

УРБООКОЛОГІЯ

УДК 551.524:504.3

М. А. Федонюк, В. В. Федонюк
Луцький національний
технічний університет

ПРОБЛЕМИ ТЕПЛООВОГО ЗАБРУДНЕННЯ СЕЛІТЕБНИХ ТЕРИТОРІЙ: ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОНІТОРИНГ

У статті розглянуто основні джерела та наслідки теплового забруднення міських територій. здійснено огляд основних зарубіжних та вітчизняних джерел з питань формування міського острова тепла та його моніторингу. Наведено приклади оцінки теплового забруднення деяких західноукраїнських міст за інфрачервоними супутниковими знімками. Окреслено та класифіковано основні методи зменшення теплового забруднення у містах.

Ключові слова: теплове забруднення, міські острови тепла, моніторинг, альbedo, дані дистанційного зондування

В статье рассмотрены основные источники и последствия теплового загрязнения городских территорий. Осуществлен обзор основных зарубежных и отечественных источников по вопросам формирования городского острова тепла и его мониторинга. Приведены примеры оценки теплового загрязнения некоторых западно-украинских городов по инфракрасным спутниковым снимкам. Определены и классифицированы основные методы уменьшения теплового загрязнения в городах.

Ключевые слова: тепловое загрязнение, городской остров тепла, мониторинг, альbedo, данные дистанционного зондирования

The article analyzes the sources and effects of thermal pollution in urban areas. The review of the main foreign and national sources for the formation of urban heat island and its monitoring is carried out. Examples of an assessment of thermal pollution of some west Ukrainian cities on infrared satellite pictures are given. The main methods of decrease of urban thermal pollution are outlined and classified.

Key words: thermal pollution, urban heat island, monitoring, albedo, remote sensing data

Постановка проблеми. Глобальне потепління, на сьогодні, вважається однією із найважливіших проблем людства, на дослідження якої спрямовані зусилля сотень наукових груп по всьому світу. Разом із цим, його причини, наслідки та конкретні прогнози часто лишаються дискусійними.

Втім, проблеми, спровоковані потеплінням, щороку стають все більш очевидними у більшості регіонів планети. У великих містах такі проблеми зазвичай відчуються швидше. Ефекти глобального потепління в урбоекосистемах накладаються на ефекти локального теплового забруднення, характерного для селітебних територій. В результаті теплове поле міст стає різуче відмінним від природних чи навіть сільськогосподарських ландшафтів. Це, своєю чергою, негативно відображається на здоров'ї населення, функціонуванні міської інфраструктури, ресурсо- та енергоспоживанні міст тощо. Відповідно все більш актуальними стають дослідження джерел та наслідків теплового забруднення та методів його зменшення в районах міської забудови.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Перші дослідження теплового режиму міст датуються ще XIX ст. Вже тоді в науку було введено поняття «міського острова тепла» (Urban Heat Island, UHI) як температурної аномалії над центральною частиною міста, що характеризується підвищеною порівняно з периферією температурою повітря (L. Howard, 1818). Втім, активні наукові дослідження таких явищ почали розвиватись у 2-й половині XX ст., разом із стрімким зростанням урбанізації, що супроводжувалась негативними екологічними наслідками. У 1950-1970 роках багато наукових груп в США, СРСР [7] та європейських країнах вивчали тепловий баланс міст, джерела, види і наслідки теплового забруднення, динаміку теплофізичних властивостей міської забудови тощо.

Так, дослідження 1970-х років деяких американських та європейських міст показало, що потік виключно антропогенного тепла може становити 20-40 Вт/м² влітку і 70-210 Вт/м² взимку [14]. Згодом у великих містах-мільйонниках оцінки цих показників зросли. Наприклад, дослідження у центральній частині Токіо показали, що потік тепла антропогенного походження може складати від 400 Вт на м² у літній період до 1590 Вт/м² взимку. Зауважимо, що остання величина є майже на 17 % більшою від сонячної сталої – показника, що характеризує потік сонячної енергії на межі земної атмосфери [15].

