

pressure (November), and also between daily amount precipitation and snow (March), daily rainfall and wind speed (average, maximum), and pressure at sea level (November).

During the months of the cold period of the year, statistically significant connections between the air temperature (average, maximum) and pressure at sea level (November), wind speed (average, maximum) and average humidity (January, December), pressure on sea levels and average relative humidity (March). Also, there were isolated cases of statistically significant correlation between snow and sea level pressure (December).

The most frequently statistically significant connections between meteorological values at the dates of deposition of ice on the wires of a standard icing machine were observed at stations in the central, northeastern, eastern and separate southern regions.

Keywords: ice deposits, meteorological parameters, statistically significant correlation relations, correlation coefficient, months of the cold period of the year.

Надійшла до редколегії 17.07.2019

УДК 551.584.5

Матвієнко М. О.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

МОДЕЛЬ ENVI-Met – ЯК ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ СУЧАСНИХ УРБОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ключові слова: мікроклімат великого міста, урбометеорологічні дослідження, імітаційні моделі, модель «ENVI-met».

Вступ. Складна міська морфологія суттєво впливає на мікроклімат і на тепловий комфорт людини. Такі характеристики, як висота будинків, орієнтація та ширина вулиці, змінюють радіаційний і тепловий баланс міста, трансформують швидкість і напрямок вітру. Заміна природних поверхонь штучними сприяє швидкому стоку опадів і є однією з причин відмінностей вологості у місті. Міські центри за рахунок заасфальтованих та бетонних поверхонь часто характеризуються підвищеною температурою повітря, особливо це простежується у літній період, коли спостерігається підвищена інтенсивність острова тепла. Інформація про особливості мікроклімату та його залежності від параметрів забудови є важливою не тільки для урбометеорологів, але й для архітекторів, інженерів та спеціалістів з містобудування.

Традиційно для дослідження мікроклімату міста застосовували метод спостереження та статистичний метод [42]. Проте, такі методи не можуть залишатися основними для сучасних урбометеорологічних досліджень. Оскільки взаємодія між містобудівним плануванням відповідною архітектурою та погодою дуже складна, їхній сукупний вплив на мікроклімат можна передбачити лише за допомогою чисельних підходів моделювання. Основна перевага таких підходів, порівняно з методом спостереження, полягає у можливості проводити моделювання мікроклімату урбанізованого середовища за різних умов (погоди, забудови, рослинності, водних об'єктів тощо). Крім того, ще однією перевагою є те, що вимірювання, як правило, виконується в обмеженій кількості точок у просторі, а чисельне моделювання може надати інформацію про будь-яку досліджувану змінну у всій змодельованій області.

Хоча мікроклімат великого міста – є найвідомішим напрямком сучасної урбометеорології, проте на сьогоднішній день в її складі виділяють також три інших – біоклімат великого міста, забруднення атмосферного повітря і вразливість та адаптація міст до зміни клімату [3]. Сучасні програмні продукти дають можливість здійснювати наукові дослідження та вирішувати низку практичних задач, що

пов'язані з одним із цих напрямків, а деякі моделі (наприклад, тривимірна модель мікроклімату «ENVI-met») можуть застосовуватися для дослідження мікрокліматичних умов, моделювання тепловідчуття людини в урбанізованому середовищі, визначення ефективності заходів з адаптації міст до прояву зміни клімату та моделювання рівня забруднення атмосферного повітря в містах.

Матеріали та методи досліджень. Для виконання цього дослідження було вивчено наукові роботи в яких використовувалося програмне забезпечення ENVI-met, та проаналізовано основні переваги та недоліки моделі. Розглянуто оцінки ефективності моделі ENVI-met для моделювання мікрокліматичних умов, теплового навантаження на організм людини, забруднення повітря урбанізованого середовища.

Виклад основного матеріалу.Серед чисельних підходів моделювання, що застосовуються в урбометеорології, все більша увагу приділяють моделям обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics (CFD) – англ.). Враховуючи прогрес у розвитку обчислювальних моделей, використання CFD стає більш популярним підходом у дослідженнях. Моделі стають все більш досконалими з точки зору роздільної здатності та підходів моделювання турбулентності [47].

Для моделювання атмосферних процесів, що спостерігаються в приземному шарі урбанізованого середовища програмне забезпечення для моделювання повинно відповідати наступним вимогам [25]:

- Модель має бути мікромасштабною, тобто мати розмір сітки ≤ 10 м;
- Модель повинна реалізовувати енергетичний баланс поверхонь усіх типів;
- Модель повинна імітувати фізичні та фізіологічні властивості рослин;
- Розрахунок атмосферних процесів повинен бути прогностичним.

Сьогодні існує багато різних моделей для дослідження мікроклімату, більшість з яких зосереджуються лише на одному аспекті моделювання, а отже, є не дуже зручними у використанні. Деякі моделі, такі як MISCAM [13-14] або MUKLIMO 3 [21], зосереджені головним чином на полі вітру та розподілу газів та аерозолів в атмосфері, проте в них не враховуються термодинамічні ефекти. Інші ж моделі, такі як Solweig [32-33], Rayman [35] чи ANSYS Fluent [19] розроблені для розрахунку потоків випромінювання в міському середовищі та для моделювання взаємодії рослин з мікрокліматом [25]. До сучасних інструментів, здатних імітувати зовнішнє середовище (так званих імітаційних моделей) належать: IES-VE, Design Builder, STAR-CCM+, OpenFOAM, SkyHelios, Urbclim, COSMO-CLM та ін. [5, 7, 23, 44].

Однією з небагатьох моделей мікромасштабу, яка відповідає всім вище зазначеним критеріям, є тривимірна модель мікроклімату ENVI-met [8]. Модель ENVI-met є одним з найбільш поширеним інструментом чисельного моделювання в цьому напрямку.

