	93,33	0,00	0,00	100,00	0,00	3,23	96,77
	РЕЕТ	6,7	46,7	46,7	0,0	0,0	100,0	3,2	19,4	77,4
	ФЕТ	16,7	36,7	46,7	0,0	3,2	96,8	9,7	16,1	74,2

За біологічно-активною температурою протягом досліджуваного періоду в половині досліджуваних місяців кожен день був з тепловим стресом, а в решті місяців повторюваність днів з тепловим стресом сягала 80 % і вище. Проаналізувавши результати розрахунків за БАТ можна зробити висновок, що за цим Бі результати біокліматичної оцінки зміщені в бік теплового стресу. Варто відмітити, що БАТ, як і два попередніх Бі, також характеризується низьким коефіцієнтом інформативності – 3 [1].

Радіаційно-еквівалентна температура за коефіцієнтом інформативності оцінюється 5 балами (максимальна оцінками за цим показником) і як вже зазначалося вище, серед ефективних температур це єдиний індекс, що враховує вплив сонячної радіації на людський організм. Відмінності повторюваності комфортної погоди в різні літні місяці між РЕЕТ та ФЕТ є значно нижчими, ніж для вищерозглянутих Бі і в середньому за досліджуваний період становили – 4,3 %. Причому для 22 з 30 розглянутих місяців різниця не перевищувала 3,3 %, проте, кілька разів відхилення сягали 10 % і навіть 16,1 %. Повторюваність днів з тепловим стресом є вищою за ФЕТ, хоча ці відмінності є незначними – в середньому 3,2 %, в більшості місяців перевищення становлять всього кілька відсотків та мають різний знак, проте, двічі за досліджуваний період зафіксовані різниці близько 16 %. Для половини з досліджуваних місяців повторюваність днів з холодним стресом повністю співпадає, максимальне відхилення, що становило 10 %, спостерігалось двічі.

Те, що оцінки біоклімату, отримані за РЕЕТ є значно точнішими, порівняно з тими, що отримані з використанням БАТ, які розраховані за тими ж вихідними даними свідчить, що при розробці даного Бі поправочні коефіцієнти, що використовуються у формулі були підібрані більш точно або градації для визначення теплового впливу середовища на людину визначалися більш ретельно і об'єктивніше відображають її тепловідчуття. А наявність невеликих відмінностей в оцінках впливу навколишнього середовища на тепловідчуття людини в окремі дні за РЕЕТ, порівняно з ФЕТ, може бути спричинена, неврахуванням інформації про радіаційні особливості середовища, що виражається середньою радіаційною температурою і враховується при розрахунках ФЕТ.

Хмарність є одним з важливих метеорологічних параметрів, що впливає на надходження сонячної радіації до людського тіла, на формування радіаційного середовища навколо людини та її тепловідчуття. Розрахований коефіцієнт кореляції між кількістю хмар та значенням РЕЕТ за досліджуваний період є статистично значимим за критерієм Фішера при рівні значимості $p=0,005$ (кореляція проводилася для вибірки з 920 значень) і становить $-0,49$, що вказує на наявність оберненого зв'язку між даним метеорологічним параметром та Бі, який реалізується, очевид, через температуру та вологість повітря (які враховуються при розрахунку ФЕТ та значення яких залежать від хмарності). З рис. 1 чітко видно, що в дні з високою хмарністю майже завжди відбувається зниження значень обох Бі. Крім того, як видно з даного графіку, за однакових умов середовища, для ФЕТ характерна більша мінливість (діапазон значень), ніж для РЕЕТ.

На рис. 2 представлено діапазони коливань досліджуваних Бі за 2005–2014 рр. для Києва. Як видно з рис. 2 для ФЕТ протягом усього досліджуваного періоду властива більша мінливість значень – $35,5^{\circ}\text{C}$, а отже і інформативна значимість. В той час як діапазон коливань БАТ майже вдвічі менший – $18,6^{\circ}\text{C}$, для РЕЕТ та НЕЕТ він становить $24,2$ та $23,3^{\circ}\text{C}$ – відповідно.