У 1970-1980 роках вийшов ряд узагальнюючих праць, які пізніше стали класичними. Це, зокрема, праці Е. Ландсберга [16], Т. Оке [18], Х. Тахи [21] та ін. У них розглядався весь комплекс природних і антропогенних особливостей, що сприяють утворенню островів тепла у містах. Найбільше уваги приділялось альбедо міських поверхонь, особливостям конвекції та турбулентності, впливу озеленення на тепловий режим, відмінностям у використанні різних матеріалів чи планувальних рішень.

Для українських міст такі особливості досліджувались науковими групами Л. Сакалі, Л. Смекалова, В. Бабиченко та ін., під редакцією яких вийшли монографії-довідники «Клімат Києва» (1980), «Клімат Одессы» (1986), «Клімат Харькова» (1983).

У США, Канаді та деяких країнах Європи були створені спеціальні лабораторії чи дослідницькі групи, що займаються виключно питаннями теплового забруднення та ефекту UHI. Це, наприклад, Heat Island Group Lawrence Berkeley Laboratory (Берклі, Каліфорнія), пілотний проект UHI країн Центральної Європи (www.eu-uhi.eu) та ряд інших.

Потужний поштовх дослідженню теплового поля селітебних територій надала поява дистанційних даних супутникових знімків в інфрачервоному діапазоні. Однак аналіз інфрачервоних зображень не є таким очевидним, як для зображень у видимому діапазоні спектру. При дослідженні теплових знімків міст потрібно враховувати мінливість метеорологічних полів, складний просторовий розподіл полів вітру та вологості, багаторазові відбиття, затіненості тощо. Питанням обробки таких знімків, їх інтеркалібруванню та правильній інтерпретації присвячено цілий ряд статей зарубіжних та вітчизняних дослідників [5, 6, 10, 18, 22].

В Україні цими питаннями займаються, зокрема, науковці ДУ "Науковий Центр Аерокосмічних Досліджень Землі ІГН НАНУ". Так, В. Філіпович, С. Станкевич та ін. останніми роками провели ряд досліджень теплового поля м. Києва за допомогою аналізу інфрачервоних знімків, запропонували методику їх якісної обробки та інтерпретації. Виявлено, що температура поверхні в окремих районах Києва збільшилась на 7–10°C (Stankevich, Filipovich, 2013) [5, 6].

Мета та завдання дослідження. Незважаючи на достатньо високий рівень розробки загальних питань теплового забруднення міст, дослідження кожної нової селітебної території потребує окремих підходів. Крім того, раніше отримані дані часто стають неактуальними або потребують певної корекції через значну мінливість погодних та кліматичних умов, нові ефекти глобального потепління, подальше розростання селітебних зон. Важливим фактором є також зміна та переорієнтування регіональних енергетичних стратегій, що може суттєво вплинути в тому числі і на розподіл міських теплових потоків. Зважаючи на це, метою даного дослідження є окреслення головних проблем, завдань і методів, що стосуються проблем теплового забруднення українських міст в сучасних умовах реформування економіки та розробки нових екологічних та енергетичних стратегій.

Основний матеріал. Теплове забруднення є одним з наймасштабніших та найпоширеніших видів фізичних забруднень, створених людиною. За даними ІЕА, щорічне світове виробництво енергії від спалювання викопного палива становить біля 14 тис. Мтоє, або $5,86 \times 10^{11}$ ГДж [23]. Не менше чверті цієї кількості повертається у довкілля тепловими потоками. І хоч у планетарному масштабі це поки становить менше 0,1% від сумарного надходження енергії від Сонця, локально теплове забруднення набуває критичних значень.

Крім безпосереднього впливу на фізичні характеристики повітря, теплове забруднення сприяє також збільшенню хімічного забруднення. Після підвищення температури повітря до +22,5°C, ймовірність виникнення смогу зростає майже на 2% на кожен додатковий градус. Крім того, більша температура повітря в містах потребує генерації додаткової електроенергії, що, своєю чергою, також провокує більше забруднення атмосфери [8].

Як вже згадувалось, в окремих мегаполісах антропогенний тепловий потік може навіть перевищувати показник сумарної сонячної радіації. При цьому тепловий вплив може поширюватись на десятки кілометрів. Наприклад, зона впливу київських ТЕЦ може сягати від 131 тис. до 11 млн.га, а висота теплового впливу – 230-250 м [4]; тепловий шлейф від м. Сент-Луїс із енергопотужностями 4,6 ГВт складав 80-120 км і поширювався на висоту до 1 км [11]. Але й міста без власних енергогенеруючих потужностей також формують свої «острови тепла». Зупинимось детальніше саме на тепловому забрудненні урбанізованих селітебних територій.