ENVI-met є прогностичною тривимірною моделлю клімату, розроблена Майклом Брюсом у Рурському університеті в Бохумі (Німеччина). Перший офіційний випуск моделі датується 1998-м, і до 2017 року понад 1900 зареєстрованих користувачів по всьому світу використовують її для дослідження мікроклімату. Більше того, протягом останніх п'яти років було опубліковано 77% із загальної кількості досліджень присвячених міському клімату, в яких використовували модель ENVI-met [53]. На сьогоднішній день реалізовано вже понад 4000 моделювань для більш як 145 країн світу.

Основною перевагою ENVI-met є те, що це одна з перших моделей, що повністю відтворює процеси взаємодії між атмосферою, ґрунтом, рослинністю і будівлями. В моделі враховуються особливості міської структури, тобто будівлі різної форми і висоти, дизайну, з різним кольором фасаду та іншими

особливостями. Рослинність враховується не лише в якості пористої перешкоди для вітрової і сонячної радіації, але і в тому числі враховуються фізіологічні процеси евапотранспірації і фотосинтезу. Можуть бути використані різні типи рослинності з певними властивостями. Ґрунт також може бути різних типів. Модель ENVI-met характеризується високою роздільною здатністю та горизонтальним кроком сітки від 0,5 до 5м та часовим кроком від 1 до 5 секунд. Максимальний період моделювання – 48 годин. У програмі передбачені модулі робочих зон з максимальним розміром сітки 200×200×30, тому площа дослідження може бути розрахована приблизно до 2000×2000 м.

ENVI-met – це прогностична модель, заснована на фундаментальних законах гідродинаміки та термодинаміки. Розрахункова модель включає в себе:

- Короткохвильове і довгохвильове випромінювання (з урахуванням затінення, відбивання від будинків та рослинності);
- Транспірація, випаровування і потік тепла від рослини в повітря, включаючи повне моделювання всіх фізичних параметрів рослин (наприклад, фотосинтез);
- Температура поверхонь стін і температура для кожної точки сітки і стіни;
- Вода і теплообмін усередині ґрунту;
- Розрахунок біометеорологічних параметрів, (середньої радіаційної температури, фізіологічно-еквівалентної температури та ін.);
- Розповсюдження різних газів і частинок, в тому числі осідання частинок на поверхнях [25].

Для моделювання в «ENVI-met» необхідно використовувати два набори вхідних даних: IN-файл (вхідний файл) і CF-файл (основний файл конфігурації). IN-файл містить інформацію про просторові властивості області, такі як географічне положення, матеріали, з яких складені будинки, висота будівель і типи рослинності.

CF-файл містить вхідні метеорологічні дані – температуру та вологість повітря, швидкість вітру, а також дату і час їх вимірювання.

Модель ENVI-met складається з чотирьох основних суб-моделей: ґрунт, модель вегетації (1D/3D), 3D модель атмосфери та 1D гранична модель (рис. 1).

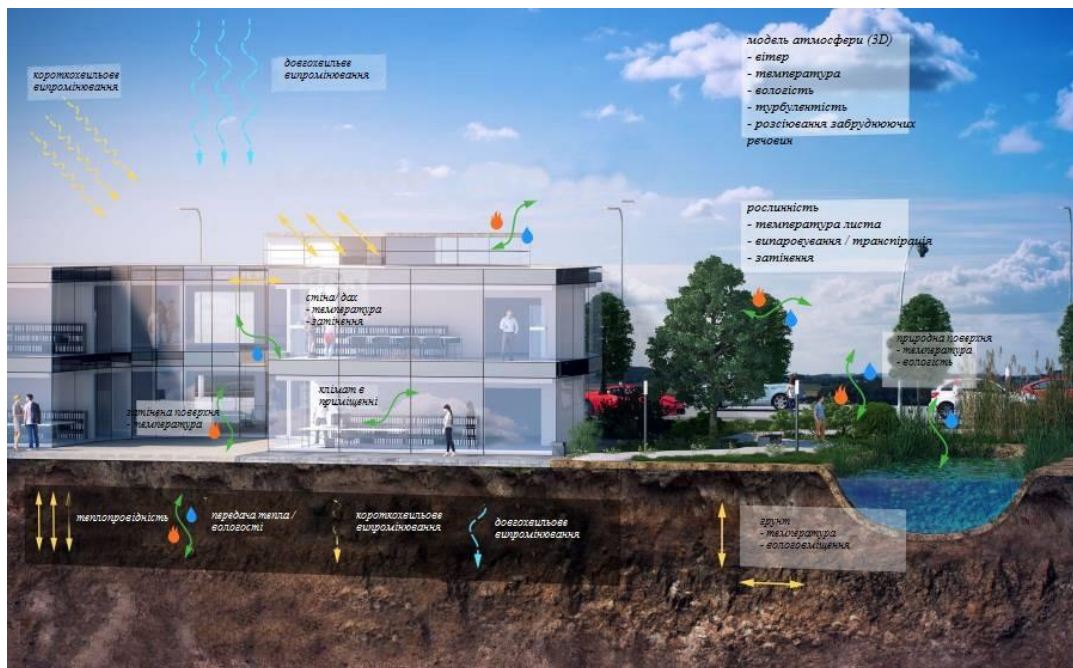


Рис.1. Структура моделі ENVI-met [15].

Ґрунт в моделі представлений від поверхні до глибини 2 м, та ділиться на 14 шарів з вертикальними відстанями від 1 см - біля поверхні, до 50 см у глибоких шарах. Різні ґрунтові профілі та ділянки поверхонь можна змодельовати шляхом виділення різних природних ґрунтів чи штучних матеріалів для кожної клітинки сітки. Для природних ґрунтів враховуються передачі тепла та водяної пари, тоді як для теплоізоляційних матеріалів - лише передача тепла. Температура поверхні ґрунту обчислюється від радіаційного випромінювання, турбулентних потоків тепла і пари та теплопровідності в ґрунті. Альbedo природного ґрунту визначається самою моделлю як функція кута падіння сонячної енергії та вмісту води верхнього ґрунтового шару [56]. 3D модель атмосфери, забезпечує моделювання температури та вологості повітря, потоку вітру та турбулентності, розрахунок надходження потоків коротко- та довгохвильового випромінювання, а також дисперсію та осадження забруднюючих речовин.

