

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАТВІЄНКО МАРІЯ ОЛЕГІВНА

УДК 551.584.5

ДИСЕРТАЦІЯ
МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ТА БІОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ ВЕЛИКИХ
МІСТ У ЛІТНІЙ ПЕРІОД

Спеціальність 103 – Науки про Землю

Галузь знань – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі
природничих наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М.О. Матвієнко

Науковий керівник (консультант): Шевченко Ольга Григорівна,
доктор географічних наук, доцент

Київ – 2022

АНОТАЦІЯ

Матвієнко М.О. Моделювання мікроклімату та біокліматичних умов великих міст у літній період. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 «Науки про Землю». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2022.

Дисертаційне дослідження присвячено оцінці мікроклімату та біокліматичних умов великих міст України з використанням нових методологічних підходів та технологічних засобів на основі новітніх програмних продуктів з високою просторовою роздільною здатністю, спрямованих на обчислення потоків випромінювання в складному урбанізованому середовищі.

В роботі проаналізовано літературні джерела та описано теоретичні основи формування клімату у містах. Розглянуто основні чинники зміни радіаційного і теплового балансів міста. Описано особливості формування міського острова тепла, фактори, які визначають його інтенсивність, просторову і вертикальну структуру. Узагальнено чинники, що формують особливості полів температури та вологості повітря у межах великих міст. Охарактеризовано особливості вітрового режиму урбанізованого середовища. Встановлено, що якщо на початкових етапах вивчення клімату міст відбувалося накопичення знань щодо особливостей мікроклімату та закономірностей перебігу процесів на основі натурних вимірювань та порівнянь значень метеорологічних параметрів «місто–передмістя», то в сучасний період урбометеорологічні дослідження переважно ґрунтуються на моделюванні атмосферних процесів та мікро- і біокліматичних особливостей, як міст загалом, так і окремих їх ділянок. Показано, що результати проведених раніше досліджень особливостей мікроклімату в різних типах забудови та за різного рівня озеленення територій міста, стали підґрунтям для розробки низки класифікацій міських просторів. Найвідомішою та найбільш вживаною з яких на сьогоднішній день є класифікація локальних кліматичних зон (ЛКЗ) І. Стюарда та Т. Оке. В

роботі наведено характеристики усіх 17 ЛКЗ, за якими їх можна ідентифікувати в межах урбанізованого середовища.

Проведено аналіз підходів до оцінки біокліматичних умов та сучасних програмних продуктів, які використовуються для чисельного моделювання клімату міст, та обґрунтовано переваги біокліматичного індексу фізіологічно-еквівалентної температури та одномірної мікромасштабної моделі «RayMan» та просторової мікромасштабної моделі «SkyHelios» для вирішення низки задач під час оцінки мікроклімату та біокліматичних умов великих міст у літній період.

Для 21 міста України виконано аналіз просторово-часової мінливості випадків ХТ та їх тривалості на території України за багаторічний період (1961–2020 рр.). Ідентифікація випадків ХТ базувалася на основі щоденних добових значеннях максимальної температури повітря за літні місяці обраного періоду. Результати свідчать, що за досліджуваний період найбільша кількість випадків ХТ спостерігалася в містах Центрального регіону, а найменша фіксувалася на станціях, розташованих на узбережжях морів. Аналіз часової динаміки кількості випадків ХТ показав, що починаючи з 1991 року майже на всіх станціях кількість випадків ХТ зросла порівняно з попередніми десятиліттями. Також, було встановлено, що за найчастіше спостерігалися ХТ тривалістю від 7 до 14 днів.

Оцінка біокліматичних умов міст України під час ХТ здійснена за допомогою одномірної мікромасштабної моделі «RayMan» з використанням біокліматичного індексу – фізіологічно-еквівалентна температура (ФЕТ). Моделювання ФЕТ проводилося для 15:00 годин за східноєвропейським літнім часом (СЛЧ) для 12 українських міст. Інтенсивність теплового стресу під час випадків ХТ зростає по території України з північного заходу на південь–південний схід, при цьому найнижче середнє значення ФЕТ (34,1°C – помірний тепловий стрес) зафіксовано у Львові та Хмельницькому, найвище (41,3°C – екстремальний тепловий стрес) – спостерігалося у Луганську. Середнє значення ФЕТ розраховане для всієї території за досліджуваний період становило 37,4°C і відповідало сильному тепловому стресу. Аналіз повторюваності різних градацій термічного навантаження, показав, що найбільша кількість днів під час ХТ належить до градацій помірного, сильного

та екстремального теплового стресу. Частота таких днів була дуже високою і коливалася від 87% у Львові до 99,3% у Дніпрі. Легкий тепловий стрес та інші градації термічного стресу спостерігалися значно рідше.

З метою детального аналізу біокліматичних умов урбанізованого середовища, було використано класифікацію локальних кліматичних зон І. Стюарда та Т. Оке. Використовуючи алгоритм протоколу WUDAPT 0 рівня, здійснено ідентифікацію ЛКЗ у великих містах України, а для Києва проаналізовано його територію в адміністративних кордонах та в межах забудованої території (англ. – built-up area (BUA)). Отримані результати свідчать, що найпоширенішими ЛКЗ серед міських поверхонь великих міст є середньоповерхові (ЛКЗ–5) та малоповерхові (ЛКЗ–6) будинки з низькою щільністю забудови. Основними природними ЛКЗ, поширеними в межах досліджуваних міст, є ЛКЗ–А (зона високих щільно посаджених дерев), ЛКЗ–В (зона розрідженої рослинності) і ЛКЗ–D (зона низькорослих рослин). В Києві площі ЛКЗ із забудованими територіями (ЛКЗ–1–9) займають понад 65% території в BUA зоні, що приблизно на 25% більше, ніж в адміністративних межах міста. Найпоширенішими в адміністративних межах ЛКЗ міста є ЛКЗ–4, 5 та 9 (на них сумарно припадає 26,9%), а в BUA зоні їх частка є вищою за рахунок включення передмістя і становить – 41,4%.

З метою оцінки впливу ЛКЗ на формування клімату міста, проаналізовано взаємозв'язок між температурою підстильної поверхні (ТПП) і типом ЛКЗ у місті Києві у ясні літні дні. Порівняння температури підстильної поверхні різних ЛКЗ свідчить, що вищі температури властиві для забудованих територій. ЛКЗ–3 та ЛКЗ–8 є найтеплішими зонами міста, в той час як ЛКЗ–А та ЛКЗ–G, що являють зону високих щільно посаджених дерев та зону водних об'єктів, були найхолоднішими. Встановлені закономірності підтверджують широкі можливості практичного використання карт локальних кліматичних зон великих міст, адже, вони можуть стати підґрунтям для розробки планів адаптації до зміни клімату чи розробки системи оповіщення про спекотну погоду, що може зашкодити здоров'ю.

Для оцінки відмінностей біокліматичних умов в межах окремих локальних кліматичних зон за різних погодних умов, було обрано 10 ділянок у місті Києві, що

представляють 6 ЛКЗ, 5 забудованих (ЛКЗ 1, 2, 4–6) та одна (ЛКЗ–А) зона високих щільно посаджених дерев. Моделювання теплового навантаження здійснювалося за допомогою просторової мікромасштабної моделі «SkyHelios». Всього було виконано 400 симуляцій для обраних ЛКЗ за різних типів погоди, які відображенні у вигляді 10 синоптичних ситуацій. Результати моделювання показали, що влітку головну роль у формуванні біоклімату забудованих територій (навіть не зважаючи на певні відмінності в характеристиках забудови) відіграють одні й ті ж чинники. Це, перш за все чинники, що впливають на радіаційний баланс території – хмарність, інтенсивність довгохвильового випромінювання від будівель, орієнтація будівель та висота Сонця на момент моделювання, тощо. Вплив характеристик вітру є помітним, проте менш значним.

Було встановлено, що за умов циклональної погоди, в нічні та ранкові години (00:00 та 06:00 СЛЧ) в межах зелених зон міста спостерігаються менш комфортні умови: в той час як в межах забудови спостерігаються комфортні умови, в парках – холодний стрес різної інтенсивності. В денні та вечірні години (12:00 та 18:00 СЛЧ) – теплове навантаження на людський організм в межах забудови та в зелених зонах є приблизно однаковим

Охолоджуючий вплив зелених зон, найкраще проявляється за умов антициклональної погоди та малоградієнтного баричного поля. За цих умов в межах зелених зон протягом всієї доби спостерігається менша інтенсивність теплового стресу – переважно на 1–2 градації ФЕТ.

Наукові результати дисертаційного дослідження можуть застосовуватися для вирішення ряду наукових та практичних задач урбометеорології та міського планування. Зокрема, при проектуванні житлової забудови з метою створення сприятливого комфортного середовища для проживання людини, а також при розробці та впровадженні заходів адаптації до теплового стресу у великих містах. Результати дослідження використовуються під час викладання курсів «Основи біометеорології» та «Урбометеорологія» під час підготовки бакалаврів та магістрів на географічному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Ключові слова: мікроклімат, біоклімат, місто, міський простір, підстильна поверхня, Україна, зміни клімату, хвилі тепла, тепловий стрес, біокліматичні індекси, фізіологічно-еквівалентна температура, локальні кліматичні зони, модель «RayMan», модель «SkyHelios», супутниковий моніторинг.

SUMMARY

Matviienko M.O. Simulation of microclimate and bioclimatic conditions of big cities in summer months. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of Natural sciences in the specialty 103 “Earth Sciences” (10 – Natural sciences). – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2022.

The dissertation study concerns the assessment of the microclimate and bioclimatic conditions of big cities of Ukraine applying new methodological approaches and technological tools based on the latest software products with a high spatial resolution aimed at calculating radiation flows in a complex urban environment.

The research analyzes literary sources and describes the theoretical foundations of climate formation in cities. The main factors of changes in radiation and heat balances of the city are considered. The peculiarities of the urban heat island (UHI) formation, the factors that determine its intensity, spatial and vertical structure are described. The factors that shape the features of temperature fields and air humidity within big cities are summarized. The peculiarities of the wind regime of the urbanized environment are characterized. It was established that if at the initial stages of the climate research of cities there was an accumulation of knowledge about the peculiarities of the microclimate and the regularities of processes on the basis of field measurements and comparisons of the values of meteorological parameters "city-suburb", then in the modern period urban meteorological studies are mainly based on the modeling of atmospheric processes and micro- and bioclimatic features, both of cities in general and of their separate areas. It is shown that the results of previous studies of microclimate characteristics in different types of buildings and at different levels of the greening of the city territories became the basis for the development of a number of classifications of urban spaces. The most famous and most used today is the classification of local climate zones (LCZ) by I. Stewart and T. Oke. The study specifies the characteristics of all 17 LCZ by which they can be identified within the urbanized environment.

An analysis of approaches to the assessment of bioclimatic conditions and modern software products used for numerical modeling of the climate of cities was carried out, and the advantages of the bioclimatic index of physiologically-equivalent temperature (PET) and the one-dimensional microscale model "RayMan" and the spatial microscale model "SkyHelios" were substantiated to solve a number of problems during the evaluation of the microclimate and bioclimatic conditions of big cities in the summer period.

For 21 cities in Ukraine, an analysis of the spatio-temporal variability of heat waves (HW) cases and their duration on the territory of Ukraine over a multi-year period (1961–2020) was performed. The identification of HW cases was based on daily maximum air temperature values for the summer months of the selected period. The results show that during the studied period, the largest number of HW cases was observed in the cities of the Central region, and the smallest was recorded at the stations located on the seacoasts. Analysis of the temporal dynamics of the number of HW cases showed that since 1991, the number of HW cases has increased in almost all stations compared to previous decades. Also, it was established that HW lasting from 7 to 14 days was most often observed.

Assessment of bioclimatic conditions of Ukrainian cities during HW was carried out by means of the one-dimensional microscale model "RayMan" with the use of the bioclimatic index - physiologically equivalent temperature (PET). PET modeling was carried out for 15:00 o'clock by Eastern European Summer Time (EEST) for 12 Ukrainian cities.

The intensity of heat stress during HW cases increases over the territory of Ukraine from the northwest to the south-southeast, while the lowest average value of PET ($34,1^{\circ}\text{C}$ – moderate heat stress) was recorded in Lviv and Khmelnytskyi, the highest ($41,3^{\circ}\text{C}$ – extreme heat stress) was observed in Luhansk. The average value of PET calculated for the entire territory during the studied period was $37,4^{\circ}\text{C}$ and corresponded to strong heat stress. The analysis of the repeatability of different gradations of thermal stress showed that the largest number of days during HW belongs to gradations of moderate, strong and extreme heat stress. The frequency of such days was very high and ranged from 87% in

Lviv to 99.3% in Dnipro. Slight heat stress and other gradations of thermal stress were observed much less often.

For the purpose of a detailed analysis of the bioclimatic conditions of the urban environment, the classification of local climatic zones by I. Stewart and T. Oke was used. Using the algorithm of the WUDAPT protocol of level 0, the LCZ were identified in big cities of Ukraine, and the territory of Kyiv was analyzed in the administrative boundaries and within the built-up area (BUA). The obtained results indicate that the most common LCZ among the urban surfaces of big cities are open midrise (LCZ-5) and open low-rise (LCZ-6) buildings. The main natural LCZ widespread within the studied cities are LCZ-A (dense trees), LCZ-B (scattered trees) and LCZ-D (low plants). In Kyiv, areas of LCZ with built-up territories (LCZ-1-9) occupy more than 65% of the territory in the BUA zone, which is about 25% more than in the administrative boundaries of the city. LCZ-4, 5 and 9 are the most common in the administrative boundaries of the LCZ of the city (they account for a total of 26.9%), and in the BUA zone their share is higher due to the inclusion of the suburbs and amounts to 41,4%.

In order to assess the influence of the LCZ on the formation of the climate of the city, the correlation between the land surface temperature and the type of LCZ in the city of Kyiv on clear summer days was analyzed. A comparison of the land surface temperature of different LCZs shows that higher temperatures are typical for built-up areas. LCZ-3 and LCZ-8 are the warmest zones of the city, while LCZ-A and LCZ-G, representing the zone of tall densely planted trees and the zone of water bodies, were the coldest. The established regularities confirm the broad possibilities of practical use of maps of local climate zones of big cities as they can become the basis for the development of climate change adaptation plans or a warning system for hot weather which can be health-harming.

To assess the differences in bioclimatic conditions within the separate LCZ under different weather conditions, 10 sites were selected in the city of Kyiv, representing 6 LCZ, 5 built-up (LCZ 1, 2, 4-6) and one (LCZ-A) zone of high densely planted trees. Modeling of the heat load was carried out using the spatial microscale model "SkyHelios". A total of 400 simulations were performed for selected LCZ under different

types of weather, which are displayed in the form of 10 synoptic situations. The simulation results showed that in the summer, the same factors play the main role in the formation of the bioclimate of the built-up areas (even without taking into account certain differences in the characteristics of the built-up area). These are, first of all, factors affecting the radiation balance of the territory – cloudiness, intensity of long-wave radiation from buildings, orientation of buildings and the height of the Sun at the time of modeling, etc. The influence of wind characteristics is noticeable, but less significant.

It was established that under conditions of cyclonic weather, in the night and morning hours (00:00 and 06:00 EEST), less comfortable conditions are observed within the green zones of the city: while comfortable conditions are observed within the built-up area, cold stress of different intensity is observed in the parks. During the day and evening hours (12:00 and 18:00 EEST) the heat load on the human body within the buildings and in green areas is approximately the same.

The cooling effect of green zones is best manifested under conditions of anticyclonic weather and a low-gradient baric field. Under these conditions, a lower intensity of heat stress is observed throughout the day within the green zones – mostly by 1–2 degrees of PET.

The scientific results of the dissertation research can be applied to solve a number of scientific and practical problems of urbometeorology and urban planning. In particular, when designing residential buildings with the aim of creating a favorable and comfortable environment for human habitation, as well as in the development and implementation of adaptation measures to heat stress in big cities. The results of the research are being used during teaching courses "Fundamentals of Biometeorology" and "Urbometeorology" in the training of bachelors and masters at the Faculty of Geography of the Taras Shevchenko National University of Kyiv.

Key words: microclimate, bioclimate, urban, urban structure, land cover, Ukraine, climate change, heat waves, heat stress, bioclimatic indices, physiologically-equivalent temperature, local climate zone, model “RayMan”, model “SkyHelios”, satellite monitoring.

Список публікацій здобувача

Статті у фахових наукових виданнях України, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Матвієнко М.О.** (2019) Модель ENVI-met – як інструмент для сучасних урбометеорологічних досліджень. *Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія*, 4(55) 151-163.
2. **Матвієнко М.О., Шевченко О.Г., Сніжко С.І.** (2021). Аналіз локальних кліматичних зон міста Києва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Серія: Географія*, 3(80) 31–36. (Особистий внесок здобувача: охарактеризовано класифікацію локальних кліматичних зон, виконано ідентифікацію локальних кліматичних зон, інтерпретація отриманих результатів).

Статті у фахових наукових виданнях України та за кордоном, що входять до міжнародних наукометричних баз даних

3. **Shevchenko O., Snizhko S., Matviienko M.** (2019). Simulation of the thermal comfort conditions of urban areas: A case study in Kyiv. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Серія Геологія. Географія. Екологія*, 51, 186–198. (0,7 д.а. (Особистий внесок здобувача: виконано моделювання поля температури та вітру, здійснено розрахунок фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).
4. **Shevchenko O., Snizhko S., Matviienko M.** (2019). Human-biometeorological assessment of Kharkiv (Ukraine) in summer season. *Croatian Meteorological Journal*, 54/55(54/55), 43–54. (Особистий внесок здобувача: здійснено збір даних та розрахунок фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).
5. **Shevchenko O., Snizhko S., Zapototskyi S., Svintsitska H., Matviienko M., Matzarakis A.** (2022). Long-term analysis of thermal comfort conditions during heat waves in Ukraine. *Geographia Polonica*, 95(1), 53–70. (Особистий внесок здобувача:

виконано збір даних, ідентифіковано випадки хвиль тепла, здійснено розрахунок фізично-еквівалентної температури, побудова карт).

Статті в інших наукових виданнях

6. **Шевченко О.Г., Сніжко С.І., Матвієнко М.О.** (2021). Біокліматичні умови у м. Львові під час проявів хвиль тепла. *Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів* Випуск 1(1), 15–23. (Особистий внесок здобувача: ідентифіковано випадки хвиль тепла, здійснено розрахунок фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).

Опубліковані наукові праці апробаційного характеру

7. **Матвієнко М.О.** (2018). Біоклімат великого міста в літній період (на прикладі житлового масиву Теремки-2 у м. Києві). «Молоді науковці – географічній науці» збірник наукових праць XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ.

8. **Матвієнко М.О.** (2019). Особливості міського острова тепла в Харкова. Міжнародна науково-практична конференція «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень». Київ.

9. **Матвієнко М.О., Шевченко О.Г.** (2020). Моделювання біокліматичних особливостей в межах складної міської забудови за допомогою моделі «SKYHELIOS». «Шевченківська весна – 2020: Географія» Збірник наукових праць XVIII міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ. (Особистий внесок здобувача: виконано моделювання фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).

10. **Shevchenko O., Snizhko S., Matviienko M.** (2020). A GIS and WUDAPT based mapping of the local climate zones in Ukrainian cities. *Geoinformatics 2020*. Київ. (Особистий внесок здобувача: виконано ідентифікацію локальних кліматичних зон в Україні, інтерпретація отриманих результатів).

11. **Матвієнко М.О, Шевченко О.Г.** (2020). Характеристика біокліматичних умов міста Харкова в літні місяці. *«Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» матеріали VIII Міжнародної наукової конференції молодих вчених.* Харків. (Особистий внесок здобувача: ідентифіковано випадки хвиль тепла, здійснено аналіз тривалості та інтенсивності випадків хвиль тепла).

12. **Матвієнко М.О.** (2021). Біокліматичні особливості в межах міської забудови за різних типів погоди. *Шевченківська весна – 2021. Географія: Збірник наукових праць XIX міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених.* Київ.

Брала участь в українських та міжнародних конференціях, а саме:

1. «Молоді науковці – географічній науці», всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених., 15–16 листопада 2018 року, Київ, Україна (доповідь)
2. Міжнародна науково-практична конференція «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень». Київ, Україна (доповідь)
3. «Шевченківська весна – 2020:Географія», XVIII міжнародна наукова міждисциплінарна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 15 квітня, 2020 року, Київ, Україна (доповідь)
4. Geoinformatics 2020, 11–14 травня 2020 року, Київ, Україна (доповідь)
5. VIII Міжнародної наукової конференції молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», 26–27 листопада 2020 року, Харків, Україна (доповідь)
6. XIX міжнародна наукова міждисциплінарна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 20 квітня 2021 року, Київ, Україна (доповідь)

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ ТА БІОКЛІМАТИЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВЕЛИКИХ МІСТ	23
1.1 Особливості радіаційного та теплового балансів у місті.....	26
1.2 Тепловий режим міст та острів тепла	30
1.3 Режим вологості повітря	35
1.4 Вітровий режим міста	36
1.5 Основні підходи до оцінки біоклімату	38
1.6 Локальні кліматичні зони.....	42
1.7 Сучасні підходи до дослідження мікроклімату та біокліматичних умов великих міст.....	47
Висновки до 1 розділу	51
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	53
2.1 Характеристика території дослідження	53
2.2 Методика досліджень	59
2.2.1 Методика дослідження локальних кліматичних зон великих міст за допомогою WUDAPT	59
2.2.2 Модель «RayMan» – як інструмент для оцінки біоклімату	66
2.2.3 Просторова мікромаштабна модель «SkyHelios»	68
2.3 Характеристика вихідних даних.....	74
Висновки до 2 розділу	76
РОЗДІЛ 3. БІОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ВЕЛИКИХ МІСТ ПІД ЧАС ХВИЛЬ ТЕПЛА.....	78
3.1 Просторово–часова мінливість випадків ХТ та характеристика їх тривалості	79
3.2 Біокліматичні умови під час ХТ	83

	15
Висновки до розділу 3	88
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА МІКРОКЛІМАТУ ТА БІОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ В МЕЖАХ РІЗНИХ ЛОКАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗОН ВЕЛИКИХ МІСТ	90
4.1 Аналіз локальних кліматичних зон міст України.....	90
4.1.1 Характеристика локальних кліматичних зон міста Києва.....	94
4.1.2 Температурний режим підстильної поверхні ЛКЗ Києва.....	98
4.2 Оцінка відмінностей біокліматичних умов в межах локальних кліматичних зон за різних погодних умов	103
Висновки до 4 розділу	145
ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	171

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

БІ – біокліматичні індекси;

ГІС – геоінформаційні системи;

ЛКЗ – локальні кліматичні зони (англ. – Local Climate Zone);

ОПР – область потрібного регіону (англ. – region of interest);

ОТ – острів тепла;

СЛЧ – східноєвропейський літній час;

ТА – навчальні зони (англ. – training areas);

ТПП – температура підстильної поверхні;

ФВН – фактор відкритого неба;

ФЕТ – фізіологічно-еквівалентна температура;

ХТ – хвиля тепла;

ВUA – забудованою територією (англ. – built-up area);

CFD – моделях обчислювальної гідродинаміки (англ. – Computational fluid dynamics models);

EBM – моделі енергетичного балансу (англ. – Energy Balance Models);

MEMI – модель енергетичного балансу людини (англ. – Munich energy balance model for individuals);

WUDAPT – World Urban Database and Tools Portal

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вивчення мікроклімату та оцінка біокліматичних умов міст є провідними науковими напрямками урбометеорології, які останнім часом активно розвиваються. Зростання міського населення, збільшення розміру урбанізованого середовища істотно змінює природні поверхні, що призводить до формування специфічного мікро- і біоклімату та спричинює ряд екологічних проблем. В умовах зміни клімату, що проявляється у збільшенні температури повітря, а також в зростанні інтенсивності та частоти виникнення екстремальних погодних явищ, таких як хвилі тепла (ХТ), міста все частіше зазнають негативного впливу високих температур. Міська морфологія, що сприяє розвитку острова тепла, може суттєво посилювати теплове навантаження на мешканців міст у літній період. Менш комфортний біоклімат урбанізованого середовища може негативно впливати на людське самопочуття та здоров'я і таким чином робити міста некомфортними для проживання. Саме тому дослідження мікроклімату та біокліматичних особливостей міст набуває все більшої актуальності, адже це може допомогти зробити місто комфортнішим та мінімізувати негативний вплив спеки на його мешканців.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Результати дисертації отримано у рамках виконання науково-дослідної тематики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, зокрема НДР «Гідроекологічна оцінка та прогноз гідроенергетичного потенціалу річок України в умовах кліматичних змін», НДР № 0118U001098 (2018–2020 рр.).

Окремі завдання дослідження реалізовано в рамках міжнародного проекту «ЕСОІМПАСТ» програми «ERASMUS+» 561975-EPP-1-2015-1-FI-EPPKA2-SBHE-JP – «Adaptive learning environment for competence in economic and societal impacts of local weather, air quality and climate» (2015–2019 рр.).

Об'єктом дисертаційного дослідження є особливості мікроклімату та біокліматичних умов великих міст. **Предметом** є моделювання особливостей мікро- та біоклімату великих міст.

Метою дисертаційного дослідження є оцінка мікроклімату та біокліматичних умов великих міст з використанням нових методологічних підходів та технологічних засобів на основі новітніх програмних продуктів з високою просторовою роздільною здатністю, спрямованих на обчислення потоків випромінювання в складному урбанізованому середовищі.

Для досягнення вказаної мети були сформульовані наступні задачі:

- проаналізувати результати сучасних досліджень та визначити основні закономірності формування мікро- та біоклімату великих міст;
- проаналізувати доступні новітні програмні продукти для урбометеорологічних досліджень, здійснити вибір найбільш прийнятних інструментів для оцінки теплового стресу у великих містах;
- здійснити оцінку біокліматичних умов великих міст України під час хвиль тепла;
- ідентифікувати локальні кліматичні зони (ЛКЗ) в межах великих міст України;
- оцінити температурний режим підстильних поверхонь в межах різних локальних кліматичних зон;
- здійснити моделювання та аналіз біокліматичних умов для різних ЛКЗ за різних типів погодних ситуацій.

Матеріали та методи дослідження. Для реалізації задач дослідження були застосовані специфічні та загально-наукові методи (зокрема, системний, порівняльний, моделювання, структурного аналізу і синтезу, математико-статистичний, аналіз природних та антропогенних зв'язків, тощо). Моделювання біоклімату в межах локальних кліматичних зон великого міста здійснено з використанням тривимірної урбометеорологічної мікромасштабної моделі «SkyHelios». Оцінка теплового стресу під час хвиль тепла (що ґрунтувалася на використанні сучасного біокліматичного індексу – фізіологічно-еквівалентної температури) реалізована за допомогою моделі «RayMan». Статистична обробка та графічне представлення значень ФЕТ виконано за допомогою персонального комп'ютера програмами «Microsoft Excel». Побудова картографічного матеріалу

здійснена за допомогою програми «ArcMap 10». Аналіз локальних кліматичних зон у великих містах реалізовано за методологією міжнародного проекту WUDAPT (World Urban Database and Tools Portal, <https://www.wudapt.org/>).

Для дослідження випадків хвиль тепла була використана інформація про максимальну добову температуру повітря за червень–серпень 1961–2020 рр. для 21 міста, які рівномірно розташовані по території України. Інформаційною базою оцінки теплового стресу під час хвиль тепла були дані про температуру та вологість повітря, швидкість вітру та кількість хмар о 15.00 год за східноєвропейським літнім часом (СЛЧ).

Ідентифікація локальних кліматичних зон у містах ґрунтувалася на матеріалах проекту WUDAPT та супутникових знімках Landsat–8 OLI/TIRS C1 Level–1. Основою для дослідження температурного режиму підстильної поверхні ЛКЗ Києва слугували сцени Landsat–8 OLI/TIRS C1 Level–1, що завантажені з вебсайту Геологічної служби США (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Для детального аналізу біокліматичних умов в межах різних типів забудови в якості вхідної інформації для моделювання ФЕТ були використані значення температури та вологості повітря, швидкості і напрямку вітру та хмарність за 00:00, 06:00, 12:00 та 18:00 СЛЧ, виміряні на метеорологічній Київ за умов різних синоптичних ситуацій (див. додатки В та Г).

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- ґрунтуючись на результатах моделювання біокліматичних умов для різних ЛКЗ м. Києва за різних типів погоди, отриманих за допомогою моделі «SkyHelios», показано наявність значних амплітуд рівня теплового навантаження навіть в межах незначних ділянок зі складною міською забудовою;
- в результаті аналізу локальних кліматичних зон міста Києва встановлено наявність значних відмінностей у співвідношенні між площами

різних ЛКЗ в адміністративних межах міста та в межах його реально забудованої території;

- встановлено наявність чіткого взаємозв'язку між різними типами ЛКЗ і температурами підстильних поверхонь у м. Києві;

- ґрунтуючись на використанні сучасного індексу фізіологічно-еквівалентної температури (ФЕТ), отриманого за допомогою моделі «RayMan», оцінено інтенсивність теплового стресу у великих містах України під час випадків ХТ;

Удосконалено:

підходи до оцінки термічного навантаження на людину під час випадків хвиль тепла;

підходи до ідентифікації локальних кліматичних зон у містах.

Дістали подальший розвиток:

- моделювання теплового навантаження на людський організм на основі моделі «SkyHelios»;

- дослідження біоклімату великих міст з використанням фізіологічно-еквівалентної температури (ФЕТ) – сучасного біокліматичного індексу, який ґрунтується на енергетичному балансі людини;

- знання щодо просторово-часового розподілу хвиль тепла на території України за багаторічний період.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові результати дисертаційного дослідження можуть застосовуватися для вирішення ряду наукових та практичних задач урбометеорології та міського планування. Зокрема, при проектуванні житлової забудови з метою створення сприятливого комфортного середовища для проживання людини, а також при розробці та впровадженні заходів адаптації до теплового стресу у великих містах.

Результати дослідження використовуються під час викладання курсів «Основи біометеорології» та «Урбометеорологія» під час підготовки бакалаврів та магістрів

на географічному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Особистий внесок здобувача. Основні результати та положення представленого дослідження отримані автором самостійно. Автор дисертації особисто здійснив підбір та аналіз літературних джерел за тематикою дослідження, аналіз локальних кліматичних зон в межах великих міст України, оцінку температурного режиму підстильних поверхонь різних ЛКЗ, моделювання теплового стресу для людини під час випадків хвиль тепла з використанням моделі «RayMan» та моделювання біокліматичних умов у межах різних ЛКЗ за допомогою моделі «SkyHelios». Спільно з науковим керівником Шевченко О.Г. здійснено постановку мети та задач дослідження, розроблено методологію їх реалізації, інтерпретовано основні одержані результати. Особистий внесок автора у наукові праці, які опубліковані у співавторстві, конкретизовано у списку публікацій.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи представлені на XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молоді науковці – географічній науці» (м. Київ, 2018), Міжнародній науково-практичній конференції «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень» (м. Київ, 2019), XVIII Міжнародній науковій міждисциплінарній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Шевченківська весна-2020» (м. Київ, 2020), XIX Міжнародній конференції «Геоінформатика: теоретична та прикладні аспекти» (м. Київ, 2020), VIII Міжнародній науковій конференції молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» (м. Харків, 2020), XIX Міжнародній науковій міждисциплінарній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Шевченківська весна-2021» (м. Київ, 2021).

Публікації. Наукові результати дисертації відображено у 12 наукових працях. З яких 2 – у фахових періодичних виданнях України, 3 статті у міжнародних наукових журналах, які індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus

і WoS, 6 матеріалів і тез доповідей міжнародних конференцій та 1 стаття, що додатково відображає результати дисертаційного дослідження.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел (205 найменувань) та 17 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 297 сторінок, з яких 151 сторінок основного тексту (5,7 д.а.). Робота містить 45 рисунків та 18 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ ТА БІОКЛІМАТИЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВЕЛИКИХ МІСТ

Вивчення клімату міст є одним з напрямків кліматології, що активно розвиваються останнім часом. Урбанізація, зростання кількості та розмірів міст, як правило, формують своєрідний клімат, що буде відрізнятися від клімату сільської місцевості. Швидка урбанізація зазвичай супроводжується значним збільшенням розмірів міст та як правило зменшенням рослинного покриву. Бетонні поверхні та непроникні дорожні покриття, значно відрізняються від природних, вони поглинають більшу кількість сонячного випромінювання, та характеризуються значно вищою температурою. Висотна забудова створює бар'єр, що ускладнює надходження свіжого повітря та його циркуляцію. Збільшення розміру міста призводить до того, що як правило, периферія або передмістя забудовуються новими житловими комплексами, торгівельними центрами, що впливатиме на вітровий режим, радіаційний та тепловий баланс міста. Серед найбільш поширених типів забудови [16, 24], можна виділити три умовні або спрощені типи архітектурно-містобудівного ландшафту міст:

- «місто-чаша», що характеризується малоповерховою забудовою в центрі зі збільшенням висоти до периферії міста. Такий тип забудови спостерігається у багатьох сучасних містах, що розвиваються навколо малоповерхової історичної забудови центру міста.

- «місто-пагорб», де багатоповерхова забудова поступово змінюється на малоповерхову з центру до периферії міста.

- «місто-рівнина» має рівномірною висоту забудови.

Перші дослідження клімату міст проводилися на порівнянні виміряних значень метеорологічних величин між міською метеорологічною станцією та селом чи найближчим містечком, або між міською та станцією, що розташована в передмісті. Цілком очевидно, що такий підхід не може залишатися основним для урбометеорологічних досліджень, адже сучасне місто характеризується складною

морфологією, де в межах міста можуть спостерігатися малоповерхові будинки з присадибною земельною ділянкою, а в передмісті – висотна забудова.

Вплив міста на його клімат почав вивчатися ще в XIX ст. На основі перших систематичних спостережень британський метеоролог Люк Говард опублікував книгу «Клімат Лондона», яка є першою монографією, що присвячена клімату міста. У своїй книзі Л. Говард виділив найбільш важливу зміну метеорологічного режиму в місті, а саме – існування міського острова тепла, та навів опис кількох випадків «міського туману» (термін, введений ним) [6]. Через кілька десятиліть Е. Рено описав температурні відмінності Парижу від прилеглої сільської місцевості. Ним були встановлені відмінності температури в межах 1–2°C. Крім того, Е. Рено відзначав, що швидкість вітру в місті менша, ніж в сільській місцевості [6]. В. Шмідт в 1917 році першим ввів у практику вимірювань використання автомобілів, обладнаних відповідними приладами. Результати таких «маршрутних спостережень» дали змогу побудувати ізотермічну карту для Відня та його околиць, що дало можливість отримати чітке зображення температурного режиму міста [6].

Систематична дослідження клімату міст розпочалися в 1937 році. Тоді німець Альберт Крацер, пізніше всесвітньо відомий як "батько міської кліматології", зібравши всі попередні дослідження – опублікував монографію "Міський клімат" (англійська версія 1956 р.), в якій, вперше було висвітлено вплив містобудування та будівництва на якість повітря та клімат. В 1956 р. Т. Чандлер публікує перший опис лондонського острова тепла, з його просторовими зображеннями [59]. На початку 1970 років був започаткований перший міський метеорологічний експеримент METROMEX (the Metropolitan meteorological experiment), який проводився в місті Сент-Луїс (США). Результати отриманих досліджень включено в огляд міського клімату зробленого Т. Оке в 1970-х роках [151]. У 1981 році Г. Ландсберг публікує книгу «Клімат міста», у якій зібрана більшість попередніх дослідження міського клімату та результати експерименту – METROMEX.

Після емпіричних досліджень клімату міст, міська метеорологія почала використовувати методи чисельного та лабораторного моделювання. З 1960-х років

починаються найперші спроби моделювати атмосферу міст з метою вивчення одиничного джерела та дифузії аерозолів [82] та з'являються перші моделі острову тепла [53, 119, 158]. Протягом 1980-х років в моделюванні мікроклімату почали розглядати такі питання як: потоки тепла та різниці температури поверхонь над містом та заміською територією [58], аналіз енергетичного балансу міст з різними типами забудови [188] та моделювання міського каньйону [41]. Почали з'являтися перші спроби моделювання шорсткості міської поверхні та відповідно моделювання аеродинамічних умов забудови [54, 91].

В наступні роки відбулися значні успіхи в моделях, які моделюють енергетичний баланс міських поверхонь (англ. – surface energy balance – SEB) [52, 128]. Поєднання моделей SEB з моделями атмосфери дало змогу моделювати і, зрештою, прогнозувати кліматичні умови міста, зокрема, циркуляцію острову тепла в граничному шарі міста. Найпростішою з таких моделей є модель NARP-LUMPS [90, 147]. Модель враховує метеорологічні дані (такі як сонячна радіація, температура, швидкість вітру) у поєднанні з морфологічними особливостями (висота будівель та тип поверхонь, бетонна чи рослинна) для імітації всіх енергетичних потоків у SEB в межах забудови. В цей період з'являються більш складні моделі міського піддахового шару (англ. – Urban Canopy Layer). Моделювання почало включати тривимірну форму будівлі, почали вирішуватись окремі енергетичні задачі дахів, доріг та стін. Такі моделі можна поділити на одношарові моделі, де існує безпосередня взаємодія лише з одним шаром атмосфери та багатшарові моделі, які поширюють вплив міської території в граничному шарі атмосфери. Зміни відбулися і в моделях обчислювальної динаміки рідин (англ. – Computational fluid dynamics models, CFD). CFD-моделі й сьогодні залишаються вживаними для дослідження клімату міст [184].

Крім чисельних інструментів моделювання, в урбометеорологічних дослідженнях також можуть застосовуватися географічні інформаційні системи (ГІС), оскільки вони мають можливість обробляти та представляти табличні дані, розпізнавати морфологію міського простору, дозволяють включати нові методи в територіальному плануванні та можуть прогнозувати температуру повітря та

розташування острову тепла. К. Наката-Осакі, Л. Соуза та Д. Родрігес [145] розробили інструмент THIS (Tool for Heat Island Simulation), який включений в систему ГІС, для розрахунку максимальної інтенсивності ОТ (UHI_{max}) на основі даних геометрії міст (за допомогою співвідношення висота/ширина міського каньйону). В цілому розроблений інструмент має одну мету: імітувати вплив ізольованої змінної міської геометрії на максимальну інтенсивність нічних теплових островів з урахуванням різної міської геометрії. С. Квін, Ци Лі, Г. Огенбро, Дж. Браун та П. Ян [159], наприклад, розробили енергетичну модель міської будівлі в системі ГІС. На базі ГІС, було розроблено веб-калькулятор STEVE для прогнозу температури повітря. Цей інструмент може бути використаний для оцінки існуючого стану та оцінки змін з майбутнім перепланування забудови [108]. Методи ГІС часто використовуються в поєднанні з даними дистанційного зондування Землі [44, 195].

1.1 Особливості радіаційного та теплового балансів у місті

Сонячна радіація є найважливішим кліматоутворюючим чинником. На земну поверхню потік сонячної радіації надходить у вигляді прямої і розсіяної радіації. Проте у містах за рахунок різної висоти, орієнтації та експозиції будівель, а також відмінностей їх теплофізичних властивостей (таких як поглинаюча та відбивна здатність) радіаційний баланс у місті порівняно із заміськими територіями характеризується суттєвими відмінностями.

Вже давно відомо, що на територію, зайняту містом, потрапляє менше сонячного світла, ніж на навколишню місцевість. Це без сумніву ефект міста, оскільки тривалість сонячного сьйва регулюється загальним станом погоди, а згадані відмінності на малих площах можуть бути обумовлені тільки локальними причинами. Дослідження зроблене А. Кремснунстером в 1896 році стало першим дослідженням зміни сонячної радіації в містах, а втрата інтенсивності випромінювання вперше вимірювалася в 1922 році Л. Бессоном для Парижу [112]. Внаслідок забруднення атмосферного повітря твердими та рідкими зваженими

частинками (аерозолями) відбувається послаблення потоку сонячної радіації. Частина сонячної радіації не проникає на територію міста, а в залежності від ступеня забруднення, сезону року та часу доби може спостерігатися зниження її інтенсивності до 20% [21].

Одним із перших, хто звернув увагу на відмінності в тривалості сонячного сяйва по місту та в сільській місцевості вважають Чандлера [60], він зазначив, що в центрі Лондона тривалість сонячного сяйва на 16%, а в передмістях на 5% менше, ніж в прилеглій сільській місцевості.

Послаблення прямої сонячної радіації в місті відбувається не тільки за рахунок погіршення прозорості міського повітря, але і за рахунок збільшення в місті хмарності. Будь яка хмарність знижує кількість прямої сонячної радіації, але розсіяна за рахунок хмарності може, як зменшуватися, так і збільшуватися [16].

На формування радіаційного балансу території суттєвий вплив має альbedo, що характеризує відбивну здатність усіх штучних і природних поверхонь. Штучні поверхні як правило характеризуються значно нижчим значенням альbedo (табл. 1.1), і відповідно поглинають більше сонячної радіації та більше нагріваються [25].

Таблиця 1.1 [25].

Значення альbedo для типових природних та штучних поверхонь.

Поверхня	Значення альbedo
Штучні поверхні	
Асфальт	5–20%
Бетон	10–35%
Цегла	20–40%
Гофроване залізо	19–16%
Свіжопофарбовані біле	50–90%
Пофарбовані поверхні	15–35%

Продовження таблиці 1.1

Чисте скло	8%
Природні поверхні	
Ліс	7–20%
Трава	25–30%
Дерева	15–18%
Чистий сніг	70–90%
Пісок світлий	35–40%
Ґрунт вологий	10–25%
Сухий	29–49%

Дослідження [113] показали, що дохідна частина радіаційного балансу в денний час в місті зазвичай менша, ніж на навколишній території. Разом з тим, складова його витратної частини – відбивання від міських поверхонь (вдень) в місті також нижче, ніж над природною поверхнею навколишньої території. В холодний період року з сніговим покривом альbedo складає в середньому на початку – 30%, в січні – лютому 50–55%, а в дні зі щойно випавши снігом його значення зростає до 70–80%.

Одним з важливих чинником, що призводить до зміни значень складових радіаційного балансу міста є його морфологія (або геометрія міста). Адже ширина та орієнтація вулиць та висота забудови формують своєрідні радіаційні умови вулиць і площ, стін і внутрішніх частин будівель. Зростання висоти забудови призведе до зростання взаємного відбивання та поглинання радіації в її межах. Сонячна радіація, яка надходить всередину міської забудови, падаючи на різні «грані» міської забудови (стінки та дахи будинків, ділянки рельєфу, на якому розташовані будинки), послідовно відбивається і передається на інші її грані, при цьому втрачаючи частину своєї енергії. Кожна з таких «граней» сама по собі складається з різних по відбивній здатності поверхонь. У результаті, при кожному перевідбиванні «гранями» додатково поглинається якась частина цієї радіації а загальне поглинання радіації кожної із «граней» стає більшим, ніж у аналогічної

відбивної здатності грані у випадку, якби вони була розташована на відкритому просторі [16].

Орієнтація вулиць впливає на проникнення прямих сонячних променів до поверхні вулиці [25]. Якщо вулиці орієнтовані в напрямку північ-південь, то пряме сонячне проміння потраплятиме на них тільки в обідній час, причому тривалість цього випромінювання протягом року залежить від висоти навколишніх будинків і ширини вулиць [113].

Тепловий баланс та радіаційний баланс тісно пов'язані один з одним. Тепловий баланс міста значно складніший за тепловий баланс природної території (рис. 1.1), в основному через людську діяльність. Розрахунок теплового балансу міської території включає [149]:

Q^* – сумарний радіаційний баланс;

Q_F – додаткові джерела енергії такі як антропогенний потік тепла (Q_F), тобто те тепло що надходить в атмосферу від транспорту, від будинків чи інших видів людської діяльності

Q_H – передача тепла між атмосферою та землею;

Q_E – приховане тепло, що виділяється або поглинається при зміні стану води;

Q_G – теплообмін між підстильною поверхнею та нижче розташованими поверхнями.

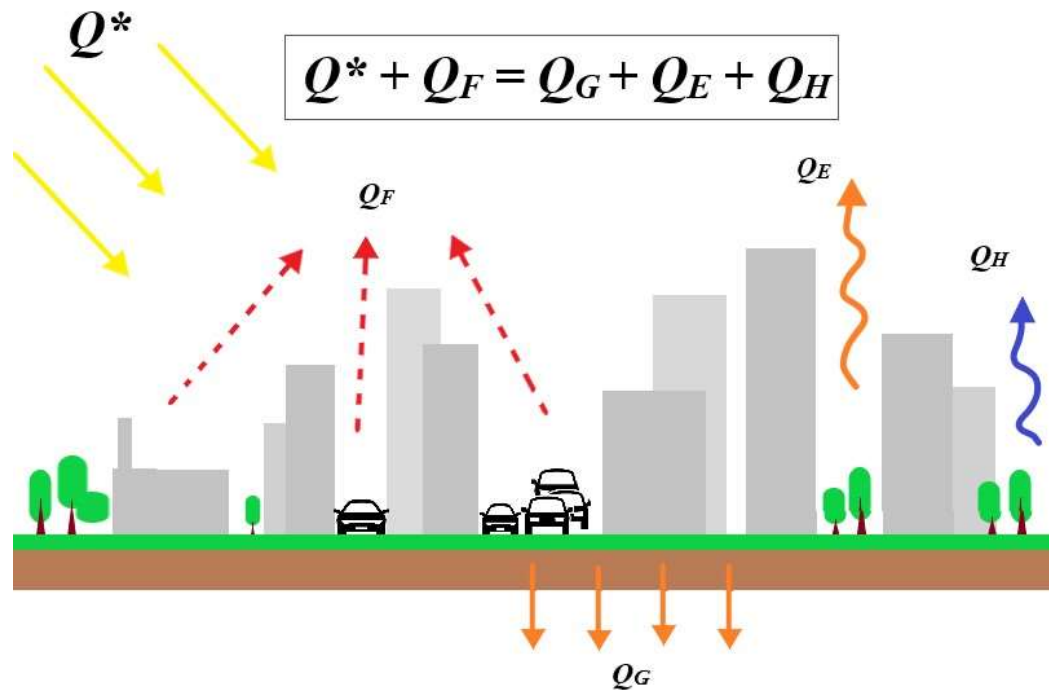


Рис.1.1 Тепловий баланс міста.

На тепловий баланс міста також можуть впливати процеси метаболізму людини і тварин [6, 185]. Для міського населення в мільйон жителів та відповідної кількості домашніх тварин тепло, що виділяється в процесах метаболізму, становить приблизно 5,3–1015 Дж. Залежно від інших антропогенних джерел надходження тепла, наведене значення не перевищує 3–4% прибуткової частини сумарного теплового балансу міста, найчастіше воно сягає менше 1%, тому при розрахунку теплового балансу міста цією компонентною, як правило, нехтують [6].

1.2 Тепловий режим міст та острів тепла

Специфічний термічний режим великих міст є найвідомішою особливістю їх клімату. Температурні відмінності між міською територією та сільською залежать від низки чинників, таких як розміри міста, щільність забудови території та синоптичних умов. Про температурні відмінності міського середовища порівняно з сільською територією було відомо вже у XIX столітті [6]. Найважливішою особливістю мікроклімату міста є існування острова тепла (ОТ), тобто підвищення

температури повітря порівняно із замиською територією. Термін ОТ був введений Люком Говардом у 1820 році для позначення температурного феномену у Лондоні. Робота розпочата Говардом заклала основу для подальших досліджень міського клімату та ОТ. Було встановлено, що формування острова тепла тісно пов'язано з властивостями та структурою підстильної поверхні, міською рослинністю, виділенням тепла в місті, щільністю населення та погодними умовами.

Аномальні температури на території міста спостерігаються не тільки біля поверхні землі, але й на вищих рівнях. Як свідчать результати досліджень різних авторів, вертикальна протяжність острова тепла в різних містах може відрізнятись. Тепловий вплив міста досить чітко проявляється в нижньому 100–500 метровому шарі [60], але в окремих випадках сягає 500–1500 м [25]. На рис.1.2 графічно відображено просторову структуру острова тепла. Контрасти температури найяскравіше виявляються в ясну спокійну погоду і зникають за умов сильної хмарності та вітру.

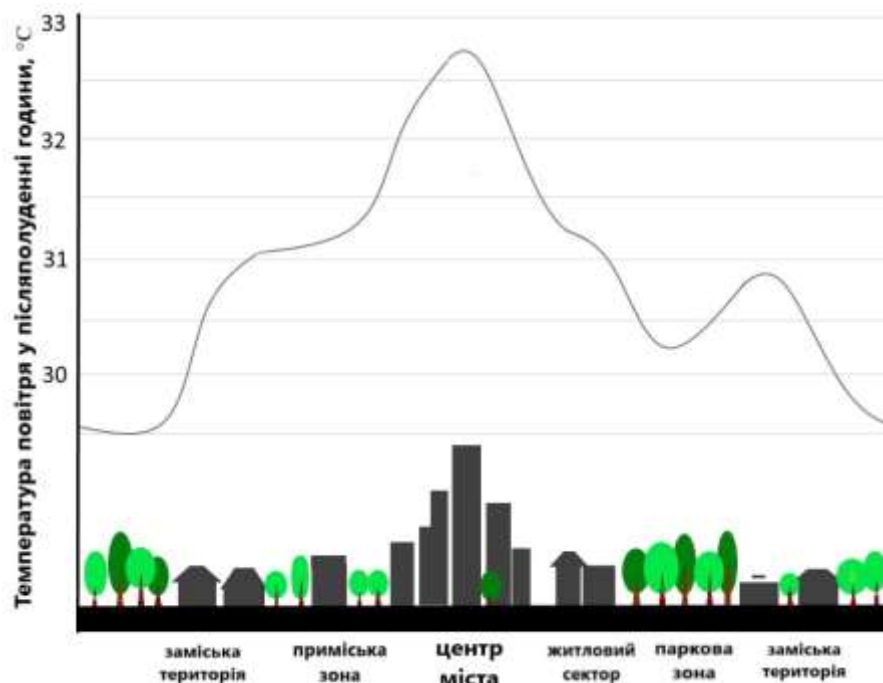


Рис.1.2 Температурні аномалії в післяполуденні години (рисунок підготовано автором за матеріалами [191]).