Зміни температурних показників у містах, проявляються у вигляді хвиль тепла (у часовому масштабі) та островів тепла (у просторовому масштабі). Згідно з визначенням Всесвітньої метеорологічної організації WMO, хвиля тепла (ХТ) – це період, протягом якого максимальна

добова температура повітря понад 5 послідовних днів перевищує середню максимальну температуру повітря цього дня за середній багаторічний період на 5°C.

Пряме теплове забруднення міських територій пов'язане із безпосереднім надходженням теплової енергії внаслідок викидів автотранспорту, промислових підприємств, котелень, підігрітими скидами стічних вод, витоками на теплотрасах тощо. Для приміських зон приватної забудови також характерні розосереджені викиди від індивідуальних опалювальних установок.

Непряме теплове забруднення пов'язане з антропогенними трансформаціями радіаційного, теплового режиму та процесів випаровування води в межах міської території. Місто – це, насамперед, зона активного перетворення людиною діяльної поверхні, яка, як відомо, є одним з кліматоутворюючих факторів, разом з сонячною радіацією та атмосферною циркуляцією. У містах значні площі займають заасфальтовані дороги та майданчики, забетоновані ділянки, будівлі, в тому числі висотні, поверхня стін та дахів яких багаторазово збільшує навіть саму площу діяльного шару. Більшість штучних поверхонь (бетон, камінь, асфальт, пластик тощо) вдень активно поглинають та накопичують тепло, від них нагрівається і приземний шар повітря.

У місті діяльна (підстилаюча) поверхня, яка є вагомим чинником кліматоутворення, дуже неоднорідна. Її прийнято ділити на ряд шарів-підповерхонь [1, 3]:

1) рівень вулиць, площ, доріг, газонів та водойм

2) рівень верхньої частини крон дерев та дахів невисокої, 1-3 поверхової забудови (зелені зони міста, окраїнні квартали приватної забудови, дачні масиви),

3) рівень дахів багатоповерхової забудови.

Окремо слід враховувати роль у формуванні теплового профілю міста окремих великих промислових комплексів, транспортних магістралей, які є джерелами не тільки диму, газу, пилу, але і додаткових викидів тепла. Місто – це і численні вертикальні поверхні: стіни, схили різної експозиції та крутизни, спуски, тунелі, естакади тощо, вплив яких на температурний режим ускладнюється різноманітністю матеріалів та технологій їх виготовлення, архітектурними особливостями тощо. Міська забудова переформовує повітряні потоки, суттєво змінюючи природний вітровий режим території. Потужні терміки (вертикальні конвективні повітряні потоки, що утворюються над нагрітими поверхнями, наприклад, заасфальтованими ділянками) самі стають додатковим джерелом динамічних перешкод на шляху природного руху повітряних мас і формування вітрів у різні сезони року. Тому про місто говорять не тільки як про «острів тепла», але як і про динамічну перешкоду на шляху перенесення атмосферних повітряних мас. Така динамічна перешкода – джерело додаткових сум опадів над містом, процес випаровування яких, в свою чергу, теж впливає на формування локального температурного режиму.

Ряд дослідників виділяє і біологічну складову у формуванні міського острова тепла (скупчення великої кількості людей на невеликій території, процеси їх життєдіяльності, що супроводжуються позитивним тепловим балансом) тощо [12].

Суттєво спотворює природний хід температурного режиму в селітебних зонах також і зміна режиму випаровування з підстилаючої поверхні. Як правило, випаровування у місті менше, ніж на прилеглих заміських територіях. Тому сонячне тепло, що в сільській місцевості витрачається на випаровування і транспірацію, у місті додатково нагріває діяльні поверхні.