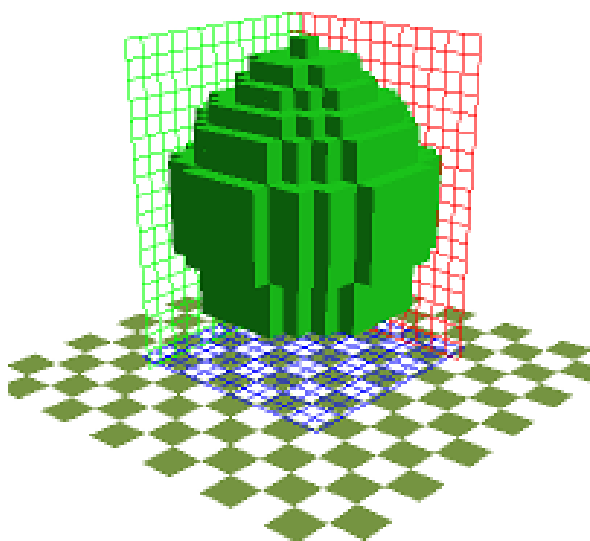


Рис. 2. Модель дерева в ENVI-met [15].

Модель вегетації 3D дає змогу описати різні дерева з різноманітними формами та просторовим розподілом листя. Кожна клітина вегетаційної комірки (рис. 2) має власний розрахунок енергетичного балансу поверхні листя, евапотранспірації та фотосинтезу. Для розрахунку затінення рослинність розглядають як каламутне середовище, а коефіцієнт ослаблення - функція оптичного шляху сонячного променя через щільність площі листя (leaf area density (LAD) – англ.). Часові та просторові зміни швидкості і напрямку вітру розраховується з використанням тривимірних негідростатичних рівнянь Нав'є-Стокса.

1D гранична модель в основному використовується для ініціалізації моделі і для визначення граничних умов тривимірної моделі атмосфери. Вона охоплює простір від рівня земної поверхні ($z = 0$) до висоти $H = 2500$ м над рівнем поверхні. Модель енергетичного балансу стін і дахів основана на множинно-вузловій перехідній моделі запропонованій Terjung [52]. Більш детальна інформація про модель, її структуру та фізичне підґрунтя, що регулює роботу різних суб-моделей наведено в роботах [8, 25].

До основних обмежень ENVI-met належить те, що модель не може моделювати ні опади, ні температури нижче 0°C . Також існує обмеження щодо визначення початкових граничних умов в ході моделювання, тобто швидкість та напрямок вітру, а також хмарність залишаються постійними, що впливатиме на репрезентативність результатів моделі при порівнянні їх з вимірними даними.

Модель широко застосовується для вирішення наукових та практичних задач в країнах з різноманітним кліматом – від тропіків до полярних регіонів (Єгипет [18], Шрі-Ланка [17], Бразилія [10], Малазія [22], США [50], Канада [56], Англія [45], Італія [39], Німеччина [27], Нідерланди [49], Японія [48], Китай [51], Австралія [9], Україна [1-2]). У більшості існуючих досліджень модель застосовується не лише для дослідження мікрокліматичних умов, але і для моделювання тепловідчуття людини в урбанізованому середовищі [6, 31, 58]. Також модель ENVI-met широко застосовують для визначення оптимальних заходів з адаптації міст до прояву зміни клімату та розрахунку їх ефективності. Наприклад, D. Duarte та ін. використовуючи

модель оцінили охолоджуючу дію рослинного покриву на міський клімат Сан-Паулу (Бразилія) [12]. Н. Lee та співавторами [31] було змодельовано чотири сценарії, як різні типи рослинності впливають на мікроклімат житлового району у Фрайбурзі (Німеччина). Схоже дослідження було зроблено і для міста Ханья (Греція) [53]. Т. Martins та співавтори [34] за допомогою моделі проаналізували та порівняли різні стратегії пом'якшення острову тепла в Тулузі (Франція). Їх результати вказували на великий вплив водних та зелених зон на пом'якшення міських островів тепла, особливо в денний час. С. Skelhorn та співавт. [45] виявили, що збільшення площі рослинності на 5% у Манчестері (Великобританія) може призвести зниження середньої температури підстильних поверхонь приблизно на 1°C. А. Ghaffarianhoseini та співавтори [22] оцінювали в Куала-Лумпурі (Малайзія) зміну теплового комфорту на відкритому повітрі, змінюючи орієнтацію, висоту, альбедо стін та наявність рослинності в підвір'ях. С. Ketterer та А. Matzarakis [27] дослідивши різні орієнтації та співвідношення сторін міських каньйонів (для кварталів Штутгарта, Німеччина) з'ясували, що теплове навантаження може бути зменшене у каньйоні з орієнтацією на Північ-Південний Схід у поєднанні зі співвідношенням сторін не менше 1,5.

Паралельно в інших наукових дослідженнях використовується модель ENVI-met для моделювання рівня забруднення атмосферного повітря урбанізованого середовища [40, 55, 57].

Оскільки обов'язковим кроком у розробці моделей та подальшому використанню є її апробація, то одним з таких способів є порівняння результатів моделювання з вимірними даними, шляхом використання статистичних параметрів. Досить часто використовують коефіцієнт детермінації (R^2) та середньоквадратичне відхилення або середньоквадратична помилка (the Root Mean Square Error (RMSE) – англ.), яка, щоб модель вважалася надійною, повинна прагнути до таких значень: $R^2 \rightarrow 1$, $RMSE \rightarrow 0$.