Максимальний розвиток островів тепла відбувається в нічні години, коли спостерігається максимальна різниця між температурами в місті та на його околицях. За досить стійких погодних умов інтенсивність ОТ має чітко виражений

добовий хід з максимумом через кілька годин після заходу сонця та мінімумом у середині дня. Вночі в теплу пору року в більшості випадків в місті значно тепліше ніж на його околицях. Протягом 2–3 годин після сходу сонця температура повітря у забудові може бути дещо нижчою, ніж у передмісті. Це відбувається за рахунок затінення земної поверхні в місті будинками та як наслідок, менш інтенсивного прогрівання повітря [182]. У сонячну безвітряну погоду відмінність температур між містом та сільською місцевістю буває незначною, але швидко збільшується після заходу сонця і зберігається упродовж всієї ночі. У дослідженні, проведеному в Афінах, відмічається, що максимальна інтенсивність міського ОТ виявляється близько півночі [87], а за даними Р. Хамді та Г. Шаєс [97] найбільша інтенсивність ОТ для міста Базеля (Швейцарія) спостерігається в період після заходу сонця (23:00 годині).

В холодну пору року ситуація дещо інша – частіше за все максимальні температури в місті та на його околицях однакові. Мінімальні ж – в більшості випадків теж вищі в місті, ніж на околицях, як і в теплу пору. Таким чином, можна зробити висновок про те, що у великому місті існування острова тепла спостерігаються і в теплу, і в холодну пору року, але в холодну пору температурний контраст між містом і околицею стійкіший упродовж доби, хоч і не так яскраво виражений.

Залежно від висоти на якій спостерігається ОТ виділяють кілька його типів [150]:

- Міський підземний ОТ (англ. – Subsurface urban heat island, UHISub), що визначатиметься, як різниця між температурою в ґрунті під містом (включаючи міські ґрунти та підземні споруди), та околицями міста або сільською місцевістю.
- Поверхневий міський ОТ (англ. – Surface urban heat island, UHISurf).
- Міський ОТ, що спостерігається в піддаховому шарі (англ. – Canopy layer urban heat island, UHIUCL). Піддаховий шар охоплює простір між міською підстильною поверхнею та середньою висотою дахів міста.

- Міський ОТ граничного шару (англ. – Boundary layer urban heat island, UHIUBL) – коли позитивні температурні аномалії спостерігаються в граничному шарі атмосфери міста. .

Накопичена інформація про інтенсивність, просторову і вертикальну структури, динаміку острову тепла були узагальненні Т. Оке в 1982 році [148]. Хоча ці дослідження були опубліковані 40 років тому, узагальнення, які були запропоновані в основному залишаються незмінними, до того ж значна частина цієї роботи підтверджується подальшими дослідженнями ОТ:

- зменшення інтенсивності ОТ зі збільшенням швидкості вітру та з посиленням хмарного покриву [35, 55, 126, 142, 154, 194];
- інтенсивність ОТ найбільша в антициклонічних умовах в літню або теплу половину року [12, 141, 156, 166, 171, 197];
- інтенсивність ОТ має тенденцію до збільшення зі збільшенням розмірів міста та/або кількості населення [55, 125, 154];
- інтенсивність ОТ найбільша вночі [125, 143, 187].

Як вже зазначалося вище, інтенсивність ОТ міста також пов'язана зі збільшенням кількості населення в місті. Дослідники вивчили ці залежності, вимірюючи параметри мікроклімату в 10 містах Канади з різною чисельністю населення від 1000 до 2 мільйонів чоловік. Вимірювання проводили ввечері, після заходу сонця, коли явище ОТ досягає своєї максимальної інтенсивності. Результати показали, що різниця температур у міській та сільській місцевості становить 2°C для міст з населенням 1000 жителів і 12°C для міст з населенням 2 мільйони [151].

Серед чинників, які впливають на формування та інтенсивність ОТ виділяють наступні [24]:

1. Погода. Найбільшого впливу має хмарність та вітер, адже суттєва хмарність та зростання швидкості вітру знижують ОТ.
2. Географічне положення впливатиме через клімат даного регіону.
3. Час доби та сезон.

4. Функції міста та людська діяльність. На інтенсивність ОТ впливатиме виділення антропогенного тепла в результаті роботи транспорту, опалення приміщень та інші види антропогенної діяльності людини.

5. Форма та розміри міста. Більші розміри міста збільшують інтенсивність ОТ.

6. Особливості рельєфу міста.

7. Водні об'єкти. Великі водойми здатні спричинювати зниження температури повітря.

8. Щільність забудови.

9. Рослинність.

Заходи спрямовані на мінімізацію інтенсивності островів тепла та пом'якшення наслідків їх існування у містах добре описала М. Сантаморів [168]. В 1998–2002 роках, в США був запущений проект Urban Heat Island Pilot Project (UHIPP), в якому взяли участь багато міст, такі як Чикаго, Х'юстон, Солт Лейк Сіті та інші [198]. Метою проекту UHIPP було надання допомоги містам у спробі оцінки острова тепла та розробці стратегій щодо його скорочення. Результати проекту були опубліковані в роботах [36, 66, 92].

На сьогодні для мінімізації ОТ багатьма дослідниками пропонуються спеціальні заходи пом'якшення та адаптації. Серед найбільш важливих запропонованих заходів є такі, що спрямовані на підвищення альbedo міських поверхонь, розширення зелених зон у містах та використання підходу природних тепловідводів (або пасивного охолодження), що контролює надходження тепла та його відведення [137]. Результати оцінки ефективності вище зазначених методів пом'якшення, свідчать про зниження температури повітря на 2–3°C [79, 88].

М. Сантаморіс, проаналізувавши заходи з пом'якшення наслідків острову тепла, поділила їх на дві основні групи [168]:

- заходи зі зменшення поглинання сонячної радіації в міських умовах. Це в основному досягається завдяки використанню матеріалів з високою відбивною здатністю. Такі матеріали, відомі, як прохолодні матеріали, їх можуть використовувати на фасадах будівель, дахах та тротуарах. Використання

прохолодних матеріалів зменшує температуру поверхні міських територій та мінімізує відповідно віддачу тепла в атмосферу;

- збільшення евапотранспірації в місті. Це може бути досягнуто завдяки інтенсивному використанню міських зелених насаджень, таких як міські парки та зелені дахи, а також використання водонепроникних тротуарів.

А. Мохаджерані [140] зробив огляд та докладно описав кожен захід з пом'якшення острова тепла та дійшов висновку, що заходи з пом'якшення ОТ найкраще використовуються в поєднанні один з одним, але при цьому необхідно враховувати геометрію міста та місцеві атмосферні умови. Інакше – на практиці це може збільшити інтенсивність острову тепла.

1.3 Режим вологості повітря

Вологість повітря у містах, як правило нижча порівняно з сільською місцевістю, хоча дуже рідко можуть фіксуватися і вищі значення вологості. До основних чинників, що призводять до зниження відносної вологості повітря у місті належать:

- існування ОТ [34, 99, 120, 172];
- збільшення частки водонепроникних поверхонь, які сприяють швидкому відведенню поверхневого стоку з території міста [105, 120, 123];
- зменшення евапотранспірації в місті. В центрах міст рослинності, як правило мало, тому випаровування в містах значно менше, ніж в сільській місцевості [98, 117].

Згідно з дослідженнями [34, 120], різниця вологості у місті та на прилеглих до нього територіях характеризується добовими та сезонними варіаціями. Найбільші відмінності в міських і сільських значеннях відносної вологості спостерігаються влітку. Крім того, той факт, що в зимовий час холодне повітря зазвичай близьке до насичення, виключає значні відмінності значень відносної вологості в цьому сезоні [81].

Причинами вищих значень вологості повітря у місті порівняно з сільською територією можуть бути викиди водяної пари з транспорту, промислових підприємств, електростанцій, а також передчасне танення снігу в місті [95, 115, 120]. Вищі значення вологості повітря в місті можуть спостерігатися під час ясних і літніх ночей зі слабкими швидкостями вітру [99, 115].

Отже, багато досліджень свідчать про відмінності значень відносної вологості у містах, що проявляються переважно у зниженні її значень, в наслідок вищих температур, збільшення водонепроникних поверхонь та зменшення евапотранспірації у містах.

1.4 Вітровий режим міста

Особливості вітрового режиму урбанізованого середовища обумовлені головним чином двома чинниками: характером підстильної поверхні та ОТ.

Ще напочатку ХХ століття було відзначено зменшення середньої швидкості вітру у великих містах [6]. Однією з основних причин зниження швидкості вітру в місті є збільшення висоти будівель та розширення забудованих територій [6, 124, 155]. Крім забудови, на зменшення швидкості вітру впливає також і рослинність. В літній сезон зелені дерева знижують швидкість вітру на 20–30%, а після опадання листя швидкість вітру в середньому збільшується на 25–40% [6].

М. Мягков [17] зазначав, що у більшості випадків вплив міської забудови на швидкість вітру виражається в збільшенні кількості днів зі штилем і зі слабким вітром (< 2 м/с) у місті та зниженні максимальної швидкості вітру в середньому на 10–30% у порівнянні з незабудованою приміською територією. Швидкість вітру може знижуватися на 70% всередині груп будівель, що утворюють замкнені і напівзамкнені внутрішньодворові простори.

Вертикальний профіль вітру в місті буде значно залежати від щільності, висоти, контрастності забудови та інших показників [17]. На рисунку 1.3 наведено класичну схему вертикального профілю швидкості вітру над центром міста, його периферією та над передмістям.

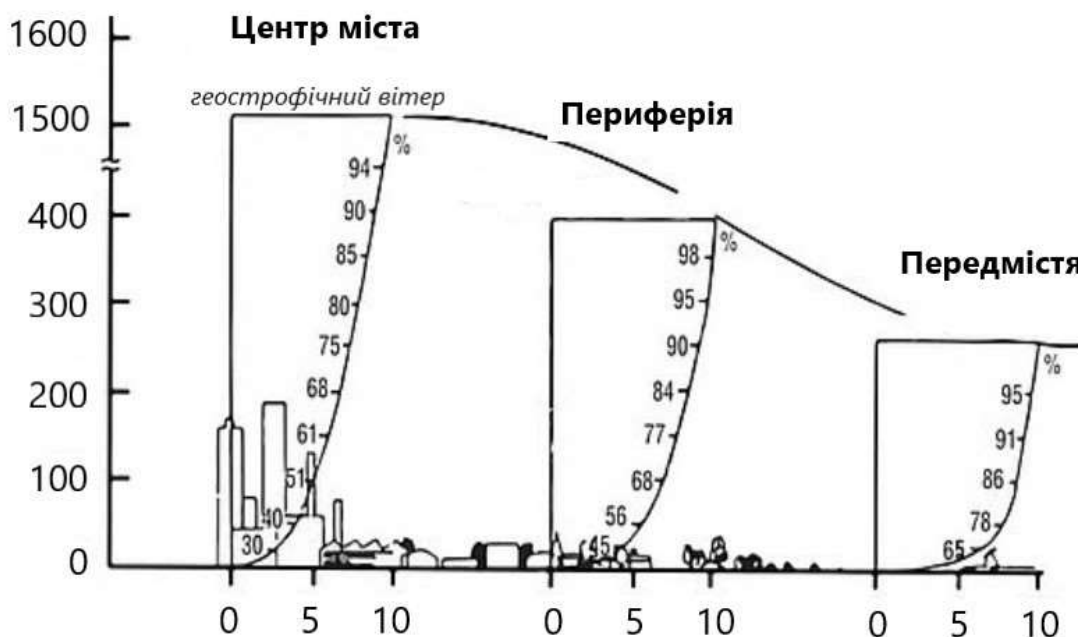


Рис.1.3 Схема вертикального профілю швидкості вітру [17].

Проте, в сучасному місті, коли спостерігається чергування забудови різної висоти, загальні відмінностей вітрового режиму будуть відрізнятися для «міста-чаша», «міста-пагорб» та «міста-рівнина» [24].

Послаблення повітряного потоку у місті відбувається за рахунок більшої шорсткості урбанізованих поверхонь порівняно з природними. Але за штильових умов швидкість вітру в місті може посилюватися через підвищену тепловіддачу в атмосферу [17]. ОТ, що характеризується вищими температурами в центрі міста, ніж на околиці, при слабкому вітрі (1–3 м/с) спричинює місцеву циркуляція «бризового типу». Повітряні потоки біля земної поверхні спрямовані від околиці міста до ОТ, і навпаки – від центру спостерігається відтік повітря до околиць міста. У зв'язку з цим на околицях міста можуть спостерігатись більші швидкості вітру порівняно з замиською територією та центром [24].

Поле вітру у міській забудові має складну структуру, оскільки на нього впливає розташування та розмір будівель, рельєф місцевості та наявність зелених насаджень. Наближаючись до перешкоди повітряний потік сповільнюється, та обтікає будівлю зверху, знизу та з боків [77]. У забудові можливе посилення вітру при співпадінні напрямку вітру з напрямком орієнтації вулиць, це відбувається

згідно ефекту Вентурі [26]. Ефект Вентурі виникає при проходженні повітряного потоку між двома висотними будинками, що розташованими досить близько один до одного (рис.1.4).

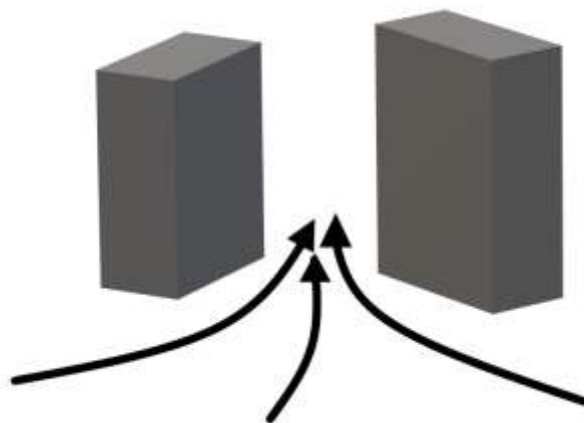


Рис.1.4 Ефект Вентурі.

Отже, зазвичай швидкість вітру у місті менша, ніж за його межами. Міська забудова та рослинність змінюють швидкість та напрямок вітру. Посилення вітру в забудові можливе згідно ефекту Вентурі. За штильових умов посилення вітру відбувається через ОТ.

1.5 Основні підходи до оцінки біоклімату

Погода та клімат впливають на здоров'я та самопочуття людини [23]. Складна міська морфологія суттєво впливає не тільки на мікроклімат, а й на біокліматичні умови урбанізованого середовища. Оцінка біокліматичних умов є необхідною при дослідженні клімату міст, адже несприятливий біоклімат знижує якість та комфортність проживання в місті та впливає на здоров'я його населення. Фундаментальні дослідження біоклімату міст почалися у ХХ столітті, проте ще у ХІХ столітті обговорювався вплив погоди на здоров'я людини. З 30-х до 60-х років

XX століття активно досліджувались такі явища, як чутливість до погоди та метеотропні захворювання [100].

Тепловий стан людини визначається трьома групами чинників: фізіологічним станом організму (перш за все – через теплопродукцію і терморегуляцію), одягом з теплоізоляційними властивостями та комплексом метеорологічних параметрів, основними з яких є температура та вологість повітря, сонячна радіація та швидкість вітру. Однакове тепловідчуття людина можна зазнавати при різних значеннях температури та вологості повітря чи швидкості вітру. На тепловий комфорт також впливають стать і вік людини, її місце проживання, культурні та національні особливості, стан її здоров'я та інше [23]. Наприклад, низька температура повітря є причиною холодового стресу, а разом з сильним вітром та підвищеною вологістю може істотно посилити холодове навантаження на організм. В літній період поєднання високої температури та високої вологості повітря, підвищуючи теплове навантаження, може викликати стан задухи.

У двадцятих роках XX століття для оцінки впливу метеорологічних умов на організм людини були розроблені комплексні показники так звані біокліматичні індекси (БІ) [23]. З часів появи першого біокліматичного індексу пройшло майже сто років і кількість різноманітних індексів, що використовуються для оцінки біоклімату на сьогодні налічує понад 160 [157]. Шевченко О.Г. [23] зазначає, що серед усіх існуючих на сьогодні класифікацій БІ найважливішим є поділ індексів на дві групи за чинниками, які враховуються при їх розрахунку. Виділяють індекси, які враховують лише метеорологічні параметри та індекси, які ґрунтуються на енергетичному балансі людини.

Розробка БІ, що ґрунтуються на енергетичному балансі людського організму розпочалася приблизно з 70-х років XX століття [100]. До таких індексів належать:

- Predicted Mean Vote (PMV);
- Фізіологічно-еквівалентна температура (ФЕТ);
- SET/Out_SET(Стандартна ефективна температура/Зовнішня стандартна ефективна температура);
- Perceived Temperature;

- Універсальний біометеорологічний індекс (UTCI).

Всі ці Бі включають важливі метеорологічні та термофізіологічні параметри.

ФЕТ визначається, як температура повітря, за якої у типовому приміщенні тепловий баланс людського тіла залишається незмінним зі значеннями температури шкіри та внутрішніх органів в умовах, що оцінюються [23, 100]. Основою для розрахунку ФЕТ є модель енергетичного балансу людини (англ. – Munich energy balance model for individuals (MEMI)), що базується на рівнянні енергетичного балансу людського організму [102]:

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \quad (1.1)$$

де M – швидкість метаболізму, W – фізична робота, R – випромінювання тіла, C – конвективний потік тепла, E_D - прихований тепловий потік для випаровування води з шкіри (непомітне потовиділення), E_{Re} – сума потоків тепла для нагрівання та зволоження повітря, яке вдихається, E_{Sw} – потік тепла за рахунок випаровування поту та S – запас потоку тепла для нагрівання або охолодження маси тіла. Одиницею вимірювання всіх потоків тепла є вати.

Деякі члени рівняння (1.1) залежать від середньої температури поверхні одягу (T_{cl}), середньої температури шкіри або швидкості потовиділення (T_{sk}) – основа для розрахунку E_{Sw} , а також від температури ядра тіла, що включає температуру крові та внутрішніх органів (T_c). Визначення цих невідомих величин виконується за рівняннями, що описують теплові потоки від ядра тіла до оболонки або поверхні шкіри (F_{cs}) – рівняння (1.2) та потоки від поверхні шкіри, що проходять через одяг до поверхні одягу (F_{sc}) – рівняння (1.3):

$$F_{cs} = v_b \times \rho_b \times c_b \times (T_c - T_{sk}) \quad (1.1)$$

$$F_{sc} = \left(\frac{1}{I_{cl}}\right) \times (T_{sk} - T_{cl}) \quad (1.3)$$

Де v_b означає потік крові від ядра тіла до шкіри, ρ_b – щільності крові, c_b – питома теплоємність, та I_{cl} це теплоопірність одягу.

Процедура розрахунку ФЕТ складається з наступних кроків:

1) Розрахунок теплового режиму тіла за допомогою MEMI для заданої комбінації метеорологічних параметрів;

2) Вставлення розрахункових значень середньої температури шкіри та температури внутрішніх органів в модель MEMI та вирішення системи рівнянь для температури повітря за наступних умов (швидкість вітру = 0,1 м/с, тиск водяної пари = 12 гПа та $T_{cp} = T_a$)

3) Отримана температура повітря буде рівнозначна ФЕТ.

Одиницями вимірювання ФЕТ є °С. ФЕТ є універсальним біокліматичним індексом адже в ньому враховано повне рівняння теплового балансу, температура внутрішніх органів, інтенсивність потовиділення, вологість шкіри, метеорологічні параметри, а також індекс може бути використаний для різного клімату. Діапазон градацій ФЕТ представлений в таблиці 1.2.

Таблиця. 1.2

Градації ФЕТ [127]

Значення ФЕТ, °С	Тепловідчуття	Оцінка теплового стресу
<4,0	дуже холодно	екстремальний холодний стрес
4,1–8,0	Холодно	сильний холодний стрес
8,1–13,0	Прохолодно	помірний холодний стрес
13,1–18,0	трохи прохолодно	легкий холодний стрес
18,1–23,0	Комфортно	не має теплового стресу
23,1–29,0	трохи тепло	легкий тепловий стрес
29,1–35,0	Тепло	помірний тепловий стрес
35,1–41,0	Спекотно	сильний тепловий стрес
>41,1	дуже спекотно	екстремальний тепловий стрес

Фізіологічно-еквівалентна температура активно використовується для оцінки біоклімату різних міст та територій. За даними О. Потчера з колегами [157] саме цей БІ є найбільш вживаним серед понад 160 нині існуючих індексів. В Україні донедавна використовувалися лише найпростіші індекси, обрахунки яких ґрунтуються лише на значеннях метеорологічних величин, проте в останні роки все частіше застосовується фізіологічно-еквівалентна температура для оцінки біоклімату різних міст [173–174, 176–179].

1.6 Локальні кліматичні зони

Як вже було зазначено, міські райони часто характеризуються щільною висотною забудовою, незначною кількістю рослинності, переважанням водонепроникних матеріалів, низьким значенням альбедо та ін. Ці чинники пояснюють, чому міський клімат може відрізнятися від клімату прилеглих територій. Як вже зазначалося вище найвідоміше та найбільш досліджене атмосферне явище великих міст – це острів тепла (ОТ).

Перші дослідження явища ОТ ґрунтувалися лише на двох підходах: 1-й – на основі порівняння температури повітря, виміряної на «міських» та «сільських» станціях; 2-й – вимірювання температури повітря за допомогою маршрутних спостережень – вздовж від сільської до міської місцевості. В обох підходах території класифікують на міську та на сільську, однак не можна стверджувати, що ці терміни є загально визначеними, враховуючи те, що вони не мають єдиного об'єктивного значення. Тобто те, що є міською територією в одному місті відрізнятиметься у іншому [186].

Матеріали оздоблення фасадів та покрівель, доріг та тротуарів, газони та водні об'єкти характеризуються певним набором теплових характеристик. Наприклад, матеріали такі, як асфальт і бетон, характеризуються низькими значеннями альбедо, які сприяють накопиченню сонячної енергії. Парки та зелені зони призводять до зниження температури в місті, шляхом випаровування та створення тіні. Під час випаровування, повітря навколо дерева охолоджується, віддаючи частину свого тепла на процес випаровування.

Отже, через різні теплофізичні властивості міських поверхонь в межах навіть невеликих районів міста буде спостерігатися різна температура поверхонь різних покриттів.

В останні десятиліття міські теоретики стверджують, що розмежування між міською та сільською територією має бути описано як континуум, а не розмежування міської/сільської території [186]. Тобто місто та прилеглі сільські

території повинні розглядатися, як суцільне середовище, в якому досліджуються процеси за різних зовнішніх умов.

Очевидно, що для розв'язання урбометеорологічних проблем необхідно розробити деякі типології міського простору. Т. Чандлер у 1965 році був одним з перших дослідників, який класифікував місто на основі кліматичних особливостей [186]. Він розділив Лондон на чотири регіони, кожен з яких відрізнявся своїм кліматом та формою забудови.

У 1978 році А. Ауер [42] розробив ще одну класифікацію території для Сент-Луїса (штат Міссурі). Він розділив місто на дванадцять типів землекористування, виділених відповідно до міської рослинності та будівель. Р. Еллефсен [74] згрупував десять північноамериканських міських районів у систему з сімнадцяти класів, які називаються "міськими територіями" (англ. – Urban Terrain Zones” (UTZs) [186].

Поєднуючи основні властивості класифікацій [42] та [74], у 2009 р. професор Т. Оке запропонував концептуальну класифікацію "міських кліматичних зон" (англ.– urban climate zones (UCZs)), в якій місто поділяється на сім однорідних ділянок, від територій з садибною забудовою – до щільно забудованих. На основі властивостей урбанізованих та природних ландшафтів І. Стюард та Т. Оке (2009) створили схему класифікації міського простору під назвою Локальні кліматичні зони (англ. – Local Climate Zone (ЛКЗ).

І. Стюард та Т. Оке визначають ЛКЗ, як території з рівномірним поверхневим покривом, забудовою, матеріалами та діяльністю людини, що в горизонтальному масштабі охоплюють від сотень метрів до кількох кілометрів. Для кожної ЛКЗ характерний свій температурний режим, який зберігається протягом цілого року, адже він пов'язаний з однорідним середовищем або екосистемою міста (наприклад, парки), природними біомами (наприклад, лісами, пустелями) та сільськогосподарськими угіддями (наприклад, садами, полями) [15].

Класифікація складається з 17 стандартних ЛКЗ (додаток А), з яких 15 визначено структурою поверхні та покриттям та 2 – будівельними матеріалами та антропогенними викидами тепла. Стандартний набір поділяється на десять типів

забудови (ЛКЗ–1, 2, 3 – щільна багатоповерхова, середньоповерхова та малоповерхова забудова, ЛКЗ–4, 5, 6 – зони з низькою щільністю забудови, ЛКЗ–7 – зона невисоких будинків, що побудовані з найпростіших будівельних матеріалів – дерева, соломи, гофрованого металу, тощо, ЛКЗ–8 – зона зі спорудами, що займають великий простір, ЛКЗ–9 – садибна зона, ЛКЗ–10 – зона важкої промисловості) та на сім типів земельного покриття А–Г (ЛКЗ–А – зона високих щільно посаджених дерев, В – зона розрідженої рослинності, С – зона кущів та чагарників, D – зона низькорослих рослин, Е – зона транспортної інфраструктури та скелястих гір, F – ґрунт або пісок, G – зона водних об’єктів) та додатково типи змінних сезонів. Останні типи додатково класифікуються за сезонними змінами або нетривалими змінами властивостей земельного покриття (тобто, коли поверхня вкривається снігом або мокра земля) [15].

Типи ЛКЗ називаються та упорядковуються за одним або за декількома ключовими властивостями поверхонь (табл. 1.3), До яких можуть належать значення коефіцієнта відкритого неба; співвідношення висоти та ширини вуличних каньйонів (відстані між будівлями та відстані між деревами); відношення площі забудови та природних ділянок до загальної площі території (у %); середня висота забудови/рослинності та коефіцієнт шорсткості за [67]. Фізичні властивості всіх зон вимірюються та не залежать від місця чи часу.

Таблиця 1.3

Параметри, що характеризують ЛКЗ [186]

Локальна кліматична зона (ЛКЗ)	Фактор відкритого неба ¹	Співвідношення сторін ²	Забудова на території ³ (%)	Непроник на поверхня ⁴ (%)	Зелені території ⁵ (%)	Висота забудови/рослинності ⁶ (м)	Коефіцієнт шорсткості ⁷
ЛКЗ–1	0,2–0,4	>2	40–60	40–60	<10	>25	8
ЛКЗ–2	0,3–0,6	0,75–1,5	40–70	30–50	<20	10–25	6–7
ЛКЗ–3	0,2–0,6	0,75–1,25	40–70	20–50	<30	3–10	6
ЛКЗ–4	0,5–0,7	0,75–1,25	20–40	30–40	30–40	>25	7–8
ЛКЗ–5	0,5–0,8	0,3–0,75	20–40	30–50	20–40	10–25	5–6
ЛКЗ–6	0,6–0,9	0,3–0,75	20–40	20–50	30–60	3–10	5–6

Продовження таблиці 1.3

ЛКЗ-7	0,2–0,5	1–2	60–90	< 20	< 30	2–4	4–5
ЛКЗ-8	> 0,7	0,1–0,3	30–50	40–50	< 20	3–10	5
ЛКЗ-9	> 0,8	0,1–0,25	10–20	< 20	60–80	3–10	5–6
ЛКЗ-10	0,6–0,9	0,2–0,5	20–30	20–40	40–50	5–15	5–6
ЛКЗ-А	< 0,4	> 1	< 10	< 10	> 90	3–30	8
ЛКЗ-В	0,5–0,8	0,25–0,75	< 10	< 10	> 90	3–15	5–6
ЛКЗ-С	0,7–0,9	0,25–1,0	< 10	< 10	> 90	< 2	4–5
ЛКЗ-Д	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	< 1	3–4
ЛКЗ-Е	> 0,9	< 0,1	< 10	< 90	< 10	< 0,25	1–2
ЛКЗ-Ф	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	< 0,25	1–2
ЛКЗ-Г	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	–	1

¹ безрозмірна величина з діапазоном значень від 0 до 1. Якщо зазначення ФВН дорівнює 1, то видимою є вся небесна півсфера; якщо 0, то все небо приховано від спостерігача.

² співвідношення висоти та ширини вуличних каньйонів (ЛКЗ 1–10) та відстані між деревами (ЛКЗ А–Г).

³ відношення площі забудови до загальної площі території (%).

⁴ відношення площі непроникних поверхонь до загальної площі території (%).

⁵ співвідношення площі природних зон (грунт, рослинність, вода) до загальної площі території (%).

⁶ середня висота забудови (ЛКЗ 1–10) та середня висота дерев/рослин (ЛКЗ А–Ф) (м).

⁷ коефіцієнт шорсткості за класами [67].

Також, кожна ЛКЗ має індивідуальні теплові та радіаційні властивості поверхонь і значення антропогенної тепловіддачі (табл. 1.4). Теплові властивості ЛКЗ описується, як здатність поверхонь приймати або виділяти тепло. Вона буде залежати від вологості ґрунту та щільності матеріалу. І. Стюард та Т. Оке [186]

зазначають, що ці значення, є суб'єктивними та повинні використовуватися обережно. Радіаційні властивості (альbedo поверхонь) кожної ЛКЗ залежать від кольору поверхонь, вологості та шорсткості.

Таблиця 1.4

Значення теплових, радіаційних та антропогенних характеристик ЛКЗ [186]

Локальна кліматична зона (ЛКЗ)	Теплові властивості поверхонь		Антропогенна тепловіддача (Вт м ²)
	(Дж м ⁻¹ с ^{-1/2} К ⁻¹)	Альbedo поверхонь (%)	
ЛКЗ-1	1,500–1,800	0,10–0,20	50–300
ЛКЗ-2	1,500–2,200	0,10–0,20	< 75
ЛКЗ-3	1,200–1,800	0,10–0,20	< 75
ЛКЗ-4	1,400–1,800	0,12–0,25	< 50
ЛКЗ-5	1,400–2,000	0,12–0,25	< 25
ЛКЗ-6	1,200–1,800	0,12–0,25	< 25
ЛКЗ-7	800–1,500	0,15–0,35	< 35
ЛКЗ-8	1,200–1,800	0,15–0,35	< 50
ЛКЗ-9	1,000–1,800	0,12–0,25	< 10
ЛКЗ-10	1,000–2,500	0,12–0,20	> 300
ЛКЗ-А	Невизначено	0,10–0,20	0
ЛКЗ-В	1,000–1,800	0,15–0,25	0
ЛКЗ-С	700–1,500	0,15–0,30	0
ЛКЗ-Д	1,200–1,600	0,15–0,25	0
ЛКЗ-Е	1,200–2,500	0,15–0,30	0
ЛКЗ-Ф	600–1,400	0,20–0,35	0
ЛКЗ-Г	1,500	0,02–0,10	0

Антропогенна тепловіддача розраховується, як середньорічна щільність теплового потоку від спалювання палива та діяльності людини (транспортування, охолодження/опалення приміщення, промислове виробництво, метаболізм людини). Значення відрізнятиметься залежно від широти місця, сезону та густоти населення [186].

Хоча неможливо врахувати всі особливості кожного міста, однак у більшості міст переважно спостерігаються майже всі 17 типів ЛКЗ. Отже, класифікація ЛКЗ забезпечує методологічний базис для вивчення міських островів тепла та може бути використана архітекторами, містобудівниками, екологами [186].

1.7 Сучасні підходи до дослідження мікроклімату та біокліматичних умов великих міст

Наразі спостереження за допомогою мобільних метеорологічних станцій, дистанційне зондування та чисельне моделювання є найбільш вживаними підходами для вивчення мікроклімату міст. На мережі метеостанцій вимірювання проводяться кожні 3 години, але це не може точно представити просторову структуру ОТ, поля вологості чи характеристик вітру, а дистанційне зондування має недоліки через низьку часову роздільну здатність та вплив хмарності на знімки. П.А. Мірзей та Ф. Хагігат [139] та [140] виділяють дві основні групи підходів до дослідження клімату урбанізованого середовища: 1 – спостереження (включає такі методи, як польові вимірювання та теплове дистанційне зондування) та 2 – чисельне моделювання. Порівняно з методами першої групи, чисельне моделювання на сьогоднішній день стало більш вживаним методом вивчення мікроклімату урбанізованого середовища. Основна перевага чисельного моделювання, полягає у можливості проводити моделювання клімату міста 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.

Серед підходів чисельного моделювання виділяють моделі енергетичного балансу (англ. – Energy Balance Models, EBM) та моделі обчислювальної гідродинаміки (англ. – Computational Fluid Dynamics, CFD). Моделі EBM широко використовувалися в минулому [144] проте, з точки зору дослідження міського клімату, CFD-моделі мають очевидні переваги. CFD-моделі здатні виконувати моделювання враховуючи зв'язки полів швидкості вітру, температури та вологості повітря, а також забруднення атмосферного повітря. Дослідження міського мікроклімату можна проводити в різних просторових масштабах від мезомасштабу, мікромасштабу до масштабу на рівні будівлі (рис. 1.5). З іншого боку, CFD-моделювання потребує представлення міської геометрії з високою роздільною здатністю, знання граничних умов для всіх відповідних змінних потоку та відповідних обчислювальних ресурсів.

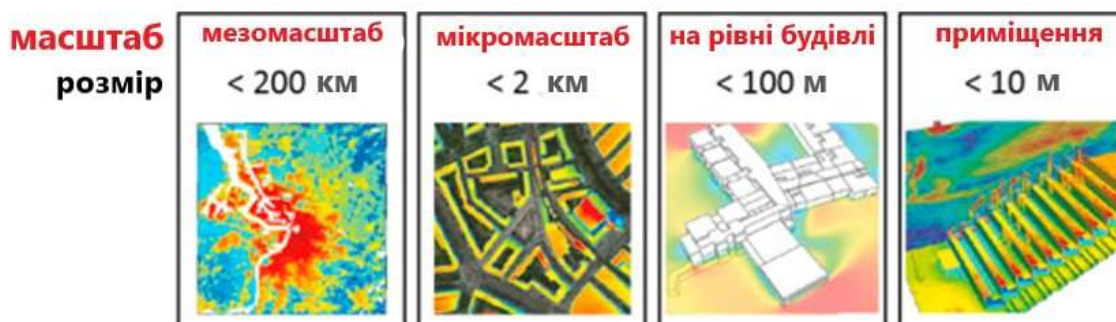


Рис.1.5 Схематичне зображення просторових масштабів у моделюванні з типовими горизонтальними розмірами [193].

Враховуючи прогрес у розвитку обчислювальних моделей, використання CFD стає більш популярним підходом у дослідженнях. У моделях постійно вдосконалюється модель турбулентності та роздільна здатність, що дозволяє з більшою точністю відтворювати мікроклімат міста [184]. С. Хатнер [103] у своїй роботі зазначив певні вимоги для програмних продуктів, що моделюють клімат урбанізованого середовища:

- Модель має бути мікромасштабною, тобто мати розмір сітки ≤ 10 м;
- Модель повинна відтворювати 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 моделювання мікроклімату, більшість з яких зосереджуються лише на одному аспекті моделювання, а отже, є не дуже зручними у використанні. Деякі моделі, такі як «MISKAM» [73, 74] або «MUKLIMO 3» [87] зосереджені головним чином на полі вітру і розподілі газів та аерозолів в атмосфері, проте в них не враховуються термодинамічні ефекти. Моделі «Solweig» [122] та «RayMan» [133] розроблені для розрахунку потоків випромінювання в міському середовищі, а модель «ANSYS Fluent» [79] – для моделювання впливу рослин на мікроклімат [103]. 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. [37, 38, 93, 169].

Серед сучасних програмних продуктів, які широко застосовуються в урбометеорології, найбільша увага приділяється моделі «ENVI-met». Модель може застосовуватися для дослідження мікрокліматичних умов, моделювання тепловідчуття людини в урбанізованому середовищі, визначення ефективності заходів з адаптації міст до прояву зміни клімату [71, 120, 127, 181] та моделювання рівня забруднення атмосферного повітря в містах [152, 200, 201].

«ENVI-met» – це тривимірна прогностична модель клімату, розроблена Майклом Брюсом у Рурському університеті в Бохумі (Німеччина). Перший офіційний випуск моделі датується 1998-м і з того часу було випущено кілька нових версій, на сьогоднішній день останньою є версія «ENVI-met. V5.0.3», що вийшла влітку 2022 року.

Основною перевагою моделі є те, що вона одна з перших, що повністю відтворює процеси взаємодії між атмосферою, ґрунтом, рослинністю та будівлями та мікромасштабному рівні. «ENVI-met» враховує особливості міської морфології (забудову різної форми і висоти, щільності, дизайну, з різним кольором фасаду та іншими особливостями) та різні типи рослинності та ґрунту (рис. 1.6). Рослинність в моделі враховується не лише в якості пористої перешкоди для вітрової і сонячної

радіації, але й враховуються фізіологічні процеси евапотранспірації та фотосинтезу. Максимальний розмір домену моделювання становить $250 \times 250 \times 40$ комірок, де кожна комірка може мати розміри від 0,5 до 10 м [11].



Рис.1.6 Структура моделі «ENVI-met» [76].

«ENVI-met» постійно оновлюється, однак модель досі має деякі обмеження: модель переоцінює турбулентність в районах з великим прискоренням або уповільненням швидкості вітру; розсіяна радіація не впливає на рослини; дифузне випромінювання вважається ізотропним; модель не здатна враховувати зрошення ґрунту та рослин; модель не може імітувати опади [11].

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. В багатьох роботах [64, 114, 136] було відзначено хорошу відповідність змодельованих даних із вимірними. Більшість інших досліджень також оцінили загальну ефективність «ENVI-met» і підтвердили, що вона може моделювати зовнішнє теплове середовище в різних кліматичних зонах з високою точністю [75, 94, 104, 109, 110].

Більш детальний опис моделі «ENVI-met» наведено у власній публікації автора [11], де охарактеризовано основні її переваги та недоліки та проаналізовано імітаційну точність моделі.

Висновки до 1 розділу

1. В результаті аналізу літературних джерел, встановлено, що якщо на початкових етапах вивчення клімату міст відбувалося накопичення знань щодо особливостей мікроклімату та закономірностей перебігу процесів на основі натурних вимірювань та порівнянь значень метеорологічних параметрів «місто–передмістя», то в сучасний період урбометеорологічні дослідження переважно ґрунтуються на моделюванні атмосферних процесів та мікро- і біокліматичних особливостей, як міст загалом, так і окремих їх ділянок.

2. Показано, що результати проведених раніше досліджень особливостей мікроклімату в різних типах забудови та за різного рівня озеленення територій міста, стали підґрунтям для розробки низки класифікацій міських просторів. Найвідомішою та найбільш вживаною з яких на сьогоднішній день є класифікація локальних кліматичних зон І. Стюарда та Т. Оке, що складається з 17 ЛКЗ, які можна ідентифікувати в межах урбанізованого середовища.

3. На основі аналізу підходів до оцінки біоклімату було обґрунтовано переваги біокліматичного індексу фізіологічно-еквівалентної температури для оцінки біокліматичних умов великих міст у літній період, до яких належать: 1) індекс ґрунтується на рівнянні енергетичного балансу людини, а відповідно, враховує всі енергетичні потоки в складному міському середовищі, навіть за ясної літньої погоди; 2) одиницями вимірювання ФЕТ є °С, що робить даний індекс зручним у використанні; 3) ФЕТ може застосовуватися для оцінки біокліматичних умов у різних кліматах.

4. Ґрунтуючись на огляді сучасних програмних продуктів, які використовуються для чисельного моделювання клімату великих міст та теплового навантаження на його мешканців, показано основні переваги та недоліки таких

моделей, включно з сучасними CFD-моделями та найпоширенішою тривимірною прогностичною моделлю клімату «ENVI-met».

5. Основні результати, представлені у даному розділі, опубліковано у працях автора [11, 12, 15].

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика території дослідження

В даний час роль міст у житті людини неухильно зростає. Вже більше половини населення світу живе у містах. У 2018 році частка міського населення становила 55%, тоді як у 1950 році – лише 30%. Згідно з прогнозами ООН [196], до 2050 р. 68% населення світу проживатиме у містах. Розширення міст істотно змінює природні поверхні, що призводить до ряду екологічних проблем, які виникають у містах.

Від величини міста залежать багато його характеристик – темпи зростання, елементи демографічної, планувальної, функціональної структури тощо. Найчастіше класифікацію міст проводять за кількістю населення.

За державними будівельними нормами України ДБН Б.2.2-12; 2019 [5] за чисельністю населення (або за людністю) міста поділяють на: малі – від 20 до 50 тисяч жителів; середні – 50–250 тисяч жителів; великі – 250–500 тисяч жителів; значніші (крупні) – 500–800 жителів та найзначніші (крупніші) – понад 800 тисяч. Однак є й інші підходи до класифікації міст за людністю, які різняться в кількості населення групи поселення [19, 22]. Аналіз досліджень проведений Черемісіною Т.В, Казачковською Г.В та Токаренко О.І [31] свідчить, що більшість міст України за чисельністю населення належать до малих та середніх міст.

У даній роботі використано найпоширеніший поділ міст за людністю запропонований Шаблієм О.І. [22], згідно якого виділяються наступні групи міст: малі (20–50 тисяч), середні (50–150 тисяч), великі (250–500 тисяч), дуже великі (500 тисяч – 1 млн.) та міста-мільйонери (понад 1 млн). За даними державної служби статистики [4] на 1 січня 2020 року більшість міст України за кількістю населення складають малі та середні міста, їх частка становить 55% та 33%, відповідно. Для реалізації задач даного дослідження були обрані міста України з населенням понад

250 тис, які належать до категорій «великі», «дуже великі» та «міста-мільйонники» (табл. 2.1). Для зручності позначення вище названих категорій міст в подальших розділах роботи використовувався узагальнений термін «великі міста».

Таблиця 2.1

Міста України обрані для дослідження

Категорія	Місто	Кількість населення
Міста-мільйонники (понад 1 млн.)	Київ	2 967 360
	Харків	1 443 207
	Одеса	1 017 699
Дуже великі (500–1 млн.)	Дніпро	990 724
	Донецьк	908 456
	Запоріжжя	731 922
	Львів	724314
	Кривий Ріг	619278
Великі міста (250–500 тис.)	Миколаїв	480080
	Маріуполь	436569
	Севастополь	403893
	Луганськ	401297
	Вінниця	370707
	Херсон	286958
	Чернігів	286899
	Полтава	286649
	Черкаси	274762
	Хмельницький	273713
	Чернівці	267060
	Житомир	264318
	Суми	262119

Загально відомо, що мікрокліматичні особливості міста залежатимуть від його географічного положення, від фізико-географічних умов місцевості, а також від морфології самого міста (різноманітність підстильної поверхні, щільність та висота забудови, наявність зелених зон та водних об'єктів) [7]. Мікрокліматичні

відмінності урбанізованого середовища, перш за все, проявляються в особливостях радіаційного балансу підстильної поверхні, створюючи при цьому відмінності інших метеорологічних елементів. Формування мікроклімату великих міст України підпорядковується загальним закономірностям, що описані у розділі 1. Протягом кількох останніх десятиліть різними вченими були проведені дослідження клімату великих міст України, які також включали вивчення їх мікрокліматичних особливостей. Такі дослідження реалізовано для Києва [18, 29], Полтави [1], Харкова [2], Ужгорода [3] та Одеси [20].

Сонячна радіація. У місто надходить менше сонячної радіації, це відбувається за рахунок зниження прозорості атмосферного повітря, що обумовлено його забрудненням. Для промислових міст характерно і зменшення тривалості сонячного сяйва. У Києві тривалість сонячного сяйва є нижчою на 3–6%, ніж у Борисполі, що знаходиться на відстані 40 км [18]. У межах самої столиці спостерігаються відмінності у надходженні прямої сонячної радіації у різних районах міста. Зокрема, центральна частина Києва отримує на 2% більше прямої сонячної радіації, ніж південна частина та промислові райони міста [18]. Для міста Дніпро фіксується на 6% менше сонячної енергії, ніж для його замських територій. У Запоріжжі інтенсивність прямої сонячної радіації зменшується зменшується на 15–46% відносно прилеглих територій. Інтенсивність прямої сонячної радіації у Маріуполі на 10–34% нижча, ніж у Асканії-Новій, що розташована на тій же широті проте у відносно чистому районі [7].

Зменшення інтенсивності прямої сонячної радіації внаслідок забруднення атмосфери є причиною збільшення частки розсіяної у сумарному надходженні короткохвильової радіації [7]. Значення сумарної радіації є вищими на 2–6% у південній частині Києва, що має більш забруднене повітря, порівняно з північною околицею. У Дніпрі кількість прямої та розсіяної радіації зменшується, проте, частка розсіяної у сумарному потоці зростає на 17%, а весь сумарний потік радіації зменшується на 6%, порівняно із замською територією. Для Маріуполя характерне зменшення інтенсивності прямої радіації від 82 до 63%, а частка розсіяної – збільшується з 18 до 37% [7].

Температура повітря. Зміна властивостей підстильних поверхонь призводить до виникнення різниці температур між містом та його околицею або сільською місцевістю. Над містом формується острів тепла, характеристики якого змінюються протягом доби, місяця і року. Взимку у ранкові години центральна частина Києва тепліша на $3,0\text{--}3,5^\circ\text{C}$ ніж Борисполя. Посилення швидкості вітру вдень призводить до зниження температури повітря, а в заплаві річки Дніпро вона стає значно нижчою, ніж у передмісті. Влітку температурні неоднорідності між містом і передмістям досягають $2,5\text{--}3,0^\circ\text{C}$ та $1,5\text{--}2,0^\circ\text{C}$ у ранкові й вечірні години, а вдень простежується їх зниження до $1,0\text{--}1,5^\circ\text{C}$ [18]. На формування температурного режиму міста Києва істотний вплив має його рельєф. Температурні контрасти між рівнинною лівобережною та підвищеною правобережною частиною міста зумовлені стіканням більш холодного повітря з правобережжя і вертикальним та горизонтальним обміном повітря. Взимку на лівобережній частині міста температура повітря на $3,5^\circ\text{C}$ нижча, ніж на правобережній, а на окремих ділянках лівобережжя можуть спостерігатися нижчі температури, ніж на околицях міста. Влітку такі контрасти температури зменшуються [18].

У Дніпрі спостерігається значне потепління в північній частині міста, порівняно з передмістям у ранкові години (на $1,5\text{--}2,0^\circ\text{C}$), а у вечірні – на $1,5^\circ\text{C}$. Відмінності між окремими районами міста становлять $1\text{--}2^\circ\text{C}$. В літній сезон найвищі температури фіксуються у центральній частині та в промислових районах Дніпра. В забудованих районах лівобережжя температура повітря є вищою на $0,5\text{--}1,0^\circ\text{C}$ порівняно з правобережжям [7].

У Харкові, як і у багатьох містах України, контрасти температур добре проявляються у зимовий сезон. За ясної погоди в окремих районах міста спостерігається підвищення температури повітря на $1,5\text{--}2,0^\circ\text{C}$, порівняно із замиською територією, а за хмарної – не більше ніж на $0,6\text{--}0,8^\circ\text{C}$. У зимовий період за сонячної погоди теплішими є північно-західна, центральна та південно-східна частини міста [2]. Влітку температура повітря вища у північно-західній, центральній і північній частинах Харкова. Температурні контрасти між окремими районами становлять $1,5\text{--}2,0^\circ\text{C}$, а в окремі дні можуть сягати до $3,2\text{--}3,7^\circ\text{C}$ [7].

У Полтаві в температура повітря зимовий сезон у середньому на $0,5^{\circ}\text{C}$ вища, порівняно з прилеглими територіями, а влітку цей показник становить $0,3^{\circ}\text{C}$. За безвітряної погоди різниця температури взимку може сягати до $2,5^{\circ}\text{C}$, а влітку – $1,5^{\circ}\text{C}$ [7]. У вечірні години різниці температури між містом та передмістям становлять $1,7$ – $1,8^{\circ}\text{C}$, вранці центральний район міста буває теплішим на $3,5$ – $4,0^{\circ}\text{C}$.

Для міст розташованих на берегах морів, крім рельєфу, важливим чинником, який впливатиме на температурний режим є теплофізичний контраст між морем і суходолом. Вранці у Маріуполі тепліше у південному районі на $1,7$ – $2,3^{\circ}\text{C}$, а у промисловому і центральному на $2,8$ – $3,1^{\circ}\text{C}$, ніж на околиці міста. Зі зміною напрямку вітру близько 11–12 години у місті стає прохолодніше на $1,0$ – $1,2^{\circ}\text{C}$, ніж за його межами. У північному та західному районах температура повітря стає близькою до її значень на замиській території [7]. Вплив Чорного моря є переважаючим фактором у формуванні термічних особливостей Одеси. В місті в середньому тепліше на $1,3^{\circ}\text{C}$ ніж в сільській місцевості [8]. Найбільші відмінності спостерігаються в розподілі мінімальних температур. Вплив моря призводить до зменшення температурних контрастів між містом та передмістям. У середньому протягом року прибережні райони мають температуру на 1 – 2°C вищу, ніж райони, розташовані на відстані 8 км від узбережжя [20].

У Львові температура повітря центральної частини міста, на $1,2$ – $2,0^{\circ}\text{C}$ вища, порівняно з околицями. Центральний район Ужгорода теж характеризується вищими температурами порівняно з новобудованими районами та приватним сектором [7].