На температурний режим селітебних зон також чинять опосередкований вплив забруднення атмосферного повітря парниковими газами. Концентрація вказаних газоподібних сполук у місті в рази перевищує їх природний середньозважений вміст в атмосферному повітрі нашої планети. Як відомо, ці гази сприяють затримці теплового випромінювання діяльних поверхонь і, як наслідок – додатковому нагріванню приземного шару атмосфери. Вміст парникових газів у атмосфері міст також має свої добові, тижневі та сезонні цикли. Так, згідно досліджень проведених [9, 19], концентрація основних парникових газів у повітрі міст у вихідні дні на 30% менша, ніж в робочі дні тижня. Найвищі концентрації вказаних газів спостерігаються у понеділки та п'ятниці, а найнижчі – у неділю.

Територія більшості міст має досить складну ландшафтно-просторову структуру. Тому острови тепла в містах – це, як правило, неоднорідні структури, вони розбиті на сектори та сегменти, які розділені водними об'єктами (річки, водосховища, ставки в межах міської зони), зеленими парковими зонами тощо. Насправді такі бар'єри пом'якшують загальний негативний вплив теплового забруднення.

Міський острів тепла найчастіше фіксують над центральними районами міста, спальними районами та промисловою зоною урбанізованих територій, проте він не є стаціонарним утворенням. Відмічають певні закономірності в добовому ході температур над містом, тижневому ході (робочі дні – вихідні дні), а також річному ході температурного режиму.

Добовий хід температури в міському острові тепла суттєво відрізняється влітку та взимку [16]. Взимку максимум розвитку острова тепла припадає на 21 год, а потім його інтенсивність поступово зменшується до 13 год наступного дня. Влітку удень до 17 год значення температури повітря в місті та на замиській території мало відрізняються, а потім внаслідок швидшого охолодження повітря в сільській місцевості різниця температур поступово зростає, і досягає свого максимуму о 2-3 год ночі. Дослідження міст на прикладі Гетеборга виявило 2 хвили охолодження – перша кількогодина вечірня із різними градієнтами (залежно від експозиції будівель та їх теплопровідності), та друга рівномірна в умовах передранкової інверсії, яка визначається радіаційними властивостями над будинкового шару повітря. [13].

Температурні відмінності мають кореляцію з площею міської забудови, кількістю жителів міста, специфікою транспортної та промислової інфраструктури і особливостями забудови житлових зон в містах та на урбанізованих територіях.

Багато таких відмінностей можна побачити і проаналізувати за космічними знімками у тепловому інфрачервоному діапазоні (рис.1).

Як бачимо з наведеного рисунка, просторовий розподіл міських островів тепла може істотно відрізнятись за рахунок рельєфу місцевості, наявності водойм, площі та конфігурації зелених зон, співвідношення промислових та «спальних» районів, транспортних розв'язок тощо.

Аналіз таких даних ДЗЗ дає хороші можливості для моніторингу теплового забруднення, виявлення його просторових та сезонних відмінностей тощо. При наявності достатньої бази подібних знімків із хорошим просторовим розрізненням можна виявляти теплові хвилі у містах, місця розривів теплових островів, локалізацію найбільш проблемних ділянок тощо.

Часто на зимових знімках міський острів тепла проглядається чітко, а на літніх чи весняно-осінніх – фрагментарно (рис. 2).

Аналіз наведених знімків показує, що в холодну морозну погоду температурний контраст між містом та околицями є значним та очевидним. Чітко виділяються основні житлові райони (найяскравіші), і навіть основні дороги. Зони приватної забудови мають меншу насиченість кольору, але теж суттєво відрізняються від околиць. На знімках, розміщених зліва (серпень-вересень) для Луцька острів тепла набагато менший, і проглядається тільки у трьох житлових кварталах, але різниця між максимальними і мінімальними (заплава р. Стир) температурами значна. На знімку м. Рівного взагалі не бачимо локалізації тепла у місті в цей період, а деякі навколишні сільськогосподарські угіддя навіть мають вищу температуру.