В багатьох роботах вже порівняли результати отримані моделлю ENVI-met з вимірними даними. Так, наприклад, W. Chow та A. Brazel оцінили точність змодельованих даних ENVI-met із вимірними температурними рядами, використовуючи зазначені вище статистичні параметри. Автори зауважили, що навіть із завищенням максимальної та мінімальної температури, модельовані значення температури повітря показують хорошу відповідність зі вимірними даними метеостанції ($R^2 = 0,67$ та $RMSE = 0,86$) [11]. У роботі E. Krüger та співавт. [30] одним із висновків є те, що на 2 м над землею в межах каньйону змодельована швидкість вітру ENVI-met, відповідає вимірним даним для швидкості вітру заданого в моделі рівня нижче 2 м/с. E. Ng та співавтори [38] показали, що коефіцієнт детермінації (R^2) між вимірними та змодельованими значеннями температури повітря коливається від 0,63 до 0,77. Досліджуючи вплив міської форми та ландшафтного типу на мікроклімат Фенікса, штат Арізона [36] автори теж використали статистичний параметр RMSE та індекс узгодження (d - index of agreement). Індекс узгодження d, це стандартизований показник ступеня помилки прогнозування моделі, який коливається між 0 і 1 (1 вказує на ідеальну відповідність). Отже, перевірка показала хорошу узгодженість моделі ENVI-met 3.1 з вимірними даними (d коливається від 0,97 до 0,99). Більшість інших досліджень також оцінили загальну ефективність ENVI-met і підтвердили, що вона може моделювати зовнішнє теплове середовище в різних кліматичних зонах з прийнятною точністю [17, 24, 28-27, 41, 43, 46, 46]. Проте, у цих роботах були досліджені старіші версії ENVI-met (3.0 / 3.1). Починаючи з версії 4.0 модель удосконалюють, основні зміни стосуються нового 3D редактору, розрахунку температури стін, а також можливості задавати в модель добову зміну температури

та вологості повітря. Крім того, разом з попереднім 1D модулем вегетації (де рослини моделюються як вегетаційні стовпчики), нова версія реалізує новий 3D модуль вегетації для опису різноманітних форм рослин та просторового розподілу листя (рис. 3)[15].

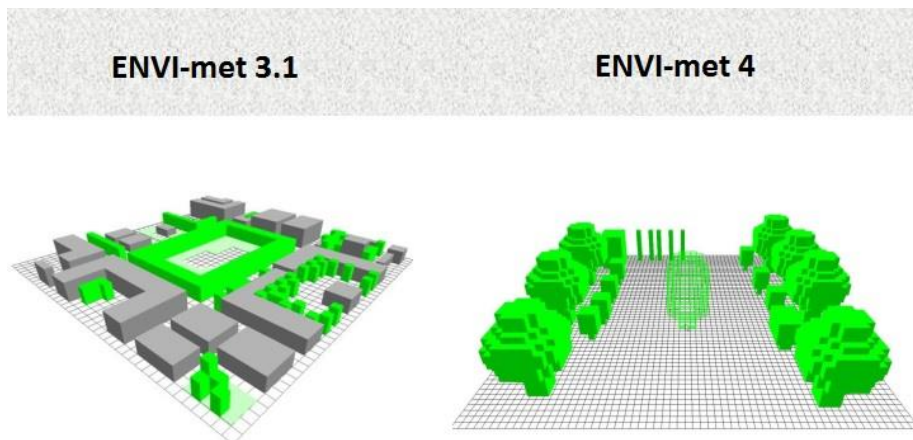


Рис. 3. Порівняння моделей вегетації різних версій ENVI-met [16].

J. Acero та K. Herranz-Pascual [4] оцінюючи модель ENVI-met версії 4 зробили висновок, що результати температури та вологості повітря показують добру відповідність між виміряними та змодельованими значеннями. Однак у випадку середньої радіаційної температури та швидкості вітру виникають певні відмінності, що підкреслюють обмеження моделі для оцінки цих метеорологічних параметрів (коефіцієнт детермінації 0,92). З іншого боку, C. Gusson та D. Duarte [24] підтвердили, що модель ENVI-met 4 показує дуже схожі результати між вимірюваними та змодельованими даними щодо температури повітря міських зон в субтропічному кліматі, із значеннями RMSE між 0,85 та 0,92. H. Lee та ін. [31] встановили наявність високої кореляції між змодельованими та виміряними значеннями ($R^2 = 0,85$). A. Forouzandeh [20] зробив висновок, що модель ENVI-met версії 4 здатна передбачити метеорологічні змінні у внутрішніх вузьких дворах з прийнятною точністю. Значення RMSE у центрі затіненого подвір'я склало 0,73 °C для температури повітря, 3,34% для відносної вологості повітря, 0,01 м / с для швидкості вітру та 8,44 ° C для середньорадіаційної температури. В наступних роботах [26, 39, 58] також показано, що модель ENVI-met версії 4 підходить для моделювання зовнішнього теплового середовища різних кліматів з високою точністю.

Висновки. Отже, у сучасних урбометеорологічних дослідженнях все більш популярним способом опису процесів, що відбуваються у міському піддаховому шарі є використання тривимірних CFD-моделей. Вони ґрунтуються на застосуванні чисельних методів для імітації взаємодії між атмосферою та міською поверхнею. Модель ENVI-met є одним з найбільш поширених інструментів чисельного моделювання, яка відтворює основні процеси взаємодії між атмосферою, ґрунтом, рослинністю і будівлями. Основною перевагою моделі є те, що вона враховує особливості міської структури, фізіологічні процеси рослинності та різні типи ґрунтів. Модель здатна імітувати мікроклімат міст різних кліматичних поясів з різноманітним кліматом (від тропіків до полярних широт) не впливаючи на точність моделювання. Модель ENVI-met може застосовуватися: для дослідження мікрокліматичних умов; для моделювання тепловідчуття людини в урбанізованому середовищі, для визначення оптимальних заходів з адаптації міст до прояву зміни клімату та

розрахунку їх ефективності; для моделювання рівня забруднення атмосферного повітря в містах. Отже, враховуючи всі особливості моделі ENVI-met, її можна рекомендувати, як сучасний інструмент для вирішення низки урбометеорологічних завдань.