Вітер. Структура міської забудови та зелені насадження змінюють швидкість вітру та його напрямок. Місто маючи вищу шорсткість підстильної поверхні, знижує середню швидкість вітру, порівняно з приміськими районами. Швидкість вітру на більшій частині території Києва в $0,6$ – $0,7$ рази менша, ніж у Борисполі. Тільки на підвищених та відкритих місцях вона наближається до значень у замиській зоні. У центрі міста спостерігається послаблення швидкості вітру у $1,5$ – $2,5$ рази. [18]. Швидкість вітру у Дніпрі менша у $0,75$ – $0,85$ рази, ніж за містом (аеропорт). Літом у денні години на відкритих підвищених ділянках швидкість

вітру у 1,2–1,3 рази більша ніж за містом, а в зимовий період суттєвих відмінностей у швидкості вітру не спостерігається [7].

У Харкові спостерігається зменшення швидкості вітру, порівняно з південною його околицею, у кілька разів. Відношення швидкості вітру у центрі міста до його значень на замиській території становить 0,7. Південна околиця міста має у 1,4–1,5 рази більшу швидкість вітру, ніж замиські території [7]. На південній околиці швидкість вітру вдвічі більша порівняно з центром міста. Незважаючи на це, на південній околиці міста фіксується дещо більша кількість штилів, ніж за містом. [2].

У центрі Полтави та у промисловій зоні швидкість вітру менша у 1,5–2,0 рази, ніж на околиці. Вищі швидкості вітру в Маріуполі спостерігаються на високому крутому березі моря [7]. У межах Одеси найбільша швидкість вітру спостерігається на узбережжі та зменшується до центру на 1,0–1,5 м/с взимку та на 0,7 м/с – влітку [20]. У центральних частинах Львова, Ужгорода та Луцька швидкість вітру зменшується, порівняно з їхніми околицями. Лише коли напрям вітру співпадає з напрямком вулиці відбувається посилення вітру до його значень за містом [7].

Вологість повітря. Вологість повітря у містах, як правило нижча порівняно з околицями. Найбільші різниці у вологості повітря протягом року спостерігається влітку, а протягом доби – у вечірні години. У Києві в теплу пору року відносна вологість повітря у вечірні години на 3–6% вища, ніж на околицях, тоді як вранці та вдень вона нижча на 1–3% [13]. У районах заплави Дніпра та в житлових масивах, що розташовані поблизу лісу, відносна вологість повітря вища на 5–8%, ніж у центрі міста, а за сонячної погоди з низькою швидкістю вітру у паркових зонах вологість на 7–11% вища, порівняно з центральними районами [18].

Влітку відносна вологість у Дніпрі є нижчою на 3–8%, ніж на його околицях. При цьому не прослідковуються відмінності вологості між правобережною набережною і житловими масивами лівобережжя та замиською територією. Значне зниження вологості на 30% фіксується над промисловими районами, порівняно з замиською територією [7]. Взимку відносна вологість у Харкові нижча на 1–7% ніж за містом. Влітку, як у ранкові так і у вечірні години, майже у всіх районах міста

відносна вологість менша на 3–10%, ніж за містом [7]. У центрі Полтави відносна вологість нижча ніж на околиці та за містом, а у промислових районах і на перехресті автошляхів вологість знижується на 9–14%. Влітку у центрі Львова вологість повітря на 7–10% нижча, ніж на околиці, найменші відмінності по території відмічаються вдень, а найбільші – перед сходом Сонця. Схожий розподіл характерний і для Ужгорода та Луцька [7].

2.2 Методика досліджень

2.2.1 Методика дослідження локальних кліматичних зон великих міст за допомогою WUDAPT

World Urban Database and Tools Portal (WUDAPT) – це міжнародний спільний проект, який базується на створенні бази даних морфології міст, для вивчення клімату та полегшення розв'язання екологічних проблем міських районів. Проект WUDAPT заснований на Національній міській базі даних та на інструмент-порталі (National Urban Database and Portal Tool – NUDAPT) [63], що розроблений для моделей, які потребують детальної тривимірної інформації про місто. Оскільки NUDAPT використовує технологію Lidar для збору точної інформації про топографію міста, такий процес не може бути застосований для міст у всьому світі. Тому, команда дослідників у галузі дистанційного зондування, ГІС, міського клімату, архітектури та природокористування під керівництвом Джеральда Міллса та Джейсона Чінга зайнялися розробкою універсального та простого методу, для різних міських районів у всьому світі – протокол WUDAPT [164].

Основними цілями проекту WUDAPT [202] є:

- використання класифікації локальних кліматичних зон, як вихідну точку для послідовної характеристики структури міст;
- використання порталу Geo-Wiki для вибору типу підстильної поверхні та землекористування в ЛКЗ (наприклад, водонепроникні поверхні (будівлі, дороги та ін.), проникні поверхні, пасовища тощо);

- розробка інструментів (на основі веб-сайту та мобільного додатку) для отримання інших міських параметрів, таких як будівельні матеріали, розміри будівлі, тощо;

- забезпечення відкритого доступу до набору цих даних;

- на порталі надати основні інструменти, які дозволяють дослідникам об'єднувати дані та порівнювати міста по всьому світу.

Процес збору даних у WUDAPT має ієрархічний підхід (рис. 2.1), де кожен рівень представляє різну деталізацію.

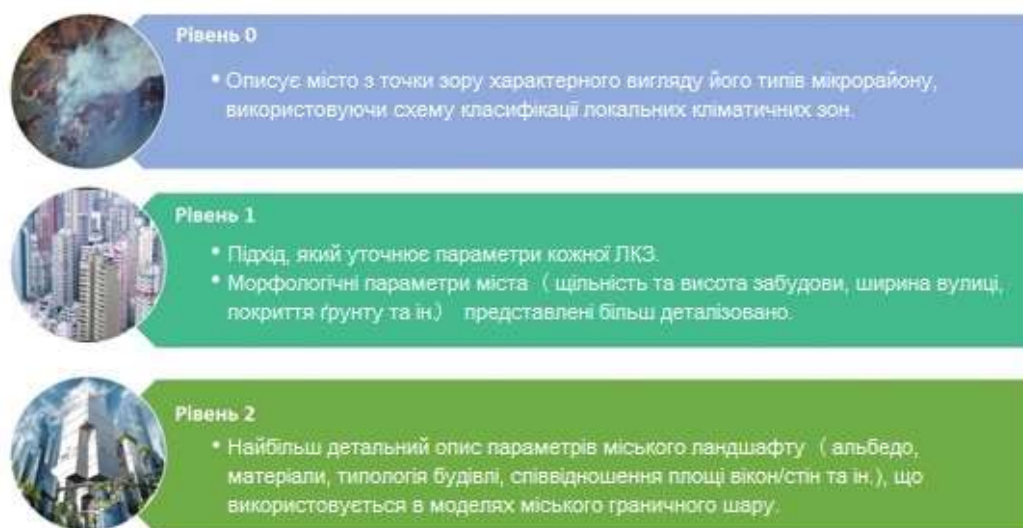


Рис. 2.1 Ієрархія даних WUDAPT [164].

Рівень – 0, описує місто за наземними та аерофотознімками схожих типів мікрорайонів, ґрунтуючись на класифікації ЛКЗ [186], згідно якої виділяють 10 міських та 7 типів природних ландшафтів. Дані цього рівня – є «найгрубішими», вони описують міський ландшафт з точки зору просторових одиниць масштабу мікрорайону (>1 км²).

На рівні – 1 використовуються підходи, які уточнюють параметри кожної ЛКЗ. В основному вони зосереджуються на морфологічних параметрах міста (наприклад, висоті забудови, ширині вулиць і т.д.) та функціях (наприклад, будівництво). На рівні 2 застосовується найбільш деталізований опис параметрів

міського ландшафту. Це найвищий рівень і стосується міських даних, зібраних у визначеному просторовому масштабі (наприклад, 250 м).

Ідентифікація ЛКЗ в межах міських районів базується на напівавтоматизованому процесі [48] з використанням наявних мультиспектральних супутникових знімків (наприклад, Landsat 8) та вільного геоінформаційного програмного забезпечення. Для виконання такого процесу потрібен зразок навчальних зон (англ. – training areas (НЗ)), які визначають типи ЛКЗ у досліджуваному місті. Ці навчальні зони використовуються для ідентифікації схожих пікселів ЛКЗ у межах наявних мультиспектральних зображень; потім ця інформація використовується для розробки моделі, яка класифікує дані зображення на типи ЛКЗ.

Універсальність класифікації ЛКЗ у поєднанні зі спрощеним представленням міського ландшафту, дозволяє користувачам легко ідентифікувати їх за супутниковими знімками, використовуючи вказівки, розміщені на вебсайті WUDAPT (<https://www.wudapt.org>). Супутникові знімки з відкритим доступом, такі як Sentinel 2 або Landsat 8, підтримують ініціативу проекту WUDAPT та дозволяють послідовно та ефективно застосовувати протокол WUDAPT для картографування ЛКЗ у містах всього світу.

Покроковий протокол отримання карти ЛКЗ на рівні 0 проекту WUDAPT був встановлений і описаний Б. Бехтелем [48], а також є на сайті WUDAPT. Як зазначають автори, дана методологія є універсальною та об'єктивною для всіх міст. Крім того, вона складається з відносно швидких та простих процедур, які дозволяють без знань дистанційного зондування проводити та підтверджувати ідентифікацію ЛКЗ в межах досліджуваних міст. Основні аспекти та інструменти, які необхідні для застосування протоколу 0 рівня, це – знання міста, схеми ЛКЗ, програмного забезпечення Google Earth і SAGA та сцени Landsat–8. Для реалізації такої методології автори пропонують використовувати безкоштовні програмні продукти такі як SAGA-GIS та Google Earth.

Google Earth/ Google Earth Pro – це безкоштовна, програма компанії Google, що є у вільному доступі. Вона є простою у використанні та містить зображення

більшості міст світу з високою роздільною здатністю. Google Earth відома, як «3D-інтерфейс планети» (англ. – A 3D Interface to the Planet), що дозволяє переглядати 3D-зображення Землі, використовуючи комбінацію цифрових моделей висот, супутникових знімків та проєкцію 3D-будівель, та цим значно полегшує визначення відповідних навчальних зон.

Супутникові знімки Landsat можна отримати за попередньої реєстрації на сайті U.S. Geological Survey Earth (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Для роботи у WUDAPT рекомендується обирати дані Landsat 8 та застосовувати знімки різних сезонів, щоб фенологічна інформація враховувалася при визначенні ЛКЗ [48].

Для ідентифікації ЛКЗ пропонується використовувати ГІС платформу – System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA). SAGA-GIS розроблена для легкої та ефективної реалізації просторових алгоритмів і служить основою для розробки та впровадження геонаукових методів та моделей. Вона має легкодоступний інтерфейс користувача з багатьма параметрами візуалізації та може бути скриптована з командного рядка, використовуючи Python або R [48]. До того ж алгоритм ідентифікації ЛКЗ на супутникових знімках – реалізований, як інструмент у SAGA-GIS.

Стандартна процедура класифікації WUDAPT включає три основні операції:

- попередня обробка растрових даних (тобто, робота з супутниковими зображеннями);
- відцифрування та попередня обробка відповідних навчальних зон;
- застосування алгоритму класифікації в ГІС.

Алгоритм протоколу WUDAPT (ідентифікація ЛКЗ міста):

Крок 1. Завантаження даних LANDSAT.

На веб-сайті USGS Earth Explore (<http://earthexplorer.usgs.gov>) потрібно завантажити необхідні знімки Landsat (L8 OLI/TIS) (слід обирати зображення з якомога меншою кількістю хмар – менше 10% (рис. 2.2). Якщо є можливість, обирати 3–5 сцен різних сезонів (наприклад, літо, зима та весна). Уникати

використання сцен, в яких хмарний покрив присутній над зоною, яка є предметом дослідження. Потрібно переконатися, що обрано продукт даних GeoTIFF рівня 1.

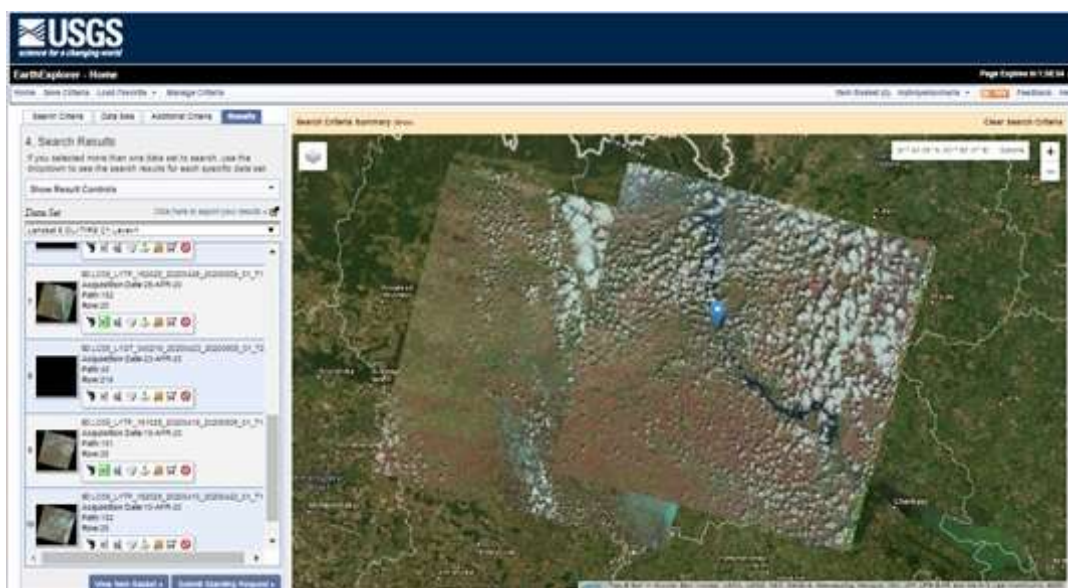


Рис. 2.2 Приклад завантаження даних Landsat в USGS Earth-Explorer.

Крок 2. Визначення регіону дослідження.

Другий крок – це процедура векторної обробки, де експерт/користувач (тобто особа, яка знає місто), окреслює область потрібного регіону (англ. – region of interest (ОПР)) та визначає частини природного і міського ландшафту, який характеризує типи ЛКЗ. Процедuru виконання другого кроку можна розділити на кілька етапів:

Етап 1. Відцифрування території навколо міського району (дану область називають – ОПР) в програмі Google Earth Pro. Обрана область повинна містити всю урбанізовану територію з буфером близько 20 км від кордонів міста. Протяжність ОПР не повинна бути менша ніж 50 км у кожному напрямку.

Етап 2. Створення в межах обраного полігону НЗ для кожного типу ЛКЗ. Кожна ЛКЗ описує мікрорайони, які повинні відповідати площі більше 1 км². Таким чином, необхідно обирати «однорідні» зони, де оптимальний розмір та форма НЗ > 1 км², оскільки зображення Landsat мають розмір пікселя 100×100 м.

Таким чином, користувач створює навчальні зони для кожної ЛКЗ, що є на території дослідження. Ці навчальні зони створюються у вигляді полігонів за допомогою Google Earth Pro (рис. 2.3). На веб-сайті проекту WUDAPT ця процедура детально пояснюється, а також доступний шаблон типів ЛКЗ для Google Earth Pro.

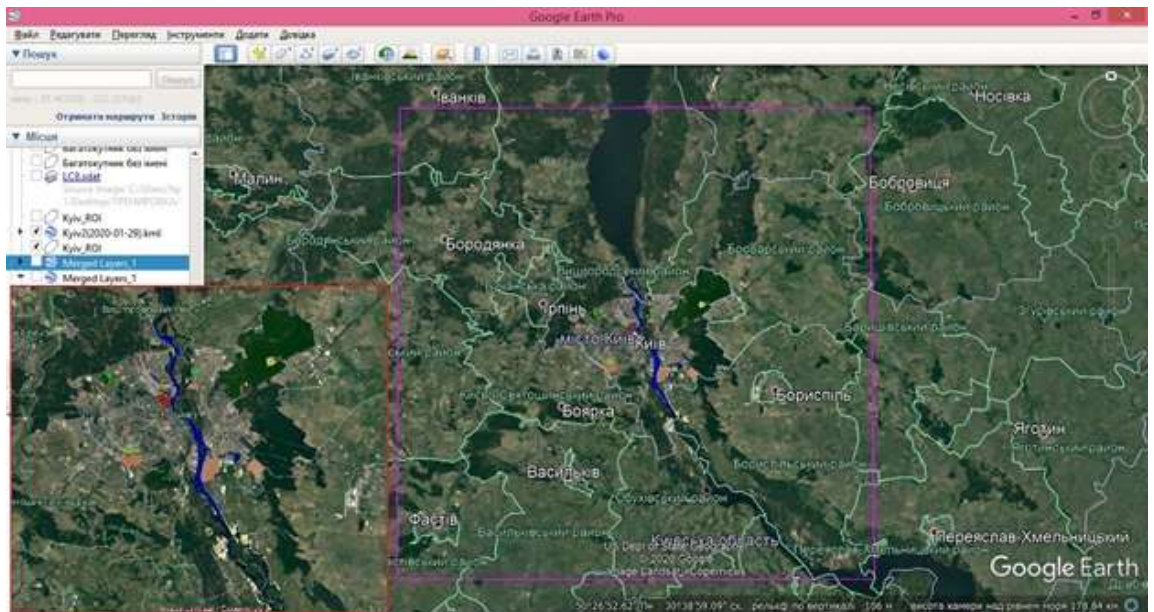


Рис. 2.3 Приклад відцифрування навчальних зон в Google Earth.

Крок 3. Ідентифікація ЛКЗ

Після первинного вибору даних НЗ наступним кроком є застосування алгоритму ідентифікації ЛКЗ. Як зазначалося вище, ця опція включена в SAGA-GIS. Алгоритм ідентифікації, рекомендований для WUDAPT, є класифікатором Random Forest. Це ансамблевий метод машинного навчання для ідентифікації, який складається з інтегрованих дерев прийняття рішень, що ідентифікують кожен піксель зображення в один тип ЛКЗ. Ідентифікатор Random Forest був обраний завдяки кращій картографічній та обчислювальній ефективності, а також, він не є параметричним, а значить, підтримує різний вигляд класів [48, 49]. Останній крок виконується в кілька епатів:

Етап 1 – передбачає імпорт супутникових даних в програмне забезпечення SAGA для подальшої обробки.

Етап 2 – імпорт KML-файлів (ОПР та НЗ) створених за допомогою Google Earth Pro у SAGA.

Етап 3 – проектування векторного файлу на проекцію даних Landsat.

Етап 4 – ідентифікація ЛКЗ в SAGA (рис. 2.4).

Етап 5 – перевірка результатів. Користувачу слід порівняти створену ЛКЗ-карту із відповідними зображеннями в Google Earth Pro (рис.2.4а), а потім, виходячи із виявлених невідповідностей, – скорегувати навчальні зони або додати інші. Після чого – повторно застосовується алгоритм ідентифікації, використовуючи переглянуті дані НЗ. Цей процес необхідно виконувати стільки разів, скільки потрібно для досягнення високоякісної карти ЛКЗ.

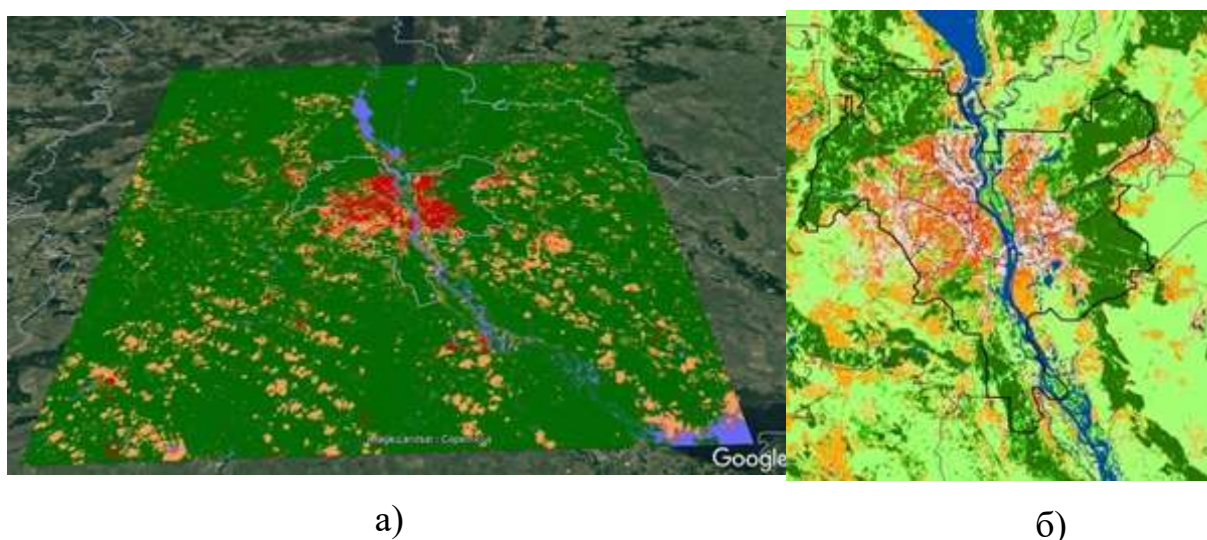


Рис. 2.4 Результати ідентифікації ЛКЗ для міста Києва: а) процес перевірки; б) фінальне представлення карти ЛКЗ.

Після того, як користувач створив карту достатньо високої якості, відповідні дані НЗ і Landsat передаються команді WUDAPT. Перед включенням у базу даних та портал WUDAPT, подані дані проходять оцінку якості та стають доступними на веб-сайті проекту WUDAPT. Сьогодні на сайті проекту (<https://wudapt.cs.purdue.edu/>) доступні карти ЛКЗ та метадані для майже 100 міст по всьому світі, які пройшли автоматичний контроль якості [68]. Першим і головним кроком у створенні глобальної бази даних про міста, стала розроблена карта ЛКЗ для всієї Європи [69].

2.2.2 Модель «RayMan» – як інструмент для оцінки біоклімату

«RayMan» – це модель мікрмасштабу, розроблена на кафедрі екологічної метеорології Фрайбурзького університету імені Альберта-Людвіга – Андреасом Мацаракісом та Франком Рутцом. Модель використовується для обчислення потоків випромінювання в простому та складному середовищі (в сільському чи урбанізованому середовищі) [162]. «RayMan» дає змогу розрахувати середню радіаційну температуру та змодельовати біокліматичні індекси (PMV, UTCI та ФЕТ) для визначення термічних умов (тепловий комфорт, холодний та тепловий стрес) у різних кліматах та регіонах. Модель «RayMan» є одномірною в просторі (всі розрахунки виконуються для однієї точки). Основна увага під час розробки полягала у зручності (всі функції та параметри можна контролювати за допомогою графічного інтерфейсу) та у продуктивності. Остання полягала в наданні користувачам можливості проводити розрахунки для довгих наборів даних, що охоплюють кілька років у високій часовій роздільній здатності.

Ще однією перевагою моделі «RayMan» є те, що для моделювання значень біокліматичних індексів потрібна обмежена кількість вхідних метеорологічних даних та інших загальних параметрів [162]. На рисунках 2.5 та 2.6 представлені інтерфейс програми «RayMan» для вводу даних та вікно результатів моделювання.

Для розрахунку значення ФЕТ «RayMan» вимагає таких вхідних метеорологічних параметрів, як температура та вологість повітря, швидкість вітру та загальна кількість хмар.

RayMan Pro

File Input Output Table Language ?

Date and time

Date (day.month.year) 1.8.2017

Day of year 213

Local time (h:mm) 15:00

Now and today

Geographic data

Location: Kyiv

Add location Remove location

Geogr. longitude (°E) 30°32'

Geogr. latitude (°N) 50°23'

Altitude (m) 167

Timezone (UTC + h) 3.0

Current data

Air temperature Ta (°C) 33.5

Vapour pressure VP (hPa) 20.1

Rel. humidity RH (%) 39.0

Wind velocity v (m/s) 2.0

Cloud cover N (octas) 4.0

Surface temperature Ts (°C)

Global radiation G (W/m?)

Mean radiant temp. Tmrt (°C)

Personal data

Height (m) 1.75

Weight (kg) 75.0

Age (a) 35

Sex m

Clothing and activity

Clothing (clo) 0.9

Activity (W) 80

Position standing

Auto Standard Clo for mPET

Thermal indices

PMV PET SET* UTCI PT mPET

Close

Рис. 2.5 Вигляд вікна моделі «RayMan» для вводу даних.

01.06.05-31.08.14 — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

Ta °C	VP hPa	RH %	v m/s	C /8	Tmrt °C	PMV	PET °C	SET* °C
15.7	8.7	49.0	5.0	5.0	39.9	-1.4	14.3	13.6
13.2	9.4	62.0	3.0	8.0	41.7	-1.5	14.5	14.3
16.1	8.8	48.0	1.0	8.0	44.6	0.1	23.5	21.5
19.2	10.0	45.0	5.0	2.0	42.0	-0.5	18.0	16.8
25.1	13.0	41.0	6.0	6.0	48.4	1.0	25.4	22.3
18.1	16.6	80.0	3.0	8.0	46.4	-0.1	20.2	19.4
14.6	15.9	96.0	1.0	8.0	25.5	-1.1	15.1	14.7
18.1	14.1	68.0	3.0	6.0	44.1	-0.3	19.6	18.6
17.1	15.2	78.0	3.0	8.0	45.6	-0.4	19.1	18.4
22.1	17.0	64.0	2.0	7.0	48.7	1.1	27.6	24.0
20.5	13.2	55.0	2.0	6.0	46.4	0.6	24.8	22.1
13.5	14.8	96.0	1.0	8.0	24.5	-1.4	13.9	13.7
18.4	11.0	52.0	3.0	8.0	46.0	-0.2	20.3	19.1
22.0	10.8	41.0	2.0	7.0	48.0	0.9	26.9	23.3
22.4	13.3	49.0	4.0	6.0	47.0	0.5	23.5	21.2
25.3	17.1	53.0	4.0	6.0	49.5	1.3	28.0	24.1
22.1	17.5	66.0	5.0	7.0	47.8	0.5	22.4	20.8
20.8	15.9	65.0	3.0	8.0	48.4	0.5	23.9	21.6
20.0	13.3	57.0	7.0	6.0	44.6	-0.4	18.2	17.2

Рис. 2.6 Вікно результатів обрахунку в моделі «RayMan».

2.2.3 Просторова мікромасштабна модель «SkyHelios»

Хоча в останні роки модель «ENVI-met» є одним з найпоширеніших інструментів чисельного моделювання в урбометеорології [33, 37, 57, 80, 86, 94], вона не зовсім проста у використанні (детально див. п.1.7). Модель вимагає низки вхідних параметрів, які навряд чи доступні для всіх міст (наприклад, атмосферні умови на висоті 2500 м). Крім того, «ENVI-met» потребує досить значного часу для моделювання, що унеможлиблює швидке розв'язання урбометеорологічних задач з її використанням. Також модель має обмежений розмір домену – максимальний становить (250×250×40 комірок), де кожна комірка може мати розміри від 0,5 до 10 м. Наприклад, територія розміром 100×100 м може бути представлена доменом 100×100 комірок з розміром 1×1 м кожна, або вона може бути представлена доменом 20×20 комірок з розміром 5×5 м. Відповідно чим менший розмір комірок, тим краще буде роздільна здатність [62].

Оскільки, як було зазначено, модель «ENVI-met» має не лише низку переваг, але й обмеження при вирішенні окремих урбометеорологічних задач, то вчені досить часто надають перевагу моделям, які потребують менше вхідної інформації і простіші у використанні, проте можуть на високому рівні вирішити аналогічні задачі. «SkyHelios», що є урбометеорологічною мікромасштабною моделлю (рис. 2.7), з високою просторовою (1×1 м) роздільною здатністю належить саме до таких. За допомогою моделі «SkyHelios» за короткий час можна отримати значення швидкості та напрямку вітру, середню радіаційну температуру та значення основних сучасних біокліматичних індексів по території дослідження із високою просторовою роздільною здатністю [83]. Хоча за допомогою моделі «SkyHelios» можна здійснити моделювання для великих територій, порівняно з «ENVI-met», але в багатьох дослідженнях основний розрахунок все ж виконується для невеликих ділянок [104].

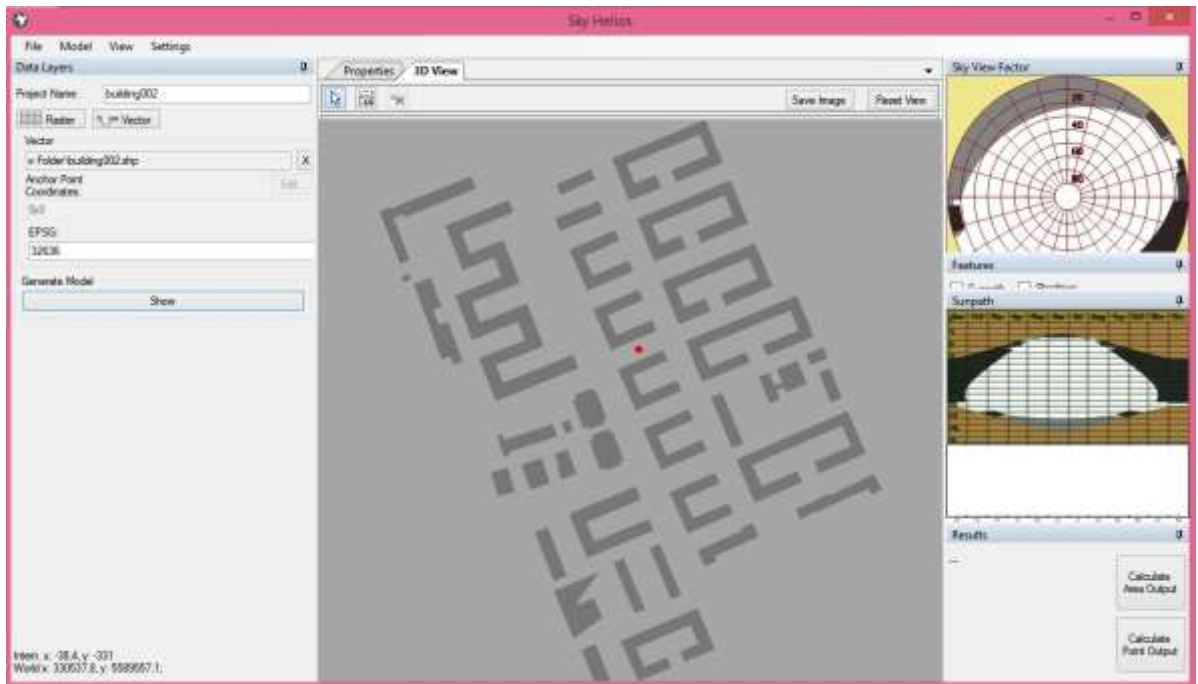


Рис. 2.7 Інтерфейс головного вікна моделі «SkyHelios».

Спершу «SkyHelios» була розроблена як модель для оперативної оцінки фактору відкритого неба та затінення [131]. Для моделювання теплових умов середовища в «SkyHelios» було інтегровано модель випромінювання, модель вітру, а також підпрограми для розрахунку сучасних біокліматичних індексів, серед яких універсальний біокліматичний індекс та фізіологічно еквівалентна температура. До сьогодні температура повітря й тиск водяної пари в моделі вважаються сталими по території, проте їх можна змінювати в часі разом із вхідними даними моделі [85].

Для введення даних про міську морфологію, модель підтримує різні просторові формати даних, які можна поєднувати між собою, а також можна імпортувати формати, що використовуються в інших моделях (наприклад, файли з «RayMan» або з «ENVI-met»). Всі просторові формати даних поділяються на растрові та векторні.

Растрові формати складаються з сітки з деяким значенням (наприклад, висотою) для кожного пікселя. «SkyHelios» приймає різні поширені формати растрових файлів, включаючи «Geospatial Data Abstraction Library»:

- GDAL формат, GeoTiff (*.tif)
- файли розділені табуляцією (*.tab)

- csv файли (*.csv)
- текстові файли (*.txt)
- ASCIIgrid (*.asc)
- PNG файли (англ. – portable network graphics) (*.png)

Векторні формати ґрунтуються на зазначенні просторового положення певних точок/вершин та полігонів. Найпоширенішим векторним форматом файлу є ShapeFiles (наприклад, polygon shapefiles (3D або файли, що включають поле висоти) застосовуються для вводу даних забудови, а point-feature shapefiles – для дерев. Вони, крім багатьох інших, приймаються моделлю «SkyHelios» через OGR (OpenGIS Simple Features Reference Implementation), яка є частиною GDAL. Всі вхідні дані слід проектувати у метричній проекції, яка повинна визначатися ідентифікатором просторової прив'язки (англ. – Spatial Reference ID, SRID) [85]. Іншим важливим форматом вхідних векторних файлів є «obstacle files», що є файлом, який відображає перешкоди та який імпортується з моделі «RayMan».

Візуалізувати отримані результати можна за допомогою різних геоінформаційних систем (Qgis, ArcMap, Surfer, тощо).

Розрахунки випромінювання в «SkyHelios» проводяться на векторній основі й виконуються для будь-якої точки в межах області моделі. Більшість параметрів, що використовуються, збігаються з тими, що й в моделі RayMan. На відміну від більшості інших моделей, «SkyHelios» розглядає міське середовище з точки зору пікселів в межах зображення «риб'яче око» (англ. – fish-eye image) (рис. 2.8). Інші параметри, такі як розсіяна короткохвильова радіація для певної точки, оцінюються відразу для поля зору верхньої півсфери [85].

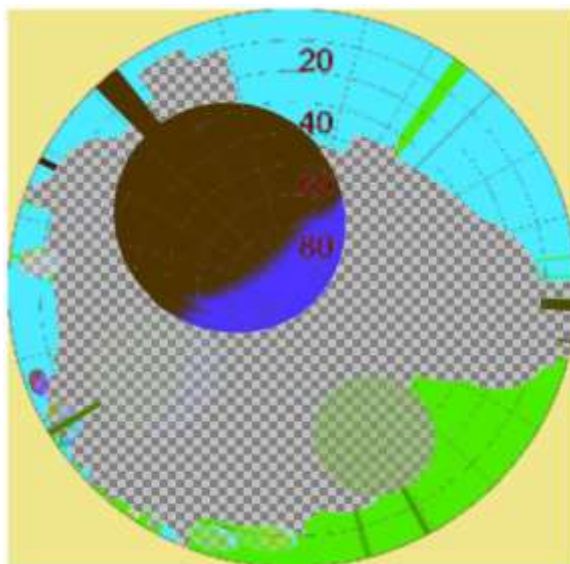


Рис. 2.8 Приклад обробленої у моделі інформації на основі фото «риб'яче око», що показує верхню півсферу з деревами та будівлями [85].

В моделі застосовується графічний процесор MOGRE для обчислення значення фактору відкритого неба, на основі якого визначаються потоки випромінювання для будь-якої точки простору в межах досліджуваної території.

Фактор відкритого неба. Всі розрахунки потоків випромінювання в моделі «SkyHelios» базуються на обчисленні значення фактору відкритого неба (ФВН) (англ. – Sky view factor (SVF)). ФВН – це співвідношення між видимою частиною неба в певній точці та площиною неба, розташованого над місцем спостережень [24]. ФВН є безрозмірним і його значення варіюються від 0 до 1, де 0 означає, що небо повністю вкрите перешкодами, тоді як 1 позначає відкрите небо. У моделі «SkyHelios», ФВН визначається шляхом розрізнення прозорих та кольорових пікселів на зображенні. Прозорі пікселі вважаються відкритим небом, а всі інші вважаються вкритими перешкодами (рис. 2.9).

Оскільки в реальному середовищі зображення «риб'яче око» є напівсферою, то не всі пікселі мають однаковий вплив на ФВН. Тому, модель «SkyHelios» застосовує безрозмірний ваговий коефіцієнт для розгляду проекції, що регулює вплив пікселя. Це призводить до того, що в моделі розраховується сферичний та площинний ФВН.

Модель радіації. У «SkyHelios» розрахунок сумарної сонячної радіації (G), включає в себе потік прямої сонячної радіації (I) та розсіяної короткохвильової радіації (D). Для чистого стану неба (безхмарного та відкритого горизонту) G обчислюється за рівняння (2.1).

$$G_0 = 0,84 \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi) \cdot e^{\left(\frac{-0,027 \cdot pr}{pr_0} T_L\right)} \quad (2.1)$$

Де, I_0 – сонячна стала, φ – zenітний кут сонця ($^\circ$), pr – тиск повітря (гПа), а також тиск на рівні моря для стандартної атмосфери ($pr_0 = 1013$ гПа), T_L – фактор мутності Лінке [80].

Інсоляція в моделі розраховується за рівнянням [107] та застосовуватиметься лише для незатінених умов. У моделі «SkyHelios» відбита радіація вважається оціночною для коефіцієнта освітленості поверхонь. Відбиття оцінюється для будь-якого пікселя зображення «риб'яче око», як значення синього кольору (враховуючи висоту сонця над горизонтом), помножене на пряме короткохвильове випромінювання й вважається ізотропним. Таким чином, траєкторія освітлення розглядається, як орієнтація будь-якої поверхні до джерела світла, через косинус кута між напрямком джерела світла і вектором нормалі до поверхні. [85]. Відбита радіація, розглядається у «SkyHelios» шляхом оцінки надходження розсіяної радіації та його ізотропного розсіювання [85].

Усі поверхні випромінюють довгохвильову радіацію згідно із законом Стефана-Больцмана, за яким обчислюється потік випромінювання абсолютно чорного тіла при заданій температурі. У моделі «SkyHelios» Закон Стефана-Больцмана дещо модифікований, він включає коефіцієнт випромінювання, що дає змогу застосовуватись до неабсолютно чорних поверхонь, наприклад, для людини його значення приблизно буде дорівнювати 0,97 [85].

Середня радіаційна температура. Середня радіаційна температура (mean radiant temperature (англ.) – T_{mrt}), є одним з найважливіших вхідних параметрів для оцінки тепловідчуття людини. У моделі «SkyHelios» розрахунок T_{mrt} базується на законі Стефана-Больцмана.

Розділивши середовище, що оточує людину (p) на кількість (n) ізотермічних поверхонь (i) та врахувавши коефіцієнт проекції (Pr) для корекції відносного розміру поверхні p і s , а також одягу clo з p , T_{mrt} можна обчислити, дотримуючись принципу рівних потоків випромінювання, спричинених фактичним та еталонним середовищем. Розрахунок T_{mrt} проводиться за рівнянням [85]:

$$T_{mrt} = \left[\sum_{i=1}^n (\epsilon_{lw,i} \cdot T_{s,i}^4 + \frac{\alpha_{abs,s} \cdot D_{s,i}}{\epsilon_{lw,p} \cdot \sigma}) \cdot Pr_{p,i} \right]^{0,25} \quad (2.2)$$

Де, ϵ_{lw} – коефіцієнт випромінювання, $\alpha_{abs,s}$ – коефіцієнт короткохвильового поглинання (Альбедо), σ – стала Стефана – Больцмана та розсіяна радіація – D_s .

Модель вітру. Дані про вітер оцінюються у «SkyHelios» на основі діагностичної моделі вітру, що розглядає чотири типи модифікації потоку для кожної окремої перешкоди (навітряна зона застою; рециркуляція в підвітряній зоні; вихор вуличного каньйону) [85].

Отже, модель «SkyHelios» здатна оцінювати швидкість та напрямок вітру, середню радіаційну температуру, а також основні біокліматичні індекси, як в просторовому так і в часовому масштабі, з високою роздільною здатністю. «SkyHelios» часто застосовується в біометеорологічних дослідженнях [84, 125, 146, 160, 161].

До основних переваг моделі «SkyHelios» належать:

- короткий час обчислення, що досягається, завдяки застосуванню інструментів графічної обробки, що необхідні при тривимірному моделюванні. «SkyHelios» використовує 3D-графіку для вирішення складних обчислень, наприклад, візуалізація таких параметрів, як фактор відкритого неба або оцінка радіації.

- використання програмного каркасу з відкритим кодом (таких як MOGRE, GDAL, SQLite), що полегшує обчислення [85]. Такі переваги дозволяють виконувати моделювання на звичайному стаціонарному комп'ютері (на 64-бітних машинах Windows).

2.3 Характеристика вихідних даних

В даному дослідженні ідентифікація випадків ХТ базувалася на щоденних добових значеннях максимальної температури повітря за літні місяці 1961–2020 рр. для 21 міста України (для Луганська – 1961–2013 рр.). Для аналізу були обрані станції, що рівномірно розташовані в різних регіонах (рис. 2.9).

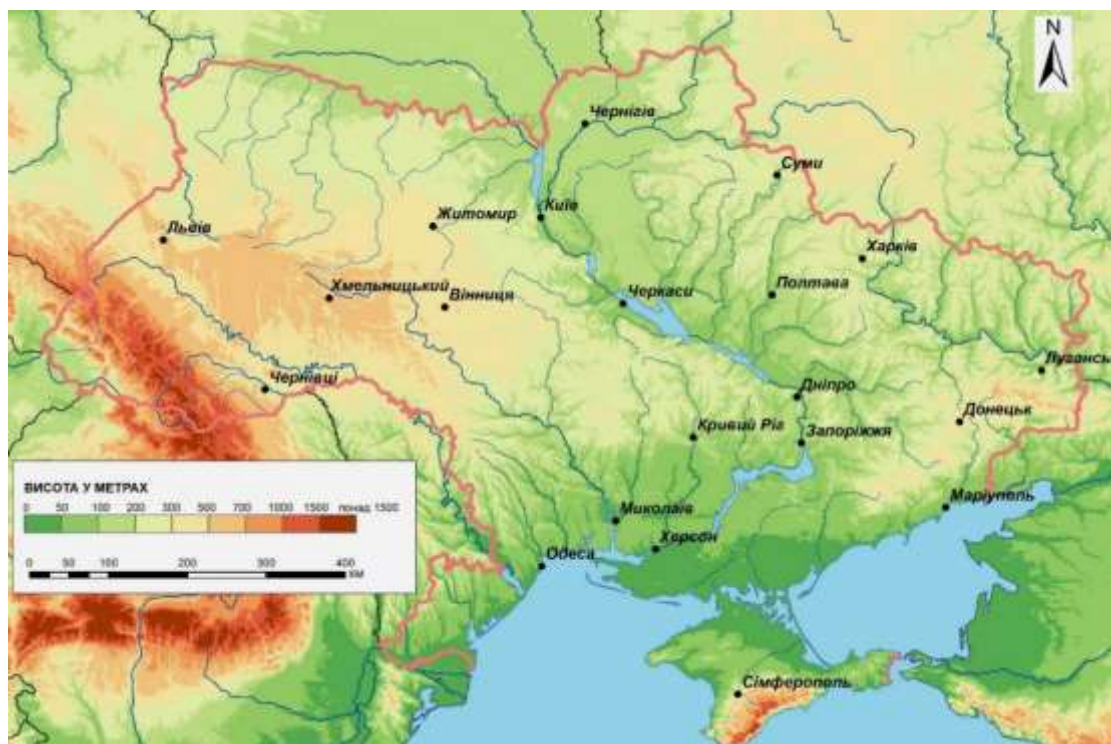


Рис. 2.9 Розташування міст, обраних для оцінки біокліматичних умов під час ХТ.

Оцінка біокліматичних умов під час хвиль тепла здійснена з використанням біокліматичного індексу фізіологічно-еквівалентна температура. Моделювання значень ФЕТ реалізовано за допомогою моделі «RayMan». Для моделювання було використано строкові дані Центральної геофізичної обсерваторії імені Б. Срезневського про температуру та вологість повітря, швидкість вітру та хмарність під час випадків ХТ. Розрахунок ФЕТ проводився для 15:00 години за східноєвропейським літнім часом (СЛЧ), оскільки цей час доби за умов ясної погоди характеризується найвищими значеннями температури повітря.

Для ідентифікації ЛКЗ у великих містах України було використано матеріали проекту WUDAPT, що були завантажені з сайту (<http://www.wudapt.org/european-lcz-map/>) для 0-рівня. Дотримуючись алгоритму протоколу WUDAPT здійснено ідентифікацію локальних кліматичних зон міста Києва. Для цього з веб-сайту Геологічної служби США (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) було завантажено кілька сцен Landsat 8, оскільки багаточасова інформація покращує класифікацію ЛКЗ [48]. Для Києва було обрано три сцени з наступними датами (4 серпня 2018 р.; 10 жовтня 2018 р. та 19 травня 2019 р.). Ці сцени мали хмарність менше 6%. В таблиці 2.2 наведено кількість відцифрованих полігонів ТА для кожного типу ЛКЗ. Ці зони охоплюють однорідні площі, наскільки це можливо та мають розмір понад 1 км². У деяких випадках розміри полігонів не відповідають рекомендаціям протоколу, оскільки фактичні розміри цих ЛКЗ (ЛКЗ–1 та Е) у місті є невеликими. Просторові дані для великих міст України були завантажені з глобальної бази даних про адміністративні території – GADM (англ. – Database of Global Administrative Areas) [87].

Таблиця 2.2

Кількість обраних навчальних зон (НЗ) та ЛКЗ Києва, що виражені у %.

Типи ЛКЗ	ТА	ЛКЗ, %
ЛКЗ–1 Щільна багатоповерхова забудова	2	0,1
ЛКЗ–2 Щільна середньоповерхова забудова	5	3,9
ЛКЗ–3 Щільна малоповерхова забудова	5	0,2
ЛКЗ–4 Багатоповерхова з низькою щільністю забудова	7	8,2
ЛКЗ–5 Середньоповерхова з низькою щільністю забудова	5	7,9
ЛКЗ–6 Малоповерхова з низькою щільністю забудова	7	3,2
ЛКЗ–7 «Легка» малоповерхова забудова	–	–
ЛКЗ–8 Обширна малоповерхова забудова	5	5,3
ЛКЗ–9 Садибна зона	3	10,8
ЛКЗ–10 Зона важкої промисловості	–	–
ЛКЗ–А Зона високих щільно посаджених дерев	5	32,6
ЛКЗ–В Зона з «легкою» лісистістю	5	13,8
ЛКЗ–С Зона кущів, чагарників	2	1,0
ЛКЗ–D Зона низькорослих рослин	5	5,3
ЛКЗ–Е Зона транспотної інфраструктури та гірських масивів	3	0,9

Продовження таблиці 2.2

ЛКЗ–F Зона зі відкритим ґрунтом та піском	5	0,5
ЛКЗ–G Зона водних об'єктів	6	6,3
Загальна площа	–	83259

Моделювання теплового навантаження виконувалася на прикладі 10 ділянок міста Києва, що належать до різних ЛКЗ (див. додаток Б). Для моделювання в «SkyHelios» використано інформацію погоди (температура та вологість повітря, швидкість та напрямок вітру, хмарність) за дні, які спеціально обиралися з різними синоптичними ситуаціями. Їх детальний опис наведено у додатку В. Моделювання проводився починаючи з 00:00 по 18:00 год СЛЧ з часовим кроком 6 год, для висоти 1,1 м над землею поверхнею (стандартна висота для розрахунку термічних умов [101, 134]).

Висновки до 2 розділу

1. На основі аналітичного огляду мікрокліматичних особливостей міст України проілюстровано різноманітність мікрокліматичних умов у межах великих міст та показано вплив цілого комплексу чинників на їх формування.

2. На основі аналізу сучасних програмних продуктів, які використовуються для чисельного моделювання мікро- та біоклімату міст, обґрунтовано переваги одновимірної мікромасштабної моделі «RayMan» та просторової мікромасштабної моделі «SkyHelios» для вирішення низки задач під час оцінки біокліматичних умов великих міст у літній період.

3. Охарактеризовано вихідні дані (для 21 міста з населенням понад 250 тисяч осіб) та методологію представленого дослідження, яка складалася з наступних етапів:

1) формування багаторічних рядів метеорологічної інформації (1961–2020 рр.);

2) визначення випадків хвиль тепла та аналіз термічного стресу у містах під час прояву цього атмосферного явища (ґрунтуючись на значеннях ФЕТ, отриманих за допомогою одномірної мікромасштабної моделі «RayMan»);

3) ідентифікація локальних кліматичних зон міст за протоколом WUDAPT 0 рівня з використанням Google Earth і SAGA та сцени Landsat-8;

4) аналіз повторюваності ЛКЗ по території міст.

5) обрано 10 ділянок у місті Києві, що представляють 6 ЛКЗ, 5 забудованих (ЛКЗ 1, 2, 4–6) та одна зона високих щільно посаджених дерев (ЛКЗ–А) та підібрано 10 погодних ситуацій з метою оцінки відмінностей біокліматичних умов в межах окремих локальних кліматичних зон за різних погодних умов.

РОЗДІЛ 3

БЮКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ВЕЛИКИХ МІСТ ПІД ЧАС ХВИЛЬ ТЕМПЛА

У літній період у великих містах помірних широт досить часто спостерігаються високі температури повітря, що призводить до формування у населення теплового стресу високої інтенсивності. Центральна частина міста за рахунок переваження заасфальтованих та бетонних поверхонь, як правило, характеризується підвищеною температурою повітря, або це явище більш відоме, як острів тепла (ОТ). В умовах зміни клімату, що проявляється в зростанні температури повітря, а також в зростанні інтенсивності та частоти виникнення екстремальних погодних явищ, таких як хвилі тепла (ХТ), міста все частіше зазнають негативного впливу високих температур. Особливості міської морфології, що сприяють розвитку ОТ, можуть спричинювати суттєве посилення теплового навантаження на мешканців міст під час випадків ХТ. Тому оцінка умов теплового комфорту міст під час ХТ має значний науковий та практичний інтерес, адже отримані результати можуть використовуватися для підвищення комфортності проживання в містах та впровадження заходів адаптації міст до спеки.