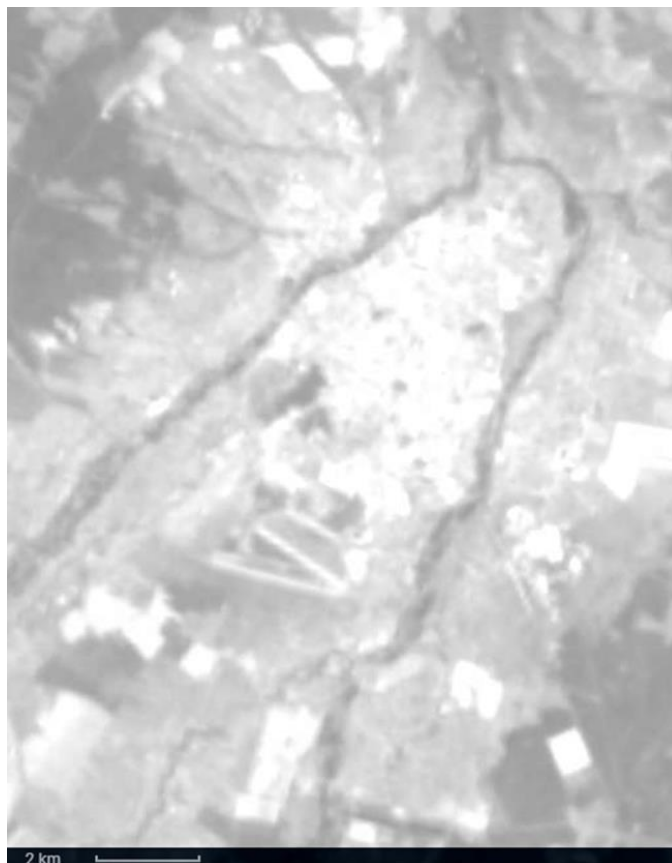
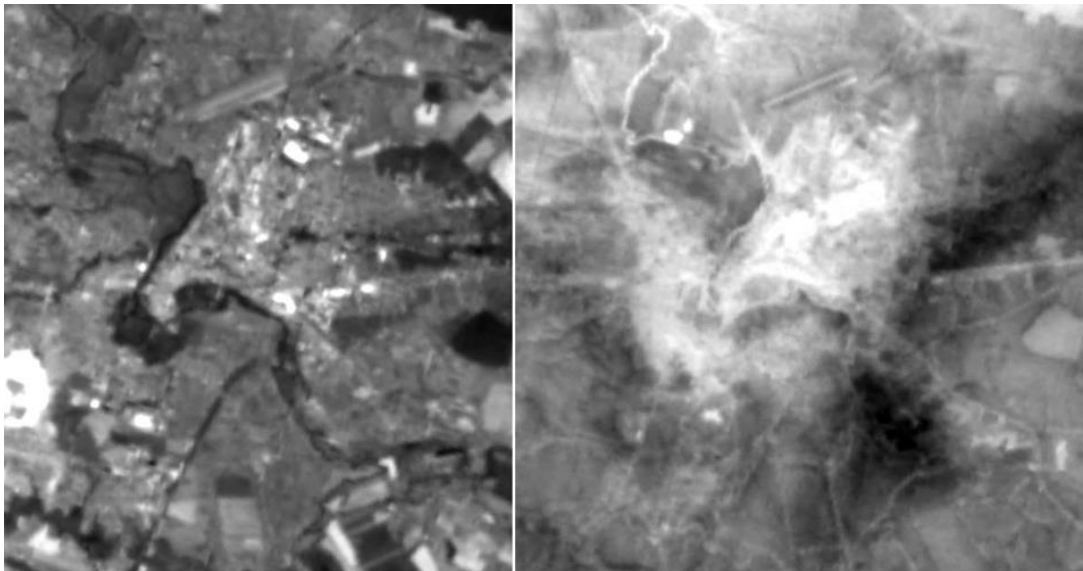