Список літератури

- 1. Матвієнко М.О., Шевченко О.Г.** Біоклімат великого міста в літній період (на прикладі житлового масиву Теремки-2 у м. Києві). 36. «Молоді науковці – географічній науці» В. XIV. Київ, 2018. С. 40.
- 2. Матвієнко М.О., Шевченко О.Г., Сніжко С.І.** Можливості моделювання мікроклімату урбанізованого середовища з використанням програми «ENVI-met». Матеріали Міжнар. наук. конф. «Від географії до негеографічного українознавства: еволюція освітньо-наукових ідей та пошуків (до 140-річчя започаткування географії у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича)». Чернівці, 2016. С. 166.
- 3. Шевченко О.Г.** Урбометеорологія – як інтегруючий напрямок погодно-кліматичних та екологічних досліджень міст і основа міських екологічних сервісів // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2019. № 3 (54). С. 168–170.
- 4. Acero J. A., Herranz-Pascual K.** A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment*, 2015 Vol. 93 (P2), 245–257 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.028>.
- 5. Al-Hafith O., Satish B. K., Bradbury S., Wilde P. De.** Simulation of courtyard spaces in a desert climate. *Energy Procedia*, 2017 Vol. 142, 1997–2002 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.401>.
- 6. Ali-Toudert, F., & Mayer, H.** Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 2006 Vol. 41 (2), 94–108 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.01.013>.
- 7. Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J.** Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015 Vol. 144, 108–117 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.024>.
- 8. Bruse M., Fleer H.** Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 1998 Vol. 13(3–4), 373–384 pp. URL: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5).
- 9. Bruse M., Skinner C. J.** Rooftop greening and local climate: a case study in Melbourne. 1999. URL: www.EnviMet.Com/Documents/Papers/Rooftop1999.Pdf.
- 10. Carfan A. C., Galvani E., Nery J. T.** Study of thermal comfort in the city of são paulo using ENVI-met model. *Investigaciones Geograficas*, 2010 Vol. 78. 34–47 pp.
- 11. Chow W. T. L., Brazel A. J.** Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 2012 Vol. 47 (1), 170–181 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.027>.
- 12. Duarte D. H. S., Shinzato P., Gusson C. dos S., Alves, C. A.** The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 2015 Vol. 14, 224–239 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>.
- 13. Eichhorn J.** Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells: Dissertation Dr der Naturwissenschaften: 16.02.1989. M. 145 p.
- 14. Eichhorn J., Kniffka A.** The numerical flow model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010 Vol. 19 (1). 81–90 pp. URL: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0425>.
- 15. ENVI-met Model Architecture** // ENVI-met A holistic microclimate model URL: <https://www.envi-met.com>.
- 16. ENVI-met V4 Preview.** Carolina dos Santos Gusson Paula Shinzato. URL: <https://docplayer.com.br/37995271-Envi-met-v4-preview-carolina-dos-santos-gusson-paula-shinzato.html>.
- 17. Emmanuel R., Johansson E.** Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research*, 2006 Vol. 30. 189–200 pp. URL: <https://doi.org/10.3354/cr030189>.
- 18. Fahmy M., Sharples S.** On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment*, 2009 Vol. 44 (9). 1907–1916 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.010>.
- 19. Fatnassi H., Poncet C., Bazzano M. M., Brun R., Bertin N.** A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. *Solar Energy*, 2015 Vol. 120. 575–584 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.019>.
- 20. Forouzandeh A.** Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, 2018 Vol. 36. 327–345 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.025>.
- 21. Früh B., Becker P., Deutschländer T., Hessel J.-D.,**

Kossmann M., Mieskes I., Wienert U. Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011 Vol. 50 (1). 167–184 pp. URL: <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2377.1>. **22.** Ghaffarianhoseini A., Berardi U., Ghaffarianhoseini A. Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates. *Building and Environment*, 2015 Vol. 87. 154–168pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.001>. **23.** Gromke C., Blocken B., Janssen W., Merema B., van Hooff T., Timmermans H. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 2015 Vol. 83. 11–26 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.022>. **24.** Gusson C. S., Duarte D. H. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. *Procedia Engineering*, 2016 Vol. 169, 2–10 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.10.001>. **25.** Huttner S. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met: Dissertation Dr der Naturwissenschaften: 26.04.2012. M. 147 p. **26.** Jänicke B., Meier F., Hoelscher M. T., Scherer D. Evaluating the effects of façade greening on human bioclimate in a complex Urban environment. *Advances in Meteorology*, 2015. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/747259>. **27.** Ketterer C., Matzarakis A. Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2014 Vol. 122. 78–88 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.003>. **28.** Ketterer C., Matzarakis A. Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *International Journal of Biometeorology*, 2015 Vol. 59(9). 1299–1309 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0940-3>. **29.** Kong F., Sun C., Liu F., Yin H., Jiang F., Pu Y., Dronova I. Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer. *Applied Energy*, 2016 Vol. 183, 1428–1440 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.070>. **30.** Krüger E. L., Minella F. O., Rasia F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 2011 Vol. 46 (3). 621–634 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006>. **31.** Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2016 Vol. 148. 37–50 pp. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>. **32.** SOLWEIG 1D User Manual-Version 2014. URL: <http://www.mathworks.se/products/compiler/mcr/> **33.** Lindberg F., Holmer B., Thorsson S. SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 2008 Vol. 52 (7), 697–713 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>. **34.** Martins T. A. L., Adolphe L., Bonhomme M., Bonneaud F., Faraut S., Ginestet S., Guyard W. Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, 2016 Vol. 26, 9–26 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.003>. **35.** Matzarakis A., Rutz F., Matzarakis A., Rutz F., Mayer, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model Modelling radiation fluxes in simple and complex. *Int J Biometeorol*, 2007 Vol. 51, 323–334 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>. **36.** Middel A., Häb K., Brazel A. J., Martin C. A., Guhathakurta S. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 2014 Vol. 122, 16–28 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>. **37.** Nasrollahi N., Hatami M., Khastar S. R., Taleghani M. Numerical evaluation of thermal comfort in traditional courtyards to develop new microclimate design in a hot and dry climate. *Sustainable Cities and Society*, 2017 Vol. 35, 449–467 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.017>. **38.** Ng E., Chen L., Wang Y., Yuan C. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 2012 Vol. 47 (1), 256–271 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>. **39.** Noro M., Lazzarin R. Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*, 2015 Vol. 14, 187–196. URL: <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2015.04.004>. **40.** Paas B., Schneider C. A comparison of model performance between ENVI-met and Austal 2000 for particulate matter. *Atmospheric Environment*, 2016 Vol. 145. 392–404 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.031>.