Одним із наслідків зміни клімату є збільшення частоти, інтенсивності та тривалості ХТ, які можуть спричинити серйозні наслідки для здоров'я населення. Хвиля тепла (англ. – Heat wave) – визначається як період з аномально спекотною та сухою погодою, який триває кілька послідовних днів та охоплює значні території [27]. Хвилі тепла мають значний вплив на самопочуття, працездатність і здоров'я людей. Вони можуть посилити тепловий стрес, який включає теплове навантаження, зневоднення та тепловий удар, а також можуть призвести до помітного короткочасного зростання захворюваності та смертності [47]. Наприклад, понад 100 000 людей загинули під час мега-хвиль тепла у 2003 році у Західній Європі та у 2010 році у Західній частині Росії [46]. Результати наших досліджень [175, 178] свідчать, що за період 1961–2015 рр. для території України найінтенсивнішими були хвилі тепла 2010 та 2015 років. ХТ 2010 тривала з кінця липня до середини серпня, була найдовшою та найінтенсивнішою і спостерігалася

майже на всіх станціях Північного, Центрального, Східного та Південного регіонів України. ХТ літа 2015 року охопила значні території на Заході країни..

Згідно проєкцій [45] у 21 столітті очікується збільшення інтенсивності, частоти та тривалості ХТ, що може призвести до значного підвищення рівня смертності від спеки влітку [118].

Чутливість до теплового стресу змінюється залежно від багатьох аспектів, таких як вік, здоров'я, спосіб життя, рівень бідності, інфраструктура, доступ до медичної допомоги та соціальне забезпечення [167]. Встановлено, що люди з респіраторними та серцево–судинними захворюваннями, цукровим діабетом або хронічними психічними захворюваннями, пацієнти, які приймають певні ліки або ліки, що впливають на сприйняття або регуляцію тепла в організмі, маленькі діти та люди похилого віку, чия здатність до адаптації може бути недостатньою, будуть більш вразливими до екстремальних температур [56, 96, 111]. Найбільш вразливі до теплового стресу є люди похилого віку. Наприклад, ХТ 2003 року у Франції спричинила 15 000 смертей, з яких 70% були люди у віці 75–94 років [189].

Офіційного стандартизованого підходу до ідентифікації ХТ не існує. Всесвітня метеорологічна організація визначає хвилю тепла, як період тривалістю понад п'ять послідовних днів, протягом яких максимальна добова температура повітря перевищує середню максимальну температуру для даного дня за кліматичну норму (період 1961–1990 рр.) на 5°C або більше. Переваги використання даного підходу при дослідженні хвиль тепла на території України обґрунтовано в роботах Шевченко О.Г. та Сніжка С.І. [27, 174].

3.1 Просторово–часова мінливість випадків ХТ та характеристика їх тривалості

Для аналізу біокліматичних умов великих міст України під час хвиль тепла було обрано понад 20 міст, які розташовані в різних регіонах України. Результати свідчать, що за досліджуваний період (червень–серпень 1961–2020 рр.) найбільша

кількість випадків ХТ спостерігалася в Центральному регіоні України з абсолютним максимумом (47 випадків) у Дніпрі, а найменша – 17 випадків фіксувалася в Східному регіоні у Маріуполі (рис. 3.1). Загалом найменша кількість випадків ХТ за досліджуваний період спостерігалася в прибережних містах (17 – в Маріуполі та 18 – в Одесі), що пов’язано охолоджуючим ефектом Чорного та Азовського морів. Кількість випадків ХТ в Північному регіоні України варіювалася від 25 (Київ та Чернігів) до 31 (Житомир). Для Західного регіону відмічалася нижча кількість випадків ХТ за досліджуваний період – від 23 (Чернівці) до 26 (Львів). Кількість випадків ХТ в Центральному регіоні України варіювалася від 30 до 32 випадків, найменша кількість ХТ у цьому регіоні зафіксована у Вінниці (24), найбільша – у Дніпрі (47). У Східному регіоні кількість ХТ коливалась від 17 (у Маріуполі) до 35 випадків (у Харкові). Південний регіон країни характеризувався переважно значною кількістю випадків ХТ – від 31 (Миколаїв) до 35 (Запоріжжя), виключенням є Одеса, де зафіксовано лише 18 ХТ.

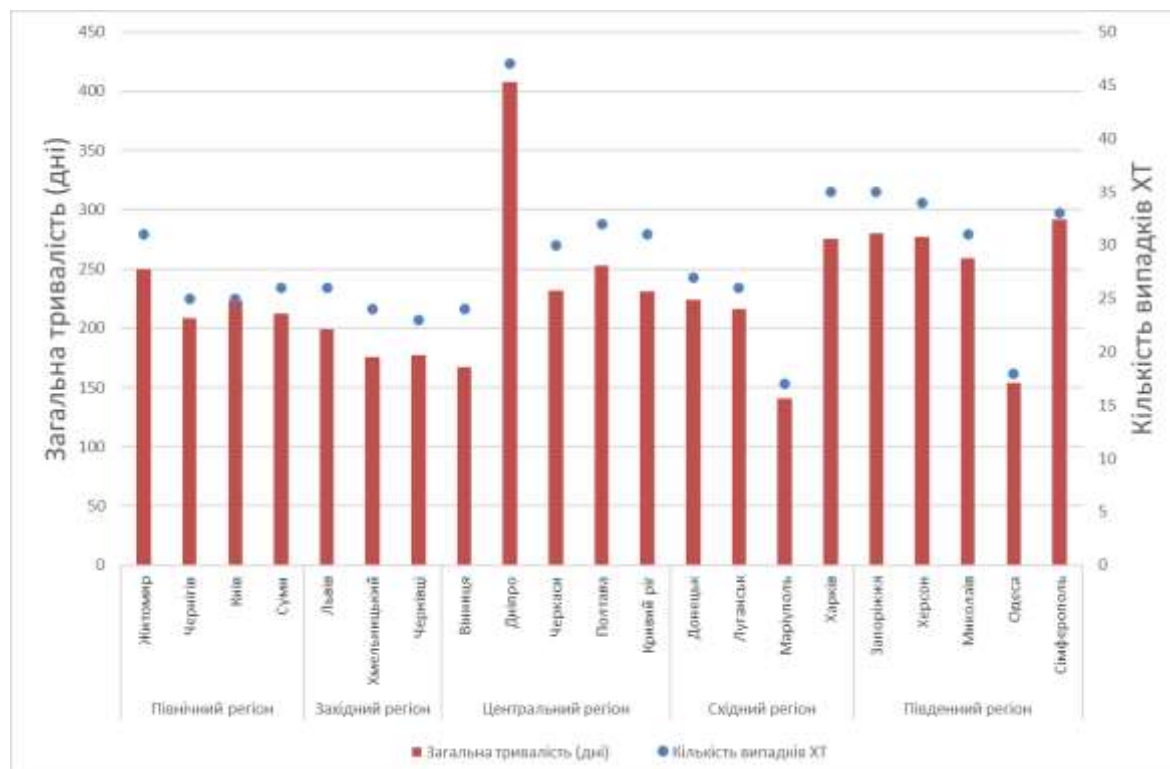


Рис. 3.1 Загальна тривалість (дні) та кількість випадків ХТ у період 1961–2020 рр.

Наведені результати свідчать про високу просторову мінливість ХТ по території України. Найбільша кількість випадків ХТ зафіксована на станціях Центрального та Південного регіонів, а найменша – на прибережних станціях. Подібний характер розподілу ХТ спостерігається в сусідніх країнах, наприклад у Польщі [190], Чехії [116], а також у Німеччині [191]. Загальна тривалість випадків ХТ за досліджуваний період також істотно змінювалася – від 141 дня (Маріуполь) та 154 днів (Одеса) до 408 днів (Дніпро). Для більшості станцій загальна тривалість випадків ХТ становила від 200 до 290 днів, а для станцій Західного регіону та Вінниці – була меншою ніж 200 днів.

Аналізуючи часову динаміку кількості ХТ, як правило, розглядають кількість випадків ХТ за десятиліття (1961–1970, 1971–1980, 1981–1990, 1991–2000, 2001–2010 та 2011–2020). Результати свідчать, що, за винятком станцій Східного регіону, найбільша кількість випадків ХТ зафіксована у 2011–2020 рр. (рис. 3.2). Проте слід зазначити, що у 2001–2010 рр. на станціях Східного регіону фіксувалася найбільша кількість випадків ХТ за весь досліджуваний період. Загалом починаючи з 1991 року майже на всіх станціях кількість випадків ХТ зросла, порівняно з попередніми роками.

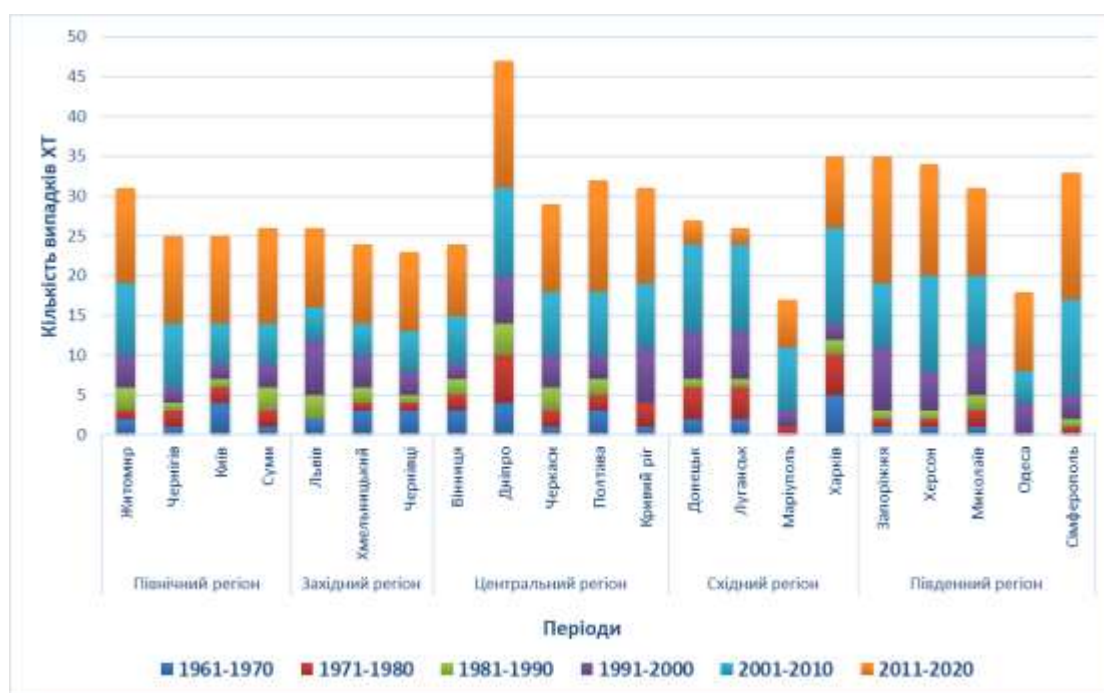


Рис.3.2 Кількість випадків ХТ у різних регіонах України за 1961–2020 рр.

На більшості станцій (18 із 21) найменша кількість хвиль тепла була зафіксована у 1981–1990 рр. та становила від 1 до 4 випадків. У цей період ХТ не спостерігалися в Кривому Розі, Маріуполі та Одесі, тоді як найбільше ХТ спостерігалось в Дніпрі (4 випадки). Для періодів 1961–1970 та 1971–1980 рр. фіксувалася дещо більша кількість випадків ХТ, проте вона майже в половину менша, ніж за період 1991–2000 рр. Зростання кількості ХТ спостерігається і в європейських країнах, наприклад [190] відмічає збільшення кількості ХТ для Польщі у 2006–2015 рр., тоді як найменша їх кількість зафіксована в період 1976–1985 рр.

Характеристика тривалості хвиль тепла. Для оцінки тривалості окремих ХТ їх було розділено на 3 градації: мінімальна тривалість ХТ, що становить 6 днів; ХТ середньої тривалості від 7–14 дні та тривалі ХТ, які спостерігаються понад два тижні. У всіх містах найчастіше спостерігалися ХТ середньої тривалості від 7 до 14 днів (рис. 3.3). Найчастіше такі ХТ фіксувалися у Херсоні (70,6%), а найрідше – у Вінниці (39,1%). В Чернігові, Вінниці, Кривому Розі та Харкові вони склали менше 50% від усіх досліджуваних ХТ. Дещо рідше спостерігалися ХТ з мінімальною тривалістю у 6 днів. Лише в Хмельницькому та Вінниці вони мали найбільшу повторюваність та склали 50% та 60,9% від усіх випадків, що спостерігалися протягом досліджуваного періоду. Найменша повторюваність шестиденних випадків ХТ фіксувалася в Києві (24%), в Херсоні (26,5%) та Сімферополі (27,3%). Тривалі ХТ (понад 14 днів) зафіксовані у 17 досліджуваних містах. Їх повторюваність була невисокою та змінювалася від 2,9% у Запоріжжі та Херсоні до 12% у Києві.

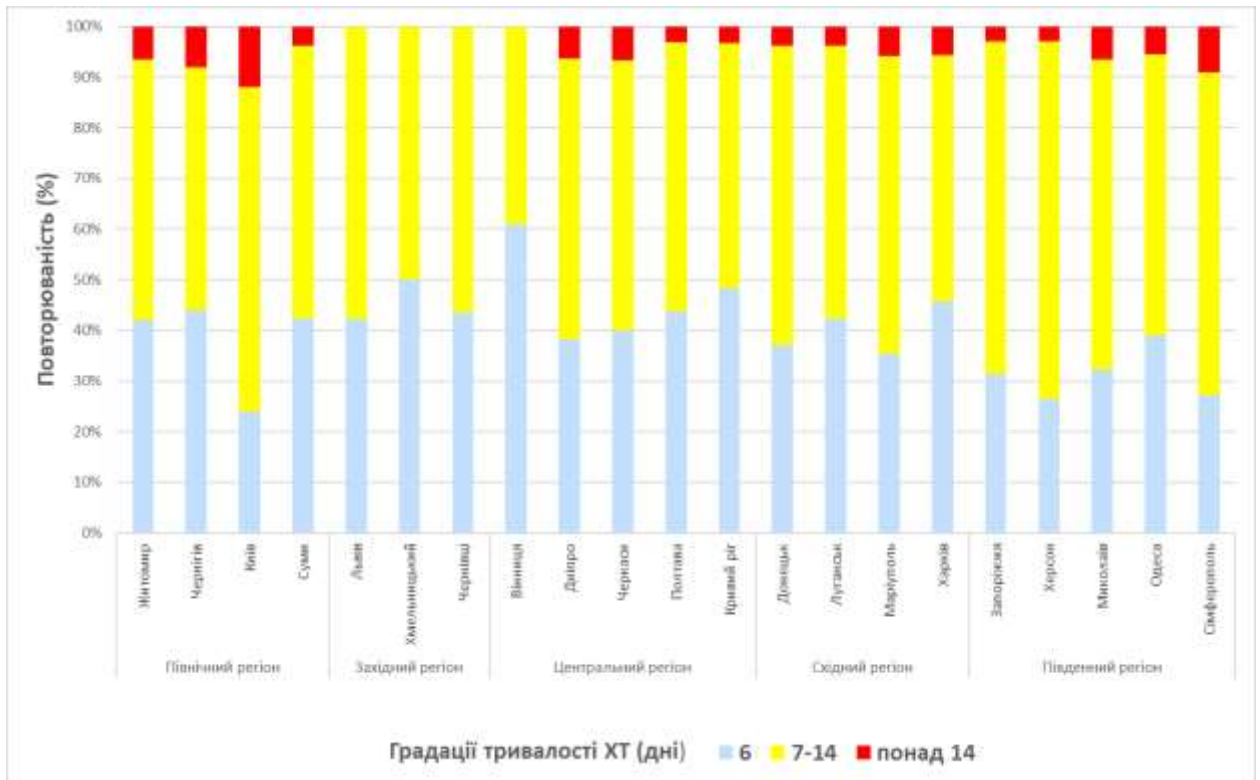


Рис.3.3 Повторюваність хвиль тепла різної тривалості.

3.2 Біокліматичні умови під час ХТ

На більшій частині території країни (рис. 3.4) середні значення ФЕТ о 15:00 СЛЧ під час ХТ змінювалися від 35,1°C до 41,0°C, що відповідає сильному тепловому стресу (див. градації ФЕТ розділ 1.5). Середні значення ФЕТ зростали з заходу на південь та південний схід. Найнижче середнє значення ФЕТ під час випадків ХТ (34,1°C) зафіксовано на станціях Західного регіону (Львів та Хмельницький) та відповідає помірному тепловому стресу, а найвище середнє значення ФЕТ – 41,3°C (екстремальний тепловий стрес) зафіксовано у Луганську (Східний регіон). Середнє значення ФЕТ о 15:00 СЛЧ під час випадків ХТ у літні місяці за 1961–2020 рр. становило 37,4°C – сильний тепловий стрес.

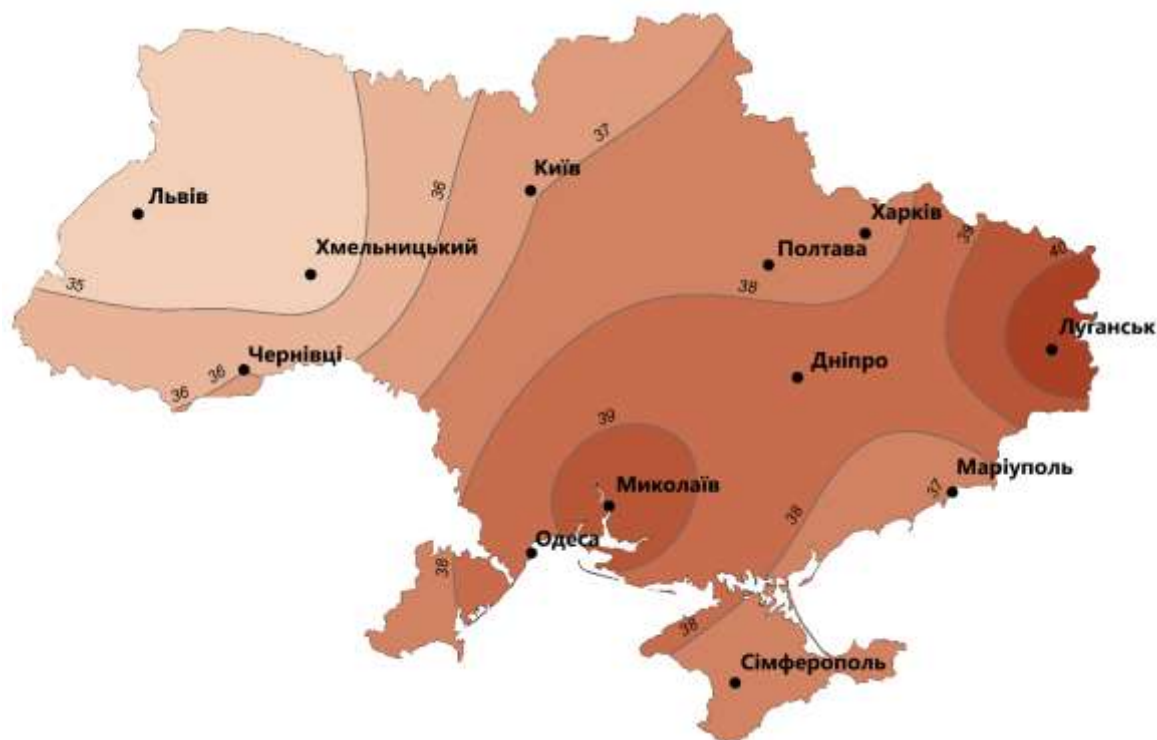


Рис.3.4 Середнє значення ФЕТ о 15:00 СЛЧ для всіх ХТ за 1961–2020 рр.

Під час всіх випадків ХТ найчастіше (понад 50%) майже на всіх станціях реєструвалися дні з сильним тепловим стресом (рис. 3.5). Повторюваність таких днів була найвищою у містах Північного, Центрального та Південного регіонів та змінювалася від 52,2% (Київ) до 57,4% (Миколаїв). Виняток становили міста Західного регіону, де під час ХТ повторюваність днів з сильним тепловим стресом, сягала лише 36–42%. Другим за частотою виникнення класом теплового стресу був помірний тепловий стрес (значення ФЕТ 29,1–35,0°C). Його повторюваність була найвищою на станціях Західного регіону зі значеннями від 37,9% (Чернівці) до 46,6% (Хмельницький), тоді як найменша (5,0% та 7,8%) спостерігалася у Луганську та Миколаєві. Під час ХТ дні з екстремальним тепловим стресом (ФЕТ >41,1°C) найчастіше фіксувалися в Луганську (56,0%) та Миколаєві (34,0%). Найбільша кількість днів під час ХТ належить до класів помірного, сильного та екстремального теплового стресу. Частота таких днів була дуже високою і коливалась від 87,0% у Львові до 99,3% у Дніпрі. Повторюваність теплового стресу такої інтенсивності нижче 90% спостерігалася лише для двох станцій Західного регіону (Львів та Хмельницький).



Рис.3.5 Повторюваність різних градацій термічного навантаження під час випадків ХТ о 15:00 СЛЧ.

Дні з легким тепловим стресом (23,1–29,0°C) коливались від 0,5% у Луганську до 12,0% у Львові. Для станцій Центрального регіону, Луганську та Миколаєва повторюваність була нижче 1%. На 6 станціях з усіх розглянутих регіонів були зафіксовані дні з комфортними умовами (тобто без теплового/холодового стресу), повторюваність таких днів була дуже низькою і коливалася від 0,4% (Київ та Харків) до 1,4% (Маріуполь).

Один день протягом періоду дослідження був класифікований з легким холодним стресом у Хмельницькому, Харкові та Сімферополі та сильним холодним стресом у Чернівцях. На всіх станціях це були останні дні випадків ХТ. Закінчення випадків ХТ, як правило, характеризувалося падінням температури повітря (і зниженням значень ФЕТ) через опади, пов'язані із проходженням атмосферних фронтальних систем територією України.

За досліджуваний багаторічний період середні значення ФЕТ під час хвиль тепла зросли по всій території України (табл. 3.1). Результати свідчать, що

починаючи з 1991 року на території України під час ХТ переважно фіксується сильний тепловий стрес. Лише у Хмельницькому (1991–2000 рр. та 2001–2010 рр.) та у Львові (1991–2000 рр.; 2001–2010 рр. та 2011–2020 рр.) спостерігався помірний тепловий стрес, а у Миколаєві (1991–2000 рр.) та у Луганську (1991–2000 рр.; 2001–2010 рр. та 2011–2020 рр.) – екстремальний тепловий стрес.

Таблиця 3.1

Середнє значення ФЕТ за різні часові періоди під час ХТ

Періоди	Середнє значення ФЕТ °С							
	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2020	1961–1990	1991–2020
Дніпро	37,0	36,5	35,8	39,4	40,4	38,4	36,4	39,4
Маріуполь	–	36,7	–	39,5	36,7	35,3	36,7	37,2
Миколаїв	39,3	38,1	39,7	41,1	40,9	39,3	39,0	40,4
Полтава	35,2	35,5	34,9	38,2	40,3	36,8	35,2	38,4
Хмельницький	34,6	38,0	30,3	31,9	32,8	35,2	34,3	33,3
Київ	36,7	35,6	29,8	35,5	39,5	36,5	34,0	37,2
Луганськ	41,3	39,8	38,1	41,1	42,0	41,6	39,7	41,6
Львів	34,2	–	32,8	34	34,1	34,4	33,5	34,2
Одеса	–	–	–	37,3	40,3	37,9	–	38,5
Сімферополь	–	35,1	30,6	39,3	38,4	36,3	32,9	38,0
Харків	36,7	37,7	34,8	36,7	38,6	35,6	36,4	37,0
Чернівці	35,7	33,1	41,0	37,6	36,7	35,5	36,6	36,6

Найнижчі середні значення ФЕТ під час випадків ХТ зафіксовано за період 1981–1990 рр. – від 29,8°C (помірний тепловий стрес) до 41,0°C (сильний тепловий стрес). Для 6 міст (Київ, Хмельницький, Сімферополь, Львів, Харків та Полтава) ця декада була періодом із найнижчим середнім значенням ФЕТ, і його значення в цей сезон варіювали від 29,8°C у Києві до 34,9°C у Полтаві. Періодом з найвищим середнім значенням ФЕТ під час ХТ для більшості станцій, був період 2001–2010 рр. (середнє значення ФЕТ варіювалося від 32,8°C до 42,0°C). Протягом цього періоду на 9 станціях зафіксовано сильний тепловий стрес, тоді як у Луганську – екстремальний, а у Хмельницьку та Львові – помірний тепловий стрес. Порівняння усередненого значення ФЕТ під час випадків ХТ за два кліматичні періоди: 1961–1990 рр. та 1991–2020 рр. свідчить, що за перший період середні значення ФЕТ

нижчі, ніж за сучасний. Виключенням є місто Хмельницький, де середнє значення ФЕТ для періоду 1991–2020 рр. є нижчим за кліматичну норму, проте для обох періодів значення ФЕТ під час ХТ відповідає легкому тепловому стресу. Незважаючи на те, що за останні три десятиліття значення ФЕТ під час випадків ХТ збільшилися майже на всіх станціях, приналежність до певних градацій ФЕТ залишилися без змін, за винятком Києва, Луганська та Сімферополя.

Особливості міської морфології, різноманітність матеріалів, а також наявність зелених та водних зон призводить до того, що мікрокліматичні умови можуть значно відрізнятися не лише в різних містах, але й у межах незначних ділянок чи різних районах одного міста. У щільно забудованих кварталах, де переважають бетонні поверхні, буде спостерігатися посилення теплового навантаження, тоді як у міських парках, скверах – знижується ймовірність виникнення теплового стресу. Відмінності значень метеорологічних величин у межах окремих мікрорайонів призведуть до неоднорідності біокліматичних умов всередині міської забудови [32, 61, 132, 170, 203]. Нами також було проведено дослідження відмінностей температури та вологості повітря і швидкості вітру в межах складної міської забудови (на прикладі ділянки житлового масиву Осокорки м. Києва) [177]. Результати показали наявність значних неоднорідностей полів цих метеорологічних величин навіть у межах незначної за площею території, що спричинює формування суттєвих відмінностей теплового навантаження на людський організм. Також було встановлено, що значення ФЕТ (а, відповідно, й інтенсивність теплового стресу), розраховані для літнього спекотного дня з часовим інтервалом 1 година за даними метеорологічної станції, та отримані для різних точок в межах незначної ділянки міської забудови, суттєво відрізняються [177]. І таким чином, хоча результати моделювання термічного навантаження на людину під час хвиль тепла, є дуже важливими для вирішення окремих наукових та практичних задач, вони мають бути лише першим етапом дослідження теплового стресу в містах в літні місяці.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що за період 1961–2020 рр. кількість випадків хвиль тепла суттєво відрізняється у досліджуваних містах України. Найбільша кількість ХТ спостерігалася в містах Центрального регіону, а найменша – на станціях, розташованих на узбережжях морів. У містах найчастіше спостерігалися ХТ тривалістю від 7 до 14 днів. За досліджуваний період найменша кількість ХТ спостерігалась у 1981–1990 рр., а найбільша – у 2011–2020 рр. Загалом починаючи з 1991 року майже на всіх станціях кількість випадків ХТ зросла порівняно з попередніми десятиліттями.

2. Ґрунтуючись на значення ФЕТ під час випадків ХТ показано, що інтенсивність теплового стресу в ці періоди зростає по території з північного заходу на південь–південний схід, що в загальних рисах відповідає розподілу температури повітря по території України у літні місяці. із заходу на південь та південний схід. Найнижче середнє значення ФЕТ ($34,1^{\circ}\text{C}$) зафіксовано у Львові та Хмельницькому, а найвище ($41,3^{\circ}\text{C}$) спостерігалось у Луганську. Середнє значення ФЕТ розраховане для всієї території в аналізований період становило $37,4^{\circ}\text{C}$ і відповідало сильному тепловому стресу.

3. Показано, що в містах України під час ХТ влітку переважають дні з сильним тепловим стресом (понад 50%), винятком є міста Західного регіону. Дні з екстремальним тепловим стресом найчастіше фіксувалися в Луганську (56,0%) та Миколаєві (34,0%). Повторюваність помірного теплового стресу (який є другим за повторюваністю) також суттєво варіювалася у різних містах – від 5,0% (Луганськ) до 46,6% (Хмельницький). Незначний тепловий стрес та інші градації термічного стресу спостерігалися значно рідше. Лише на 6 станція під час ХТ фіксувалися дні з комфортними умовами (повторюваність від 0,4% до 1,4%).

4. На основі аналізу значень ФЕТ під час хвиль тепла за 1961–2020 рр. показано, що починаючи з 1991 року середні значення даного показника зросли майже у всіх досліджуваних містах і на більшості станцій належать до градації сильного теплового стресу. Середнє значення ФЕТ під час ХТ за окремі декади з 1991 року

належало до градації помірного теплового стресу лише для Хмельницького, Києва, Львова та Сімферополя, а у Луганську за 1991–2000 рр. та 2011–2020 рр. – до екстремального.

5. Основні наукові результати, представлені у даному розділі, опубліковано у працях автора [14, 175, 178].

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА МІКРОКЛІМАТУ ТА БІОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ В МЕЖАХ РІЗНИХ ЛОКАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗОН ВЕЛИКИХ МІСТ

4.1 Аналіз локальних кліматичних зон міст України

Для реалізації задач даного дослідження були використані матеріали проекту WUDAPT 0-рівня для 21 міста України (див. табл. 4.1). ЛКЗ-1 – щільна багатоповерхова та ЛКЗ-7 – зона невисоких будинків, що побудовані з найпростіших будівельних матеріалів (дерева, соломи, гофрованого металу, тощо) не зафіксовані в досліджуваних містах. Для більшості міст серед міських поверхонь найпоширенішими ЛКЗ є середньоповерхові (ЛКЗ-5) та малоповерхові (ЛКЗ-6) будинки з низькою щільністю забудови. Середня висота забудови даних типів – 10–25 м та 3–10 м, відповідно. Це переважно – житлово-офісні квартали з достатньою кількістю зелених насаджень.

В Одесі та Харкові найбільші площі зайняті ЛКЗ-5 – 30,3% та 28,4% території міст, відповідно. Площі ЛКЗ-5 в інших містах варіюються від 20,7% (Хмельницький) до 5,3% (Чернівці). Для Києва цей показник становить 11,2%.

Для 14 з усіх досліджуваних міст, площі територій із забудовою, що належить до ЛКЗ-6, мають найвищі показники серед забудованих типів і становлять від 9,4% території для Херсону до 44,9% – для Чернігова. ЛКЗ-8 (території із 1–3 поверховими будівлями, що розташовані на значній відстані одна від одної, та характеризується невеликою кількістю рослинності (< 20% від загальної площі)) є значно менш поширеною у містах України. Найменші площі цієї ЛКЗ у Чернігові, Донецьку, Львові, Полтаві та Луцьку (1,9; 3,2; 3,9; 4,5 та 5,9% відповідно), а найбільші – у Маріуполі, Одесі та Харкові (21,8; 18,9 та 18,1% від загальної площі міст).

Таблиця 4.1

Покриття території ЛКЗ для досліджуваних міст та загальна площа міських поверхонь

Назва міста	Локальні кліматичні зони (%) в межах міст															Загальна площа ¹
	ЛКЗ-2	ЛКЗ-3	ЛКЗ-4	ЛКЗ-5	ЛКЗ-6	ЛКЗ-8	ЛКЗ-9	ЛКЗ-10	ЛКЗ-А	ЛКЗ-В	ЛКЗ-С	ЛКЗ-Д	ЛКЗ-Е	ЛКЗ-Ф	ЛКЗ-Г	
Київ	0,90	0,07	0,38	11,21	8,83	14,93	3,75	0,00	32,50	9,53	–	9,60	2,18	0,65	5,46	83152
Харків	1,27	0,06	0,47	28,37	13,95	18,07	2,38	–	11,79	6,40	0,04	15,14	1,12	0,07	0,88	29115
Одеса	8,61	0,53	0,72	30,27	24,38	18,92	0,76	0,15	0,28	7,96	0,03	5,52	0,80	0,05	1,02	9680
Дніпро	1,98	0,11	0,23	16,08	16,01	8,38	3,93	–	2,79	11,58	0,03	24,40	0,73	0,18	13,58	44779
Донецьк	0,37	0,04	0,23	13,12	13,74	3,21	5,10	–	9,85	9,85	0,01	42,97	0,61	0,06	0,84	61329
Запоріжжя	1,62	0,08	0,23	15,21	11,08	12,16	3,64	0,02	1,57	6,96	0,03	32,31	1,64	0,37	13,08	32594
Львів	4,84	0,30	0,12	15,22	22,95	3,93	4,54	–	30,52	10,86	0,01	6,41	0,11	0,02	0,17	17999
Кривий Ріг	3,02	0,20	0,02	10,20	11,90	11,47	3,65	–	2,48	11,01	–	38,59	3,91	0,04	3,50	80355
Миколаїв	0,74	0,22	0,04	7,34	16,88	12,87	2,44	0,03	1,85	10,91	0,11	23,07	0,50	0,19	22,80	29023
Маріуполь	2,12	0,12	0,11	17,69	8,92	21,78	1,01	0,01	0,31	2,66	–	43,50	0,67	0,16	0,94	22343
Луганськ	0,39	0,10	0,11	11,95	13,80	6,43	1,72	–	10,53	19,38	0,01	34,57	0,56	0,15	0,30	27544
Вінниця	0,50	0,18	0,66	13,15	34,90	13,75	4,84	–	12,67	6,42	0,04	8,74	2,01	0,10	2,04	10174
Сімферополь	2,65	0,33	0,17	19,63	23,25	16,14	4,02	–	2,57	5,80	0,29	20,88	1,52	0,16	2,59	10461
Херсон	0,66	0,06	0,01	5,84	9,40	4,73	1,77	0,00	0,65	10,15	0,01	59,61	0,24	0,10	6,76	29347
Чернігів	2,35	0,52	0,06	14,96	44,90	1,93	1,89	–	–	14,17	8,46	8,14	0,81	0,07	1,76	8308
Полтава	0,81	0,06	0,28	14,07	22,94	4,47	4,82	–	15,25	17,58	0,01	17,94	0,33	0,12	1,32	11915
Черкаси	0,98	0,10	0,34	17,00	11,89	7,27	3,19	–	0,84	5,76	0,02	18,10	1,77	0,55	32,18	10201
Хмельницький	1,48	0,07	0,13	20,74	28,40	9,47	4,65	–	4,24	8,48	0,71	17,74	0,51	0,06	3,33	6909
Чернівці	0,87	0,10	0,08	5,28	23,69	3,86	4,91	–	18,05	13,79	0,00	28,40	0,30	0,02	0,63	15913
Житомир	0,13	0,04	0,28	6,20	29,02	8,83	8,84	0,02	14,76	13,57	0,01	15,56	1,51	0,13	1,11	11963
Суми	0,10	0,03	0,40	7,54	20,09	6,18	5,34	–	15,68	10,01	0,03	29,60	2,11	0,19	2,70	14302

¹ Загальна площа міських поверхонь, яка виражена в кількості супутникових комірок, що належить до класу ЛКЗ 1–17 (розмір кожної комірки 100x100м).

Поширення ЛКЗ–9 (садибна зона) у досліджуваних містах не перевищує 9%. Це райони з низькою щільністю забудови (невеликі житлові будинки садибного типу не вище 3-х поверхів зі земельними ділянками). Найвищий показник (8,8%) зайнятості території даною зоною має місто Житомир, а найменший (0,8%) – Одеса.

ЛКЗ–2 (зона щільної середньоповерхової забудови, що характеризується 3–9 поверховими будинками та малою або повною відсутністю зелених насаджень) та ЛКЗ–3 (зона щільної малоповерхової забудови заввишки до 3 поверхів з малою кількістю зелених зон) займає найменші площі у досліджуваних містах. ЛКЗ–2 найпоширеніша у Одесі – 8,6%. Значно менші її площі (4,8%) – у Львові, а найменші – відмічаються у Сумах, Житомирі, Полтаві, Вінниці, Луцьку, Донецьку, Миколаєві та Києві (менше, ніж 1% від загальної площі території). Площі міських територій, зайнятих ЛКЗ–3 у досліджуваних містах не перевищує 0,5%.

Зона багатоповерхових будинків із низькою щільністю забудови (ЛКЗ–4) не зафіксована у Миколаєві, Херсоні та Кривому Розі, а для інших міст поширення цієї ЛКЗ становить менше 1% від загальної площі міст.

Зони важкої промисловості з малоповерховою та середньоповерховою забудовою й майже відсутнім рослинним покривом (ЛКЗ–10) у Одесі займають 0,1% від загальної території. В інших містах, де фіксувалася дана ЛКЗ (Запоріжжя, Миколаєва, Маріуполя, Херсону та Житомира) вона займає менше 0,1% міської території.

Основними природними ЛКЗ, поширеними в межах досліджуваних міст, є ЛКЗ–А (зона високих (до 30 м) щільно посаджених дерев), ЛКЗ–В (зона розріджених рослин) і ЛКЗ–D (зона низькорослих рослин). ЛКЗ–А в містах представлена територіями зі щільно висадженими деревами, переважно це міські парки або природні ліси, що зазвичай розташовані на периферії міст. Найбільший відсоток ЛКЗ–А серед досліджуваних міст, мають Київ та Львів – 32,5 та 30,5%, найменший – Одеса та Маріуполь (по 0,3%) від площі, та повна відсутність даної зони в Чернігові.

ЛКЗ–В представлена листяними та/або вічнозеленими деревами, що мають висоту 3–15 м та відношення озеленення – >90% від загальної площі зони. В

українських містах – це зона озеленення загального користування, тобто міські парки, сквери, сади, бульвари, міські ліси. Для більшості досліджуваних міст площі, зайняті ЛКЗ–В в середньому становлять до 9–13%. Винятком є місто Луганськ та Полтава – 19,4% площі, зайнятої цією ЛКЗ. Маріуполь має найменший відсоток території з ЛКЗ–В – 2,7%.

ЛКЗ–С – це зона з кущами, чагарниками і невисокими деревами (висотою < 1 м). Вона зафіксована у 14 містах з усіх досліджуваних. У Чернігові площі ЛКЗ–С становили 8,5%, Хмельницькому – 0,7%, Миколаєві – 0,1%. Для решти міст поширення цих ЛКЗ по території становило менше за 0,1%.

Площі ЛКЗ–D (території, з низькою рослинністю без дерев або з поодинокими деревами, найчастіше представлені полями, луками або частинами міських парків) варіюються від 5,5% (Одеса) до 59,6 (Херсон). ЛКЗ–E (території під транспортною інфраструктурою та гірські масиви з малою кількістю рослинності) займає найменші території від загальної площі міст – від 0,1% (Львів) до 3,9% (Кривий Ріг). ЛКЗ–F (території з відкритим ґрунтом та піском (це переважно території, де відбувається будівництво або ділянки, які підготовані до посіву) займає менш ніж 1% від загальної площі досліджуваних міст.

ЛКЗ–G (зона водних об'єктів, містить великі відкриті водойми, такі як моря та озера, або невеликі, такі як річки. Найбільші площі ЛКЗ–G у Черкасах (32,2%), Миколаєві (22,8%), Дніпрі (13,6%) та Києві (5,5%), що пов'язано з особливостями гідрографічної мережі України. У містах Харків, Донецьк, Луцьк та Львів зона водних об'єктів займає менше ніж 1 % від загальної площі міста (0,9%; 0,8%; 0,3% та 0,2%, відповідно).

Отже, для більшості великих міст України найпоширенішими локальними кліматичними зонами є ЛКЗ–5 та ЛКЗ–6, що являють собою середньо- та малоповерхову забудови низької щільності. ЛКЗ–5 займає найбільші площі в Одесі (30,3%) та Харкові (28,4%), а найменші (5,3%) – у Чернівцях. Площі ЛКЗ–6 варіюються від 9,4% території для Херсону до 44,9% – для Чернігова. Садибна зона (ЛКЗ–9) не перевищує 9% у всіх великих містах України. Зони щільної забудови

(ЛКЗ–2 та ЛКЗ–3) займають найменші площі у досліджуваних містах. Поширення ЛКЗ–2 у всіх великих містах не перевищує 8,6%, а ЛКЗ–3 – 0,5%.

Основними природними ЛКЗ поширеними в межах досліджуваних міст, є ЛКЗ–А, ЛКЗ–В та ЛКЗ–D. Найбільшим відсотком ЛКЗ–А характеризуються міста Київ та Львів (32,5 та 30,5%), а найменшим – Одеса та Маріуполь (по 0,3%) від площі. ЛКЗ–В в середньому становить до 9–13% площі для більшості досліджуваних міст. Найбільший відсоток 19,4% площі зайнятою цією ЛКЗ зафіксовано у Луганську, а найменший – 2,7% у Маріуполі. ЛКЗ–С спостерігалася у 14 містах з усіх досліджених та змінювалася від 0,1 (Миколаїв) до 8,5% (Чернігів). Площі зайняті ЛКЗ–D варіюються від 5,5% (Одеса) до 59,6 (Херсон). ЛКЗ–Е займає найменші території від загальної площі міст – від 0,1% (Львів) до 3,9% (Кривий Ріг). ЛКЗ–F займає менш ніж 1% від загальної площі досліджуваних міст. Найбільші площі зони водних об'єктів (ЛКЗ–G) зафіксовано у Черкасах (32,2%), Миколаєві (22,8%), Дніпрі (13,6%) та Києві (5,5%), а у містах Харків, Донецьк, Луцьк та Львів дана зона охоплює менше ніж 1 % від загальної площі міста (0,9%; 0,8%; 0,3% та 0,2% відповідно).

4.1.1 Характеристика локальних кліматичних зон міста Києва

При розробці карти ЛКЗ Європи автори [69]. використовували так званий трансферний підхід (англ. — city-to-city transfers). Принцип якого базується на тому, що можна класифікувати міський ландшафт для одного міста, використовуючи частину інформації даних ТА, створених для іншого міста. Хоча такий трансферний підхід значно полегшує картографування ЛКЗ, однак, його результати будуть гіршими в порівнянні з аналізом окремих міст [69]. А отже, збір даних про ТА конкретного досліджуваного міста залишається найкращим способом отримання точних результатів для рівня 0. За супутниковими знімками 2013–2015 років Київ та Львів були класифіковані на ЛКЗ, але через постійну розбудову міст, існуючі класифікації ЛКЗ вимагають періодичних оновлень [15, 175].

Дотримуючись алгоритму протоколу WUDAPT здійснено ідентифікацію локальних кліматичних зон міста Києва (рис. 4.1). Аналіз карти забудованої території Києва вказує на наявність 15 з 17 типів ЛКЗ (ЛКЗ–7 та ЛКЗ–10 – відсутні). ЛКЗ–1 з щільною багатоповерховою забудовою спостерігається тільки на лівому березі міста, та становить 0,1% від загальної території. Центральна частина міста, що охоплює Шевченківський та Печерський райони характеризуються змішаною середньо- та багатоповерховою забудовою, що відповідають ЛКЗ–2 та ЛКЗ–3 та займають 3,9% та 0,2% відповідно. Найпоширенішими ЛКЗ міста Києва є ЛКЗ–4 (8,2%) та ЛКЗ–5 (7,9%), які спостерігаються по всьому місту. ЛКЗ–6 (малоповерхова з низькою щільністю забудова) займає 3,2% від загальної площі Києва, це переважно 1–3 поверхові будинки садибного типу забудови.

Зона зі спорудами, що займають великий простір (ЛКЗ–8) розташовується в різних частинах міста та займає 5,3% від загальної площі. В Києві до цього типу належать зони легкої промисловості, інноваційного розвитку, комунально-складська та інженерного обладнання забудова. ЛКЗ–9, що включає садибну та садово-дачну зони зі земельними ділянками, має найвищі показники – 10,8% від загальної площі міста.

В межах Києва спостерігається наявність всіх природніх ЛКЗ. Найбільший відсоток серед зон з зеленими насадженнями – 32,6% має зона високих щільно посаджених дерев (ЛКЗ–А), найменший – 1% та 5,3% мають зони кущів та чагарників (ЛКЗ–С) та низькорослих рослин (ЛКЗ–D). ЛКЗ–E представлена у вигляді транспортної інфраструктури міста, та займає 0,9% від загальної площі. Зона з відкритим ґрунтовим та піщаним покривом (ЛКЗ–F) – 0,5%, та відповідає тим територіям, на яких здійснюється будівництво. Річка Дніпро разом з озерами займає 6,3% від загальної площі міста.

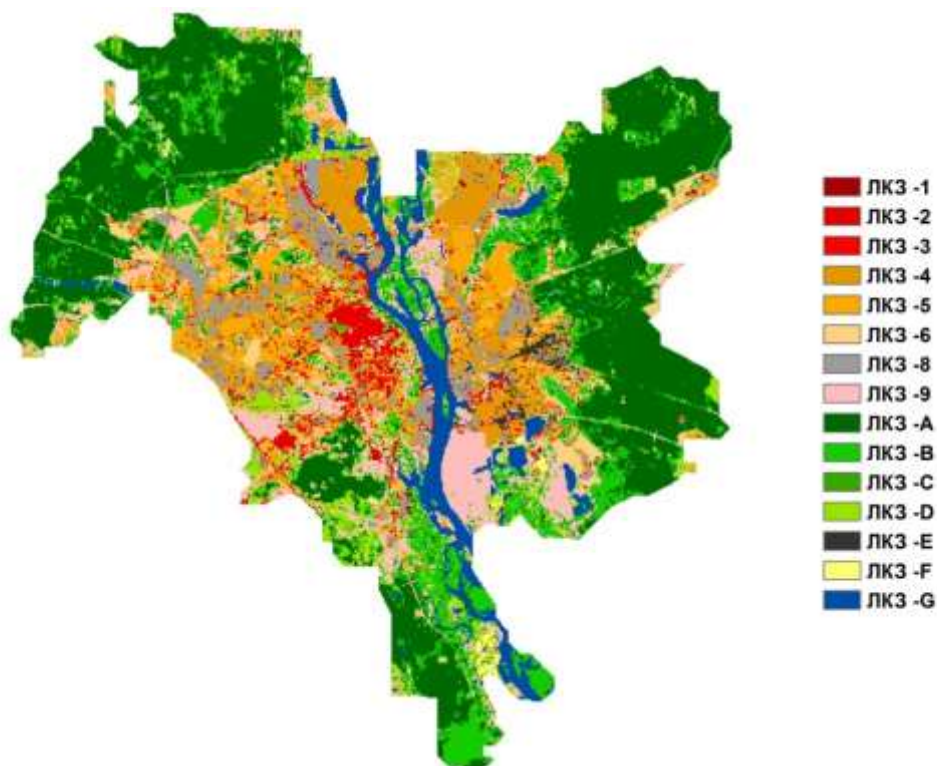
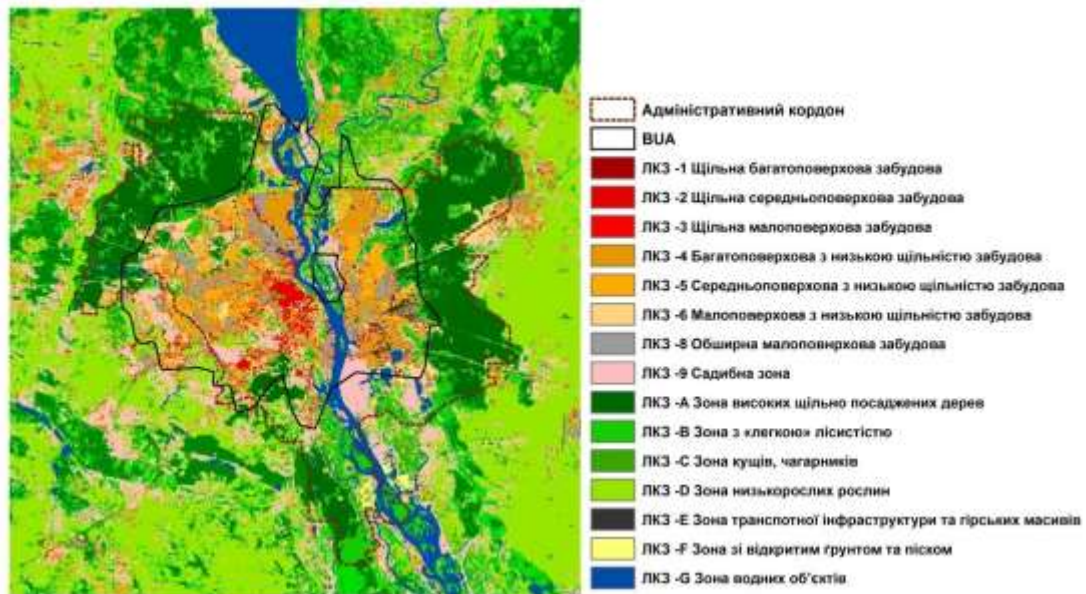


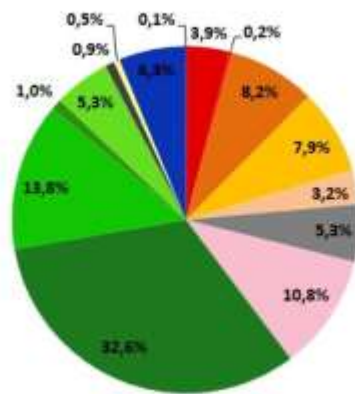
Рис.4.1 Карта Локальний кліматичних зон м. Києва

Адміністративні межі міста не завжди співпадають з забудованою територією (англ. – built-up area (BUA)), а прилеглі ліси та поля можуть бути включені до адміністративних кордонів. Для того, щоб результати оцінки ЛКЗ зробити більш об'єктивними для різних цілей, краще оцінити ЛКЗ за адміністративними кордонами міста та за BUA (оскільки площі цих територій можуть бути різними).