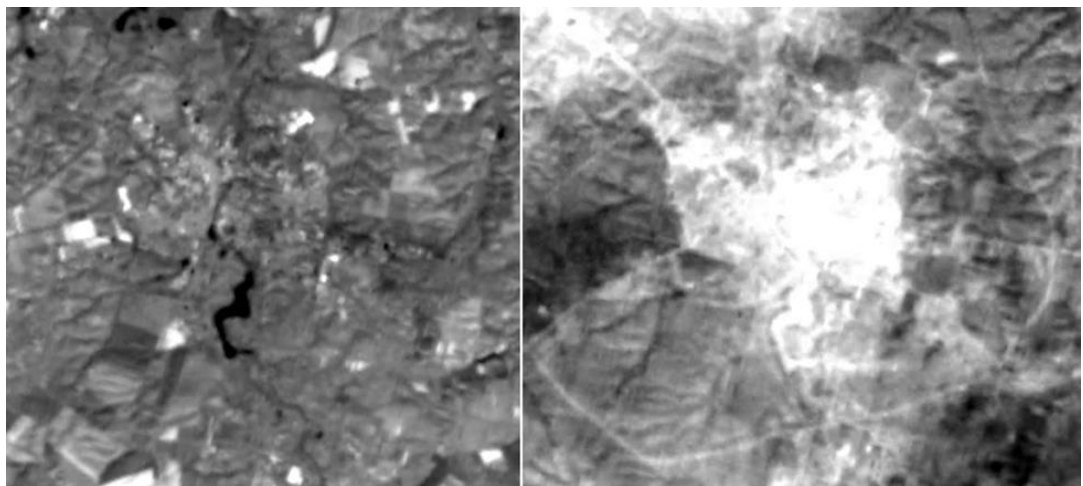
Рис. 1. «Острів тепла» над Івано-Франківськом. Знімок (тепловий інфрачервоний канал) супутника Landsat-8, 19 серпня 2016 р.

Звичайно, для більш повноцінного та деталізованого аналізу потрібно робити якісну інтеркалібрацію знімків, враховувати час зйомки, порівнювати із конкретними метеоумовами тощо.

Окрім аналізу матеріалів ДЗЗ, для моніторингу теплового забруднення дуже важливим є тепловізійне знімання міських кварталів. При цьому таке знімання повинно охоплювати не тільки житлові будівлі, а й транспортні артерії та розв'язки, райони прокладання теплотрас, санітарно-захисні зони підприємств, зелені зони та ін.



a)



б)

Рис.2. Порівняння теплових знімків Луцька (а) та Рівного (б) у різні кліматичні періоди (знімки LandSat-8, зліва – кінець серпня-вересень 2016, справа – січень 2017)

Час проведення тепловізійних обстежень для моніторингу потрібно підбирати для максимального виявлення внутрішньодобових та сезонних відмінностей. Мають бути охоплені як періоди максимумів енергетичних та транспортних навантажень, так і періоди відносного «спокою». Важливо також оцінити розподіл тепла на територіях з різною щільністю забудови, різним рівнем озеленення, використанням матеріалів з різним альбедо поверхні тощо. Виявлення таких відмінностей дозволить підбирати ефективні планувальні та інженерно-технічні рішення для мінімізації теплового забруднення та його наслідків.

Боротьба із тепловим забрудненням часто є фактично синонімом енергозбереження, адже більшість енергозберігаючих заходів впливають на зменшення надходження у довкілля антропогенних потоків тепла. Разом з тим, є цілий ряд спеціальних методів, що сприяють зменшенню непрямого теплового забруднення (рис. 3).

«Енергетичний» блок цієї схеми цілком зрозумілий і достатньо описаний в багатьох джерелах. Зауважимо тільки, що зростання частки відновлювальних джерел енергії в ЖКГ та на

транспорті може мати дуже значний ефект для зменшення теплового забруднення. Ряд досліджень вказують, що навіть досить великі міста, такі як Гельсінкі чи Шанхай, за різних варіантів розвитку, можуть виробляти від 5 до 32% міських потреб з альтернативних джерел, переважно вітрових та комбінованих установок [17]. Крім того, встановлення сонячних панелей на дахах чи стінах будівель, забезпечує не тільки виробництво електроенергії, а й поглинання теплового сонячного потоку, який вимірюється сотнями Вт/м².



Рис.3. Блок-схема основних шляхів зменшення теплового забруднення міст

Одним з найдієвіших методів опосередкованого, але комплексного і ефективного зменшення теплового забруднення, є різні види озеленення. Моніторинг теплового поля міста Києва за 1984–2014 рр. показав, що мінімальна поверхнева температура притаманна парковим/лісопарковим зонам завдяки природному випаровуванню та відсутності штучних покриттів, тоді як аномально висока приповерхнева температура спостерігається над великими транспортними розв'язками, основними проспектами і трасами (Філіпович, Крилова, 2014) [6]. Низький рівень озеленення та ущільнення міської забудови викликають локальне порушення мікрокліматичних умов та підсилюють зміну клімату на регіональному рівні [5, 6].