41. Qaid A., Ossen D. R. Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. *International Journal of Biometeorology*, 2015 Vol. 59 (6). 657–677 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0878-5>. **42.** Rizwan, A. M., Dennis L. Y. C., Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 2009 Vol. 20 (1). 120–128 pp. URL: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4). **43.** Samaali M., Courault D., Bruse M., Olioso A., Ocelli R. Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: Validation on soybean surface radiative measurements. *Atmospheric Research*, 2007 Vol. 85 (2), 183–198 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.12.005>. **44.** Santiago J. L., Krayenhoff E. S., Martilli A. Flow simulations for simplified urban configurations with microscale distributions of surface thermal forcing. *Urban Climate*, 2014 Vol. 9, 115–133 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.07.008>. **45.** Skelhorn C., Lindley S., Levermore G. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2014 Vol. 121, 129–140 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2013.09.012>. **46.** Song B., Park K. Contribution of greening and high-albedo coatings to improvements in the thermal environment in complex urban areas. *Advances in Meteorology*, 2015. 12–21 pp. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/792172>. **47.** Souch C., Grimmond S. Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography*, 2006 Vol. 30 (2). 270–279 pp. **48.** Srivanit M., Hokao K. Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer. *Building and Environment*, 2013 Vol. 66, 158–172 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.012>. **49.** Taleghani M., Kleerekoper L., Tenpierik M., van den Dobbelsteen A. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 2015 Vol. 83. 65–78 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>. **50.** Taleghani, M., Sailor, D., & Ban-Weiss, G. A. Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood. *Environmental Research Letters*, 2016 Vol. 11 (2). URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024003>. **51.** Tan Z., Lau K. K. L., Ng E. Planning strategies for roadside tree planting and outdoor comfort enhancement in subtropical high-density urban areas. *Building and Environment*, 2017 Vol. 120, 93–109 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.017>. **52.** Terjung W. H. Urban energy balance climatology: A preliminary inversion of the city – man system in downtown Los Angeles. *Geogr. Rev.*, 1970 Vol. 60. 31–53 pp. **53.** Tsilini V., Papantoniou S., Kolokotsa D. D., Maria E. A. Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 2015 Vol. 14 (1). 323–333 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.006>. **54.** Tsoka S., Tsikaloudaki A., Theodosiou T. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 2018 Vol. 43, 55–76 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>. **55.** Vos P. E. J., Maiheu B., Vankerkom J., Janssen S. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 2013 Vol. 183, 113–122 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.021>. **56.** Wang Y., Berardi U., Akbari H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 2016 Vol. 114, 2–19 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>. **57.** Wania A., Bruse M., Blond N., Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 2012 Vol. 94(1), 91–101. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.036>. **58.** Yang X., Zhao L., Bruse M., Meng Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. *Building and Environment*, 2013 Vol. 60. 93–104 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>.

References

1. Matviienko M.O., Shevchenko O.H. Bioklimat velykoho mista v litnii period (na prykladi zhytlovoho masyvu Teremky-2 u m. Kyievi). *Zb. «Molodi naukovtsi – heohrafichnii nautsi» V. KhIV. Kyiv*, 2018. S. 40. **2.** Matviienko M.O., Shevchenko O.H., Snizhko S.I. Mozhyvosti modeliuvannia mikroklimatu urbanizovanoho seredovyshcha z vykorystanniam prohramy «ENVI-met». *Materialy Mizhnar. nauk. konf. «Vid heohrafii do neohrafichnoho ukrainoznavstva: evoliutsiia osvitho-naukovykh idei ta poshukiv (do 140-richchia zapochatkuvannia heohafii u*