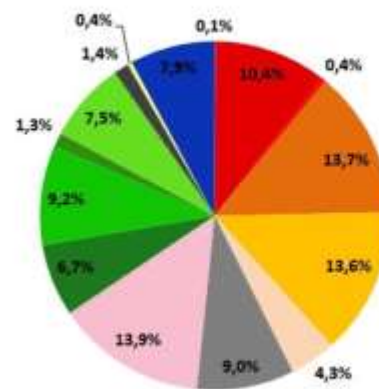
На прикладі міста Києва було проаналізовано відмінності співвідношення різних ЛКЗ в межах адміністративних кордонів міста та в межах забудованої території. Площа міста в межах адміністративного кордону становить приблизно 850 км², та охоплює не тільки забудовану територію, але й велику лісисту територію, яка займає 52,6% території міста. Локальні кліматичні зони, виявлені в адміністративних межах Києва та в його BUA території, показані на рис. 4.2. Площі ЛКЗ із забудованими територіями (ЛКЗ–1 – ЛКЗ–9) охоплюють близько 40% в межах адміністративних кордонів і понад 65% в BUA. Природні зони (А, В і D) становлять близько 60,3% в адміністративних межах міста та 34,5% в межах BUA.



а)



б)



в)

Рис. 4.2 а) ЛКЗ міста Києва; б) площа кожної ЛКЗ в адміністративних межах Києва; в) площа кожного ЛКЗ в ВUA.

Зона щільної середньоповерхової забудови (ЛКЗ–2) займає 10,4% від ВUA і розташована в центральній частині міста на правому березі. У межах адміністративного кордону Києва та на забудованій території майже не зустрічається – ЛКЗ–3 (менше 0,4%). Результати порівняння обох вибірок показують, що більшість житлової забудованої території міста займають ЛКЗ–4, 5 та 9. Багатоповерхові (ЛКЗ–4) та середньоповерхові будівлі (ЛКЗ–5) з низькою щільністю забудови займають 8,2 та 7,9% території міста Києва. Тоді, як в ВUA їх відсоток є вищим (по 13,7% відповідно) за рахунок включення передмістя. Зона малоповерхової з низькою щільністю забудови (ЛКЗ–6) та зона зі спорудами, що

займають великий простір (ЛКЗ–8) в межах забудованої території є більшими та становлять 4,3% та 9 % відповідно. Площі ЛКЗ–8 в ВUA зоні майже вдвічі більші (порівняно з їх площами у адміністративних межах) за рахунок включення територій передмість, на яких розташовані об'єкти легкої промисловості та комунально-складської забудови. ЛКЗ–9, що відповідає приватним житловим секторам, в межах адміністративного кордону Києва та в ВUA, займає 10,8 та 14% відповідно.

Річка Дніпро, яка поділяє територію міста на дві частини разом з озерами займає 6,3% від загальної площі, але для забудованої територій цей відсоток відповідно є дещо більшим – 7,9. Території ЛКЗ А–D в ВUA становлять 24,7%, що є вдвічі меншими за площі цих природних зон в адміністративних межах Києва (52,7%). Найбільша різниця 6,7% (ВUA) та 32,6% (адміністративні межі) спостерігаються для ЛКЗ–А – зона високих щільно посаджених дерев.

Отже, аналіз ЛКЗ зон міста Києва показав наявність суттєвих відмінностей у співвідношенні між ЛКЗ в межах адміністративних кордонів міста та в межах ВUA зони. Площі ЛКЗ із забудованими територіями (ЛКЗ–1 – ЛКЗ–9) займають понад 65% території в ВUA зоні, що приблизно на 25% більше, ніж в адміністративних межах міста. Найпоширенішими ЛКЗ міста є ЛКЗ–4, 5 та 9 (висотна забудова з низькою щільністю, середньоповерхова з низькою щільністю забудова, а також садибна зона), а в ВUA зоні їх частка є вищою за рахунок включення передмістя.

Площі зелених зон (ЛКЗ–А, В, С і D) та водних об'єктів (ЛКЗ–G) в ВUA зоні майже удвічі менші, ніж в адміністративних межах Києва. Таким чином, в межах територій, де проживають та працюють мешканці міста (ВUA), приблизно 2/3 площі – це забудовані ділянки зі штучними поверхнями.

4.1.2 Температурний режим підстильної поверхні ЛКЗ Києва

З метою оцінки впливу локальних кліматичних зон на формування клімату міста, нами було проаналізовано взаємозв'язок між температурою підстильної поверхні (ТПП) та ЛКЗ. Аналіз ґрунтується на припущенні, що кожна ЛКЗ буде

демонструватиме певні особливості температурного режиму підстильної поверхні. Типові температури кожної зони були розраховані шляхом накладання ЛКЗ на поля ТПП.

Для оцінки ТПП Києва було відібрано та завантажено 4 безхмарні сцени Landsat-8 OLI/TIRS C1 Level-1 з вебсайту Геологічної служби США (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Супутникові зображення обиралися тільки за ті дні, в які хмари над містом були повністю відсутні. Всі дані були відібрані за теплий період 2016–2018 рр.: 29.07.2016; 17.08.2017; 01.06.2018; 04.08.2018. Landsat-8 отримує дані, використовуючи два різні датчики – Operational Land Imager (OLI) та Thermal Infrared Sensor (TIRS). TIRS здійснює зйомку у двох спектральних каналах: 10 канал (10,6–11,2 мкм) та 11 канал (11,5–12,5 мкм). Ці канали мають низьку роздільну здатність 100 м на піксель, однак, при побудові карти ТПП використовуються інші канали датчика OLI (4 та 5 канали), що мають роздільну здатність 30 метрів [163].

Для оцінки ТПП міста Києва було використано підхід, що базується на термальних каналах супутникових знімків – Radiative Transfer Equation [43]. ТПП обчислювалася за даними значень 10-го каналу Landsat-8, оскільки USGS рекомендує відмовитися від даних 11 каналу [163]. Обробка даних теплових каналів Landsat проводилася за допомогою програм QGIS, а побудова карт – за допомогою ArcGIS.

Алгоритм за яким визначалася температура поверхні за супутниковими знімками наведений на рисунку 4.3. Процес проводився в п'ять послідовних етапів, де кожен наступний розраховувався на основі попереднього: I етап – розрахунок значення енергетичної яскравості верхньої частини атмосфери (англ. – Top of Atmosphere Spectral Radiance); II етап – розрахунок температурної яскравості (англ. – Brightness Temperature); III етап – нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI); IV етап – коефіцієнт випромінювання земної поверхні (англ. – Land Surface Emissivity) та V етап – обчислюється температура підстильної поверхні.



Рис. 4.3 Алгоритм визначення температури підстильної поверхні.

Для більш точної побудови температури сцени Landsat–8 додатково пройшли етап атмосферної корекції, який виконувався за допомогою калькулятора розрахунку атмосферних параметрів на сайті NASA (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>). Отримані значення температури переведені в градуси Цельсія, і на основі цих значень для кожної сцени сформовано карту температури підстильної поверхні, що наведені на рис. 4.4 та у додатку Д. Аналіз карт свідчить, що в літній день за ясної погоди значення температури підстильної поверхні в межах Києва суттєво відрізняється. На лівобережжі вищі значення температури підстильної поверхні фіксувалися в житлових масивах та комунально-складських, виробничих територіях. На правобережній частині міста вищі ТПП спостерігалися в Оболонському районі (Мінський масив, Оболонь, та Петрівка). Вища температура була зафіксована й в інших районах міста на територіях, де розташовані великі торговельні центри, паркувальні майданчики та промислова забудова. Акваторія Дніпра та лісові масиви на околицях міста характеризувалися нижчими температурами поверхонь. Нижчі значення ТПП також фіксувалися в парках (Національний природний парк «Голосіївський», парк Партизанської Слави, Сирецький дендрологічний парк та ін.).

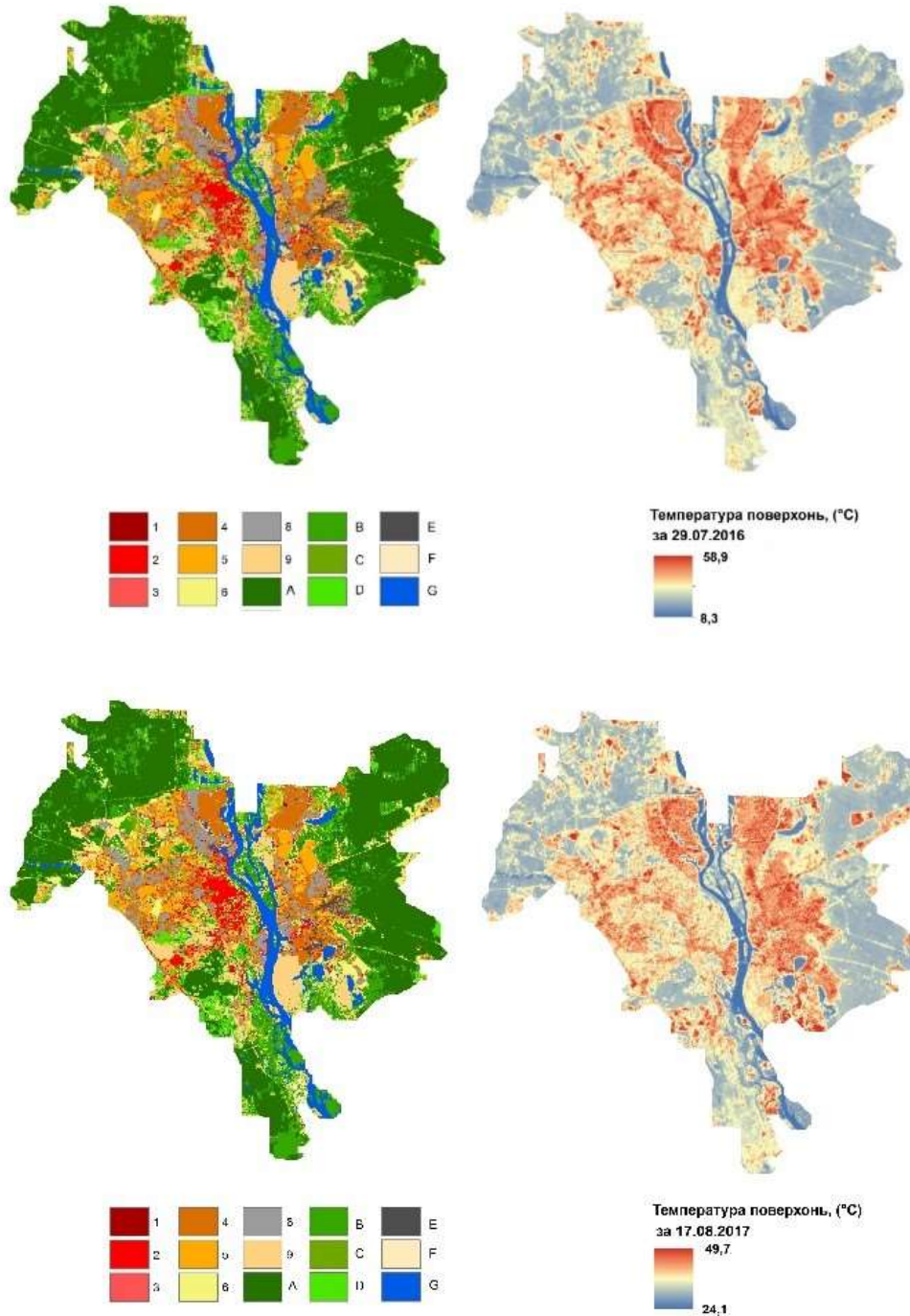


Рис. 4.4 Просторовий розподіл ЛКЗ та ТПП для сцени Landsat-8 за 29 липня 2016 р. та 17 серпня 2017 р.

Отримані карти просторового розподілу ЛКЗ та ТПП вказують на те, що між ними існують чіткі взаємозалежності. Щоб проаналізувати цей взаємозв'язок, було розділено дані ТПП за відповідними класами ЛКЗ. Статистична та графічна обробка даних була виконана з використанням програмного забезпечення Microsoft

Excel. На рисунку 4.5 наведено коробкові діаграми (або діаграми розмаху) для кожної сцени Landsat–8, що показують максимальне, мінімальне значення, медіану ТПП для окремих ЛКЗ.

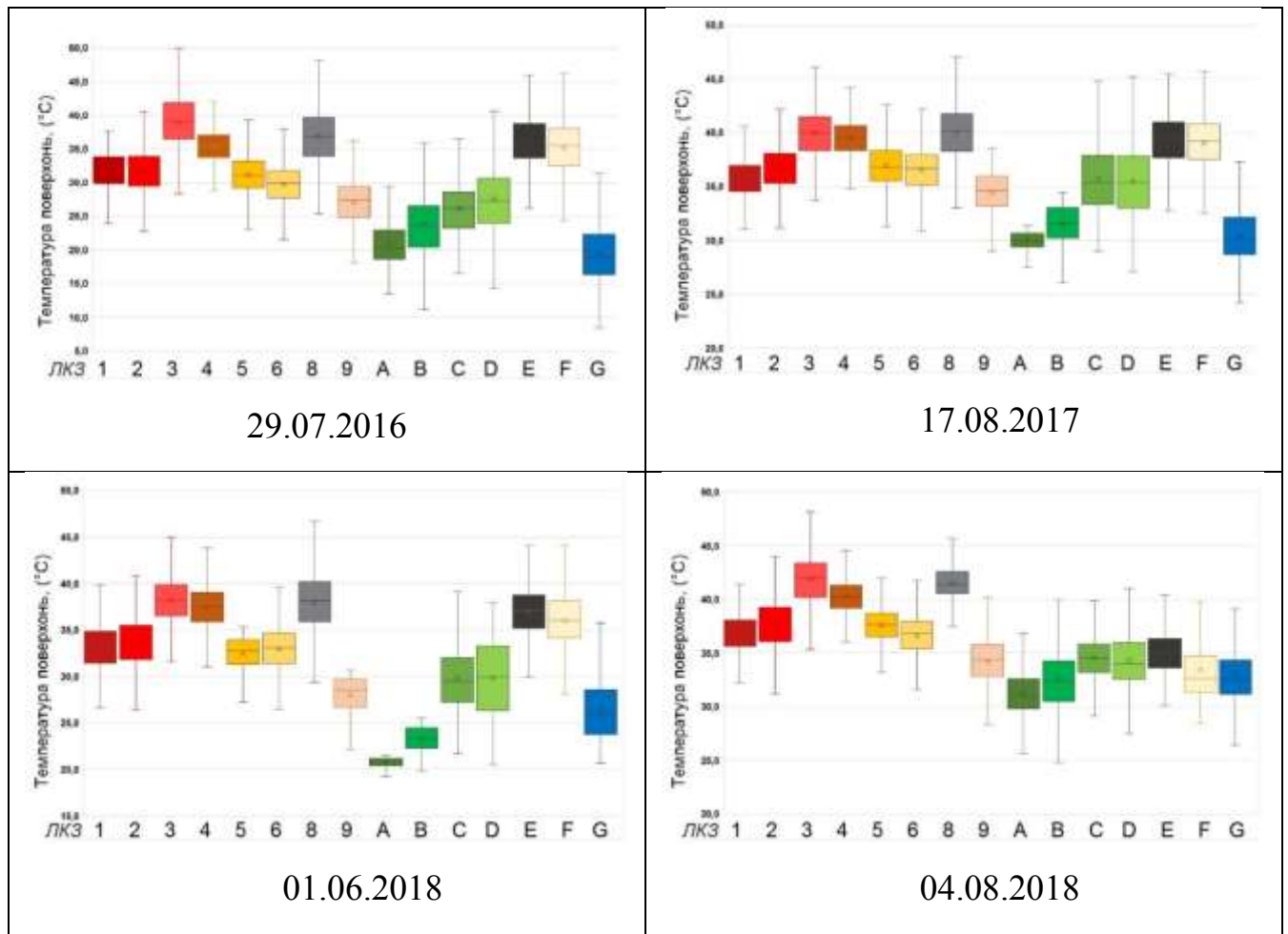


Рис. 4.5 Коробкові діаграми ТПП в ЛКЗ міста Києва

Розподіл значень ТПП загалом свідчить, що класи земельного (природного) покриття мають нижчі температури, ніж класи забудованого типу. І цей розподіл ТПП схожий для всіх досліджуваних сцен Landsat–8. ЛКЗ–3 (щільна малоповерхова забудова) та ЛКЗ–8 (зона зі спорудами, що займають великі території) характеризуються найвищими значеннями ТПП. Типам ЛКЗ з низькою щільністю забудови (ЛКЗ–4, 5 та 6) характерні дещо нижчі значення ТПП. Зокрема, ЛКЗ–9, що характеризується садибною забудовою, має найнижчі показники серед всіх забудованих типів ЛКЗ. ЛКЗ–1 (щільна багатоповерхова забудова), для якої мали б бути характерні найвищі показники ТПП, демонструє нижчі значення

температури, ніж ЛКЗ–2 та ЛКЗ–3. Це може бути пов'язано з тим, що ЛКЗ–1, представлена лише невеликими ділянками в межах міста Києва, на які суттєвий вплив мають сусідні зони. Іншою причиною може бути висотна забудова, яка перешкоджає рівномірному прогріву поверхонь, створюючи тінь. Схожі результати, в яких ЛКЗ–1 є холоднішою в денні години наведено в роботах [50, 180]. При цьому в нічні години розподіл дещо змінюється й ЛКЗ–1 має вищі значення. Підсумовуючи значення температур поверхонь в забудованих ЛКЗ для всіх сцен існує певний порядок від високого до низького значення ТПП: ЛКЗ–3 > ЛКЗ–8 > ЛКЗ–4 > ЛКЗ–2 та ЛКЗ–5 > ЛКЗ–1 > ЛКЗ–6 > ЛКЗ–9.

Найнижчими температурами поверхонь характеризуються ЛКЗ природного типу. ЛКЗ–А (зона високих щільно посаджених дерев) та ЛКЗ–G (зона водних об'єктів) демонструють найнижчі значення ТПП. У всіх досліджуваних сценах Landsat-8 існує тенденція до підвищення температури з ЛКЗ–А до ЛКЗ–Е, що пов'язано зі зменшенням рослинності. Серед ЛКЗ земельного покриття найвищими значеннями ТПП характеризуються зона транспортної інфраструктури та гірських масивів (ЛКЗ–Е) та зона з відкритим ґрунтом та піском (ЛКЗ–F).

Отже, порівняння температури підстильної поверхні різних локальних кліматичних зон свідчить, що вищі температури властиві для забудованих типів ЛКЗ, ніж для типів, що характеризуються природними підстильними поверхнями. ЛКЗ–3 та ЛКЗ–8 є зонами з найвищими температурами, а ЛКЗ–А та ЛКЗ–G – з найнижчими. Крім того, чітко простежується зменшення значень ТПП з ЛКЗ–3 до ЛКЗ–6, а з ЛКЗ–А до ЛКЗ–Е – збільшення значень ТПП.

4.2 Оцінка відмінностей біокліматичних умов в межах локальних кліматичних зон за різних погодних умов

Враховуючи складність міської морфології, в межах міста такі параметри, як температура поверхонь та повітря, вологість, напрям та швидкість вітру можуть відрізнитися як в межах міста, так і в межах його мікрорайонів. Наприклад, в центрі міста зі щільною забудовою спостерігаються вищі температури, а в міському парку,

навпаки – нижчі. Відповідно теплове навантаження на мешканців у різних районах міста може суттєво відрізнятись. Оцінка біокліматичних умов проводилася на прикладі 10 ділянок міста Києва, що являють собою різні локальні кліматичні зони. Детальний опис обраних ділянок наведено у додатку Б. Моделювання теплового навантаження на людину здійснювалося за допомогою моделі «SkyHelios». Для оцінки було обрано біокліматичний індекс – фізіологічно-еквівалентна температура, який розраховувався для стандартної людини (чоловік 35 років, зростом 1,75 м та вагою 75 кг [198]). Всього було виконано 400 симуляцій для обраних ЛКЗ для різних типів погоди, які відображені у вигляді 10 синоптичних ситуацій: область підвищеного тиску з півдня, умови високого циклону, улоговина з півдня, циклонічна депресія, малоградієнтне баричне поле, циклон, антициклон, градієнтне баричне поле високого тиску, південна периферія антициклону та тилова частина циклону. Детальніше опис обраних погодних умов див. додаток В.

Синоптична ситуація 1 – Область підвищеного тиску з півдня.

Для оцінки біокліматичних умов в різних ЛКЗ за умов області підвищеного тиску з півдня (23.07.2015) ми проаналізували результати симуляцій для усіх ЛКЗ для строків 00:00, 06:00, 12:00 та 18:00 СЛЧ. Отримані результати представлено у вигляді серії картосхем (додаток Е).

23 липня 2015 року спостерігалася ясна та спекотна погода зі слабким вітром, що спричинила формування високих значень ФЕТ в денні години. Результати моделювання свідчать (табл. 4.2), що для строку 00:00 СЛЧ на обраних ділянках спостерігалися комфортні умови (19,5–23,0°C), а у їхніх внутрішніх дворах та поблизу стін будівель, що орієнтовані на південь значення ФЕТ досягло 25,9°C, що відповідає легкому тепловому стресу.

Таблиця 4.2

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 23 липня 2015 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер	Мін	макс	Сер
1 (ЛКЗ–1)	19,6	25,7	22,7	17,3	33,7	25,5	28,7	52,2	40,5	32,1	43,8	38,0

Продовження таблиці 4.2

2 (ЛКЗ–1)	19,7	25,2	22,5	17,4	32,4	24,9	29,2	52,3	40,8	32,1	46,2	39,2
3 (ЛКЗ–2)	19,5	25,4	22,5	17,6	34,2	25,9	28,9	53,7	41,3	31,9	47,0	39,5
4 (ЛКЗ–2)	19,5	25,5	22,5	17,5	33,4	25,5	28,9	53,9	41,4	31,9	47,0	39,5
5 (ЛКЗ–4)	19,7	25,9	22,8	17,4	32,1	24,8	29,6	55,1	42,4	32,1	46,6	39,4
6 (ЛКЗ–5)	19,6	25,0	22,3	17,5	30,3	23,9	29,3	53,6	41,5	32,0	47,8	39,9
7 (ЛКЗ–5)	19,5	25,4	22,5	17,5	34,9	26,2	29,0	53,6	41,3	31,9	46,8	39,4
8 (ЛКЗ–6)	19,5	24,6	22,1	17,6	31,1	24,4	29,3	50,1	39,7	31,9	45,5	38,7
9 (ЛКЗ–6)	19,5	24,9	22,2	17,8	32,0	24,9	29,3	54,8	42,1	32,0	46,1	39,1
10 (ЛКЗ–А)	19,8	22,6	21,2	15,7	16,9	16,6	32,2	40,6	33,8	33,8	37,2	34,4

На рис. 4.6 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 3 (ЛКЗ–2). О 06:00 СЛЧ годині ранку в межах досліджуваних ЛКЗ значення ФЕТ змінювалося в значних межах від легкого холодового стресу до помірного теплового стресу ($17,3^{\circ}\text{C}$ – $33,7^{\circ}\text{C}$), що охоплює 4 градації теплового стресу. Найнижчі значення ФЕТ ($17,3^{\circ}\text{C}$) спостерігалися на ділянках, що були затінені забудовою (рис. 4.6), на відкритих місцях (тобто, на тих частинах ділянок, які вважаються моделлю нічим незаповненими) – незначний тепловий стрес. У прибудинковій зоні, що орієнтована на північний-схід мешканці зазнавали помірного теплового стресу (до $34,9^{\circ}\text{C}$). В полудень термічні умови на всіх обраних ділянках стають більш екстремальними. В основному це пов'язано зі збільшенням інтенсивності сонячної радіації та підвищенням температури повітря.

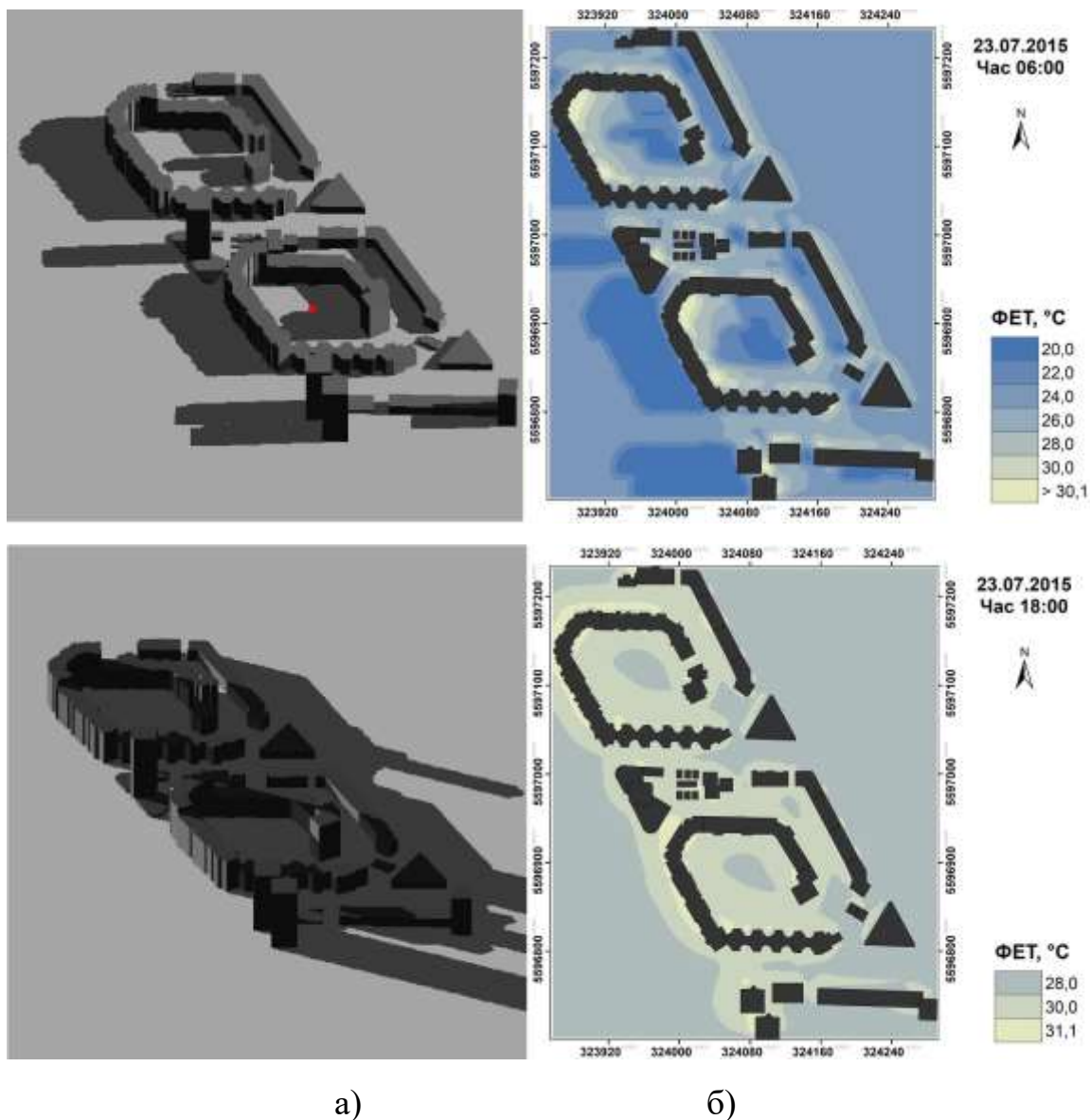


Рис. 4.6 Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 р для ділянки 3 (ЛКЗ–2, 3-й А мікрорайон) у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

О 12:00 СЛЧ затінені ділянки територій мають значення ФЕТ від 29,1°C до 38,0°C. Це означає, що людина навіть в тіні відчувала б помірний або сильний тепловий стрес. На решті територій, особливо поблизу стін будинків, орієнтованих на захід спостерігався екстремальний тепловий стрес. Максимальне значення ФЕТ на досліджуваних територіях було від 50,1°C до 55,1°C. Незважаючи на те, що о 18:00 СЛЧ температури повітря на окремих частинах ділянок була вищою, ніж у попередній строк, біокліматичні умови дещо покращилася, оскільки площа

затінених ділянок зросла у зв'язку зі зменшенням висоти Сонця (рис. 4.6). Середнє значення ФЕТ по території обраних ділянок знизилось на 1–3°C порівняно з 12:00 СЛЧ. Найбільші зміни спостерігаються у максимальних значеннях ФЕТ, що в середньому були нижчими на 6,6°C за попередній строк, але все ж таки відповідали екстремальному тепловому стресу. Враховуючи зміну напрямку падіння сонячних променів, затіненими територіями стали ті, що розміщені поблизу стін будинків, орієнтованих на схід. Відповідно там фіксувалися найнижчі значення ФЕТ – від 31,9°C до 32,1°C, що відповідає помірному тепловому стресу.

Добре відомо, що, рослинність призводить до зниження температури повітря міської території та зменшує ймовірність виникнення теплового стресу в літній період [34]. Міські парки можуть пом'якшити негативний вплив ОТ та покращити тепловий комфорт не тільки на своїй території, а й на прилеглих до них [35]. Древа, а саме їх висота та характеристика крони (діаметр та пористість), створюючи ефект затінення й охолодження, тим самим впливають на зниження значень біокліматичних індексів [199].

Тому, щоб оцінити вплив рослинності на біоклімат було здійснено моделювання значень ФЕТ для міського парку, що відповідає ЛКЗ–А (зона високих щільних дерев) та проведено порівняння біокліматичного індексу ФЕТ забудованих типів (ЛКЗ 1–10) та природної ЛКЗ.

Результати моделювання свідчать, що значення ФЕТ в ЛКЗ–А змінювалося в значних межах від 15,7°C до 40,6°C (табл. 4.2). У строк 00:00 СЛЧ по всій території спостерігалися комфортні умови (19,8–22,6°C). Найнижчі значення ФЕТ (15,7–16,9°C) фіксувалися в ранкові години та відповідали легкому холодному стресу (рис. 4.7). О 12:00 СЛЧ на малозатінених ділянках парку людина відчувала б тепловий стрес від помірного (32,2°C) до сильного (40,6°C). У вечірні години зі зниженням висоти Сонця (рис. 4.7) спостерігається і зміна просторового розподілу значень ФЕТ в межах парку (від 33,8 – помірного до 37,2°C – сильного теплового стресу). Вищі значення ФЕТ (35,1–37,2°C) зафіксовані поблизу частин дерев, що орієнтовані на захід, а нижчі (33,8°C, помірний тепловий стрес) спостерігалися в тіні дерев.

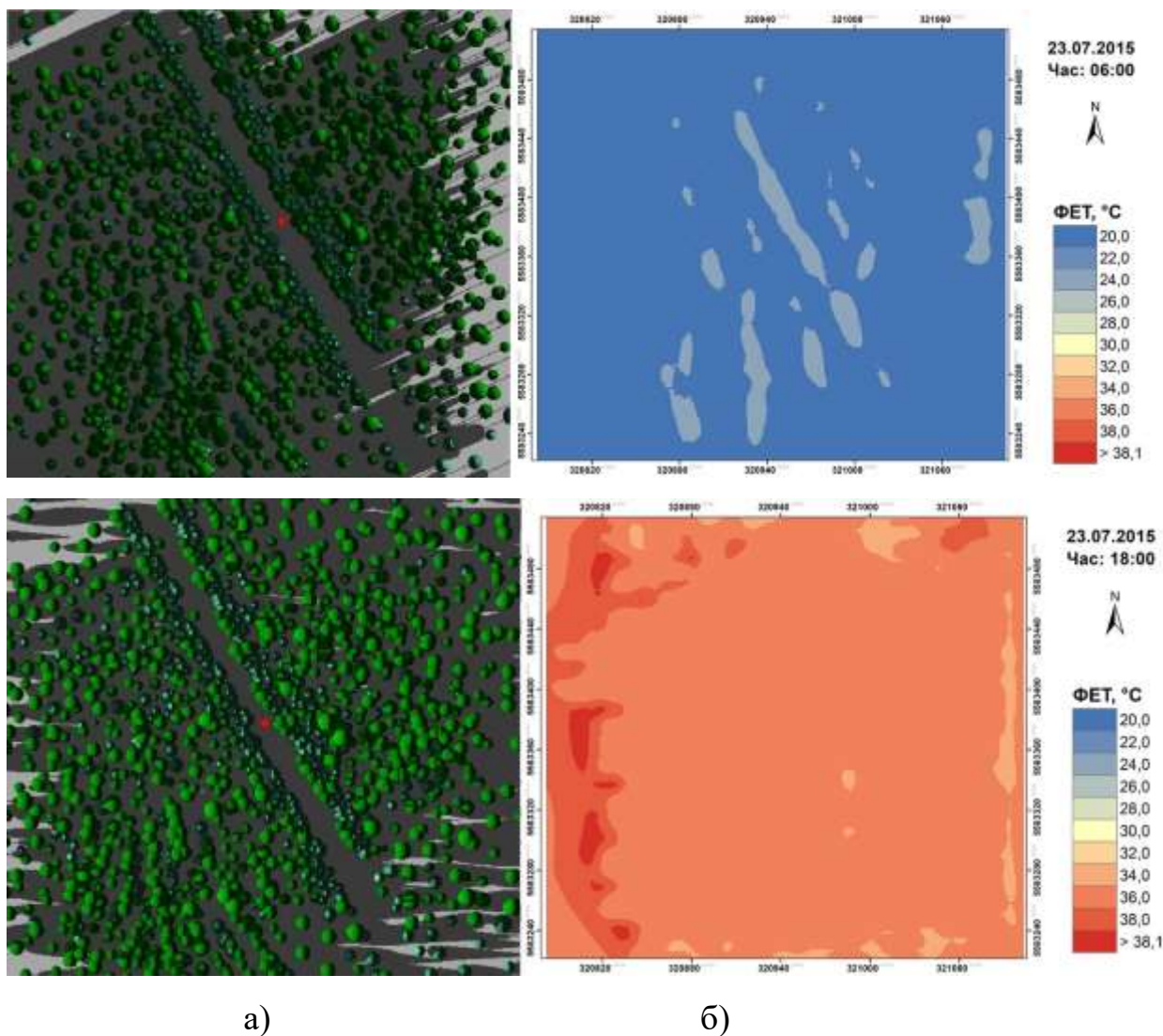


Рис. 4.7 Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 р для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Порівняння значень ФЕТ ЛКЗ–А зі значеннями забудованих ЛКЗ показало, що протягом дослідженого періоду в міському парку не було зафіксовано екстремального стресу, на відміну від ділянок із забудовою. У строк 00:00 СЛЧ суттєвих відмінностей в значеннях ФЕТ ЛКЗ–А та забудованих ЛКЗ не виявлено. Для 6 години ранку мінімальне значення ФЕТ було нижчим в середньому на 2°C, а максимальне – на 13,3°C. Середнє значення ФЕТ в парку відповідало легкому холодному стресу, тоді як в забудованих ЛКЗ – легкому тепловому стресу. О 12:00 СЛЧ в ЛКЗ–А спостерігалися дещо комфортніші умови, середнє значення ФЕТ по

ділянці становило 33,8°C, що відповідає помірному тепловому стресу, а в міській забудові переважав екстремальний тепловий стрес. Це пов'язано з тим, що дерева створюють затінок, а за рахунок евапотранспірації знижують температуру повітря. У вечірні години у зв'язку з вищими температурами повітря в межах парку, так як і в забудованих ЛКЗ, фіксувалося збільшення мінімального значення ФЕТ порівняно з 12:00 СЛЧ, але за рахунок збільшення затінення максимальне та середнє значення були нижчими. В ЛКЗ–А переважав помірний тепловий стрес на відміну від забудованих територій, де переважав сильний та фіксувався екстремальний тепловий стрес.

Синоптична ситуація 2 – Умови високого циклону

Результати моделювання термічного навантаження на обраних ЛКЗ за умов високого циклону наведено у таблиці 4.3 та у серії картосхем (додаток Ж). Під час обраної синоптичної ситуації (2 червня 2020 року) спостерігалася хмарна та прохолодна погода зі слабким вітром, що призвела до невисоких значень ФЕТ. Для строку 00:00 СЛЧ значення ФЕТ змінювалося від екстремального (1,9°C) до помірного холодового стресу (9,7°C). Вищі значення ФЕТ (понад 6,0°C) зафіксовані у прибудинкових зонах, що може бути пов'язано з довгохвильовим випромінюванням будівель, а нижчі (менше 3,0°C) – на відкритих місцях. На рис. 4.8 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 2 (ЛКЗ–1).

Таблиця 4.3

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 2 червня 2020 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер
1 (ЛКЗ–1)	2,0	9,4	3,0	0,2	10,2	1,7	6,6	22,7	10,7	8,8	24,0	11,7
2 (ЛКЗ–1)	2,0	9,1	3,4	0,2	10,1	2,2	6,9	22,6	11,3	9,0	23,9	12,2
3 (ЛКЗ–2)	2,0	9,4	3,4	0,2	10,8	2,4	7,2	24,2	12,7	9,1	25,4	13,1
4 (ЛКЗ–2)	1,9	9,4	3,7	0,0	10,1	2,5	6,8	23,7	12,3	8,8	25,0	13,0
5 (ЛКЗ–4)	2,1	9,7	4,5	0,4	9,8	3,3	9,2	22,2	14,9	9,2	23,8	13,4
6 (ЛКЗ–5)	2,0	8,8	3,1	0,3	10,2	1,9	7,3	22,5	10,9	9,3	24,7	12,2
7 (ЛКЗ–5)	1,9	8,9	3,0	0,2	11,2	1,9	6,6	24,6	11,6	9,0	25,6	12,4

Продовження таблиці 4.3

8 (ЛКЗ-6)	1,9	8,5	2,9	0,1	9,1	1,7	7,7	22,8	11,6	9,4	23,9	12,1
9 (ЛКЗ-6)	1,9	8,2	2,6	0,2	9,7	1,4	8,2	25,4	11,4	9,4	25,5	11,9
10 (ЛКЗ-А)	3,2	4,8	4,2	1,2	2,7	1,9	6,7	10,8	8,1	9,8	11,9	10,6

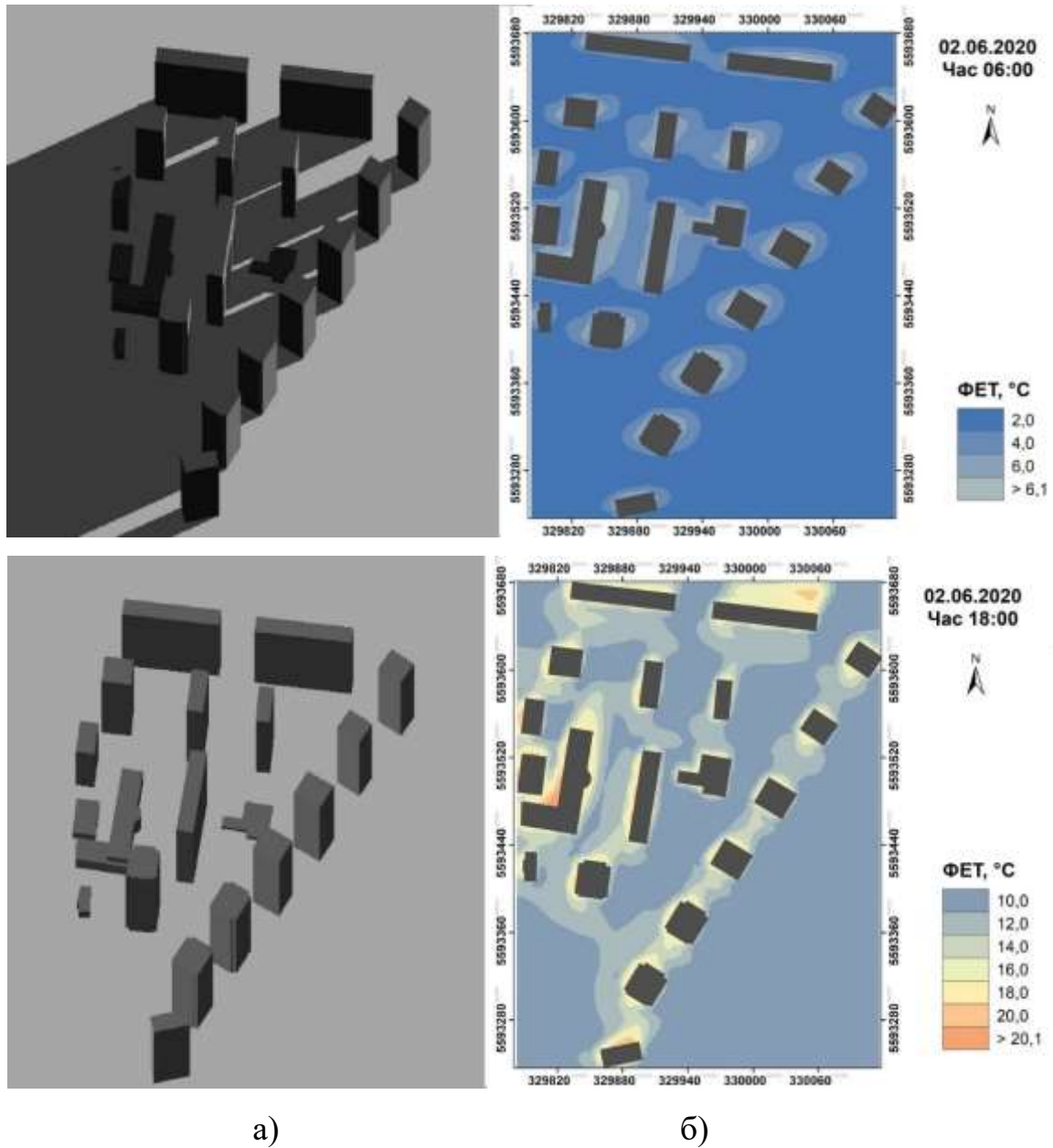


Рис. 4.8 Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 р для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

О 06:00 СЛЧ середнє значення ФЕТ по досліджуваній території відповідало екстремальному холодоровому стресу (від 1,4 до 3,3°C). Децо вищі значення порівняно з непорушеними місцями фіксувалися поблизу стін будинків орієнтованих на схід, що пов'язано з початком надходження сонячної радіації. Мінімальні значення ФЕТ були нижчими на 1–2°C порівняно зі значеннями у нічні години, що пов'язано зі зниженням температури повітря в ранкові години. О 12:00 СЛЧ термічні умови на всіх обраних ділянках децо покращилися – значення ФЕТ характеризувалися значними відмінностями і знаходилося в межах від 6,4°C (сильний холодоровий стрес) до 25,4°C (легкий тепловий стрес). Вищі значення ФЕТ (понад 14,1°C) відмічалися у внутрішніх дворах та навколо окремих будинків, а нижчі – на відкритій місцевості. Схожий просторовий розподіл ФЕТ спостерігався й у вечірні години (рис. 4.8). Значення ФЕТ змінювалося в межах від 8,8°C (помірний холодоровий стрес) до 25, 6°C (легкий тепловий стрес).

Результати моделювання ЛКЗ–А з природним рослинним покривом свідчать, що протягом в усі строки 2 червня 2020 р. в парку спостерігався холодоровий стрес, значення ФЕТ змінювалося від 1,2°C до 11,9°C (табл. 4.3). У нічні години над відкритою місцевістю фіксувалися найнижчі значення ФЕТ (менше 3,5°C – екстремальний тепловий стрес), а поблизу дерев – децо вищі (від 4,5 до 4,8°C – сильний холодоровий стрес). У строк 06:00 СЛЧ у міському парку спостерігався екстремальний холодоровий стрес (1,2–2,7°C) з вищими значеннями на відкритих ділянках парку (рис. 4.9). Такий розподіл ФЕТ пов'язаний з низькими температурами повітря у нічні (T_a – 8,5°C) та ранкові години (T_a – 5,7°C), що зафіксовано у ці строки. О 12:00 СЛЧ просторовий розподіл значень ФЕТ не змінився, вищі значення (9,1–10,8°C) зафіксовано на відкритих ділянках парку, а нижчі (6,7–9,0°C) – над ділянками з рослинністю. В денні години у ЛКЗ–А людина зазнавала б сильного та помірнього холодорового стресу. У вечірні години (рис. 4.9) відвідувачі парку відчували б помірний холодоровий стрес, значення ФЕТ було в межах (9,8–11,9°C).

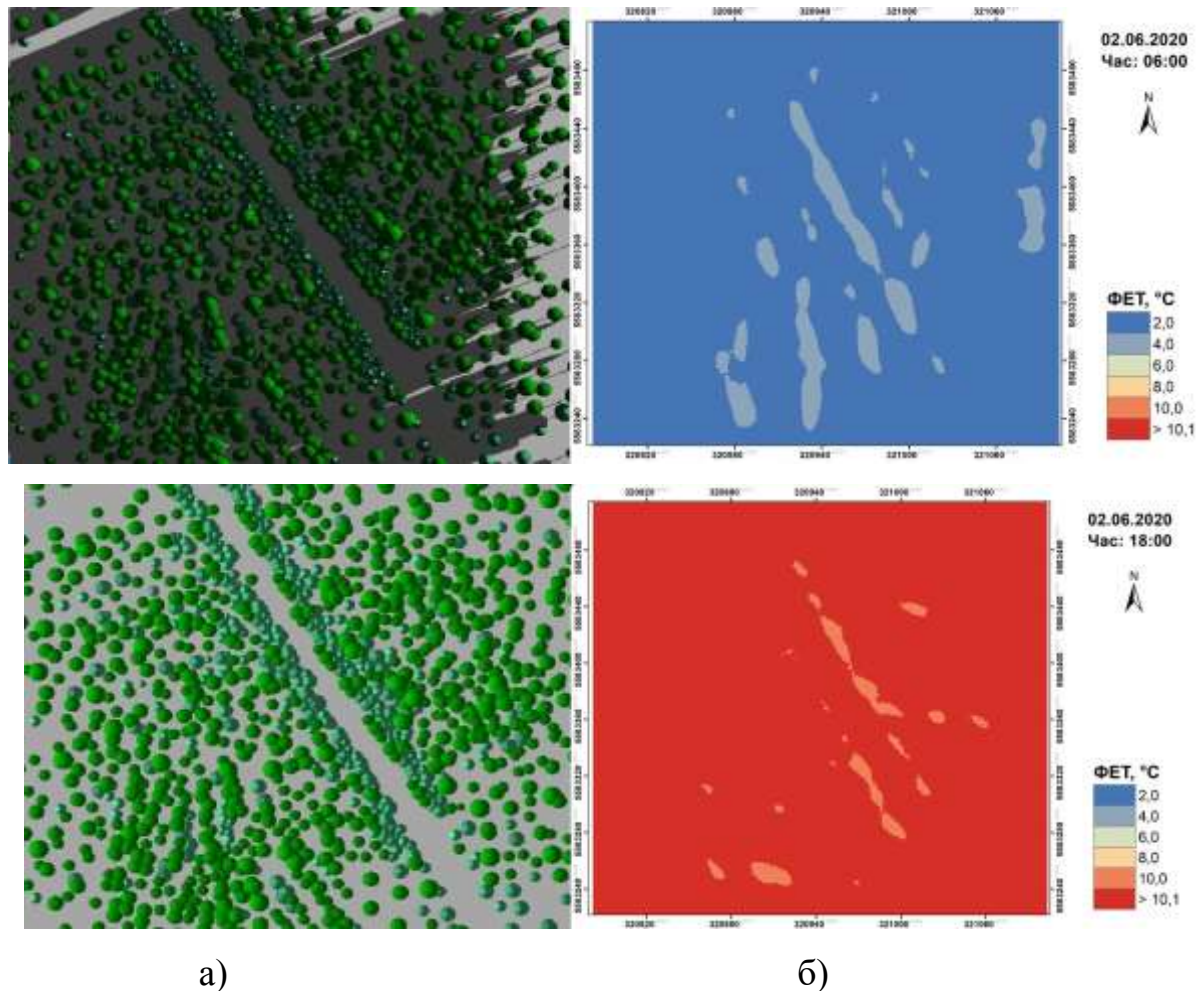


Рис. 4.9 Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 р. для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Порівняння значень ФЕТ у межах ЛКЗ–А зі значеннями ФЕТ у межах забудованих ЛКЗ свідчить, що в міському парку переважав холодний стрес у всі строки спостереження, тоді як в міській забудові о 12:00 та 18:00 СЛЧ фіксувалися комфортні умови і навіть тепловий стрес. Для 00:00 та 06:00 СЛЧ мінімальні значення ФЕТ в ЛКЗ–А були вищими за забудовані ЛКЗ. Проте, у всі строки максимальні значення ФЕТ в міському парку були нижчими, ніж значення ФЕТ в межах забудованих ЛКЗ. Це пояснюється тим, що в нічні години вищі значення ФЕТ на забудованих територіях пов'язані з тепловим випромінюванням від будівель, оскільки штучні матеріали, на відміну від природних поверхонь мають

здатність довше утримувати тепло. В денні години суттєвий вплив на зниження значення ФЕТ в межах парку мала рослинність.

Синоптична ситуація 3 – Улоговина з півдня, циклонічна депресія

16 серпня 2019 року в Києві спостерігалася хмарна та прохолодна погода зі слабким вітром. Результати моделювання свідчать (табл. 4.4) та (додаток 3), що при циклонічній депресії для строку 00:00 СЛЧ значення ФЕТ на досліджуваних територіях знаходилося в межах від 10,2°C (помірний холодний стрес) до 17,8°C (легкий холодний стрес). Середні значення ФЕТ в межах ЛКЗ змінювалося від 12,1°C – помірний холодний стрес (у ЛКЗ–1а, 5а) до 13,4°C – легкий холодний стрес (у ЛКЗ–4). Вищі значення ФЕТ (понад 14,0°C) фіксувалися у внутрішніх двориках забудованих локальних кліматичних зон та пов'язані з тепловим випромінюванням від будинків. Нижчі (менше 11°C) – у проміжках між деякими будинками простір яких співпадав з напрямком вітру, адже повітряний потік у цих ділянках звузився та сформував дещо вищі швидкості вітру, які вплинули на значення ФЕТ. На рис. 4.10 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 5 (ЛКЗ–4).