Багато західних дослідників відзначають, що рослинність може полегшити УНІ через безпосередньо затінення теплопоглинальної поверхні та через евапотранспіраційне охолодження [21]. Випаровування і транспірація з системи ґрунт-рослинність є ефективним регулятором мікроклімату. У середніх широтах у теплий період ці ефекти можуть давати «оази» прохолоднішого повітря, температура якого на 2-8° менша від околиць. Прихована теплота випаровування у лісах та парках може сягати 200-400 Вт/м², що часто може значною мірою нівелювати антропогенні потоки тепла у місті. Дослідження в Лондоні, Токію, Монреалі показали зниження температури у зелених зонах на 1,6-2,4°С у порівнянні із сусідніми забудованими районами [21].

Вертикальне озеленення також може знизити амплітуду коливань температури із сонячної сторони на 50%, а максимальні значення – на 1,6-4,7°С. В іншому дослідженні показано, що ефект вертикальних систем зелених насаджень зменшує енергію, що використовується для охолодження приблизно на 23%, що призводить до зниження річного споживання енергії на 8% [20].

Крім озеленення, збільшення альбедо поверхні можливе і завдяки використанню відповідних матеріалів. У багатьох містах середні показники альбедо поверхонь дуже низькі та становлять від 0,08 до 0,2. Збільшення альбедо дахів, доріг та тротуарів на 0,13-0,15 може дати до 2 градусів зменшення температури, а у поєднанні із продуманим озелененням – до 4 градусів локально. За розрахунками, це дозволяє економити до 10% електроенергії у помірному кліматі та до 20% - у жаркому [1, 2].

Аераційні особливості міської забудови також здатні впливати на тепловий баланс, тому хороше провітрювання в межах селітебних зон, наявність спеціальних аераційних тунелів чи коридорів – це також чинник терморегуляції. Особливе значення має рівень турбулентного обміну, який характеризується коефіцієнтом турбулентності. Складові теплового балансу і коефіцієнт турбулентності істотно залежать від умов погоди і можуть помітно відхилятися від своїх середніх значень.

Загалом вирішення проблем теплового забруднення у міських селітебних територіях потребує застосування цілого комплексу означених методів, але з продуманим обґрунтуванням і врахуванням місцевих особливостей.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, проаналізувавши ретроспективні дослідження особливостей розподілу температурних полів у селітебних зонах міст і сучасний потенціал дослідження даної проблеми з використанням новітніх інформаційних технологій, можна зробити наступні висновки:

- так звані «острови тепла» над населеними пунктами мають чітко виражену добову, сезонну та річну динаміку, яка визначається комплексом чинників антропогенного і природного характеру. Річний максимум їх прояву припадає на холодний період року, в добовій динаміці мінімуми та максимуми чітко пов'язані з ритмом життя великого міста, інтенсивністю транспортних потоків і виробничою діяльністю містян;

- утворення «островів тепла» над містами має як негативні, так і позитивні соціально-економічні та екологічні наслідки. Проте з точки зору формування екологічно безпечного та антропокомфортного середовища доцільним є пошук засобів зменшення температурних контрастів між селітебними зонами і територіями з природними ландшафтами;

- до основних перспективних методів зменшення температурних контрастів у системі міських «островів тепла» слід віднести: горизонтальне і вертикальне озеленення житлових мікрорайонів та промислових зон; перерозподіл транспортних потоків у населених пунктах та створення мінізон, вільних від автотранспорту; зміна властивостей діяльної поверхні для збільшення її альбедо; теплоізоляція приміщень та споруд.

Література

1 Артамонов Б. Б. Аналіз впливу мікрокліматичних зон на процеси кліматоутворення у містах в умовах глобальної зміни клімату. Науковий вісник НЛТУ України, 23, 2013. С. 133–137. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlту_2013_23.

2 Иванов С. В., Драничер О. Р. "Роль альбедо в формировании городского острова тепла." Вісник Одеського державного екологічного університету 15 (2013): 79-88.

3 Кондратьев К. Я. Основные факторы формирования острова тепла в большом городе / К. Я. Кондратьев, Л. Т. Матвеев // Доклады РАН. – 1999. – Т. 367, № 2. – С. 253-256.