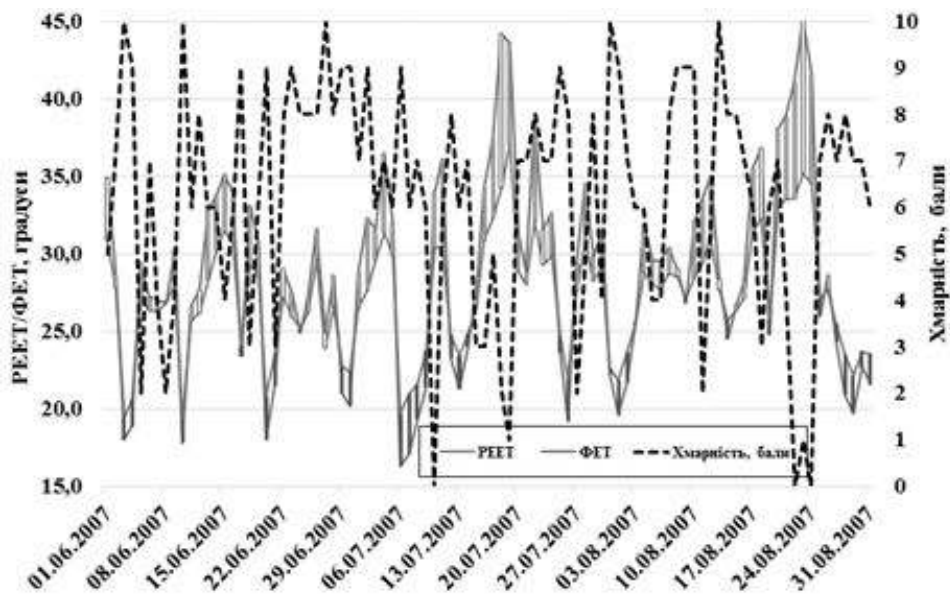


Рис. 1. Графік ходу значень ФЕТ, РЕЕТ та хмарності за 1 червня–31 серпня 2007 р.

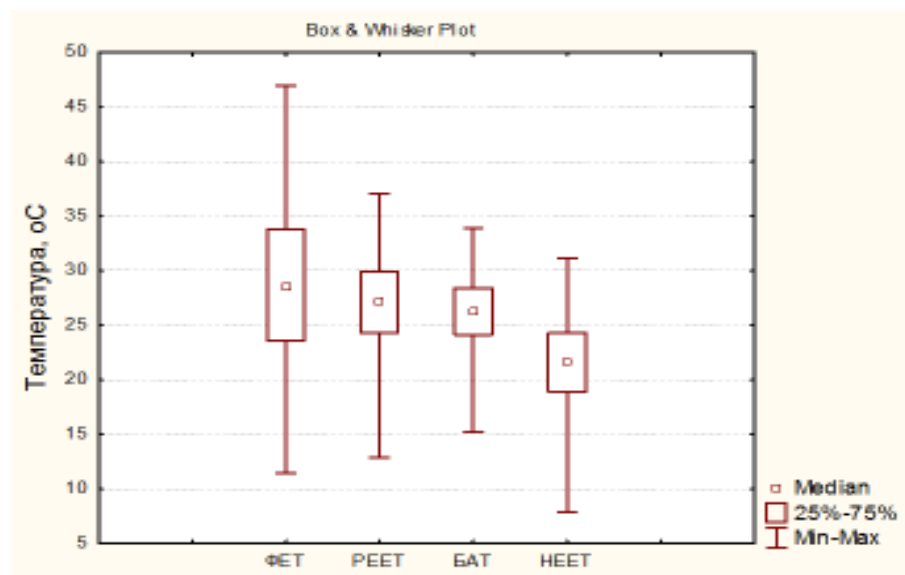


Рис. 2. Медіанні значення та діапазони коливань НЕЕТ, БАТ, РЕЕТ та ФЕТ за 1.06.2005 – 31.08.2014 рр. для м. Києва

Висновки. Проведений порівняльний аналіз біокліматичних індексів ЕЕТ, НЕЕТ, РЕЕТ, БАТ та ФЕТ, свідчить про суттєві переваги останнього. Адже, по-перше, при його розрахунках враховується повне рівняння теплового балансу людини і всі групи параметрів, що впливають на тепловідчуття людини, по-друге, врахування метеорологічних чинників, включає врахування сонячної радіації, що надходить до тіла людини, а також середньої радіаційної температури, по-третє, для ФЕТ властива більша мінливість значень, а отже і інформативна значимість, порівняно з іншими розглянутими Бі. Незважаючи на простоту розрахунків ЕЕТ, НЕЕТ та БАТ – ці індекси краще не застосовувати для оцінки біоклімату в теплий період – результати розрахунків свідчать про значні відхилення оцінок біоклімату здійснених

Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2016. – Т.3(42)

з їх використанням, від оцінок здійснених за ФЕТ. Результати оцінки біоклімату, отримані з використанням індексу РЕЕТ є ближчими до результатів отриманих за ФЕТ. Проте, зважаючи на те, що в ЕЕТ, НЕЕТ, РЕЕТ та БАТ не враховується середня радіаційна температура, що є дуже важливою для оцінки тепловідчуття людини в літній період в складному урбанізованому середовищі, дані Бі не можуть використовуватися для його біокліматичної оцінки.