Chernivetskomu natsionalnomu universyteti imeni Yuriia Fedbkovycha)». Chernivtsi, 2016. S. 166. **3.** Shevchenko O.H. Urbometeorolohiia – yak intehruichyiy napriamok pohodno-klimatychnykh ta ekolohichnykh doslidzhen mist i osnova miskykh ekolohichnykh servisiv // Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia. 2019. № 3 (54). S. 168–170. **4.** Acero J. A., Herranz-Pascual K. A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment*, 2015 Vol. 93 (P2), 245–257 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.028>. **5.** Al-Hafith O., Satish B. K., Bradbury S., Wilde P. De. Simulation of courtyard spaces in a desert climate. *Energy Procedia*, 2017 Vol. 142, 1997–2002 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.401>. **6.** Ali-Toudert, F., & Mayer, H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 2006 Vol. 41 (2), 94–108 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.01.013>. **7.** Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J. Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015 Vol. 144, 108–117 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.024>. **8.** Bruse M., Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 1998 Vol. 13(3–4), 373–384 pp. URL: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5). **9.** Bruse M., Skinner C. J. Rooftop greening and local climate: a case study in Melbourne. 1999. URL: www.EnviMet.Com/Documents/Papers/Rooftop1999.Pdf. **10.** Carfan A. C., Galvani E., Nery J. T. Study of thermal comfort in the city of são paulo using ENVI-met model. *Investigaciones Geograficas*, 2010 Vol. 78. 34–47 pp. **11.** Chow W. T. L., Brazel A. J. Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 2012 Vol. 47 (1), 170–181 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.027>. **12.** Duarte D. H. S., Shinzato P., Gusson C. dos S., Alves, C. A. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 2015 Vol. 14, 224–239 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>. **13.** Eichhorn J. Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells: Dissertation Dr der Naturwissenschaften: 16.02.1989.M. 145 p. **14.** Eichhorn J., Kniffka A. The numerical flow model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010 Vol. 19 (1). 81–90 pp. URL: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0425>. **15.** ENVI-met Model Architecture // ENVI-met A holistic microclimate model URL: <https://www.envi-met.com>. **16.** ENVI-met V4 Preview. Carolina dos Santos Gusson Paula Shinzato. URL: <https://docplayer.com.br/37995271-Envi-met-v4-preview-carolina-dos-santos-gusson-paula-shinzato.html>. **17.** Emmanuel R., Johansson E. Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research*, 2006 Vol. 30. 189–200 pp. URL: <https://doi.org/10.3354/cr030189>. **18.** Fahmy M., Sharpley S. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment*, 2009 Vol. 44 (9). 1907–1916 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.010>. **19.** Fatnassi H., Poncet C., Bazzano M. M., Brun R., Bertin N. A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. *Solar Energy*, 2015 Vol. 120. 575–584 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.019>. **20.** Forouzandeh A. Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, 2018 Vol. 36. 327–345 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.025>. **21.** Früh B., Becker P., Deutschländer T., Hessel J.-D., Kossmann M., Mieskes I., Wienert U. Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011 Vol. 50 (1). 167–184 pp. URL: <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2377.1>. **22.** Ghaffarianhoseini A., Berardi U., Ghaffarianhoseini A. Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates. *Building and Environment*, 2015 Vol. 87. 154–168pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.001>. **23.** Gromke C., Blocken B., Janssen W., Merema B., van Hooff T., Timmermans H. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 2015 Vol. 83. 11–26 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.022>. **24.** Gusson C. S., Duarte D. H. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. *Procedia Engineering*, 2016 Vol. 169, 2–10 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.03.001>. ISSN:2306-5680 **Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia. 2019. № 4 (55)**

<https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.10.001>. **25.** *Huttner S.* Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met: Dissertation Dr der Naturwissenschaften: 26.04.2012. M. 147 p. **26.** *Jänicke B., Meier F., Hoelscher M. T., Scherer D.* Evaluating the effects of façade greening on human bioclimate in a complex Urban environment. *Advances in Meteorology*, 2015. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/747259>. **27.** *Ketterer C., Matzarakis A.* Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2014 Vol. 122. 78–88 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.003>. **28.** *Ketterer C., Matzarakis A.* Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *International Journal of Biometeorology*, 2015 Vol. 59(9). 1299–1309 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0940-3>. **29.** *Kong F., Sun C., Liu F., Yin H., Jiang F., Pu Y., Dronova I.* Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer. *Applied Energy*, 2016 Vol. 183, 1428–1440 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.070>. **30.** *Krüger E. L., Minella F. O., Rasia F.* Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 2011 Vol. 46 (3). 621–634 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006>. **31.** *Lee, H., Mayer, H., & Chen, L.* Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2016 Vol. 148. 37–50 pp. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>. **32.** SOLWEIG 1D User Manual-Version 2014. URL: <http://www.mathworks.se/products/compiler/mcr/> **33.** *Lindberg F., Holmer B., Thorsson S.* SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 2008 Vol. 52 (7), 697–713 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>. **34.** *Martins T. A. L., Adolphe L., Bonhomme M., Bonneaud F., Faraut S., Ginestet S., Guyard W.* Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, 2016 Vol. 26, 9–26 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.003>. **35.** *Matzarakis A., Rutz F., Matzarakis A., Rutz F., Mayer, H.* Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model Modelling radiation fluxes in simple and complex. *Int J Biometeorol*, 2007 Vol. 51, 323–334 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>. **36.** *Middel A., Häb K., Brazel A. J., Martin C. A., Guhathakurta S.* Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 2014 Vol. 122, 16–28 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>. **37.** *Nasrollahi N., Hatami M., Khastar S. R., Taleghani M.* Numerical evaluation of thermal comfort in traditional courtyards to develop new microclimate design in a hot and dry climate. *Sustainable Cities and Society*, 2017 Vol. 35, 449–467 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.017>. **38.** *Ng E., Chen L., Wang Y., Yuan C.* A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 2012 Vol. 47 (1), 256–271 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>. **39.** *Noro M., Lazzarin R.* Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*, 2015 Vol. 14, 187–196. URL: <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2015.04.004>. **40.** *Paas B., Schneider C.* A comparison of model performance between ENVI-met and Austal 2000 for particulate matter. *Atmospheric Environment*, 2016 Vol. 145. 392–404 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.031>. **41.** *Qaid A., Ossen D. R.* Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. *International Journal of Biometeorology*, 2015 Vol. 59 (6). 657–677 pp. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0878-5>. **42.** *Rizwan, A. M., Dennis L. Y. C., Liu C.* A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 2009 Vol. 20 (1). 120–128 pp. URL: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4). **43.** *Samaali M., Courault D., Bruse M., Olioso A., Ocelli R.* Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: Validation on soybean surface radiative measurements. *Atmospheric Research*, 2007 Vol. 85 (2), 183–198 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.12.005>. **44.** *Santiago J. L., Krayenhoff E. S., Martilli A.* Flow simulations for simplified urban configurations with microscale distributions of surface thermal forcing. *Urban Climate*, 2014 Vol. 9, 115–133 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.07.008>. **45.** *Skelhorn C., Lindley S., Levermore G.* The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale

assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2014 Vol. 121, 129–140 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.LANDURBPLAN.2013.09.012>. **46.** Song B., Park K. Contribution of greening and high-albedo coatings to improvements in the thermal environment in complex urban areas. *Advances in Meteorology*, 2015. 12–21 pp. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/792172>. **47.** Souch C., Grimmond S. Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography*, 2006 Vol. 30 (2). 270–279 pp. **48.** Srivanit M., Hokao K. Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer. *Building and Environment*, 2013 Vol. 66, 158–172 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.012>. **49.** Taleghani M., Kleerekoper L., Tenpierik M., van den Dobbelsteen A. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 2015 Vol. 83. 65–78 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>. **50.** Taleghani, M., Sailor, D., & Ban-Weiss, G. A. Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood. *Environmental Research Letters*, 2016 Vol. 11 (2). URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024003>. **51.** Tan Z., Lau K. K. L., Ng E. Planning strategies for roadside tree planting and outdoor comfort enhancement in subtropical high-density urban areas. *Building and Environment*, 2017 Vol. 120, 93–109 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.017>. **52.** Terjung W. H. Urban energy balance climatology: A preliminary inversion of the city – man system in downtown Los Angeles. *Geogr. Rev.*, 1970 Vol. 60. 31–53 pp. **53.** Tsilini V., Papantoniou S., Kolokotsa D. D., Maria E. A. Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 2015 Vol. 14 (1). 323–333 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.006>. **54.** Tsoka S., Tsikaloudaki A., Theodosiou T. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 2018 Vol. 43, 55–76 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>. **55.** Vos P. E. J., Maiheu B., Vankerkom J., Janssen S. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 2013 Vol. 183, 113–122 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.021>. **56.** Wang Y., Berardi U., Akbari H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 2016 Vol. 114, 2–19 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>. **57.** Wania A., Bruse M., Blond N., Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 2012 Vol. 94(1), 91–101. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.036>. **58.** Yang X., Zhao L., Bruse M., Meng Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. *Building and Environment*, 2013 Vol. 60. 93–104 pp. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>.

Модель envi-met – як інструмент для сучасних урбометеорологічних досліджень

Матвієнко М. О.

У статті представлено опис сучасної моделі мікроклімату ENVI-met. На сьогоднішній день модель ENVI-met є одним з найбільш поширених інструментів чисельного моделювання, що застосовується для опису процесів у міському піддаховому шарі. Модель ґрунтується на фундаментальних законах гідро- і термодинаміки, та здатна відтворювати основні процеси взаємодії між атмосферою, ґрунтом, рослинністю і будівлями. Модель може застосовуватися для дослідження мікрокліматичних умов, моделювання тепловідчуття людини в урбанізованому середовищі, визначення ефективності заходів з адаптації міст до прояву зміни клімату та моделювання рівня забруднення атмосферного повітря в містах. Наведено аналіз досліджень, в яких використовується модель, за ними проаналізовано імітаційну точність моделі ENVI-met, яку встановлено шляхом порівняння змодельованих даних та вимірних, показано переваги та недоліки моделі.

Ключові слова: мікроклімат великого міста, урбометеорологічні дослідження, імітаційні моделі, модель «ENVI-met».

Модель Envi-met – как инструмент для современных урбометеорологических исследований.

Матвиенко М.О.

В статье представлено описание современной модели микроклимата ENVI-met. На сегодняшний день модель ENVI-met является одним из наиболее распространенных

инструментов численного моделирования, применяемого для описания процессов в городском приземном слое. Модель основывается на фундаментальных законах гидро- и термодинамики, и способна воспроизводить основные процессы взаимодействия между атмосферой, почвой, растительностью и зданиями. Модель может применяться для исследования микроклиматических условий, моделирование теплоощущения человека в урбанизированной среде, определения эффективности мер адаптации городов к проявлению изменения климата и моделирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах. Приведен анализ исследований, в которых используется модель, за ними проанализировано имитационную точность модели ENVI-met, путем сравнения смоделированных данных и измеренных, показаны преимущества и недостатки модели.

Ключевые слова: микроклимат большого города, урбометеорологические исследования, имитационные модели, модель «ENVI-met».

Envi-met model as a tool for modern urban meteorological studies.

Matviienko M.O.

Studying the microclimate of cities is one of the areas of urban meteorology, which are actively developing recently. The research of microclimate and its dependence on building parameters is important not only for scientists but also for architects, engineers and urban planners. Because they can help make the urban environment more comfortable for living and minimize the negative impact of Urban Heat Island, which is especially important in the context of rapid urbanization and in the face of climate change, that is most often reflected in air temperatures increasing.

For modern urban meteorological studies traditional methods (observation method and statistical methods) cannot remain basic, so they are replaced by numerical simulation tools. One of those tools is the Computational Fluid Dynamics (CFD), which are based on the use of numerical methods to simulate the interaction between the atmosphere and the urban surface. Such approaches are gaining in popularity because of such advantages as accurate modeling of urban geometry and the high-resolution description of airflow in it; the ability to simulate the microclimate in different conditions (weather, buildings, vegetation, water bodies, etc.); numerical simulation can provide information about any researched variable in the entire simulated area.

This article describes the modern ENVI-met microclimate model as one of the most common numerical simulation tools. The model is based on the fundamental laws of fluid dynamics and thermodynamics and is able to reproduce the basic processes of interaction between the atmosphere, soil, vegetation and buildings. The model can be used to simulate microclimate conditions, bioclimatology, urban air pollution, and to identify optimal measures for urban adaptation to climate change. The paper provides an overview of studies published in peer-reviewed international journals (in the period from 1999 to the end of 2018) using the ENVI-met model, and also presents its main advantages and disadvantages. The simulation accuracy of the ENVI-met model is analyzed by comparing the simulated data with the measured one.

Key words: microclimate, urban meteorological research, simulation models, ENVI-met model.

Надійшла до редколегії 02.11.2019