Таблиця 4.4

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 16 серпня 2019 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	Макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер	Мін	макс	Сер
1 (ЛКЗ–1)	10,6	17,8	12,1	10,0	16,9	11,5	11,7	27,4	15,5	10,9	22,8	13,3
2 (ЛКЗ–1)	10,6	17,8	12,5	10,0	16,9	11,8	12,0	27,6	16,2	11,0	23,6	13,9
3 (ЛКЗ–2)	10,6	17,8	12,8	9,9	16,9	12,2	11,7	27,4	17,0	10,9	24,3	14,6
4 (ЛКЗ–2)	10,2	17,8	12,9	9,6	16,9	12,3	11,8	27,8	17,0	10,9	23,7	14,5
5 (ЛКЗ–4)	10,4	17,8	13,4	9,8	16,9	12,8	11,2	26,8	17,4	10,8	23,3	15,1
6 (ЛКЗ–5)	10,9	17,8	12,1	10,3	16,8	11,5	12,4	27,4	15,6	11,3	23,6	13,5
7 (ЛКЗ–5)	10,5	17,7	12,4	9,9	16,9	11,7	11,9	28,0	16,4	10,8	25,1	14,0
8 (ЛКЗ–6)	10,9	17,7	12,4	10,3	16,8	11,8	12,9	27,8	16,6	11,2	23,3	13,9
9 (ЛКЗ–6)	10,8	17,7	12,2	10,2	16,7	11,6	13,0	28,6	16,4	11,6	25,2	13,6
10 (ЛКЗ–А)	10,9	12,2	11,5	10,3	11,6	10,9	11,7	15,1	12,9	11,2	12,9	11,8

В ранкові години (рис. 4.10) суттєві зміни у значеннях ФЕТ не спостерігалися, показник змінювався від помірного до легкого холодного стресу ($9,6^{\circ}\text{C}$ – $16,9^{\circ}\text{C}$). Середнє значення ФЕТ по ділянках відповідало помірному холодному стресу ($11,5$ – $12,8^{\circ}\text{C}$). О 12:00 СЛЧ термічні умови на всіх досліджуваних територіях дещо покращилися, середнє значення ФЕТ по ділянках змінюється в межах від $15,5^{\circ}\text{C}$ до $17,4^{\circ}\text{C}$, що відповідає легкому холодному стресу. Вищі значення ФЕТ ($23,1$ – $28,6^{\circ}\text{C}$ – легкий тепловий стрес) фіксувалися поблизу стін будинків та у внутрішніх дворах ЛКЗ.

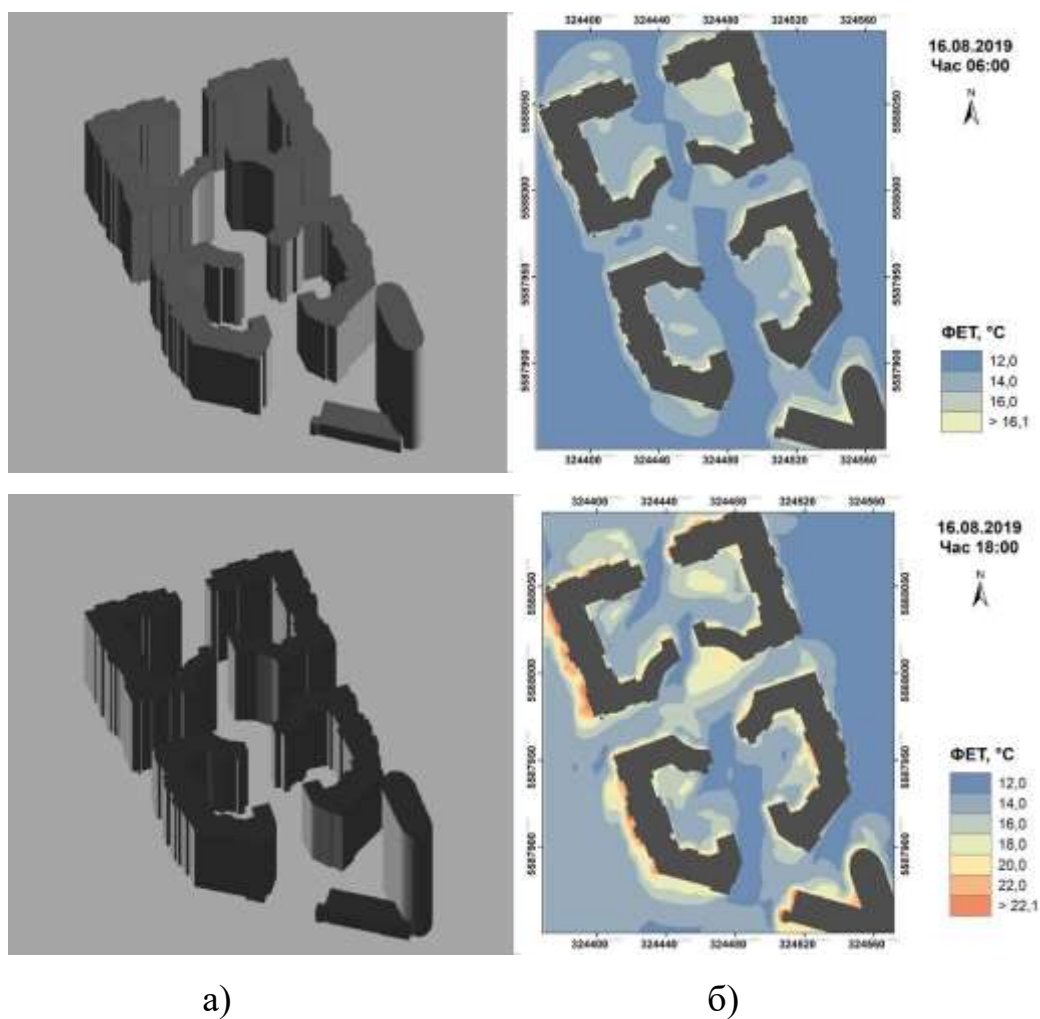


Рис. 4.10 Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 р для ділянки 5 (ЛКЗ–4, ЖК «Французький квартал») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

У строк 18:00 СЛЧ (рис.4.10) біокліматичні умови майже не змінилися – значення ФЕТ заходилися в межах від 10,8°C (помірний холодний стрес) до 25,2°C (легкий тепловий стрес). Середнє значення ФЕТ в межах досліджуваних ЛКЗ знизилось на 0,4–2,3°C, порівняно з 12:00 СЛЧ. Як і в попередні строки найвищі значення спостерігалися у внутрішніх дворах ЛКЗ, а нижчі – на ділянках між деякими будинками, де спостерігалось збільшення швидкості вітру. Оскільки цього дня спостерігалася суцільна хмарність, яка в денні години перешкоджала надходженню прямого сонячного випромінювання і тим самим – прогріву підстильної поверхні, просторовий розподіл значень ФЕТ майже не змінювався протягом досліджуваного часу. Вищі значення Бі, поблизу забудов, можуть бути пов'язані з віддачею тепла від будинків в нічні години, тоді як в денні години суттєвий вплив мала відсутність вітру або його незначні швидкості поблизу будинків.

Результати моделювання для ЛКЗ–А (парк) свідчать, що протягом доби 16 серпня 2019 року (в умовах хмарної та прохолодної погоди зі слабким вітром) значення ФЕТ по території змінювалося в незначних межах – від 10,3°C до 15,1°C (табл. 4.4). У строк 00:00 СЛЧ по всій території парку спостерігався помірний холодний стрес (10,9–12,2°C). В ранкові години суттєвих змін у значеннях ФЕТ не виявлено (рис. 4.11), людина на даній території відчувала б помірний холодний стрес. О 12:00 СЛЧ спостерігається зміна просторового розподілу значення ФЕТ на досліджуваній території. В центральній частині міського парку фіксуються нижчі значення ФЕТ (11,7–13,0°C – помірний холодний стрес), а на решті території – вищі (13,1–15,1°C – легкий холодний стрес). У вечірні години (рис. 4.11) значення ФЕТ в межах ЛКЗ–А відповідали помірному холодному стресу (11,2–12,9°C).

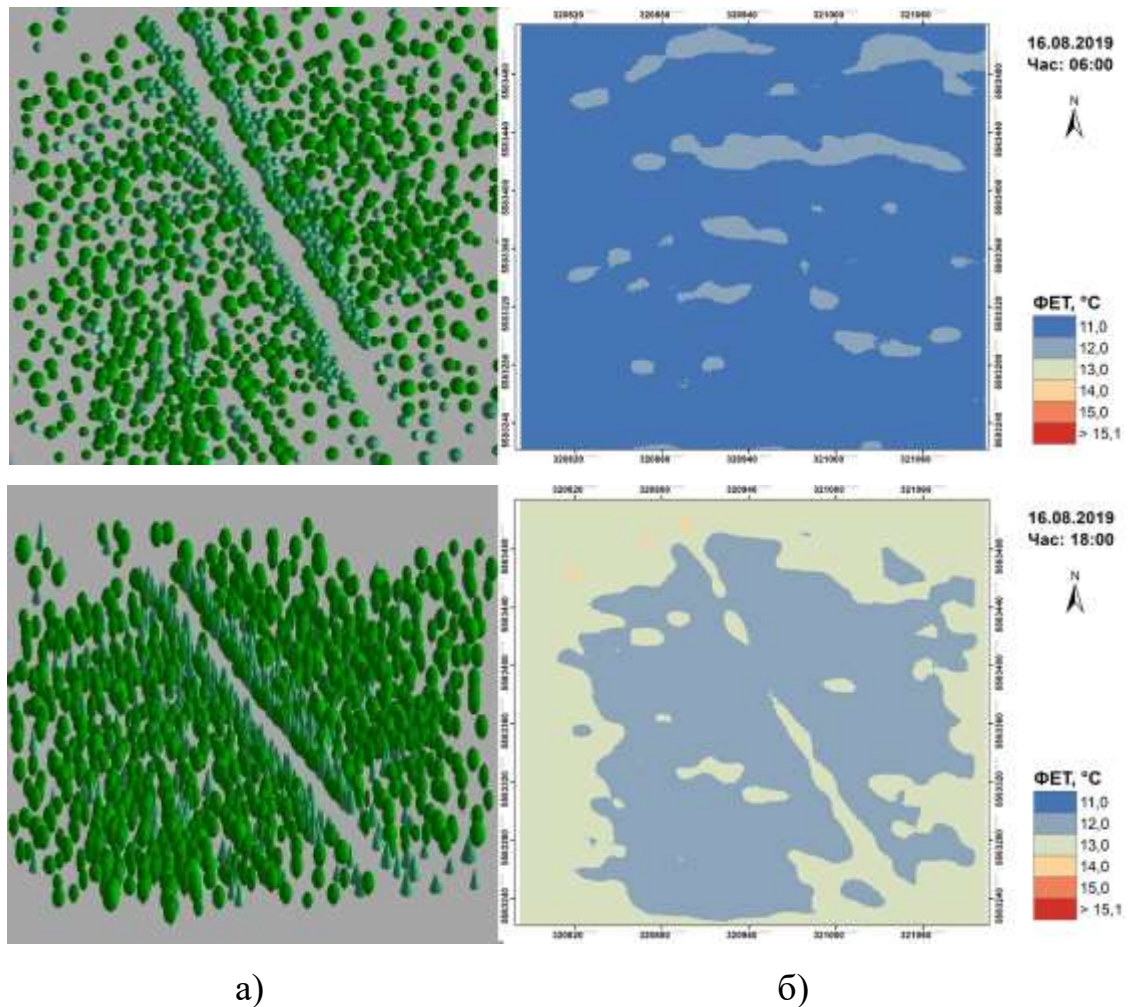


Рис. 4.11 Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 р. для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Протягом доби 16 серпня 2019 в межах ЛКЗ–А не було зафіксовано комфортних умов та теплового стресу на відміну від забудованих ЛКЗ. Для всіх строків моделювання суттєвих відмінностей між мінімальними значеннями ФЕТ в ЛКЗ–А та в забудованих ЛКЗ не виявлено. Проте, максимальне значення ФЕТ у міському парку було нижчим приблизно на 6°C (у нічні та ранкові години) та на 12°C (в денні та вечірні), ніж на забудованих територіях. У строки 00:00 та 06:00 СЛЧ середнє значення ФЕТ по території міського парку та у забудованих ЛКЗ відповідало помірному холодоровому стресу. Тоді як у строки 12:00 та 18:00 СЛЧ на території ЛКЗ–А ще продовжує спостерігатися помірний холодоровий стрес, а на забудованих територіях – легкий тепловий стрес.

Синоптична ситуація 4 – Малоградієнтне баричне поле

Для оцінки біокліматичних умов в різних ЛКЗ за умов малоградієнтного баричного поля (20 липня 2020 р.) за допомогою моделі «SkyHelios» було здійснено 40 симуляцій, за результатами яких було побудовано серію картосхем (додаток І). 20 липня 2020 року у м. Києві спостерігалася переважно ясна та тепла погода зі слабким вітром (північно-східного напрямку). Результати моделювання свідчать (табл. 4.5), що для строку 00:00 СЛЧ на обраних ділянках значення ФЕТ знаходилося в межах від 15,7°C (легкий холодний стрес) до 20,4°C (комфортні умови). Вищі значення (понад 19°C) фіксувалися поблизу будинків, а нижчі на відкритих місцях (менше 16°C). На рис. 4.12 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 2 (ЛКЗ–2).

Таблиця 4.5

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 20 липня 2020 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	Мін	Макс	Сер	мін	макс	Сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер
1 (ЛКЗ–1)	15,8	19,7	16,8	14,7	19,8	15,8	24,8	43,5	30,3	24,7	37,0	27,4
2 (ЛКЗ–1)	15,9	19,6	17,2	14,7	18,9	16,0	25,1	43,2	30,9	24,7	37,1	27,7
3 (ЛКЗ–2)	15,8	19,8	16,9	14,6	19,1	15,6	24,9	45,4	31,9	24,6	37,9	28,1
4 (ЛКЗ–2)	15,7	20,0	17,0	14,6	19,5	15,8	24,7	45,5	31,7	24,4	37,2	27,8
5 (ЛКЗ–4)	16,0	19,9	17,6	14,7	18,5	16,2	25,3	44,9	31,9	24,7	37,5	28,3
6 (ЛКЗ–5)	15,7	19,4	16,9	14,5	19,4	15,7	25,2	44,5	30,4	24,9	38,7	27,9
7 (ЛКЗ–5)	15,7	19,9	16,6	14,6	19,1	15,5	24,6	44,7	30,9	24,6	38,4	27,9
8 (ЛКЗ–6)	15,7	18,9	16,4	14,5	18,0	15,2	25,3	41,0	30,6	24,8	36,8	27,6
9 (ЛКЗ–6)	15,7	19,3	16,1	14,4	18,5	15,0	26,2	46,1	31,2	24,9	37,9	27,4
10 (ЛКЗ–А)	17,4	20,4	19,8	15,9	18,0	17,5	26,6	31,8	28,4	26,1	28,5	26,7

О 06:00 СЛЧ суттєвих змін у значеннях ФЕТ, порівняно з попереднім строком, не зафіксовано. Найнижчі значення даного біокліматичного індексу (14,4–15,9°C – легкий холодний стрес) спостерігалися на відкритих місцях та на ділянках, що були затінені забудовою (рис.4.12). У прибудинковій зоні, що орієнтована на

північний-схід, фіксувалися вищі значення БІ – 18,1–19,8°C, що відповідає комфортним умовам. Мінімальні та середні значення ФЕТ по території ЛКЗ були нижчими на 1–2°C порівняно зі значеннями у нічні години, що пов'язано зі зниженням температури повітря в ранкові години.

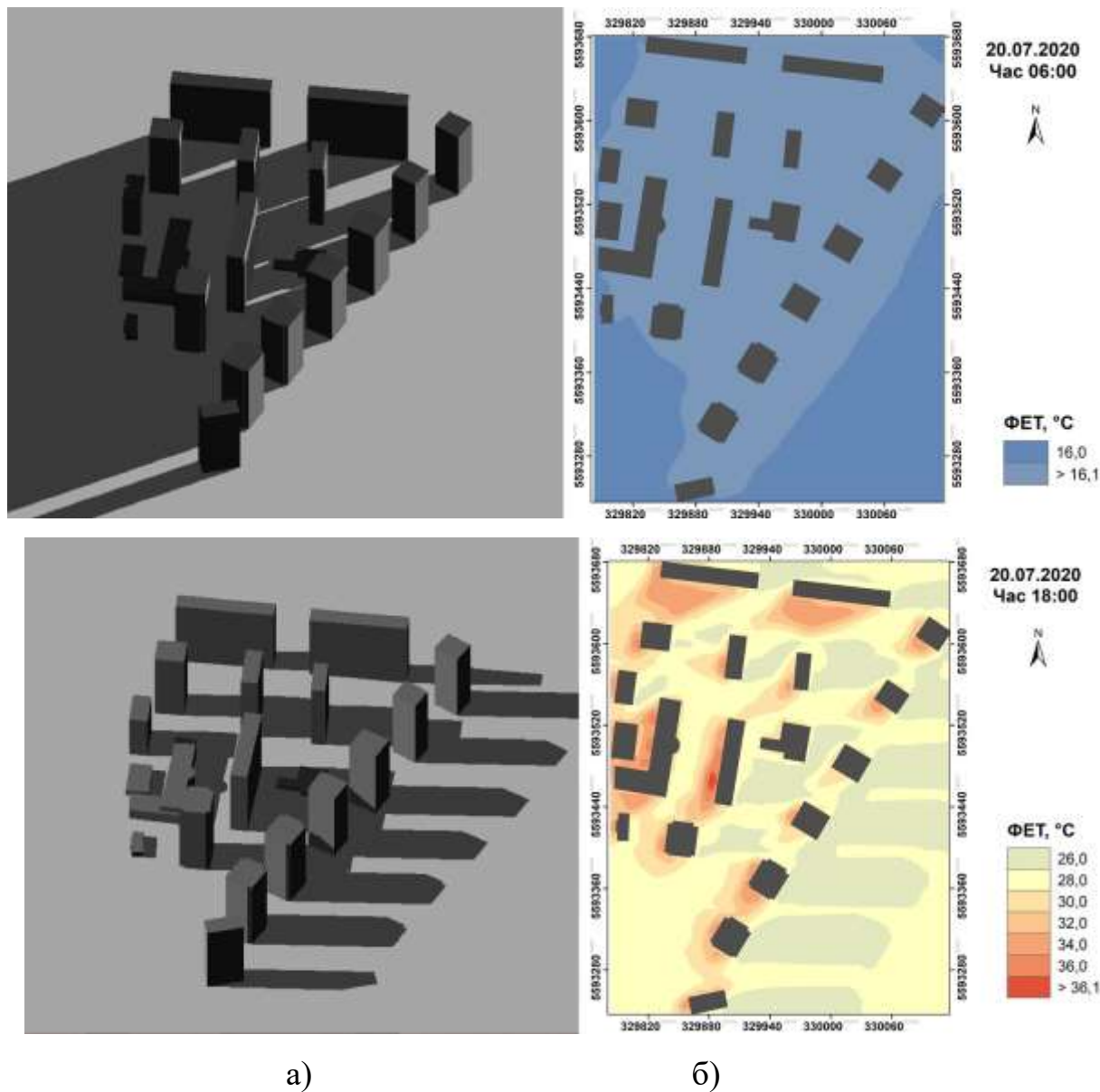


Рис. 4.12. Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 р. для ділянки 2 (ЛКЗ–1, ЖК «Паркові озера») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Зі збільшенням інтенсивності сонячної радіації та підвищенням температури повітря в полуденні години значення ФЕТ змінювалося в значних межах від 24,6 (легкий тепловий стрес) до 46,1°C (екстремальний тепловий стрес). Найбільше

зниження значень ФЕТ порівняно з відкритими ділянками, спостерігалось на затінених територіях – значення даного біокліматичного індексу були в межах $24,6\text{--}28^{\circ}\text{C}$ та відповідали легкому тепловому стресу. На решті територій фіксувався помірний та сильний тепловий стрес, а поблизу стін будинків, орієнтованих на південь – екстремальний тепловий стрес ($41,0^{\circ}\text{C}\text{--}46,1^{\circ}\text{C}$).

О 18:00 СЛЧ біокліматичні умови дещо покращилася, оскільки площа затінених ділянок зросла у зв'язку зі зменшенням висоти Сонця. Значення ФЕТ змінювалися в межах від $24,4^{\circ}\text{C}$ (легкий тепловий стрес) до $38,7^{\circ}\text{C}$ (сильний тепловий стрес). Поблизу стін будинків орієнтованих на захід фіксувалися найвищі значення ФЕТ – від $30,0^{\circ}\text{C}$ до $38,7^{\circ}\text{C}$, а на відкритих ділянках та в тіні – найнижчі (менше 28°C). Середнє значення ФЕТ по території досліджуваних ділянок знизилось на $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ порівняно з 12:00 СЛЧ, та відповідало легкому тепловому стресу. Найбільші зміни зафіксовано у максимальних значеннях ФЕТ, що в середньому на 5°C були нижчими від значень за попередній термін.

Результати моделювання у міському парку показують, що значення ФЕТ протягом доби в ЛКЗ–А змінювалися в значних межах – від $15,9^{\circ}\text{C}$ до $31,8^{\circ}\text{C}$ (табл. 4.5). У строк 00:00 СЛЧ на більшій частині території спостерігалися комфортні умови ($18,1\text{--}20,4^{\circ}\text{C}$). Нижчі значення ФЕТ ($17,4\text{--}18,0^{\circ}\text{C}$) фіксувалися в північно-західній та в південній частинах ЛКЗ–А та відповідали легкому холодному стресу. В ранкові години (рис. 4.13) відвідувачі парку відчували б легкий холодний стрес, оскільки зниження температури повітря спричинило нижчі значення ФЕТ ($15,9\text{--}18,0^{\circ}\text{C}$). О 12:00 СЛЧ на досліджуваній ділянці фіксувався тепловий стрес від легкого ($26,6^{\circ}\text{C}$) до помірного ($31,8^{\circ}\text{C}$) з вищими значеннями на малозатінених територіях. У вечірні години зі зниженням висоти Сонця спостерігається зниження термічного навантаження (рис. 4.13) – значення ФЕТ знаходяться в межах $26,1\text{--}28,4^{\circ}\text{C}$ (легкий тепловий стрес). Вищі значення ФЕТ ($28,0\text{--}28,5^{\circ}\text{C}$) зафіксовані в західній частині ділянки, а нижчі ($26,1^{\circ}\text{C}$) спостерігалися в тіні дерев.

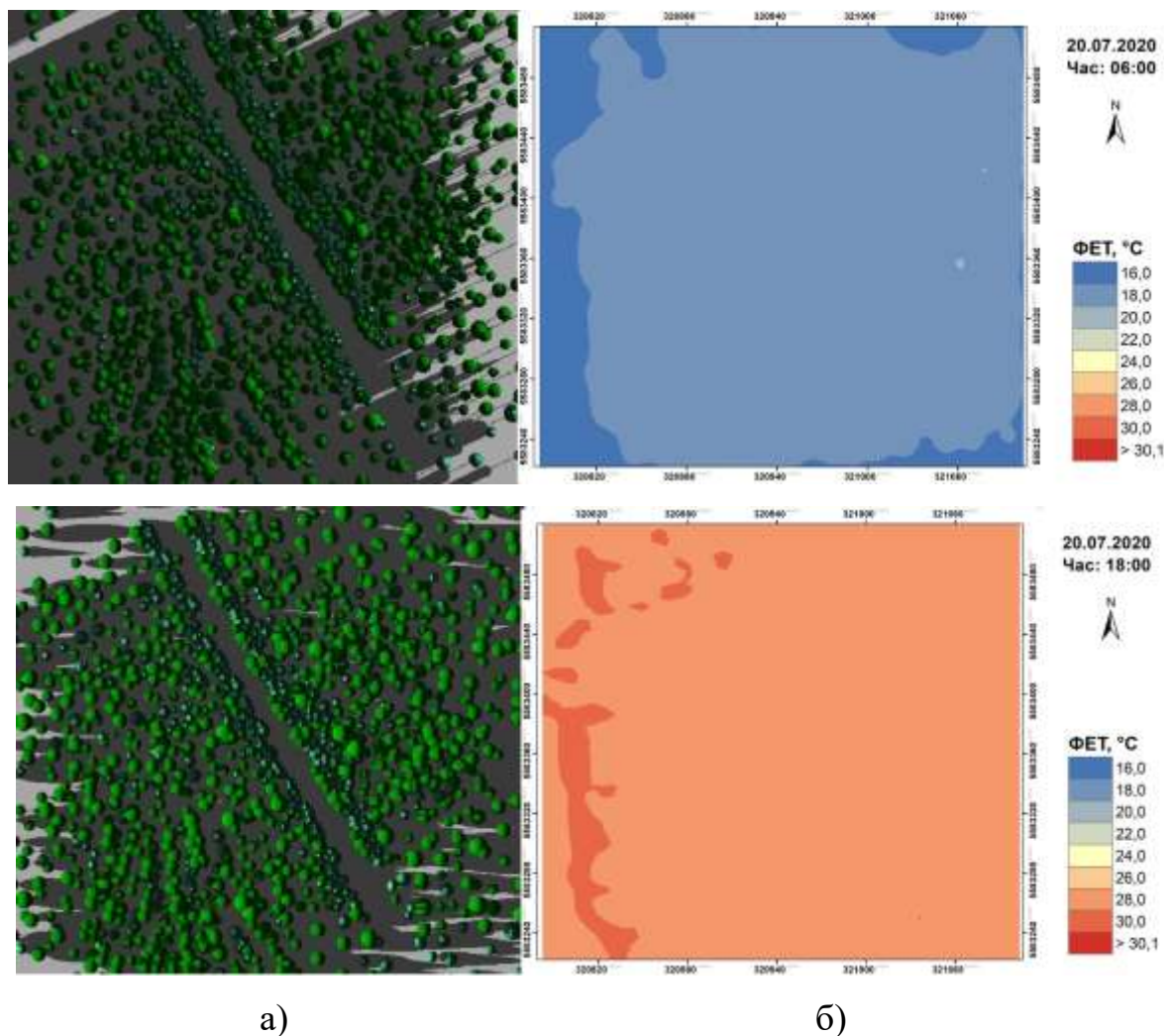


Рис.4.13. Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 р для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Отже, аналіз показав, що в умовах малоградієнтного баричного поля біокліматичні умови в забудованих ЛКЗ та в межах ЛКЗ–А помітно відрізнялися – на території парку (на відміну від інших досліджених ділянок) не було зафіксовано екстремального теплового стресу. У строк 00:00 СЛЧ середнє значення ФЕТ по ділянці у міському парку було вищим на 2–3°C та відповідало комфортним умовам, тоді як на забудованих ділянках спостерігався легкий холодний стрес. У ранкові години суттєвих відмінностей в значеннях ФЕТ не виявлено. О 12:00 СЛЧ в ЛКЗ–А спостерігалися дещо комфортніші умови, середнє значення ФЕТ по ділянці становило 28,4°C, що відповідає легкому тепловому стресу, тоді як на забудованих

ділянках переважав помірний, а в деяких частинах ділянок – екстремальний тепловий стрес. У вечірні години в межах парку максимальне значення ФЕТ було нижчим приблизно на 10°C за забудовані ЛКЗ, тоді як середнє по ділянці відповідало легкому тепловому стресу, що фіксувався на всіх досліджуваних ЛКЗ.

Синоптична ситуація 5 – Циклон

Результати моделювання термічного навантаження в межах досліджуваних ЛКЗ в умовах циклону наведено у таблиці 4.6 та у серії картосхем (додаток К). 1 липня 2018 року в Києві спостерігалася хмарна та прохолодна погода з опадами в першій половині дня. Результати моделювання свідчать (табл. 4.6), що при циклонічній діяльності для строку 00:00 СЛЧ значення ФЕТ на досліджуваних ділянках знаходилося в межах від 6,8 (сильний холодний стрес) до 14,8 (легкий холодний стрес). Середні значення ФЕТ по території ЛКЗ змінювалося від 8,8 до 10,1°C, що відповідає помірному холодному стресу. Вищі значення даного біокліматичного індексу (понад 14,0°C) фіксувалися у внутрішніх двориках обраних ЛКЗ, а нижчі (менше 10°C) – на відкритих ділянках. На рис. 4.14 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 7 (ЛКЗ–5).

Таблиця 4.6

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 1 липня 2018 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	Мін	Макс	сер	Мін	макс	сер	мін	макс	Сер	мін	макс	Сер
1 (ЛКЗ–1)	7,2	14,8	8,8	5,0	16,0	6,8	9,1	26,1	31,1	10,9	25,9	13,2
2 (ЛКЗ–1)	6,8	14,7	9,2	7,9	17,3	10,2	9,4	26,2	14,1	10,8	26,5	14,0
3 (ЛКЗ–2)	7,2	14,7	9,5	4,9	15,4	7,6	8,6	26,0	14,3	10,9	26,3	14,1
4 (ЛКЗ–2)	6,9	14,7	9,6	5,0	13,9	7,6	9,3	26,3	14,5	10,8	26,9	14,4
5 (ЛКЗ–4)	7,0	14,8	10,1	4,6	13,9	8,2	8,6	25,5	15,1	10,9	26,0	15,1
6 (ЛКЗ–5)	7,5	14,7	8,8	5,2	13,9	6,8	9,6	26,0	13,3	11,4	26,6	13,7
7 (ЛКЗ–5)	7,1	14,7	9,0	4,9	15,3	7,1	9,1	26,4	13,9	10,8	27,7	13,9
8 (ЛКЗ–6)	7,5	14,6	9,1	5,4	14,2	7,1	10,6	26,5	14,2	11,5	26,1	13,8
9 (ЛКЗ–6)	7,4	14,6	8,9	5,5	14,6	6,9	10,2	26,5	14,0	11,3	28,2	13,6
10 (ЛКЗ–А)	7,6	8,8	8,1	5,5	6,4	5,9	9,2	12,9	10,3	11,4	12,9	11,9

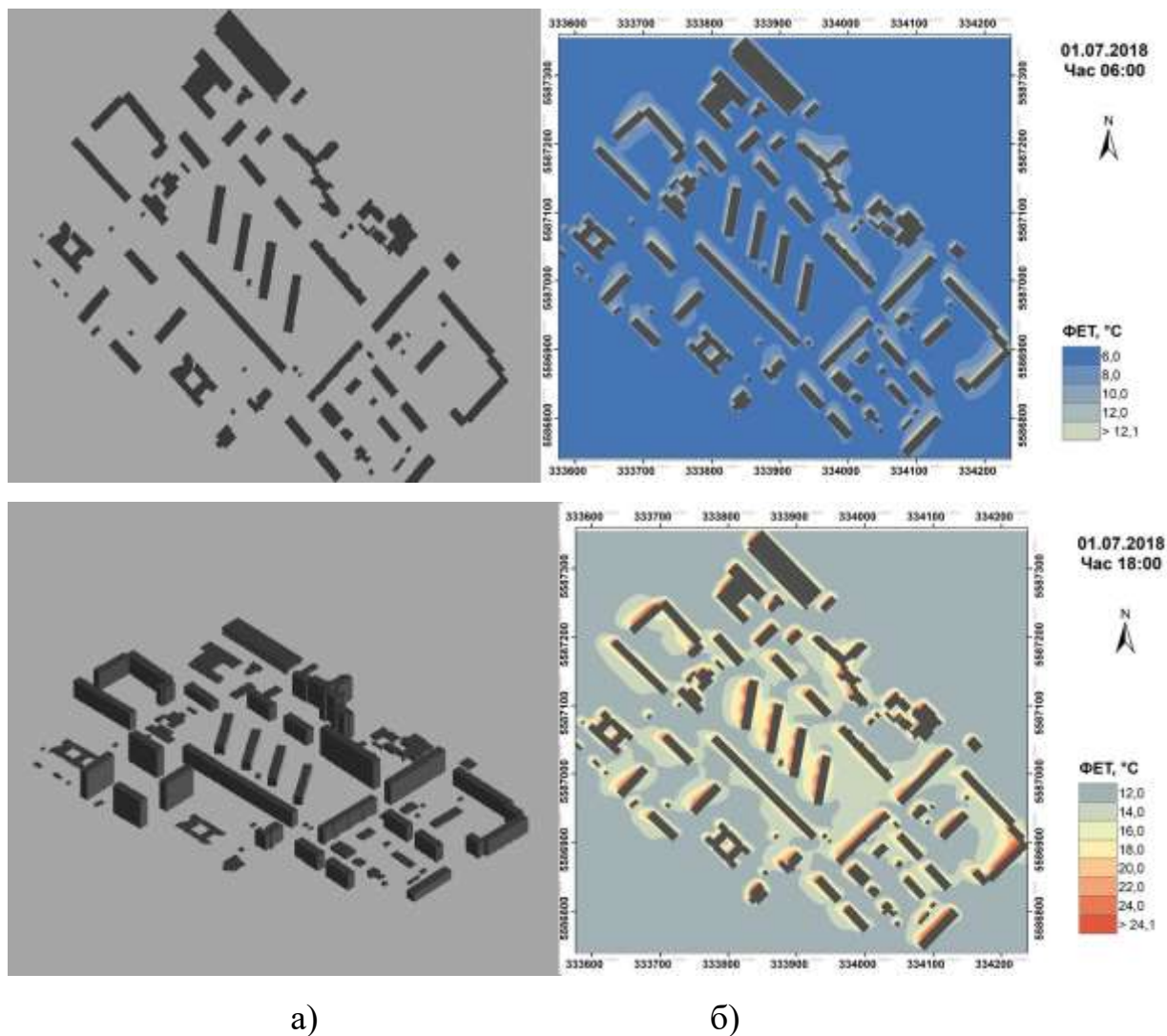


Рис. 4.14. Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 р для ділянки 7 (ЛКЗ–5, 7-й мікрорайон Харківського масиву) у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Порівняно з попереднім строком, о 06:00 СЛЧ (рис. 4.14) суттєвих змін значень ФЕТ не відбулося – показник змінювався від сильного до легкого холодного стресу (5°C – $17,3^{\circ}\text{C}$). Середнє значення ФЕТ по території ЛКЗ відповідало помірному холодному стресу для ділянок 2 та 5, а для інших – сильному холодному стресу. О 12:00 СЛЧ біокліматичні умови на всіх досліджуваних ділянках дещо покращилися – середнє значення ФЕТ по змінювалося по території в межах від $13,1^{\circ}\text{C}$ до $14,5^{\circ}\text{C}$, що відповідає легкому холодному стресу. Вищі значення ФЕТ ($25,5$ – $26,5^{\circ}\text{C}$ – легкий тепловий стрес)

фіксувалися поблизу стін будинків та у внутрішніх дворах в межах ЛКЗ. Найбільші різниці (4°C), порівняно з відкритими ділянками фіксувалися у проміжках між будинками.

О 18:00 СЛЧ (рис.4.14) змін біокліматичних умов, порівняно з попереднім строком, майже не відбулося – значення ФЕТ заходилися в межах від $10,8^{\circ}\text{C}$ (помірний холодний стрес) до $28,2^{\circ}\text{C}$ (легкий тепловий стрес). Середнє значення ФЕТ по обраних ділянках відповідало легкому холодному стресу. Як і в попередні строки найвищі значення спостерігалися у внутрішніх дворах ЛКЗ, а нижчі – на відкритих ділянках. Оскільки, цього дня спостерігалася суцільна хмарність просторовий розподіл значень ФЕТ майже не змінювався протягом досліджуваного часу.

Результати моделювання свідчать, що протягом досліджуваного періоду значення ФЕТ в межах ЛКЗ-А змінювалося в межах від $5,5^{\circ}\text{C}$ до $12,9^{\circ}\text{C}$ (табл. 4.6). У строк 00:00 СЛЧ по всій території парку спостерігався холодний стрес від сильного до помірного ($7,6 - 8,8^{\circ}\text{C}$). В ранкові години суттєвих змін в значеннях ФЕТ, порівняно з попереднім строком, не виявлено (рис. 4.15). О 12:00 та о 18:00 СЛЧ на обраній ділянці фіксувався б помірний холодний стрес зі значеннями ФЕТ – $9,2^{\circ}\text{C}-12,9^{\circ}\text{C}$ та $11,4-12,0^{\circ}\text{C}$ відповідно. Влітку в умовах циклонічної погоди у міському парку спостерігалися умови, що відповідали холодному стресу, в той час як в межах забудованих територій о 12:00 та о 18:00 СЛЧ зафіксовані значення легкого теплового стресу. У строк 00:00 СЛЧ суттєвих відмінностей в мінімальних та середніх значеннях ФЕТ між ЛКЗ-А та забудованими територіями не виявлено. Проте максимальне значення ФЕТ в ЛКЗ-А було нижчим на 6°C за цей же показник для забудованих ЛКЗ. Для 06:00 СЛЧ за рахунок зниження температури повітря спостерігалися нижчі значення, порівняно зі строком 00:00 СЛЧ БІ у всіх ЛКЗ. Для строків 12 та 18 суттєвих відмінностей між мінімальними значеннями ФЕТ для різних ЛКЗ не виявлено. Проте, максимальне значення ФЕТ у міському парку було нижчим приблизно на 13°C (для 12:00 СЛЧ) та на 16°C (для 18:00 СЛЧ), ніж на забудованих територіях.

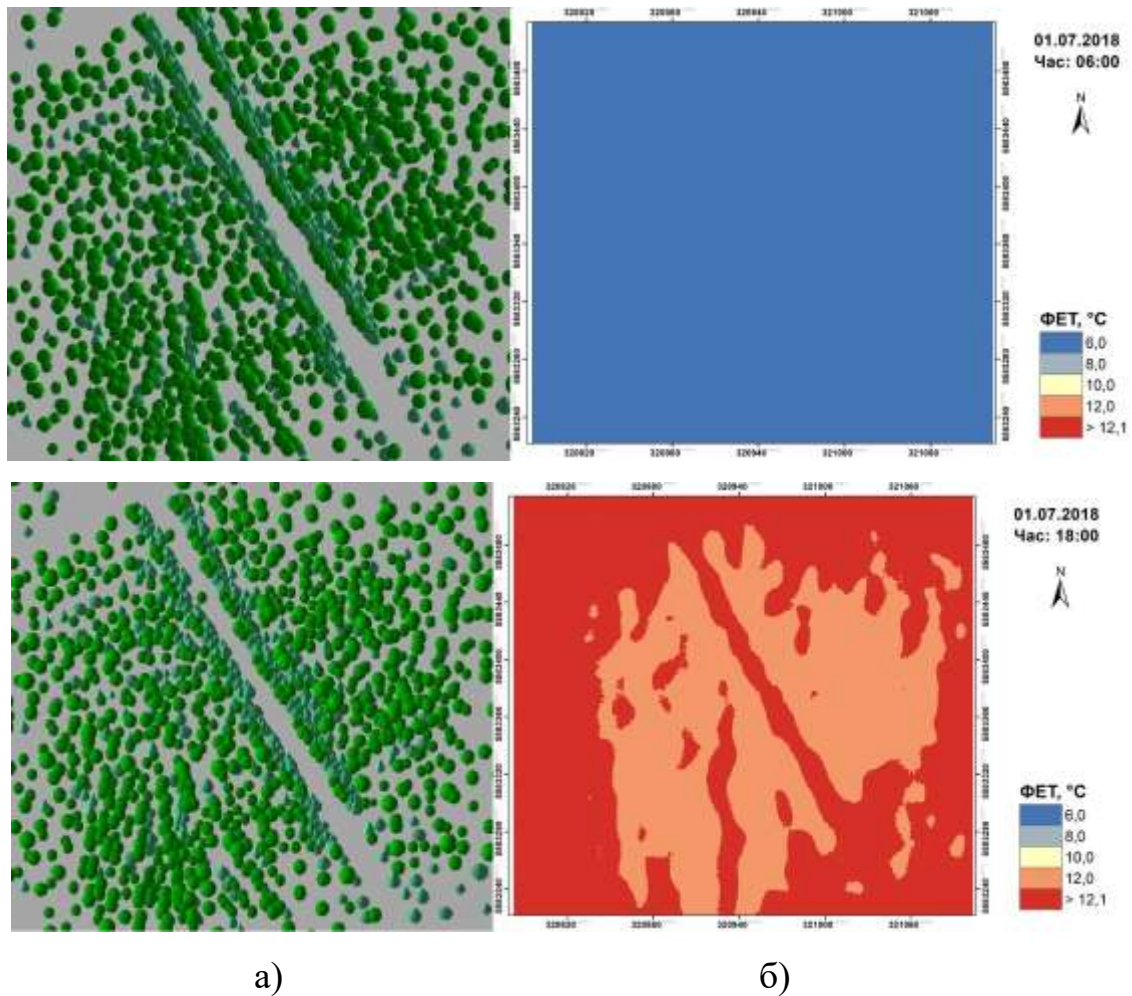


Рис. 4.15. Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 р. для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Синоптична ситуація 6 – Антициклон

2 серпня 2015 року спостерігалася спекотна суха погода зі слабким вітром, що призвела до формування інтенсивного теплового стресу в денні години у Києві та на прилеглих територіях (додаток Л). Результати моделювання свідчать (табл. 4.7), що для строку 00:00 СЛЧ значення ФЕТ на в межах досліджуваних ЛКЗ знаходилося становило від 13,1°C (легкий холодний стрес) до 19,6°C (комфортні умови). Найнижчі значення ФЕТ (13,1–17,3°C) спостерігалися на відкритих ділянках, найвищі (понад 18°C) – у внутрішніх дворах забудов. На рис. 4.16 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 4 (ЛКЗ–2).

Таблиця 4.7

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 2 серпня 2015 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	макс	сер	Мін	макс	сер	мін	макс	Сер	мін	макс	Сер
1 (ЛКЗ-1)	13,1	19,6	13,9	12,8	17,4	13,8	28,2	44,6	34,1	27,2	42,3	30,2
2 (ЛКЗ-1)	13,1	19,2	14,9	12,9	16,9	14,2	28,4	43,6	34,6	27,0	42,1	30,4
3 (ЛКЗ-2)	15,2	19,1	16,3	12,7	16,7	13,8	28,3	45,5	34,5	26,8	43,7	30,8
4 (ЛКЗ-2)	15,2	19,4	16,4	12,7	17,2	13,7	27,7	45,9	34,8	27,0	42,6	30,8
5 (ЛКЗ-4)	15,5	19,2	17,0	12,9	16,4	14,5	28,1	44,9	34,4	27,0	41,1	30,8
6 (ЛКЗ-5)	15,2	18,7	16,4	12,6	16,2	13,8	28,0	44,4	35,4	26,8	42,9	31,0
7 (ЛКЗ-5)	15,0	19,2	15,9	12,7	16,9	13,6	27,8	45,8	34,5	26,7	43,4	30,5
8 (ЛКЗ-6)	15,2	18,2	15,8	12,6	15,8	13,3	28,8	41,9	34,4	26,9	41,4	30,4
9 (ЛКЗ-6)	15,1	18,6	15,5	12,5	16,3	13,0	28,4	45,1	34,2	27,0	42,6	30,3
10 (ЛКЗ-А)	16,8	19,8	19,1	14,0	16,5	15,9	29,7	37,3	32,0	28,8	31,9	29,5

О 06:00 СЛЧ значення ФЕТ по досліджуваній території (рис. 4.16) змінювалися від помірного холодового стресу до легкого холодового стресу ($12,5^{\circ}\text{C}$ – $17,4^{\circ}\text{C}$), що пов'язано зі зниженням температури повітря в ранкові години. Вищі значення ФЕТ (15 – 16°C) фіксувалися у внутрішніх дворах забудов та біля стін будинків, що орієнтовані на схід, а нижчі (12 – 13°C) – в тіні та на відкритих ділянках.

У строк 12:00 СЛЧ біокліматичні умови на всіх обраних ділянках стають екстремальнішими, що пов'язано зі зростанням температури повітря та надходження сонячної радіації. Значення ФЕТ змінюється в значних межах від $27,7^{\circ}\text{C}$ (легкий тепловий стрес) до $45,8^{\circ}\text{C}$ (екстремальний тепловий стрес), що охоплює 4 градації теплового стресу. Мешканці досліджуваних забудованих ЛКЗ відчували легкий та помірний тепловий стрес поблизу стін будинків, що орієнтовані на північ та північний-захід, тоді як на решті території та біля стін, що орієнтовані на південь – сильний та екстремальний тепловий стрес ($35,1$ – $45,9^{\circ}\text{C}$). Середнє значення БІ по ділянках змінювалося від $34,1^{\circ}\text{C}$ – помірний тепловий стрес до $35,4^{\circ}\text{C}$ – сильний тепловий стрес.

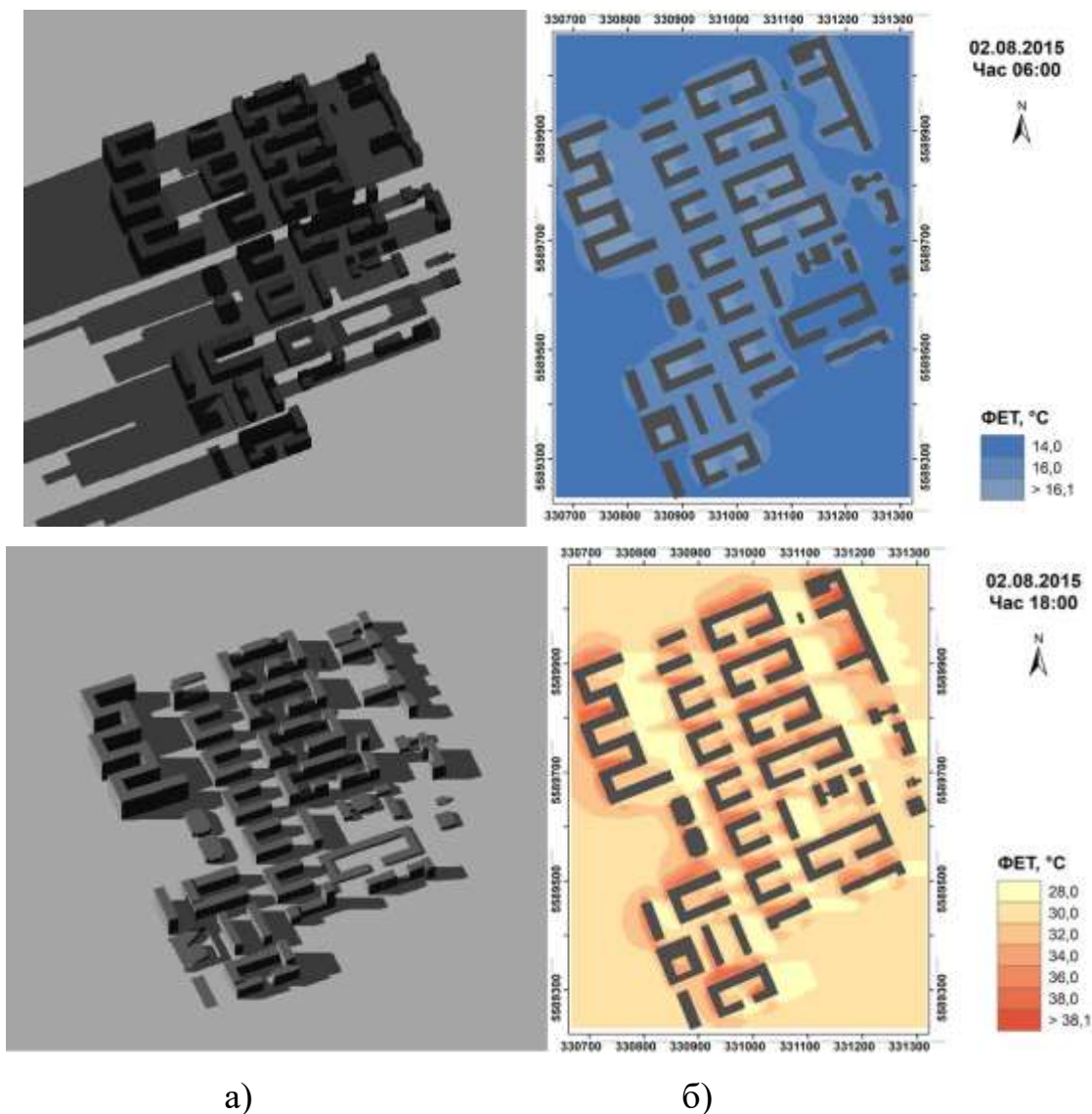


Рис. 4.16. Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 р. для ділянки 4 (ЛКЗ–2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

У вечірні години значення ФЕТ становило від 26,7 (легкий тепловий стрес) до 43,7°C (екстремальний тепловий стрес). Враховуючи зміну напрямку падіння сонячних променів, затіненими територіями стали ті, що розміщені поблизу стін будинків орієнтованих на схід (рис. 4.16). Відповідно там фіксувалися найнижчі значення ФЕТ – від 26,8°C до 30,0°C, що відповідає помірному тепловому стресу. Середнє значення ФЕТ по обраних ділянках в середньому знизилось на 4°C порівняно з 12:00 СЛЧ.

Результати моделювання біокліматичних умов для ЛКЗ–А свідчать, що протягом досліджуваного періоду значення даного біокліматичного індексу змінювалося в значних межах – від 14,0°C до 37,3°C (табл. 4.7). У строк 00:00 СЛЧ майже по всій території спостерігалися комфортні умови (18,1–19,8°C), очевидно, це пов'язано із затримкою коронами дерев тепла в приземному шарі повітря. Найнижчі значення ФЕТ (16,8–18,0°C) фіксувалися в північно-західній та на південній частинах обраної ділянки та відповідали легкому холодovому стресу (рис. 4.17).