4 Попов О. О. Математичне моделювання розповсюдження техногенного забруднення від підприємств паливної енергетики / О. О. Попов. // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова НАН України. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2009. – Вип. 51. – С. 73-84.)

5 Станкевич С. А., Филиппович В. Е., Лубский Н. С., Крылова А. Б., Крицук С. Г., Бровкина О. В., Горный В. И., Тронин А. А.. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической

температури поверхності урбанізованої території по матеріалам теплової космічної съёмки. Український журнал дистанційного зондування Землі, № 7, 215. С.12–21.

6 Філіпович В. Є., Крилова Г. Б. Дослідження теплового поля м. Києва за даними космічного зондування в ІЧ-діапазоні як складової аналізу екологічного стану урбанізованої території. Збірник наукових праць 13 Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях», Київ, 2014. С.16–28. http://itgip.org/wp-content/uploads/2013/11/Book_small.pdf

7 Энергетические аспекты защиты окружающей среды от теплового и химического загрязнения / С. С. Кутателадзе, В. Н. Москвичёва, Б. И. Псахис и др. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1978. – 40 с.

8 Art. H. Rosenfeld, H.Akbari, S.Bretz, D. Sailor, H. Taha. Mitigation of Urban Heat Islands: Materials, Utility Programs, Updates / Journal of Energy Efficiency, Vol. 1, No. 1, 1993. P. 1-20.

9 Böhm R. Urban bias in temperature time series: a case study for the city of Vienna, Austria / R. Böhm // Climatic Change. – 1998. – Vol. 38. – P. 113–128.

10 Chen X.-L. et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes/ Remote Sensing of Environment 104 (2006). P 133 – 146.

11 Formation and transport of secondary air pollutants: ozone and aerosols in the St. Louis urban plume / WH White, JA Anderson, DL Blumenthal, RB Husar, NV Gillani, JD Husar, WE Wilson Jr // Science 08 Oct 1976: Vol. 194, Issue 4261, pp. 187-189. DOI: 10.1126/science.959846

12 Georgi, N., Tzesouri, A. Monitoring Thermal Comfort in Outdoor Urban Spaces for Bioclimatic Conditions Environment. 1st WSEAS International Conference on landscape architecture, Algarve, Portugal, (2008), 98–103. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2008/algarve/LA/13-588-398.pdf>

13 Holmer B., S. Thorsson, I. Eliasson. Cooling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature difference / Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography. December 2007. P. 237-248

14 Hosler C.L. and H.E. Landsberg, The effect of localized man-made heat and moisture sources in mesoscale weather modification, Energy and Climate, National Academy of Sciences, Washington, DC, 1977

15 Ichinose T., K. Shimodozono, K. Hanaki. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo / Atmospheric Environment 33 (1999). P. 3897-3909.]

16 Landsberg, H.E. The Urban Climate / Academic Press, 28.08.1981. – P 275.

17 Niemi R., J. Mikkola, P.D. Lund. Urban energy systems with smart multi-carrier energy networks and renewable energy generation / Renewable Energy 48 (2012) 524e536.

18 Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island / Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108 (455), 1-24

19 OSIRIS: a physically based simulation tool to improve training in thermal infrared remote sensing over urban areas at high spatial resolution / T. Poglio, S. Mathieu-Marni, T. Ranchin, E. Savaria, L. Wald. // Remote Sensing of Environment, Elsevier, 2006, 104, pp.238-246

20 Perini, K. , Ottel , M. , Haas, E. and Raiteri, R. (2011) Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. Open Journal of Ecology, 1, 1-8. doi: 10.4236/oje.2011.11001.

21 Taha H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat / Energy and Buildings 25 (1997) 99-103

22 Voogt J, T.R. Oke. Thermal remote sensing of urban climates / Remote Sensing of Environment 86 (2003) 370–384

23 World total energy consumption / Global Energy Statistical Yearbook 2016. – Online: <https://yearbook.enerdata.net>.

© М. А. Федонюк,

Надійшла до редакції 15 травня 2017 р.

В. В. Федонюк

Рекомендував до друку

докт. геогр. наук М. М. Приходько