Список літератури

1. Андреев С.С. Климатический ресурс и комфортность территории Южного Федерального округа России. / С.С. Андреев // Автореферат на соискание ученой степени доктора наук. – СПб, 2010. – 37 с. 2. Врублевська О.О. Прикладна кліматологія: Конспект лекцій / О.О. Врублевська, Г.П. Катеруша. – Дніпропетровськ: Економіка, 2005. – 131 с. 3. Головина Е.Г. Некоторые вопросы биометорологии: учебное пособие / Е.Г. Головина, В.И. Русанов. – СПб.: изд. РГГМИ, 1993. – 90 с. 4. Ткачук С. В. Обзор индексов степени комфортности погодных условий и их связь с показателями смертности / С.В. Ткачук // Труды Гидрометцентра России, 2012. – Вып. 347. – 194–214 с. 5. Contor N. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment – the mean radiant temperature / N. Contor, J. Unger // Central European Journal of Geosciences. – 2011. – 3 (1). – P. 90–100. 6. Hoppe P. A new method to determine the mean radiant temperature outdoors / P. Hoppe // Wetter und Leben. – 1992. – v. 44. – no.1–3. – P. 147–151. 7. Hoppe P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment / P. Hoppe // International Journal of Biometeorology. – May 1999. – V. 43. – P. 71–75. 8. Lee H. Modification of Human-Biometeorologically Significant Radiant Flux Densities by Shading as Local Method to Mitigate Heat Stress in Summer within Urban Street Canyons / H. Lee, J. Holst, H. Mayer // Advances in meteorology. – 2013. – <http://dx.doi.org/10.1155/2013/312572>.

Порівняльний аналіз біокліматичних індексів для оцінки комфортності урбанізованого середовища в теплий період

Шевченко О.Г.

В статті розглянуто основні підходи до оцінки біоклімату територій з використанням біокліматичних індексів. Проаналізовано переваги та недоліки біокліматичних індексів, що найчастіше використовуються на території України. Здійснено порівняльний аналіз цих індексів з фізіологічно-еквівалентною температурою та проаналізовано можливість їх використання для біокліматичної оцінки урбанізованого середовища в теплий період.

Ключові слова: біокліматичні індекси, урбанізоване середовище, біоклімат, тепловий комфорт.

Сравнительный анализ биоклиматических индексов для оценки комфортности урбанизированной среды в теплый период

Шевченко О.Г.

В статье рассмотрены основные подходы к оценке биоклимата территорий с использованием биоклиматических индексов. Проанализированы преимущества и недостатки биоклиматических индексов, которые чаще всего используются на территории Украины. Выполнен сравнительный анализ этих индексов с физиологически-эквивалентной температурой и проанализировано возможность их использования для биоклиматической оценки урбанизированной среды в теплый период.

Ключевые слова: биоклиматические индексы, урбанизированная среда, биоклимат, тепловой комфорт.

Comparative analysis of bioclimatic indices for estimation of comfort in urban areas in warm period

Shevchenko O. G.

The article describes the main approaches to the evaluation of areas bioclimate using bioclimatic indices. It analyzes the advantages and disadvantages of bioclimatic indices which are the most common in Ukraine. The article shows the results of comparative analysis of these indices with physiological equivalent temperature (PET) and analyzes the possibility of their use for the bioclimatic assessment of the urban environment in the warm period. This analysis indicates the significant advantages of the

Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2016. – Т.3(42)

physiologically equivalent temperature. Because, firstly, in its calculations the full equation of human energy balance and all parameters affecting on the human comfort are taken into account. Secondly, consideration of meteorological factors include consideration of solar radiation which arrives to the human body and mean radiant temperature. Thirdly, PET has more variability of values and hence the higher information importance compared to other considered bioclimatic indices. Despite the simplicity of the calculations of the effective temperature and biologically active temperature it is better not to apply them for the evaluation of bioclimate in a warm period - because the calculation results show significant deviations of bioclimate estimates made by using them (except radiation-equivalent-effective temperature) from the estimates which were made with the help of PET. Additionally, the calculation of these indices does not include mean radiant temperature, which is important for assessment of human comfort during the summer in the complex urban environment, so this bioclimatic indices cannot be used for its bioclimatic assessment.

Keywords: *bioclimatic indices, urban areas, bioclimate, thermal comfort.*

Надійшла до редколегії 10.10.2016