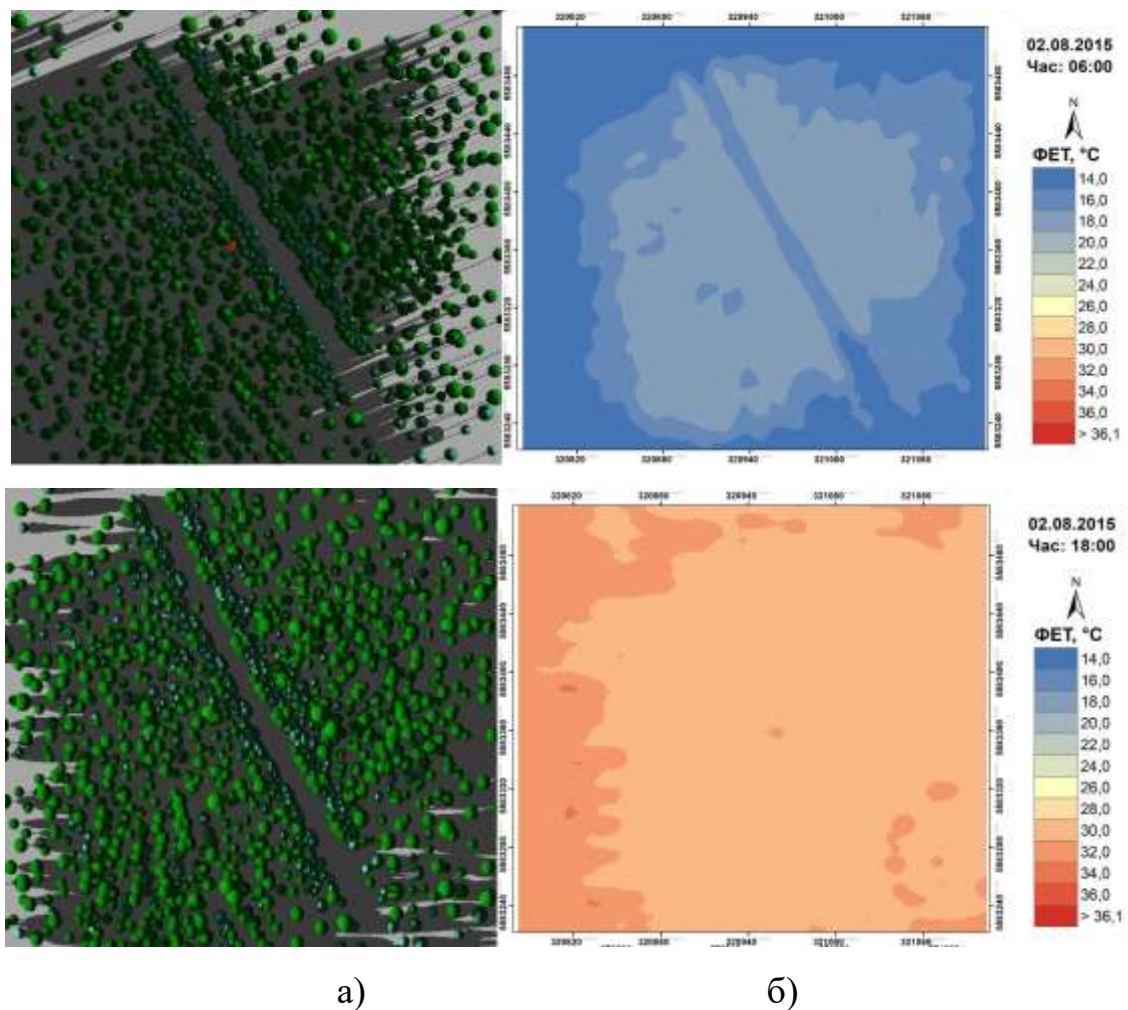


Рис. 4.17 Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 р для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

В ранкові години розподіл ФЕТ по ділянці ЛКЗ–А був схожим до розподілу о 00:00 СЛЧ, але значення ФЕТ були нижчими (від 14,0 до 16,5°C), що пов'язано зі зниженням температури повітря – на 3,3°C (рис. 4.17). О 12:00 СЛЧ спостерігається істотна зміна просторового розподілу значень ФЕТ на досліджуваній території. Вищі значення БІ (35,1–37,3°C – сильний тепловий стрес) фіксуються на малозатінених ділянках ЛКЗ–А (північно-західна, південна частини та алея, що простягається вздовж парку), а нижчі (29,7–35,0 °C – помірний тепловий стрес) – поблизу дерев. У вечірні години зі зміною висоти Сонця (рис. 4.17) спостерігається і зміна просторового розподілу значень ФЕТ в межах парку. Вищі значення ФЕТ (30,5–31,9°C) зафіксовані в північно-західній та західній частинах ділянки, що пов'язано з падінням сонячних променів і відповідного прогріву цієї частини ЛКЗ–А.

Порівняння значень ФЕТ ЛКЗ–А зі значеннями забудованих ЛКЗ показало, що протягом дослідженого періоду в міському парку не було зафіксовано екстремального теплового стресу, в той час як в межах забудованих ділянок він спостерігався о 12:00 та о 18:00 СЛЧ. У строк 00:00 СЛЧ середнє значення ФЕТ по ділянці міського парку становило 19,1°C (комфортні умови), а в забудованих ЛКЗ воно змінювалося від 13,9 до 17,0, що відповідає легкому холодному стресу. О 12:00 СЛЧ в ЛКЗ–А спостерігалися дещо комфортніші умови – максимальне значення ФЕТ по ділянці становило 37,3°C (сильний тепловий стрес), тоді як в межах забудованих ЛКЗ фіксувався екстремальний тепловий стрес. Схожа ситуація прослідковується й у вечірні години, в межах парку максимальне значення ФЕТ було нижчим на 9,2–11,8°C за забудовані ЛКЗ, тоді як середнє по ділянці відповідало помірному тепловому стресу, що фіксувався на всіх досліджуваних ЛКЗ.

Синоптична ситуація 7 – Градієнтне баричне поле високого тиску

Для дослідження розподілу біокліматичного індексу ФЕТ в різних забудованих ЛКЗ в умовах градієнтного баричного поля високого тиску (14 червня 2020 р.), ми проаналізували результати 40 симуляцій, для яких було побудовано

картосхеми (додаток М). 14 червня 2020 року в Києві спостерігалася хмарна і тепла погода з опадами в другій половині дня.

Результати моделювання свідчать (табл. 4.8), що у строк 00:00 СЛЧ значення ФЕТ на досліджуваних територіях знаходилося в межах від 17,0°C (легкий холодний стрес) до 23,6°C (легкий тепловий стрес). Середні значення ФЕТ по ЛКЗ відповідали комфортним умовам – від 18,1 до 19,8°C. Вищі значення ФЕТ фіксувалися поблизу стін будинків що орієнтовані на захід та південний-захід, такий просторовий розподіл пов'язаний з тепловим випромінюванням об'єктів та нижчою швидкістю вітру в цих областях. Нижчі значення ФЕТ (менше 19,0°C) спостерігалися у проміжках між деякими будинками, простір яких співпадав з напрямком вітру, що в свою чергу призвело до зростання турбулентності.

Таблиця 4.8

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 14 червня 2020 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	макс	сер	Мін	макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	Сер
1 (ЛКЗ–1)	17,2	23,6	18,6	13,5	22,4	15,6	19,2	33,6	23,5	25,6	35,7	28,3
2 (ЛКЗ–1)	17,2	23,5	19,0	13,6	22,5	16,2	19,2	33,9	24,1	25,9	36,3	28,4
3 (ЛКЗ–2)	17,3	23,6	19,3	14,4	23,2	17,2	18,2	33,6	25,1	25,9	36,8	28,9
4 (ЛКЗ–2)	17,1	23,6	18,7	13,7	22,0	16,4	19,5	33,3	24,5	25,2	36,9	28,4
5 (ЛКЗ–4)	17,4	23,6	19,8	14,0	22,3	17,0	19,5	33,3	25,4	26,1	35,9	28,8
6 (ЛКЗ–5)	17,2	23,3	19,5	13,6	22,6	16,8	19,8	34,1	26,0	25,9	37,7	29,2
7 (ЛКЗ–5)	17,0	23,4	18,8	13,5	23,8	16,1	19,4	34,7	24,7	25,8	37,6	28,8
8 (ЛКЗ–6)	17,4	23,3	18,6	14,0	22,2	15,8	20,4	34,2	24,5	26,2	36,2	28,6
9 (ЛКЗ–6)	17,2	22,7	18,1	14,1	22,6	15,6	20,7	34,2	24,4	26,2	36,9	28,4
10 (ЛКЗ–А)	17,9	18,8	18,4	14,2	15,5	14,6	18,8	23,8	20,5	26,2	29,0	27,2

На рис. 4.18 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 6 (ЛКЗ–5). В ранкові години суттєвих змін у просторовому розподілі значень ФЕТ в межах забудованих ЛКЗ не відмічалось. Проте значення ФЕТ помітно відрізнялися, охоплюючи 3 градації – від легкого холодного до легкого теплового (13,5°C–23,8°C). Причиною такої зміни стало зниження

температури повітря, порівняно з 00:00 СЛЧ. Середнє значення ФЕТ по ділянках відповідало легкому холодному стресу (15,6–17,2°C). В полудень термічні умови дещо покращилися – середнє значення ФЕТ по ділянках змінюється від 23,5°C до 26,0°C, що відповідає легкому тепловому стресу.

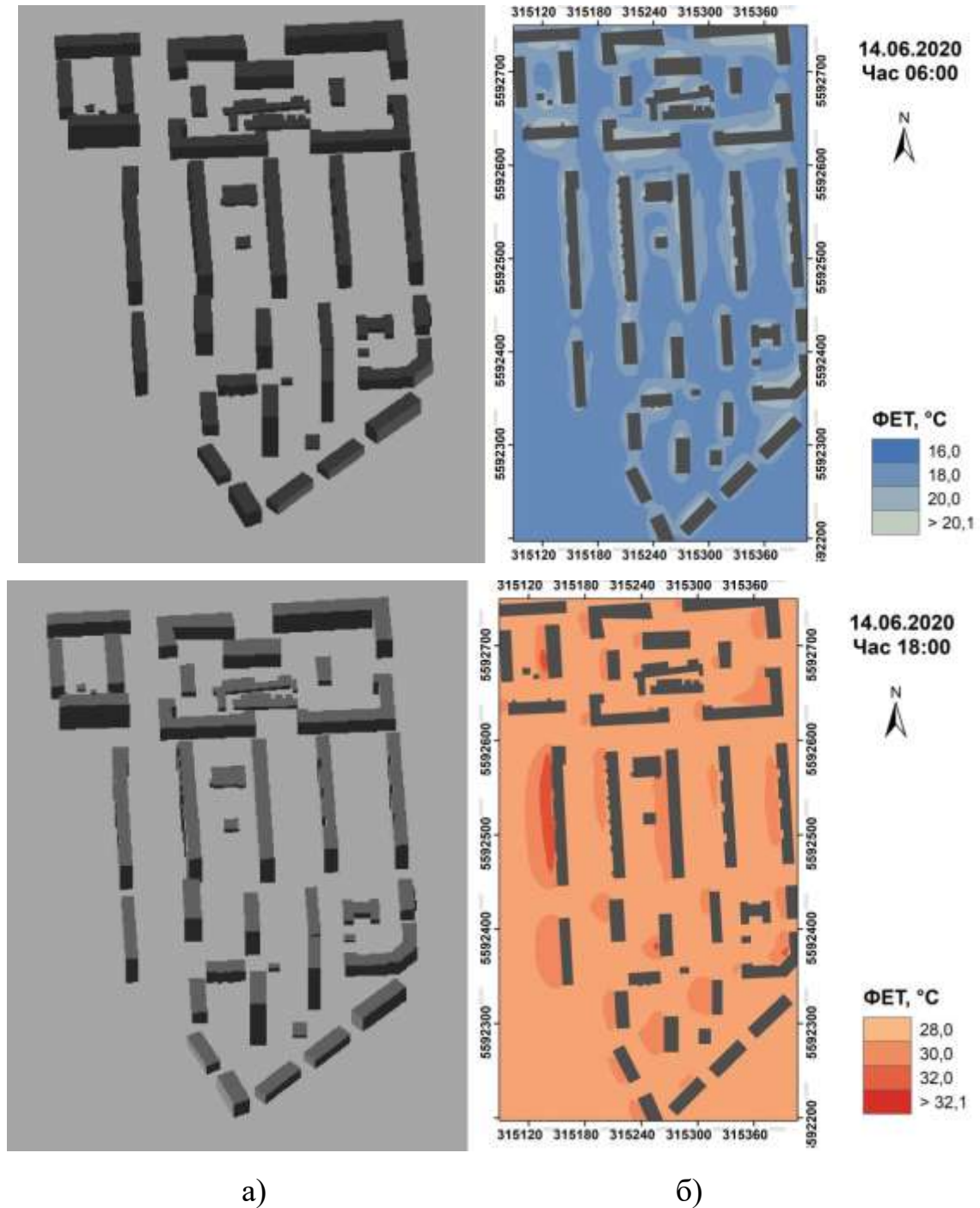


Рис. 4.18 Результати моделювання значень ФЕТ за 14 червня 2020 р для ділянки 6 (ЛКЗ–5, мікрорайон Галагани) у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

О 12-й годині значення ФЕТ в різних частинах території знаходилися в межах від 18,2°C (комфортні умови) до 34,7°C (помірний тепловий стрес). Вищі значення ФЕТ фіксувалися у внутрішніх дворах та поблизу стін будинків, що орієнтовані на південний-захід, а нижчі (менше 24,0°C) – у проміжках між деякими будинками, що співпадали з напрямком вітру. На решті територій (на відкритих ділянках) значення ФЕТ становило 22,1–24,0°C.

У вечірні години температура повітря підвищилась (на 4,7 °C) а хмарність зменшилась (до 6 октантів), що призвело до посилення теплового стресу на досліджуваних територій. О 18:00 СЛЧ значення ФЕТ в межах досліджуваних ділянок було від 25,2°C (легкий тепловий стрес) до 37,7°C (сильний тепловий стрес). Середнє значення ФЕТ по обраних ділянках було на 2–5°C вищим, порівняно з 12:00 СЛЧ. Найбільші зміни відбулися у мінімальних значеннях ФЕТ, що були в середньому на 5°C вищими, ніж у попередній строк і відповідали легкому тепловому стресу. У строк 18:00 СЛЧ, як і в попередні строки просторовий розподіл ФЕТ залишився без змін.

Результати моделювання значень ФЕТ для міського парку (ЛКЗ–А) показують (додаток М), що протягом досліджуваного періоду значення ФЕТ в ЛКЗ–А змінювалося в межах від 14,2°C до 29°C (табл. 3.7). У строк 00:00 СЛЧ по всій території парку спостерігалися комфортні умови (18,1–18,8°C), тільки в північно-західній частині – легкий холодний стрес (17,9–18,0°C). Найнижчі значення ФЕТ (14,2–15,5°C) фіксувалися в ранкові години та відповідали легкому холодному стресу (рис. 4.19). О 12:00 СЛЧ на досліджуваній території спостерігалися комфортні умови – середнє значення ФЕТ по ділянці становило 20,5°C. Нижчі значення (18,8–21,0°C) фіксувалися в центральній частині обраної ділянки, а вищі (23,1–23,8°C – легкий тепловий стрес) – на ділянках з меншою кількістю дерев. У вечірні години (рис. 4.19) значення ФЕТ в ЛКЗ–А підвищилися та знаходилися в межах від 26,2 до 29,0°C, що відповідає легкому тепловому стресу. Порівняння значень ФЕТ для ЛКЗ–А зі значеннями ФЕТ в межах забудованих ЛКЗ показало, що протягом досліджуваного періоду в міському парку в денні години

спостерігалися комфортніші умови – не було зафіксовано помірнього та сильного теплового стресу, як у забудованих ЛКЗ. Для всіх строків моделювання суттєвих відмінностей між мінімальними значеннями ФЕТ не виявлено, але максимальне значення ФЕТ у міському парку було нижчим.

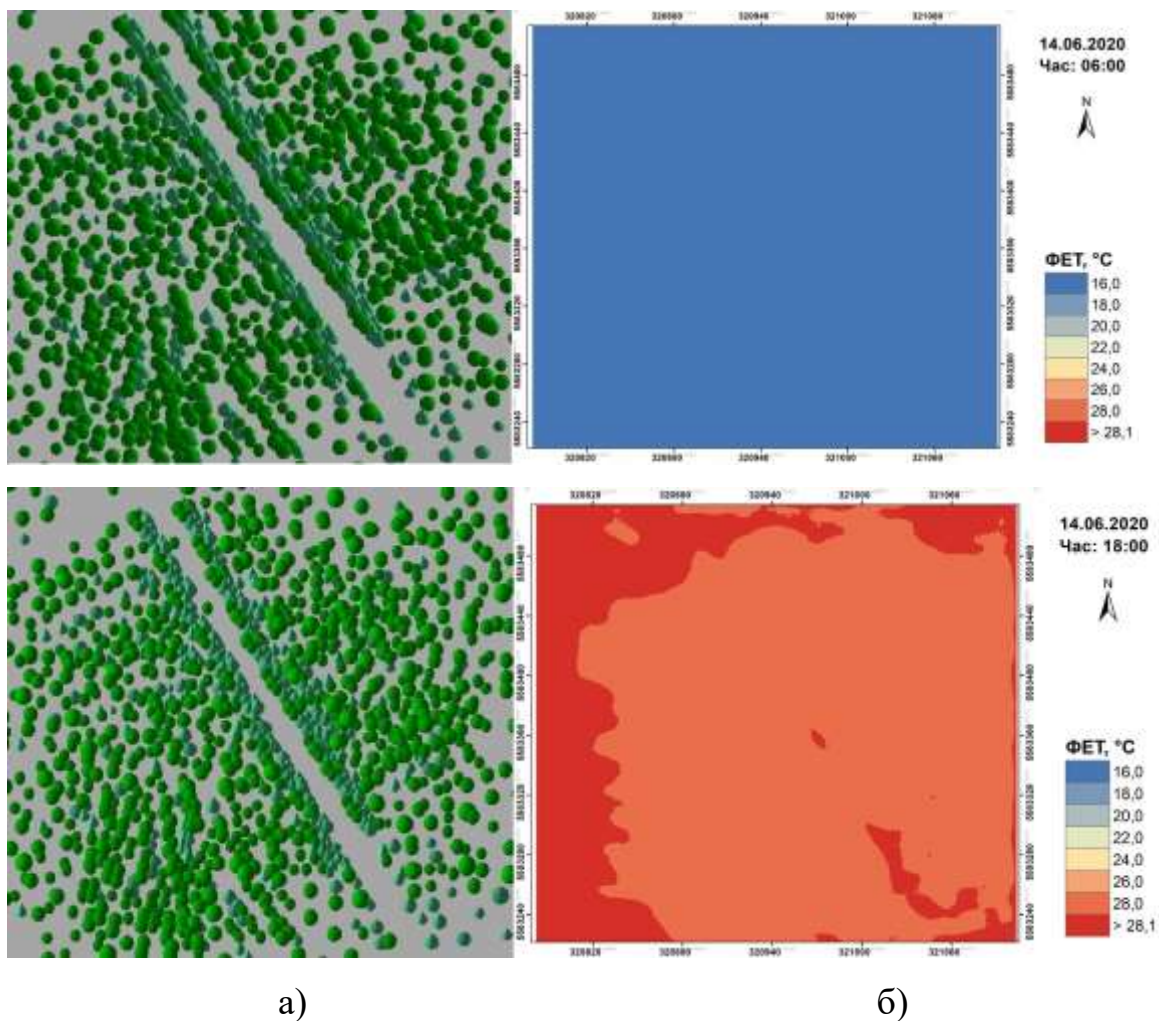


Рис. 4.19 Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 р для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Синоптична ситуація 8 – Південна периферія антициклону

14 серпня 2010 року Київ перебував в зоні периферії антициклону, спостерігалася спекотна погода (максимальна температура повітря – 37,1°C), зі слабким вітром. Власне, в цей період на території центральних, східних, південних та північних областей України спостерігалася мега-хвиля тепла, яка

характеризувалася екстремальним тепловим стресом [178]. Результати моделювання свідчать (табл. 4.9), що для строку 00:00 СЛЧ значення ФЕТ варіювалося по території від комфортних умов (20,7–23,0°C) до легкого теплового стресу (23,1–26,4°C). Вищі значення ФЕТ зафіксовані у внутрішніх двориках, а нижчі (менше 22,0°C) – на відкритих ділянках. О 06:00 СЛЧ на всіх обраних ділянках спостерігалися комфортні умови, значення ФЕТ було в межах від 18,4°C до 22,4°C. Вищі значення (понад 20,5°C) порівняно з відкритими ділянками фіксувалися у внутрішніх дворах (рис. 4.20).

Таблиця 4.9

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 14 серпня 2010 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	макс	сер	мін	макс	сер	мін	Макс	Сер	мін	макс	Сер
1 (ЛКЗ–1)	20,7	26,2	21,6	18,6	22,2	19,5	35,1	44,1	38,3	36,6	42,3	37,3
2 (ЛКЗ–1)	20,7	25,8	22,0	18,6	22,0	19,9	35,4	44,1	38,6	36,6	42,6	37,5
3 (ЛКЗ–2)	20,7	25,7	21,8	18,5	22,2	19,5	35,3	45,7	39,1	36,5	43,7	37,5
4 (ЛКЗ–2)	20,4	26,1	21,6	18,4	22,4	19,3	35,2	46,4	38,8	36,5	42,8	37,4
5 (ЛКЗ–4)	20,8	26,4	22,7	18,8	22,3	20,3	35,5	44,5	38,7	36,5	42,3	37,5
6 (ЛКЗ–5)	20,6	25,7	21,9	18,5	21,8	19,6	35,4	45,0	38,2	36,6	43,1	37,5
7 (ЛКЗ–5)	20,5	25,6	21,5	18,5	22,4	19,3	35,3	45,9	38,8	36,5	43,5	37,5
8 (ЛКЗ–6)	20,6	25,2	21,4	18,5	21,4	19,1	36,1	42,9	38,8	36,6	42,2	37,4
9 (ЛКЗ–6)	20,6	25,0	21,1	18,4	21,7	18,8	36,0	46,7	38,7	36,6	43,4	37,3
10 (ЛКЗ–А)	21,9	24,0	23,3	19,8	22,3	21,7	37,3	42,6	38,8	36,9	38,2	37,2

Для прикладу на рис. 4.20 наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 1 (ЛКЗ–1). О 12:00 СЛЧ термічні умови в межах усіх досліджуваних ЛКЗ стають більш спекотними, що пов'язано зі збільшенням інтенсивності сонячної радіації та підвищенням температури повітря. Найвищі значення ФЕТ – від 41,0 до 46,4°C (екстремальний тепловий стрес), відмічалися поблизу стін будинків, орієнтованих південь та південний захід, а нижчі (35,1°C) –

зафіксовано на ділянках, що перебували в тіні. Середнє значення ФЕТ по обраним ділянкам відповідало сильному тепловому стресу ($38,2\text{--}39,1^\circ\text{C}$).

Зі зміною висоти Сонця, а також з появою хмарності (6 октантів) о 18:00 СЛЧ спостерігається і зміна просторового розподілу значень ФЕТ в межах досліджуваних ЛКЗ. Вищі значення ФЕТ ($41,0\text{--}43,7^\circ\text{C}$) зафіксовані поблизу будинків, що орієнтовані на захід, а нижчі ($36,5^\circ\text{C}$ – сильний тепловий стрес) спостерігалися на затінених ділянках (рис. 4.20). порівняно з попереднім строком на $1\text{--}4^\circ\text{C}$ знизилися максимальні значення ФЕТ (проте все ж таки належали до градації екстремального теплового стресу).

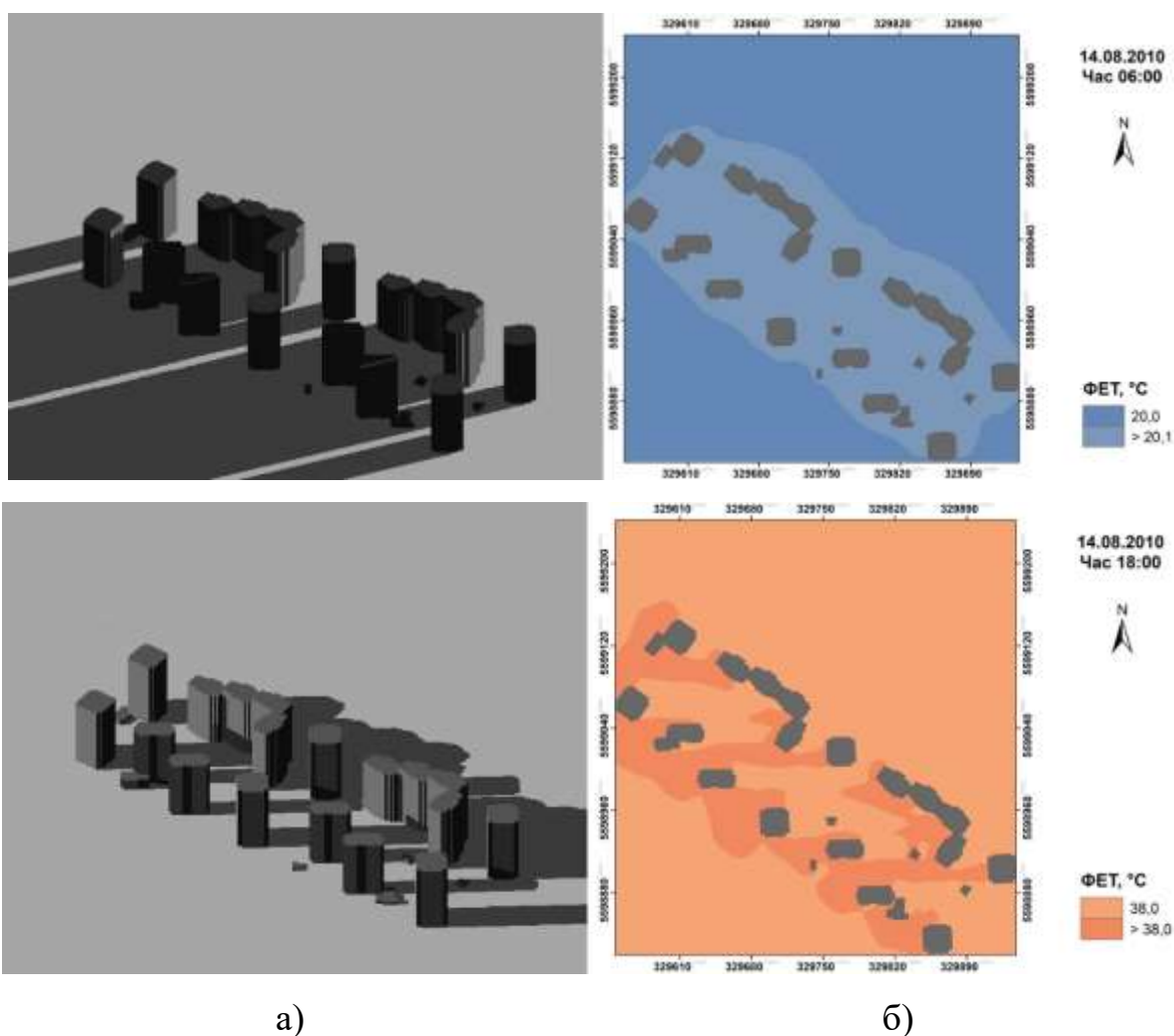


Рис. 4.20 Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 р для ділянки 1 (ЛКЗ – 1, 26-й А мікрорайон) у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Результати моделювання ЛКЗ–А показують, що значення ФЕТ в межах міської зеленої зони змінювалися від 19,8°C до 42,6°C (табл. 4.9). У нічні години над відкритими ділянками фіксувалися комфортні умови (21,9–23,0°C), а біля дерев – легкий тепловий стрес (23,1–24,0°C). Такий розподіл ФЕТ може бути пов’язано з кронами дерев, що сприяли затримці тепла в приземному шарі. У строк 06:00 СЛЧ по всій території спостерігалися комфортні умови (19,8–22,3°C) з вищими значеннями на відкритих ділянках парку (рис. 4.21).

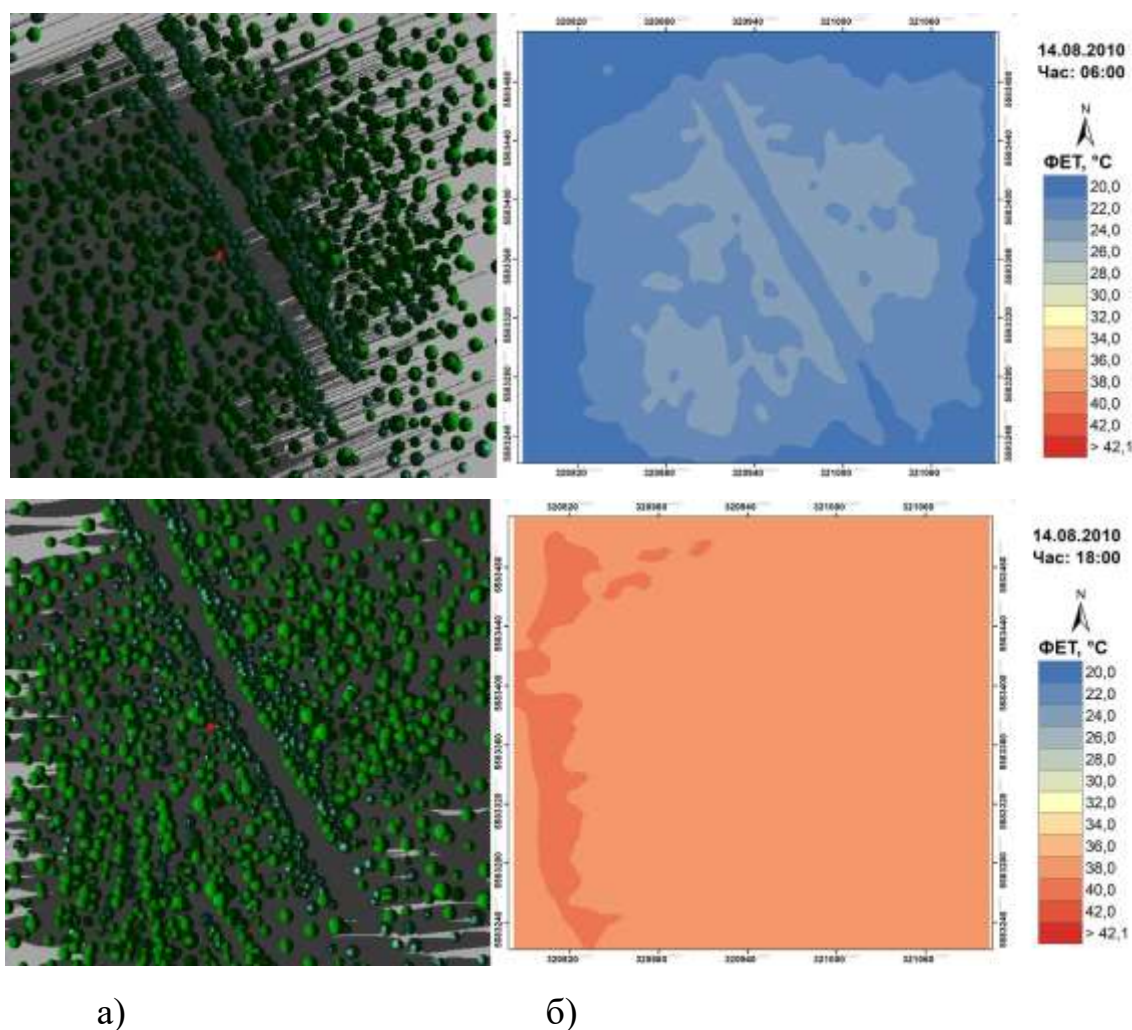


Рис. 4.21 Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 р для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

О 12:00 СЛЧ просторовий розподіл значень ФЕТ істотно змінився, найвищі значення (38,2°C) фіксувалися на відкритих незатінених ділянках парку, а нижчі

(37,3°C) – над ділянками, вкритими рослинністю. В денні години у ЛКЗ–А людина зазнавала б сильного та екстремального теплового стресу. У вечірні години (рис. 4.21) значення ФЕТ в парку знаходилось в межах (36,9–38,2°C – сильний тепловий стрес). Отже, для строків 00:00 та 06:00 СЛЧ годин суттєвих відмінностей між максимальними та мінімальними значеннями ФЕТ в межах ЛКЗ–А та забудованими ЛКЗ не виявлено. Проте, середнє значення ФЕТ по ділянці у міському парку є вищим (приблизно на 2°C), порівняно із забудованими. Аналіз отриманих результатів показав, що під час мега-хвилі літа 2010 року навіть у міських парках фіксувався сильний тепловий стрес, хоча значення ФЕТ в межах ЛКЗ–А закономірно були нижчими ніж у забудованих ділянках.

Синоптична ситуація 9 – Область підвищеного тиску

26 липня 2020 року спостерігалася ясна та спекотна погода зі слабким вітром, що спричинила високий рівень термічного навантаження на мешканців Києва в денні години. Результати моделювання свідчать (табл. 4.10), що для строку 00:00 СЛЧ в межах забудованих ділянок значення ФЕТ становили від 16,3°C (легкий холодний стрес) до 20,7°C (комфортні умови). Вищі й відповідно комфортні умови фіксувалися у внутрішніх дворах поблизу будинків, нижчі — на відкритих ділянках. На рис. 4.22 для прикладу наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 8 (ЛКЗ–6).

Таблиця 4.10

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 26 червня 2020 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	макс	сер	мін	Макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер
1 (ЛКЗ–1)	16,4	20,5	17,5	17,0	22,8	18,3	26,1	43,9	32,5	27,2	43,7	30,9
2 (ЛКЗ–1)	16,5	20,4	17,9	17,1	21,9	18,5	25,5	50,0	33,8	27,2	43,4	31,1
3 (ЛКЗ–2)	16,4	20,6	17,5	16,9	22,3	18,2	25,8	53,1	34,9	27,1	45,1	31,6
4 (ЛКЗ–2)	16,4	20,7	17,7	17,0	22,8	18,3	25,7	53,5	34,9	27,0	45,3	31,7
5 (ЛКЗ–4)	16,7	20,7	18,4	17,1	21,6	18,7	26,2	52,4	34,6	27,3	43,1	31,4
6 (ЛКЗ–5)	16,4	20,1	17,7	16,9	22,7	18,2	25,4	50,3	34,4	26,9	44,9	31,7
7 (ЛКЗ–5)	16,4	20,7	17,3	17,0	22,6	18,1	25,3	52,2	34,0	26,9	45,5	31,3

Продовження таблиці 4.10

8 (ЛКЗ–6)	16,4	19,7	17,0	16,9	20,9	17,8	25,9	50,3	33,7	27,0	42,7	31,2
9 (ЛКЗ–6)	16,3	20,1	16,7	16,9	21,6	17,7	25,8	52,1	33,4	26,5	44,0	30,1
10 (ЛКЗ–А)	18,1	21,2	20,6	18,6	20,5	19,7	28,5	36,4	31,2	29,1	32,8	29,9

В ранкові години, незважаючи на нижчу температуру повітря, значення ФЕТ були вищими та змінювалися від легкого холодого стресу до комфортних умов (16,9°C–22,8°C). Це пов'язано з початком надходження сонячної радіації на підстильну поверхню та відсутності вітру о 06:00 СЛЧ. Найвищі значення ФЕТ (18,5–22,8°C) спостерігалися поблизу стін будинків, що орієнтовані на схід (рис. 4.22), а найнижчі — на відкритих ділянках (менше 17,5°C).

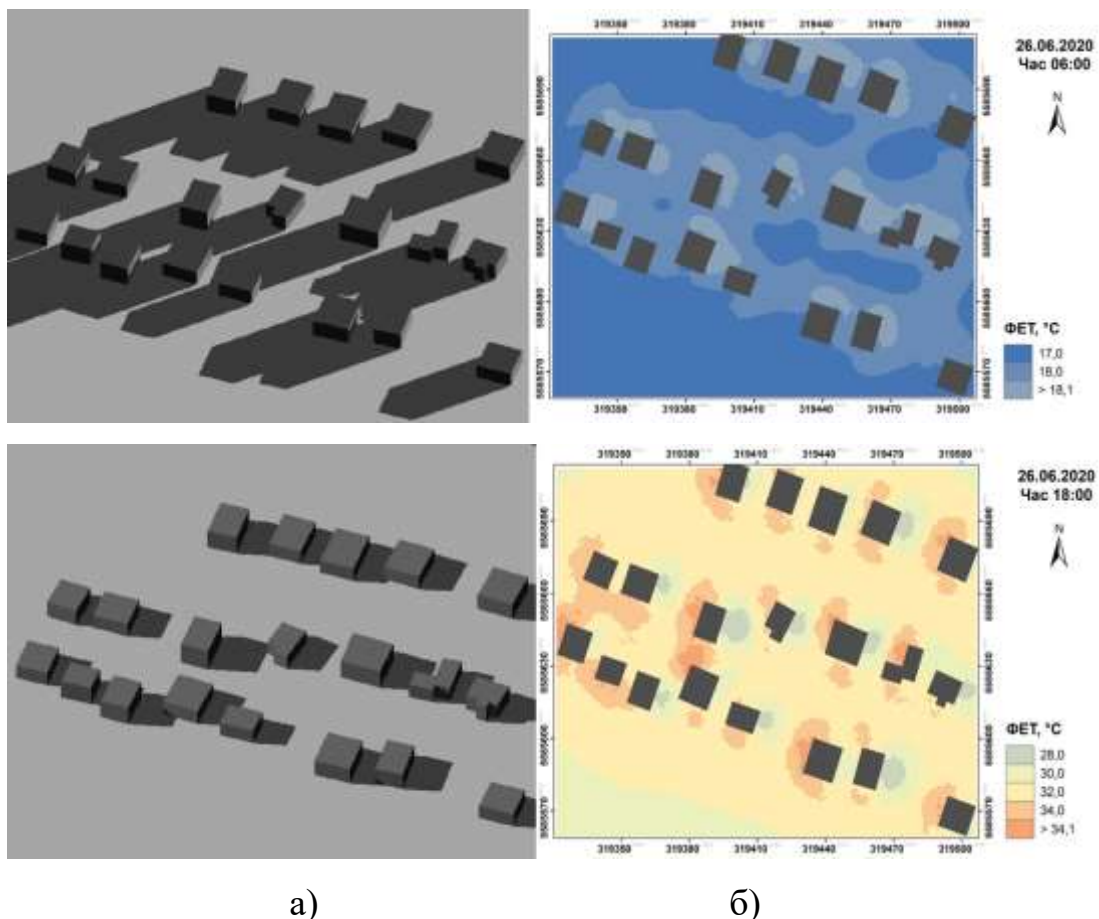


Рис. 4.22 Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 р для ділянки 8 (ЛКЗ–6, Жуляни) у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

За рахунок збільшення інтенсивності сонячної радіації та підвищення температури повітря за ясної погоди у строк 12:00 СЛЧ біокліматичні умови на всіх обраних ділянках стали екстремальнішими. Значення ФЕТ змінювалися в значних межах – від 25,3°C (легкий) до 53,1°C (екстремальний), що включає всі 4 градації теплового стресу. На затінених ділянках мешканці відчували легкий та помірний тепловий стрес, що характеризувався значеннями ФЕТ від 25,3°C до 32,0°C. На решті територій, особливо поблизу стін будинків, орієнтованих на південь спостерігався екстремальний тепловий стрес, максимальне значення ФЕТ на досліджуваних територіях було від 43,9°C до 53,5°C. Середнє значення ФЕТ по ділянках знаходилося в межах від 32,5 до 34,9°C, що відповідало помірному тепловому стресу.

Враховуючи зміну висоти Сонця, о 18:00 СЛЧ спостерігалася зміна просторового розподілу значень ФЕТ на досліджуваних територіях. Біокліматичні умови дещо покращилася, оскільки площа затінених ділянок зросла, середнє значення ФЕТ знизилось на 1–3°C, порівняно з 12:00 СЛЧ. Найбільші зміни спостерігаються у максимальних значеннях ФЕТ, що в середньому були на 5°C нижчими за попередній строк, але все ж таки відповідали екстремальному тепловому стресу. Найвищі значення ФЕТ (понад 41,1°C) спостерігалися поблизу західних стін будинків.

Результати моделювання ФЕТ для міського парку (табл. 4.10) свідчать, що протягом досліджуваного періоду значення ФЕТ в ЛКЗ–А змінювалися від 18,1°C (комфортні умови) до 36,4°C (сильний тепловий стрес). У строк 00:00 СЛЧ по всій території спостерігалися комфортні умови з найвищими значеннями ФЕТ (20,6–21,2°C) біля дерев, що може бути пов'язано затримкою кронами тепла та відсутністю турбулентності (у цей строк спостерігався штиль). В ранкові години суттєвих змін у значеннях ФЕТ не виявлено – на території міського парку продовжували спостерігатися комфортні умови (18,6–20,5°C). Проте з появою Сонця (рис. 4.23) спостерігається зміна у просторовому розподілу значень ФЕТ в межах ЛКЗ–А. Вищі значення Бі фіксувалися зі східної сторони парку, що пов'язано з напрямком падіння сонячних променів. О 12:00 СЛЧ-й на

малозатінених ділянках парку людина відчувала б тепловий стрес від помірного (33,1°C) до сильного (36,4°C). Нижчі значення ФЕТ (28,5–32 °C) фіксувалися в тіні поблизу зелених насаджень, та відповідали легкому та помірному тепловому стресу. Середнє значення ФЕТ по території становило — 31,2°C (помірний тепловий стрес). У вечірні години зі зміною висоти Сонця (рис. 4.23) спостерігалася зміна просторового розподілу значень ФЕТ в межах парку. Середнє значення ФЕТ становило 29,9°C, що відповідає помірному тепловому стресу.

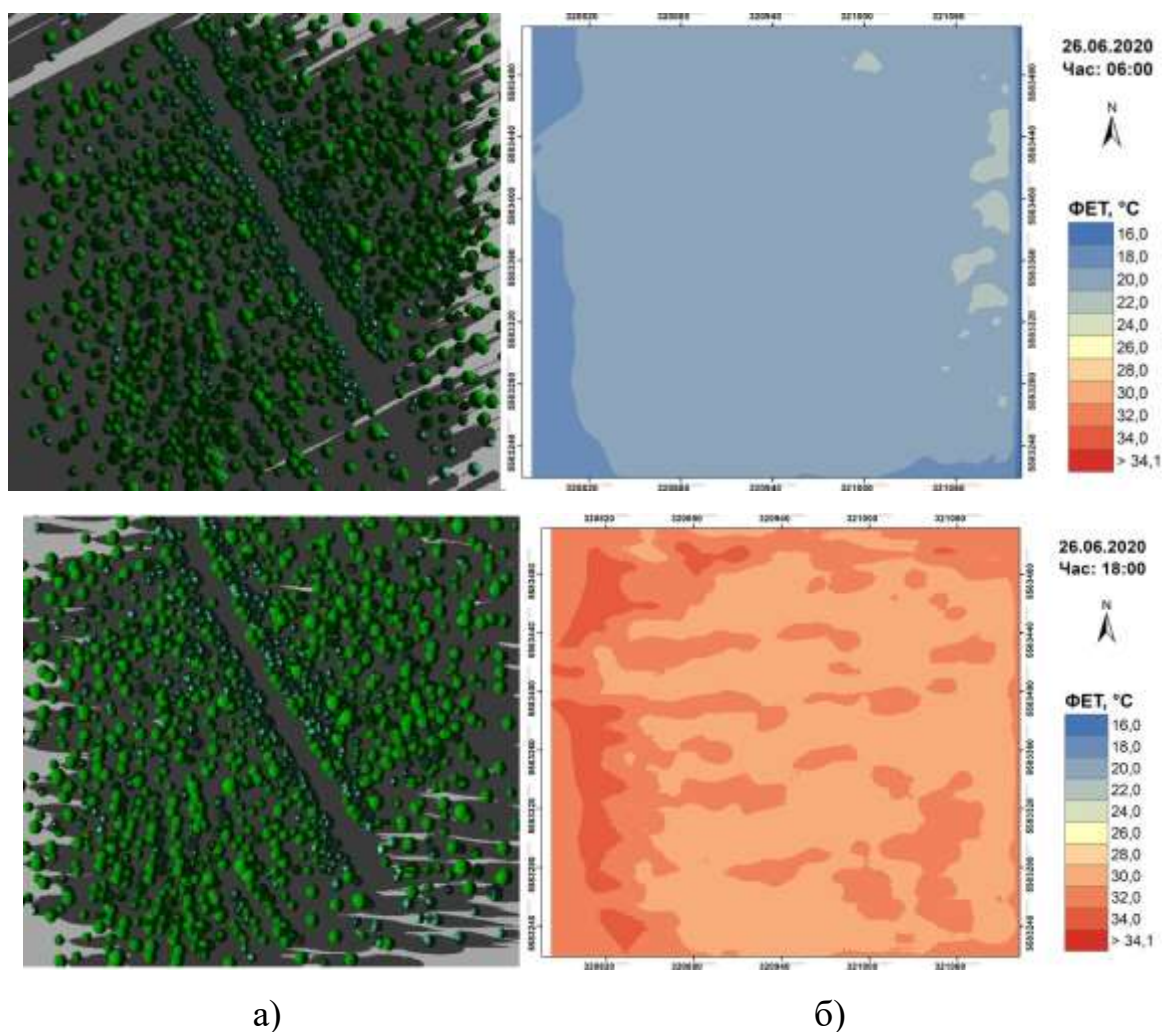


Рис. 4.23 Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 р. для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Протягом дослідженого періоду в міському парку не було зафіксовано екстремального теплового стресу, на відміну від забудованих територій. У строки

00:00 та 06:00 СЛЧ значення ФЕТ в межах ЛКЗ–А були вищими, ніж цей показник в інших ЛКЗ та відповідали комфортним умовам, тоді як в міській забудові фіксувався холодний стрес. У строки 12:00 та 18:00 СЛЧ в межах ЛКЗ–А фіксувалися дещо комфортніші умови, ніж на забудованих територіях, найбільші різниці спостерігалися у максимальних значеннях ФЕТ. О 12:00 СЛЧ в міському парку максимальне значення ФЕТ становило 36,4°C, що відповідає сильному тепловому стресу, тоді як в міській забудові переважав екстремальний тепловий стрес зі значеннями ФЕТ від 43,9°C до 53,5°C. У вечірні години в зв'язку з підвищенням температури повітря в межах парку, так як і в забудованих ЛКЗ фіксувалося збільшення мінімального значення ФЕТ порівняно з 12:00 СЛЧ. Проте за рахунок збільшення затіненої території максимальне значення ФЕТ було нижчим, хоча і відповідало екстремальному тепловому стресу (в міській забудові) та помірному (в ЛКЗ–А).

Синоптична ситуація 10 – Тилова частина циклону

4 липня 2019 року північна частина території України перебувала в тилівій частині циклону, в Києві спостерігалася тепла погода зі слабким вітром та мінливою хмарністю в денні години. Результати моделювання біоклімату свідчать (табл. 4.11), що в 00:00 СЛЧ значення ФЕТ варіювалися від помірного холодного стресу (11,2°C) до комфортних умов (18,4°C). Вищі значення ФЕТ (14,0–18,6°C) зафіксовані у внутрішніх двориках, а нижчі (менше 13,0°C) – на відкритих ділянках

Таблиця 4.11

Значення ФЕТ в межах обраних ЛКЗ для 4 липня 2019 року

Час	00:00 СЛЧ			06:00 СЛЧ			12:00 СЛЧ			18:00 СЛЧ		
	мін	макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер	мін	макс	сер
1 (ЛКЗ–1)	11,6	18,4	12,5	9,8	17,4	11,0	17,6	33,9	21,8	16,5	30,6	18,9
2 (ЛКЗ–1)	11,4	17,9	12,8	9,8	17,5	11,4	17,6	33,9	22,4	16,5	29,6	19,3
3 (ЛКЗ–2)	11,5	18,0	12,8	9,7	18,1	11,4	17,9	35,2	22,8	16,8	29,5	19,6

Продовження таблиці 4.11

4 (ЛКЗ–2)	11,2	18,4	13,0	9,6	17,8	11,4	18,2	36,1	23,0	16,5	31,1	20,0
5 (ЛКЗ–4)	11,5	18,6	13,7	9,9	17,1	12,2	17,7	34,4	23,6	16,6	29,4	20,5
6 (ЛКЗ–5)	11,5	17,8	12,8	9,5	17,8	11,4	17,7	33,9	23,0	16,8	30,9	20,2
7 (ЛКЗ–5)	11,2	17,6	12,4	9,5	18,5	11,0	17,7	35,8	22,6	16,8	31,1	19,5
8 (ЛКЗ–6)	11,5	17,3	12,3	9,6	17,0	10,9	18,2	34,0	22,5	17,3	29,7	19,4
9 (ЛКЗ–6)	11,4	16,9	12,0	9,7	17,0	10,6	18,2	36,1	22,3	17,3	31,1	19,2
10 (ЛКЗ–А)	12,6	14,6	13,9	10,9	12,1	11,8	18,6	23,6	20,1	17,2	18,9	17,8

Для прикладу на рис. 4.24 наведено картосхеми значень розподілу значень ФЕТ для ділянки 9 (ЛКЗ–6). О 06:00 СЛЧ в межах досліджуваних ЛКЗ значення ФЕТ (рис. 4.24) змінювалося від помірного холодового стресу до комфортних умов (9,5°C–18,5°C). Вищі значення ФЕТ (понад 13°C) фіксувалися у прибудинкових зонах, а нижчі (менше 12°C) – на затінених територіях та на відкритих ділянках. В полуденні години поява хмарності (5 октантів) перешкоджала сильному прогріву підстильної поверхні, тому на обраних ділянках не було зафіксовано екстремального теплового стресу. Значення ФЕТ змінювалося від 17,6 (комфортні умови) до 35,8°C (сильний тепловий стрес), середнє значення ФЕТ відповідало комфортним умовам для ЛКЗ–1, 2, 5 та 6, а для ЛКЗ–4 – легкий тепловий стрес. Нижчі значення ФЕТ спостерігалися на затінених територіях обраних ділянок та відповідали комфортним умовам та легкому холодовому стресу (менше 23,0°C). Вищі значення ФЕТ (25,1–35,8°C, легкий та сильний тепловий стрес) фіксувалися у внутрішніх дворах житлових комплексів та у прибудинкових зонах (ЛКЗ–6а, 6б).

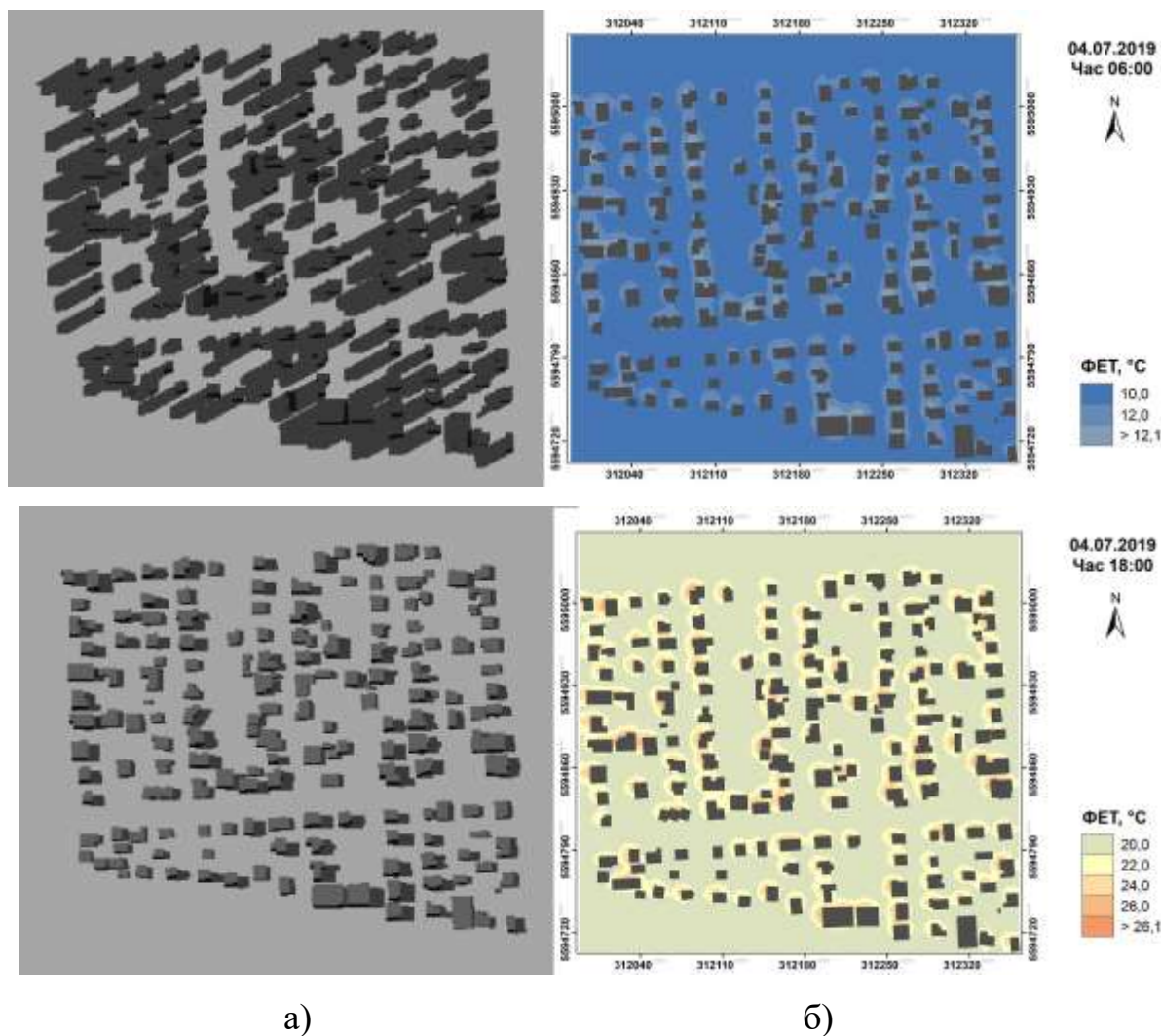


Рис. 4.24 Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 р. для ділянки 9 (ЛКЗ–6, Новобіличі) у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

В полуденні години поява хмарності (5 октантів) перешкоджала сильному прогріву підстильної поверхні, тому на обраних ділянках не було зафіксовано екстремального теплового стресу. Значення ФЕТ змінювалося від 17,6 (комфортні умови) до 35,8°C (сильний тепловий стрес), середнє значення ФЕТ відповідало комфортним умовам для ЛКЗ–1, 2, 5 та 6, а для ЛКЗ–4 – легкий тепловий стрес. Нижчі значення ФЕТ спостерігалися на затінених територіях обраних ділянок та відповідали комфортним умовам та легкому холодному стресу (менше 23,0°C). Вищі значення ФЕТ (25,1–35,8°C, легкий та сильний тепловий стрес) фіксувалися у внутрішніх дворах житлових комплексів та у прибудинкових зонах (ЛКЗ–6а, 6б).

О 18:00 СЛЧ значення ФЕТ варіювалися від 16,5°C (легкий холодний стрес) до 31,1°C (помірний тепловий стрес). Як і в попередній строк вищі значення ФЕТ (25,1–31,1°C) фіксувалися у внутрішніх дворах та у прибудинкових зонах. На відкритих ділянках спостерігалися нижчі значення ФЕТ 16,5–20,0°C. Незважаючи на те, що о 18:00 СЛЧ фіксувалася вища температура повітря – значення ФЕТ були нижчими, ніж за попередній строк. Це пов'язано з хмарністю – відбулося зростання кількості хмар до 7 октантів. Середнє значення ФЕТ в межах досліджуваних ЛКЗ відповідало комфортним умовам (18,9–20,5°C).

Результати моделювання свідчать, що за добу значення ФЕТ в межах ЛКЗ–А змінювалося в незначних межах – від 10,9°C до 23,6°C (табл. 4.11). У строк 00:00 СЛЧ по всій території спостерігався холодний стрес від помірного (12,6°C) до легкого (14,6°C). Нижчі значення ФЕТ (12,6–13,5°C) фіксувалися на територіях з меншою кількістю дерев, а вищі (13,6–14,6°C) – біля дерев. У ранкові години значення ФЕТ по території змінювалося мало та становило 10,9–12,1°C, що відповідає помірному холодному стресу (рис. 4.25). О 12:00 СЛЧ відвідувачі парку перебували б у комфортних умовах, значення ФЕТ варіювалося від 18,6°C до 23,6°C. Легкий тепловий стрес (23,1 – 23,6°C) фіксувався у північно-східній частині ЛКЗ–А, оскільки ця частина парку була малозатіненою. У вечірні години незважаючи на підвищення температури повітря, порівняно з попереднім строком (рис. 4.25) спостерігалися нижчі значення ФЕТ (17,2–18,9°C). Середнє значення по ділянці становило 17,8°C, що відповідає легкому холодному стресу. Причиною такого зниження може бути поява хмарності в денні години, яка перешкоджала прогріву підстильної поверхні та збільшення швидкості вітру.

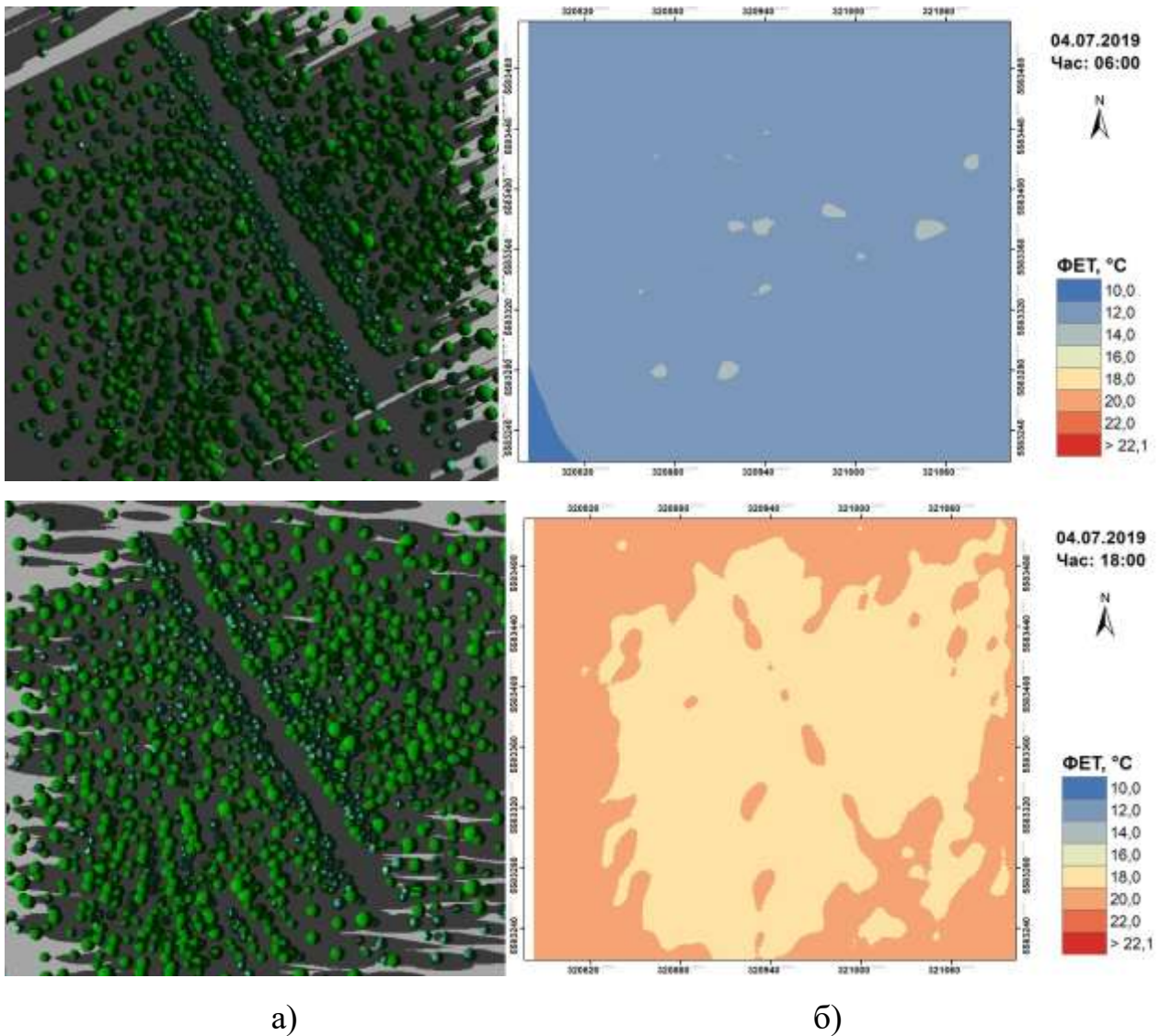


Рис. 4.25. Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 р для ділянки 10 (ЛКЗ–А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 06:00 та 18:00 СЛЧ: а) 3D модель ділянки з затіненням; б) розподіл значень ФЕТ.

Аналіз біокліматичних умов в межах ЛКЗ–А та забудованих територій свідчить, що в міському парку значення ФЕТ були нижчими і не перевищували легкого теплового стресу. У строки 00:00 та 06:00 СЛЧ суттєвих відмінностей в мінімальних та середніх значеннях ФЕТ ЛКЗ–А та забудованих ЛКЗ не виявлено, відмінності спостерігалися лише в максимальних. О 12:00 СЛЧ в межах ЛКЗ–А спостерігалися комфортні умови, тоді як на забудованих територіях фіксувався помірний та сильний тепловий стрес. Такі відмінності вкотре підтверджують позитивний вплив зелених насаджень на міський біоклімат.

Отже, моделювання біокліматичних умов в межах досліджуваних ділянок, показало, що літній період головну роль у формуванні біоклімату в межах забудованих територій (навіть не зважаючи на певні відмінності в характеристиках забудови) відіграють одні й ті ж чинники. Це, перш за все чинники, що впливають на радіаційний баланс території – хмарність, інтенсивність довгохвильового випромінювання від будівель, орієнтація будівель та висота Сонця на момент моделювання. Меншою мірою – характеристики вітру.

Порівняння біокліматичних умов забудованих територій та паркової зони підтвердило ключову роль підстильної поверхні та евапотранспірації у формуванні мікроклімату міст та зниженні теплового стресу в межах урбанізованих територій.

Висновки до 4 розділу

1. Для більшості великих міст України найпоширенішими локальними кліматичними зонами є ЛКЗ–5 та ЛКЗ–6 – середньоповерхова та малоповерхова забудова низької щільності. ЛКЗ–8 (комунально-складські та інженерні споруди) займає значно менше міських територій – її поширеність варіюється від 1,9 (у Чернігові) до 21,8% (у Маріуполі). Садибна зона (ЛКЗ–9) не перевищує 9% території у кожному з досліджених міст України. Зони щільної забудови (ЛКЗ–2 та ЛКЗ–3) займають найменші площі у містах – вони не перевищують 8,6% для ЛКЗ–2 та 0,5% – для ЛКЗ–3. Основними природними ЛКЗ поширеними у великих містах України є ЛКЗ–А, ЛКЗ–В та ЛКЗ–D. ЛКЗ–С займає менше 0,7% площі території міст, виняток становить лише Чернігові (8,5% від загальної площі міста). Найбільші площі зони водних об'єктів (ЛКЗ–G) зафіксовано у Черкасах (32,2%), Миколаєві (22,8%), Дніпрі (13,6%) та Києві (5,5%), а у містах Харків, Донецьк, Луцьк та Львів дана ЛКЗ охоплює менше ніж 1% від загальної площі міста.

2. Аналіз ЛКЗ зон міста Києва показав суттєві відмінності у співвідношенні між площами різних ЛКЗ в межах адміністративних кордонів міста та в межах реально забудованої території. Площі ЛКЗ із забудованими територіями (ЛКЗ–1–9) займають понад 65% території в ВUA зоні, що приблизно на 25% більше, ніж в

адміністративних межах міста. Найпоширенішими ЛКЗ міста є ЛКЗ–4, 5 та 9 (на них сумарно припадає 26,9%), а в ВUA зоні їх частка є вищою за рахунок включення передмістя і становить – 41,4%.

3. Зелені зони (ЛКЗ–А, В, С і D) та водні об'єкти Києва (ЛКЗ–G) в межах ВUA майже удвічі менше, ніж в адміністративних межах міста. Отже, в межах територій, де реально проживають та працюють мешканці міста (ВUA), близько 2/3 площі займають забудовані ділянки зі штучними поверхнями.

4. Аналіз підстильних поверхонь міста Києва в літній період показав наявність чіткого взаємозв'язку між різними типами локальних кліматичних зон та температурами підстильних поверхонь. Було встановлено, що вищі ТПП властиві для забудованих типів ЛКЗ. Локальними кліматичними зонами з найвищими температурами в межах Києва є ЛКЗ–3 та ЛКЗ–8. ЛКЗ–А та ЛКЗ–G влітку є найхолоднішими.

5. Встановлені закономірності підтверджують широкі можливості практичного використання карт локальних кліматичних зон великих міст, адже, вони можуть стати підґрунтям для розробки заходів адаптації міст до спеки, планів адаптації до зміни клімату чи розробки системи оповіщення про спекотну погоду, що може зашкодити здоров'ю (Heat Health Warning System (HHWS) – англ.).

6. Моделювання біокліматичних умов великого міста у літній період на прикладі різних локальних кліматичних зон Києва за різних погодних умов показало, що влітку головну роль у формуванні біоклімату забудованих територій (навіть не зважаючи на певні відмінності в характеристиках забудови) відіграють одні й ті ж чинники. Це, перш за все чинники, що впливають на радіаційний баланс території – хмарність, інтенсивність довгохвильового випромінювання від будівель, орієнтація будівель та висота Сонця на момент моделювання, тощо. Вплив характеристик вітру є помітним, проте менш значним. Порівняння біокліматичних умов забудованих територій та паркової зони підтвердило ключову роль підстильної поверхні та евапотранспірації у формуванні мікроклімату міст та зниженні теплового стресу в межах урбанізованих територій.

Було встановлено, що за умови високого циклону, при циклонічній депресії, циклоні, високого циклону та області підвищеного тиску з півдня, в нічні та ранкові години (00:00 та 06:00 СЛЧ) в межах зелених зон міста спостерігаються менш комфортні умови – в той час як в межах забудови спостерігаються комфортні умови, в парках – холодний стрес різної інтенсивності. В денні та вечірні години (12:00 та 18:00 СЛЧ) – ситуація в межах міських зелених зон майже не змінюється порівняно з забудовою.

Охолоджуючий вплив зелених зон, найкраще проявляється за умов антициклональної погоди, малоградієнтного баричного поля, градієнтного баричного поля високого тиску, південна периферія антициклону та за умов тилової частини антициклону. За цих умов в межах парку у всі строки спостерігається менша інтенсивність теплового стресу – переважно коли в забудові спостерігається екстремальний або сильний тепловий стрес, то у парках – помірний та легкий.

7. Основні результати, представлені у даному розділі, опубліковано у працях автора [9, 10, 13, 15, 174].

ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу літературних джерел, показано, що якщо на початкових етапах вивчення клімату міст відбувалося накопичення знань щодо особливостей мікроклімату та закономірностей перебігу процесів на основі натурних вимірювань та порівнянь значень метеорологічних параметрів «місто–передмістя», то в сучасний період урбометеорологічні дослідження переважно ґрунтуються на моделюванні атмосферних процесів та мікро- і біокліматичних особливостей, як міст загалом, так і окремих їх ділянок. Накопичені раніше знання щодо особливостей мікроклімату в різних типах забудови та за різного рівня озеленення територій міста, стали підґрунтям для розробки низки класифікацій міських просторів. Найвідомішою та найбільш вживаною з яких на сьогоднішній день є класифікація локальних кліматичних зон І. Стюарда та Т. Оке.

2. На основі аналізу підходів до оцінки біокліматичних умов та сучасних програмних продуктів, які використовуються для чисельного моделювання клімату міст, було обґрунтовано переваги біокліматичного індексу фізіологічно-еквівалентної температури та одномірної мікромасштабної моделі «RayMan» та просторової мікромасштабної моделі «SkyHelios» для вирішення низки задач під час оцінки мікроклімату та біокліматичних умов великих міст у літній період.

3. Для оцінки умов теплового комфорту міст під час ХТ було проаналізовано просторово-часовий розподіл ХТ та змодельовано значення ФЕТ під час прояву цих атмосферних явищ за допомогою одномірної мікромасштабної моделі «RayMan». Встановлено, що найбільша кількість ХТ спостерігалася в містах Центрального регіону, а найменша – на станціях, розташованих на узбережжях морів. У містах найчастіше спостерігалися ХТ тривалістю від 7 до 14 днів. За досліджуваний період найменша кількість ХТ спостерігалась у 1981–1990 рр., а найбільша – у 2011–2020 рр. Загалом

починаючи з 1991 року майже на всіх станціях кількість випадків ХТ зроста порівняно з попередніми десятиліттями.

4. Грунтуючись на значення ФЕТ під час випадків ХТ показано, що інтенсивність теплового стресу в ці періоди зростає по території з північного заходу на південь–південний схід, що в загальних рисах відповідає розподілу температури повітря по території України у літні місяці. Найнижче середнє значення ФЕТ ($34,1^{\circ}\text{C}$) зафіксовано у Львові та Хмельницькому (Західний регіон), а найвище ($41,3^{\circ}\text{C}$) спостерігалось у Луганську (Східний регіон країни). Середнє значення ФЕТ розраховане для всієї території в аналізованій період становило $37,4^{\circ}\text{C}$ і відповідало сильному тепловому стресу. Показано, що в містах України під час ХТ влітку переважають дні з сильним тепловим стресом (понад 50%), за винятком міст Західного регіону. Дні з екстремальним тепловим стресом найчастіше фіксувалися в Луганську (56,0%) та Миколаєві (34,0%). На основі аналізу значень ФЕТ під час хвиль тепла за 1961–2020 рр. показано, що починаючи з 1991 року середні значення даного показника зросли майже у всіх досліджуваних містах і на більшості станцій належать до градації сильного теплового стресу.

5. Для більшості великих міст України найпоширенішими локальними кліматичними зонами є ЛКЗ–5 та ЛКЗ–6 – середньоповерхова та малоповерхова забудова низької щільності. ЛКЗ–8 (комунально-складські та інженерні споруди) займає значно менше міських територій – її поширеність варіюється від 1,9 (у Чернігові) до 21,8% (у Маріуполі). Садибна зона (ЛКЗ–9) не перевищує 9% території у кожному з досліджених міст України. Зони щільної забудови (ЛКЗ–2 та ЛКЗ–3) займають найменші площі у містах – вони не перевищують 8,6% для ЛКЗ–2 та 0,5% – для ЛКЗ–3. Основними природними ЛКЗ поширеними у великих містах України є ЛКЗ–А, ЛКЗ–В та ЛКЗ–D. ЛКЗ–С займає менше 0,7% площі території міст, виняток становить лише Чернігові (8,5% від загальної площі міста). Найбільші площі зони водних об'єктів (ЛКЗ–G) зафіксовано у Черкасах (32,2%), Миколаєві (22,8%), Дніпрі

(13,6%) та Києві (5,5%), а у містах Харків, Донецьк, Луцьк та Львів дана ЛКЗ охоплює менше ніж 1% від загальної площі міста.

6. Аналіз ЛКЗ міста Києва показав суттєві відмінності у співвідношенні між площами різних зон в межах адміністративних кордонів міста та в межах реально забудованої території. Площі ЛКЗ із забудованими територіями (ЛКЗ–1–9) займають понад 65% території в ВUA зоні, що приблизно на 25% більше, ніж в адміністративних межах міста. Найпоширенішими ЛКЗ міста є ЛКЗ–4, 5 та 9 (на них сумарно припадає 26,9%), а в ВUA зоні їх частка є вищою за рахунок включення передмістя і становить – 41,4%. Зелені зони (ЛКЗ–А, В, С і D) та водні об'єкти Києва (ЛКЗ–G) в межах ВUA майже удвічі менше, ніж в адміністративних межах міста. Отже, в межах територій, де реально проживають та працюють мешканці міста (ВUA), близько 2/3 площі займають забудовані ділянки зі штучними поверхнями.

7. Аналіз підстильних поверхонь міста Києва в літній період показав наявність чіткого взаємозв'язку між різними типами локальних кліматичних зон та температурами підстильних поверхонь. Було встановлено, що вищі ТПП властиві для забудованих типів ЛКЗ. Встановлені закономірності підтверджують широкі можливості практичного використання карт локальних кліматичних зон великих міст, адже, вони можуть стати підґрунтям для розробки планів адаптації до зміни клімату чи розробки системи оповіщення про спекотну погоду, що може зашкодити здоров'ю.

8. Моделювання біокліматичних умов великого міста у літній період на прикладі різних локальних кліматичних зон Києва за різних погодних умов показало, що влітку головну роль у формуванні біоклімату забудованих територій (навіть не зважаючи на певні відмінності в характеристиках забудови) перш за все, відіграють чинники, які впливають на радіаційний баланс території – хмарність, інтенсивність довгохвильового випромінювання від будівель, орієнтація будівель та висота Сонця на момент моделювання, тощо. Вплив характеристик вітру є помітним, проте менш значним. Порівняння біокліматичних умов забудованих територій та паркової зони

підтвердило ключову роль підстильної поверхні та евапотранспірації у формуванні мікроклімату міст в межах урбанізованих територій.

9. Охолоджуючий вплив зелених зон, найкраще проявляється за умов антициклональної погоди та малоградієнтного баричного поля. За цих умов в межах зелених зон протягом всієї доби спостерігається менша інтенсивність теплового стресу – переважно на 1–2 градації ФЕТ.

10. Отримані результати можуть використовуватися як для подальших наукових досліджень мікро- та біоклімату міст, так і з метою розробки заходів адаптації міст до спеки, для підвищення комфортності територій, а також при плануванні нової забудови у містах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабиченко, В. Н. (1983). *Клімат Полтавы*. Ленинград: Гидрометеоздат.
2. Бабиченко, В. Н. (1983). *Клімат Харькова*. Ленинград: Гидрометеоздат.
3. Бабиченко, В. Н. (1991). *Клімат Ужгорода*. Ленинград: Гидрометеоздат.
4. Державна служба статистики України. Населення України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/>
5. ДБН Б.2.2-12:2018. Планування і забудова територій. Київ: Мінрегіон України, 2018.
6. Ландсберг, Г. Е. (1983). *Клімат города* Пер. с англ. [А. Я. Фредмана]; Под ред. А. С. Дубова. Ленинград: Гидрометеоздат.
7. Ліпінський, В. М., Дячук, В. А., & Бабиченко, В. Н. (2003). *Клімат України*. Київ: Видавництво Раєвського.
8. Маринин, И. Л., & Драничер, О. Р. (2013). Некоторые оценки характеристик острова тепла г. Одесса. *Український гідрометеорологічний журнал*, 12, 54–61.
9. Матвієнко, М. О. (2018). *Біоклімат великого міста в літній період (на прикладі житлового масиву Теремки-2 у м. Києві)*. «Молоді науковці – географічній науці» збірник наукових праць XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ.
10. Матвієнко, М. О. (2021). *Біокліматичні особливості в межах міської забудови за різних типів погоди*. Шевченківська весна – 2021. Географія: Збірник наукових праць XIX міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ.
11. Матвієнко, М. О. (2019). Модель ENVI-met – як інструмент для сучасних урбометеорологічних досліджень. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 4(55), 151-163. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.13>
12. Матвієнко, М. О. (2019). *Особливості міського острова тепла в Харькова*. Міжнародна науково-практична конференція «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень», Київ.

13. Матвієнко, М.О, & Шевченко О.Г. (2020). *Моделювання біокліматичних особливостей в межах складної міської забудови за допомогою моделі «SKYHELIOS»*. «Шевченківська весна – 2020:Географія» Збірник наукових праць XVIII міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ.
14. Матвієнко, М.О, & Шевченко, О.Г. (2020). *Характеристика біокліматичних умов міста Харкова в літні місяці*. «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» матеріали VIII Міжнародної наукової конференції молодих вчених, Харків.
15. Матвієнко, М. О., Шевченко, О. Г., & Сніжко, С. І. (2021). Аналіз локальних кліматичних зон міста Києва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Серія: Географія*, 3(80) 31-36.
16. Мягков, М. С. (2004). *Механизм формирования теплового баланса в городской застройке на примере г. Москвы*. (Автореф. дис. канд. тех. Наук) Государственный университет по землеустройству, Москва.
17. Мягков, М. С., Губернский, Ю. Д., Конова, Л. И., & Лицкевич, В. К. (2007). *Город, архитектура, человек и климат*. Москва: «Архитектура-С».
18. Осадчий, В. І., Косоветь, О. О., & Бабіченко, В. М. (2010). *Клімат Києва*. Київ: Ніка-Центр.
19. Перцик, Е. Н. (1991). *География городов (геоурбанистика): [учеб. пособие для геогр. спец.вузов]*. Москва: Высш. шк.
20. Смекалова, Л. К., & Швер, Ц. А. (1986). *Климат Одессы*. Ленинград: Гидрометеиздат.
21. Стольберг, Ф. В. (Ред.) (2000). *Экология города: Учебник*. Киев: Либра.
22. Шаблій, О. І. (2000). *Соціально-економічна географія України: [навч. посіб.]*. Львів: Світ.
23. Шевченко, О. Г. (2016). Порівняльний аналіз біокліматичних індексів для оцінки комфортності урбанізованого середовища в теплий період. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 3(42), 105–115.

24. Шевченко, О. Г. (2021). *Теоретико-методологічні засади комплексних досліджень урбометеорологічних трансформацій у містах*. Київ: ДІА.
25. Шевченко, О. Г., Кульбіда, М. І., & Сніжко, С. І. (2013). *Клімат великого міста : формування та особливості прояву*, Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. з питань запобігання зміни клімату «Клімат і місто (на прикладі м. Києва)». Київ.
26. Шевченко, О. Г., & Сніжко, С. І. (2018). Вітровий режим великого міста. *Вісник Київського університету. Серія: Географія*, 3(72), 13–20.
27. Шевченко, О. Г., & Сніжко, С. І. (2012). Хвилі тепла та основні методологічні проблеми, що виникають при їх дослідженні. *Український гідрометеорологічний журнал*, 11, 101–109.
28. Шевченко, О. Г., Сніжко, С.І., & Матвієнко, М. О. (2021). Біокліматичні умови у м. Львові під час проявів хвиль тепла. *Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів*, 1(1), 15–23.
29. Шевченко, О., Сніжко, С., Самчук, Є. (2012). Особливості термічного режиму граничного шару атмосфери над Києвом. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології. Науковий журнал Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна*, 3-4, 7-13.
30. Шевченко, О. Г., Сніжко, С. І., Самчук, Є. В. (2011). Температурні аномалії великого міста. *Український гідрометеорологічний журнал*, 8, 21-29
31. Черемісіна, Т. В., Казачковська, Г. В., & Токаренко, О. І. (2016) Дослідження питання визначення та класифікації населених пунктів. *Глобальні та національні проблеми економіки*, 14, 684–687.
32. Abreu–Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2014). Thermal bioclimate in idealized urban street canyons in Campinas, Brazil. *Theoretical and applied climatology*, 115(1), 333–340.
33. Acero, J. A., & Herranz-Pascual, K. (2015). A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment*, 93(P2), 245–257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.028>.

34. Ackerman, B. (1986). Climatology of Chicago area urban rural differences in humidity. *Journal of Climate and applied meteorology*, 46, 427–430.
35. Ackerman, B. (1985). Temporal march of the Chicago heat island. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24, 547–554.
36. Akbari, H. & Rose, L. S. (2001). *Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Salt Lake City, Utah*. Technical Report Lawrence Berkeley National Laboratory.
37. Al-Hafith, O., Satish, B. K., Bradbury, S., & Wilde, P. de. (2017). Simulation of courtyard spaces in a desert climate. *Energy Procedia*, 142, 1997–2002. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.401>.
38. Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2015). Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 108–117.
39. Aram, F., Solgi, E., Garcia, E. H., & Mosavi, A. (2020). Urban heat resilience at the time of global warming: evaluating the impact of the urban parks on outdoor thermal comfort. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 117.
40. Aram, F., Solgi, E., Higuera García, E., Mosavi, A., & R. Várkonyi-Kóczy, A. (2019). The Cooling Effect of Large-Scale Urban Parks on Surrounding Area Thermal Comfort. *Energies*, 12(20), 3904.
41. Arnfield, A. J. (1976). Numerical modelling of urban surface radiative parameters. In *Papers in Climatology: the Cam Allen Memorial Volume* Edited by: Davies, J.A. Department of Geography, McMaster University.
42. Auer, A. H. Jr. (1978). Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, 17(5), 636–643.
43. Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/1480307/>
44. Balázs, B., Unger, J., Gál, T., Sümeghy, Z., Geiger, J., & Szegedi, S. (2009). Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modelling, verification and extension. *Meteorological Applications*, 16, 275–287.

45. Ballester, J., Rodó, X., & Giorgi, F. (2010). Future changes in Central Europe heat waves expected to mostly follow summer mean warming. *Climate Dynamics*, 35(7–8), 1191–1205.
46. Basarin, B., Lukić, T., & Matzarakis, A. (2020). Review of Biometeorology of Heatwaves and Warm Extremes in Europe. *Atmosphere*, 11(12), 1276.
47. Basu, R. (2009). High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health*, 8(1), 40.
48. Bechtel, B., Alexander, P., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., ... Stewart, I. (2015). Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 199–219. doi:10.3390/ijgi4010199.
49. Bechtel, B., & Daneke, C. (2012). Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1191–1202.
50. Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., & Voogt, J. (2019). SUHI analysis using Local Climate Zones: a comparison of 50 cities. *Urban Climate*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.01.005>
51. Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.-D., Kossmann, M., Mieskes, I., & Wienert U. (2011). 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*, 50(1), 167–184. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2377.1>
52. Best, M. J. (2005). Progress towards better weather forecasts for city dwellers: from short range to climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1), 47–55.
53. Bornstein, D. (1975). The Two-Dimensional URBMET Urban Boundary Layer Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 14(8), 1459–1477.
54. Bottema, M., & Mestayer, P. G. (1998). Urban roughness mapping - validation techniques and some first results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74–76, 163–173.

55. Brandsma, T., Können, G. P., & Wessels, H. R. A. (2003). Empirical estimation of the effect of urban heat advection on the temperature series of De Bilt (The Netherlands). *International Journal of Climatology*, 23(7), 829–845. doi:10.1002/joc.902
56. Bunker, A., Wildenhain, J., Vandenberg, A., Henschke, N., Rocklöv, J., Hajat, S., & Sauerborn, R. (2016). Effects of Air Temperature on Climate-Sensitive Mortality and Morbidity Outcomes in the Elderly; a Systematic Review and Meta-analysis of Epidemiological Evidence. *eBioMedicine*, 6, 258–268.
57. Carfan, A. C., Galvani, E., & Nery, J. T. (2012). Study of thermal comfort in the city of São Paulo using ENVI-met model. *Investigaciones Geográficas*, 78, 34–47.
58. Carlson, T., & Boland, F. (1978). Analysis of Urban-Rural Canopy Using a Surface Heat Flux/Temperature Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 17(7), 998–1013.
59. Chandler, T. (1956). Selected bibliography on urban climate. WMO Publ.
60. Chandler, T. J. (1965). The climate of London. London: SAGE Publications Sage.
61. Charalampopoulos, I., Tsiros, I., Chronopoulou–Sereli, A., & Matzarakis, A. (2013). Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece. *Urban Ecosystems*, 16(2), 217–233.
62. Chatzinikolaou E., Chalkias C., & Dimopoulou E. (2018). Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model. *ISPRS — International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4, 69–76. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018.
63. Ching, J., Brown, M., Burian, S., Chen, F., Cionco, R., Hanna, A., Hultgren, T., et al. (2009). National urban database and access portal tool. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1157–1168.
64. Chow, W. T. L., & Brazel, A. J. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47(1), 170–181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.027>
65. Clarke, J. F., & McElroy, J. L. (1970). Experimental studies of the nocturnal urban boundary layer. Urban climatology. WMO Tech Note N 108 (108 – 112);

66. Cummings, J. B., Withers, C. R., Sonne, J., Parker, D., & Vieira, R. K. (2007). *UCF Recommissioning, Green Roofing Technology, and Building Science Training*. Final Report. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center.
67. Davenport, A. G., Grimmond, C. S. B., Oke, T. R., Wieringa, J., & Society, A. M. (2000). *Estimating the roughness of cities and sheltered country*. Asheville, NC, Proceedings on 12 th Conference on Applied Climatology, 96–99.
68. Demuzere, M., Bechtel, B., Middel, A., & Mills, G. (2019). Mapping Europe into local climate zones. *PLOS ONE*, *14*(4), e0214474.
69. Demuzere, M., Bechtel, B., & Mills, G. (2019). Global transferability of Local Climate Zone models. *Urban climate*, *27*, 46–63
70. Digavinti, J., Reddy, N., Manikiam, B. (2017). Land surface temperature retrieval from LANDSAT data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, *12*(20), 9679-9687.
71. Duarte, D. H. S., Shinzato, P., Gusson, C. dos S., & Alves, C. A. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance-built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, *14*, 224–239.
72. Eichhorn, J. (1989). *Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells*. (PhD thesis). University of Mainz, Germany.
73. Eichhorn J., Kniffka A. (2010). The numerical flow model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. *Meteorologische Zeitschrift*, *19*(1), 81–90. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0425>
74. Ellefsen, R. (1991). Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten U.S. cities. *Energy and Buildings*, *16*(3–4), 1025–1049.
75. Emmanuel, R., & Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research*, *30*, 189–200.
76. ENVI-met Model Architecture. Retrieved from <https://envimet.info/doku.php?id=intro:modelconcept>
77. Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2012). *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*. London, Washington: DC.

78. Fatnassi, H., Poncet, C., Bazzano, M. M., Brun, R., & Bertin, N. (2015). A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. *Solar Energy*, *120*, 575–584.
79. Fintikakis, N., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, M., Assimakopoulos, D. N., Fintikaki, M., Doumas, P. et al. (2011). Bioclimatic Design of Open Public Spaces in the Historic Centre of Tirana, Albania. *Sustainable Cities and Society*, *1*, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2010.12.001>
80. Forouzandeh, A. (2018). Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, *36*, 327–345.
81. Fortuniak, K., Kłysik, K., & Wibig, J. (2006). Urban–rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. *Theoretical and Applied Climatology*, *84*(1–3), 91–101.
82. Frenkiel, F. N. (1955). Atmospheric Pollution and Zoning in an Urban Area. *The Scientific Monthly*, *82*(4), 194–203.
83. Fröhlich, D., Gangwisch, M., & Matzarakis, A. (2019). Effect of Radiation and Wind on Thermal Comfort in Urban Environments—Application of the RayMan and SkyHelios Model. *Urban Climate*, *27*, 1–7.
84. Fröhlich, D., & Matzarakis, A. (2013). Modeling of changes in thermal bioclimate: examples based on urban spaces in Freiburg, Germany. *Theor Appl Climatol* *111*, 547–558.
85. Fröhlich, D., & Matzarakis, A. (2018). Spatial estimation of thermal indices in urban areas basics of the SkyHelios model. *Atmosphere*, *9*(6), 209.
86. Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.-D., Kossmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., et al. (2011). 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*, *50*(1), 167–184.
87. GADM – the Database of Global Administrative Areas. Retrieved from <https://gadm.org/about.html>

88. Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Synnefa, A., Vassilakopoulou, K., Papadopoulou, K., ... Lagoudaki, A. (2011). Improving the microclimate in urban areas: a case study in the centre of Athens. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(1), 53-71. doi:10.1177/0143624410394518;
89. Giannopoulou, K., Santamouris, M., Livada, I., Georgakis, C., & Caouris, Y. (2010). The Impact of Canyon Geometry on Intra Urban and Urban: Suburban Night Temperature Differences Under Warm Weather Conditions. *Pure and Applied Geophysics*, 167(11), 1433–1449.
90. Grimmond, C., & Oke, T. (2002). Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41(7), 792–810.
91. Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9), 1262–1292.
92. Gray, K. A. & Finster, M. E. (1999). *The Urban Heat Island, Photochemical Smog, and Chicago: Local Features of the Problem and Solution*. Evanston, IL: Northwestern University, 1999
93. Gromke, C., Blocken, B., Janssen, W., Merema, B., van Hooff, T., & Timmermans, H. (2015). CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 83, 11–26.
94. Gusson, C. S., & Duarte, D. H. S. (2016). 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*, 169, 2–10.
95. Hage, K. D., & Hage, K. D. (1975). Urban-Rural Humidity Differences. *Journal of Applied Meteorology*, 14(7), 1277–1283.
96. Hajat, S., O'Connor, M., & Kosatsky, T. (2010). Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. *Lancet*, 375(9717), 856–863.
97. Hamdi, R., & Schayes, G. (2008). Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology*, 28(7), 973–982.

98. Hieberg S. D. (1978). Diurnal temperature and moisture cycles. *State Water Survey Bulletin*, 63, 25—42.
99. Holmer, B., & Eliasson, I. (1999). Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. *International Journal of Climatology*, 19(9), 989–1009.
100. Höppe, P. (1997). Aspects of human biometeorology in past, present and future. *International Journal of Biometeorology*, 40(1), 19–23.
101. Höppe, P. (1993). Heat balance modelling. *Experientia* 49, 741–746.
102. Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75.
103. Huttner, S. (2012). Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. (PhD thesis). University of Mainz, Germany.
104. Jänicke, B., Milošević, D., & Manavvi, S. (2021). Review of User-Friendly Models to Improve the Urban Micro-Climate. *Atmosphere*, 12(10), 1291. <https://doi.org/10.3390/atmos12101291>
105. Jáuregui, E., & Tejeda, A. (1997). Urban-rural humidity contrasts in Mexico City. *Int. J. Climatol.*, 17, 187–196.
106. Unger, J. (1999). Urban-rural air humidity differences in Szeged, Hungary. *Int. J. Climatol.*, 19, 1509–1515.
107. Jendritzky, G.; Menz, H.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990). *Methodik zur Raumbezogenen Bewertung der Thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell)*. Akad für Raumforschung und Landesplanung: Hannover, Germany.
108. Kardinal, S., Wong, J., & Hien, N. (2012). *Development of Empirical Models for Estate-Level Air Temperature Prediction in Singapore*. Retrieved from <https://heatland.lbl.gov/sites/default/files/cuhi/docs/221410-jusuf-doc.pdf>
109. Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2015). Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *International Journal of Biometeorology*, 59(9), 1299–1309. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0940-3>.

110. Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of the urban heat island in a city with complex topography – The case of Stuttgart, Germany. *Urban Climate*, 10, 573–584.
111. Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat stress and public health: a critical review. *Annual review of public health*, 29, 41–55.
112. Kratzer, A. (1956). *The Climate of Cities (Das Stadtklima)*. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn.
113. Kremser, V. (1909). Ergebnisse vieljähriger Windregistrierungen in Berlin. *Meteorol. Z.*, 26, 238-252.
114. Krüger, E. L., Minella, F. O., & Rasia, F. (2011). Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 46(3), 621–634.
115. Kuttler, W., Weber, S., Schonfeld, J., & Hesselschwerdt, A. (2007). Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology*, 27, 2005–2015.
116. Kysely, J. (2010). Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term prospect? *International Journal of Climatology*, 30(1), 89–109.
117. Landsberg, H. E., Maise, T. N. (1972). Micrometeorological observations in an area of urban growth. *Boundary Layer Meteorol.*, 1, 61—63.
118. Laschewski, G., & Jendritzky, G. (2002). Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. *Climate Research*, 21(1), 91–103.
119. Leahey, D. M., Friend, J. P. (1971). A Model for Predicting the Depth of the Mixing Layer Over an Urban Heat Island with Applications to New York City. *J. Appl. Meteor.*, 10, 1162-1173
120. Lee, D. O. (1991). Urban-rural humidity differences in London. *International Journal of Climatology*, 11(5), 577–582.
121. Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 148, 37–50.

122. Lindberg, F., Holmer, B., & Thorsson, S. (2008). SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 52(7), 697–713.
123. Liu, W., You, H. & Dou, J. (2010). Erratum to: Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing area. *Theor Appl Climatol*, 101, 237–238. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0230-x>
124. Li, Z., Yan, Z., Tu, K., Liu, W., & Wang, Y. (2011). Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28, 408–420. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-0018-z>
125. Lokoshchenko, M. A. (2014). Urban ‘heat island’ in Moscow. *Urban Climate*, 10(3), 550–562.
126. Magee, N., Curtis, J., & Wendler, G. (1999). The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*, 64, 39–47.
127. Martins, T. A. L., Adolphe, L., Bonhomme, M., Bonneaud, F., Faraut, S., Ginestet, S., Michel, C., et al. (2016). Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, 26, 9–26.
128. Masson, V. (2005). Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1), 35–45.
129. Matzarakis, A. (2007). Climate, thermal comfort and tourism. In B. Amelung, K. Blazejczyk, A. Matzarakis, *Climate Change and Tourism: Assessment and Coping Strategies* (p.139–154). Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences
130. Matzarakis, A., Gangwisch, M., & Herbert, T. (2021). Modelling in Human Biometeorology: Spatial-Temporal Analysis of Thermal Indices. *Environmental Sciences Proceedings*, 8(1):28. <https://doi.org/10.3390/ecas2021-10297>
131. Matzarakis, A., & Matuschek, O. (2011). Sky view factor as a parameter in applied climatology - Rapid estimation by the SkyHelios model. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(1), 39–45.

132. Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2006). Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan Model. *PLEA*, 2, 449-453.
133. Matzarakis, A., Rutz, F., Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model Modelling radiation fluxes in simple and complex. *Int J Biometeorol*, 51, 323–334.
134. Mayer, H. (1993). Urban bioclimatology. *Experientia* 49, 957-963.
135. McCormick, R. A., Kurfis, K. R. (1966). Vertical diffusion over a city. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc*, 92, 392–396.
136. Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., & Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16–28.
137. Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D. (1994). Modelling the thermal performance of the earth to air heat exchangers. *Solar Energy*, 53(3), 301-5.
138. Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200-206, doi:10.1016/j.scs.2015.04.00
139. Mirzaei, P. A., & Haghighat, F. (2015). Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. *Build Environ*, 45, 2192-2201.
140. Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. doi:10.1016/j.jenvman.2017.03.09.
141. Morris, C. J. G., & Simmonds, I. (2000). Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology* 20, 1931–1954
142. Morris, C. J. G., Simmonds, I., Plummer, N. (2001). Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology* 40, 169–182

143. Montavez, J. P., Rodriguez, A., & Jimenez, J. I. (2000). A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology*, 20, 899–911.
144. Myrup, L. O. (1969). A Numerical Model of the Urban Heat Island. *Journal of Applied Meteorology*, 8(6), 908–918.
145. Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2018). THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 157–168.
146. Nouri, A. S., Costa, J. P., & Matzarakis, A. (2017). Examining default urban-aspect-ratios and sky-view-factors to identify priorities for thermal-sensitive public space design in hot-summer Mediterranean climates: The Lisbon case. *Building and Environment*, 126, 442–456. doi:10.1016/j.buildenv.2017.10.027
147. Offerle, B. (2003). *The energy balance of an urban area: Examining temporal and spatial variability through measurements, remote sensing and modelling*. (Ph.D. thesis) Indiana University.
148. Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
149. Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 12(4), 471–508.
150. Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
151. Oke, T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7(8), 769–779.
152. Paas, B., & Schneider, C. (2016). A comparison of model performance between ENVI-met and Austal2000 for particulate matter. *Atmospheric Environment*, 145, 392–404.
153. Paltridge, G. W. (1976). *Radiative processes in meteorology and climatology*. Amsterdam /New York: Elsevier Scientific Pub. Co.
154. Park, H-S. (1986). Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmospheric Environment*, 20, 1859–1866.

155. Peng, L., Liu, J.-P., Wang, Y., Chan, P., Lee, T., Peng, F., ... Li, Y. (2018). Wind weakening in a dense high-rise city due to over nearly five decades of urbanization. *Building and Environment*, *138*, 207–220. doi:10.1016/j.buildenv.2018.04.037
156. Philandras, C. M., Metaxas, D. A., & Nastos, P. T. (1999). Climate variability and urbanization in Athens. *Theoretical and Applied Climatology*, *63*, 65–72.
157. Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.P., Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of the Total Environment*, *631-632*, 390-406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
158. Preston-Whyte, R. A. (1970). Local atmospheric circulations and the mesoclimate of Durban. (PhD thesis). University of Natal.
159. Quan, S. J., Li, Q., Augenbroe, G., Brown, J., & Yang, P. P.-J. (2015). Urban Data and Building Energy Modeling: A GIS-Based Urban Building Energy Modeling System Using the Urban-EPC Engine. *Planning Support Systems and Smart Cities*, 447–469. doi:10.1007/978-3-319-18368-8_24
160. Raman, V., Kumar, M., Sharma, A., Froehlich, D., & Matzarakis, A. (2021). Quantification of thermal stress abatement by trees, its dependence on morphology and wind: A case study at Patna, Bihar, India. *Urban Forestry & Urban Greening*, *63*, 127213. doi:10.1016/j.ufug.2021.127213
161. Raman, V., Kumar, M., Sharma, A., & Matzarakis, A. (2021). A quantitative assessment of the dependence of outdoor thermal-stresses on tree-building morphology and wind: A case-study in sub-tropical Patna, India. *Sustainable Cities and Society*, *73*, 103085. doi:10.1016/j.scs.2021.103085
162. Rayman model. Retrieved from <https://www.urbanclimate.net/rayman/>
163. Reddy, S. N., & Manikiam, B. (2017). Land surface temperature retrieval from LANDSAT data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, *12*(20), 9679-9687.
164. Ren, C., Cai, M., Wang, M., Xu, Y., & Ng, E. (2016). *Local Climate Zone (LCZ) Classification Using the World Urban Database and Access Portal Tools*

- (WUDAPT) *Method: A Case Study in Wuhan and Hangzhou*. The Fourth International Conference on Countermeasure to Urban Heat Islands (4th IC2UHI).
165. Ren, Chao, NG, E., Mills, G., Ching, J., Bechtel, B., See, L., Masson, V., et al. (2016). WUDAPT Global Initiative: Census of Global Cities. Retrieved from file:///C:/Users/User/Desktop/Downloads/WUDAPT-Briefing-Doc_201706302.pdf.
 166. Roberge, F., & Sushama, L. (2018). Urban heat island in current and future climates for the island of Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 40, 501–512. doi:10.1016/j.scs.2018.04.033
 167. Ruuhela, R., Jylhä, K., Lanki, T., Tiittanen, P., & Matzarakis, A. (2017). Biometeorological Assessment of Mortality Related to Extreme Temperatures in Helsinki Region, Finland, 1972–2014. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8), 944. doi:10.3390/ijerph14080944
 168. Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703.
 169. Santiago, J. L., Krayenhoff, E. S., & Martilli, A. (2014). Flow simulations for simplified urban configurations with microscale distributions of surface thermal forcing. *Urban Climate*, 9, 115–133.
 170. Serghides, D. K., Dimitriou, S., Kyprianou, I., & Papanicolas, C. (2019). The bioclimatic approach in developing smart urban isles for sustainable cities. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 4, 2. doi:10.1051/rees/2018006
 171. Shahgedanova, M., Burt, T. P., & Davies, T. D. (1997). Some aspects of the three-dimensional heat island in Moscow. *International Journal of Climatology*, 17, 1451–1465.
 172. Sisterson, D. L., & Dirks, B. A. (1978). Structure of the daytime urban moisture field. *Atmos. Environ.*, 12, 1943—1949.

173. Shevchenko, O. (2021). Human Thermal Comfort Conditions during Heat Wave Events in Kyiv, Ukraine. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 77(2), 99–110.
174. Shevchenko, O., Lee, H., Snizhko, S., & Mayer, H. (2014). Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *International Journal of Climatology*, 34(5), 1642–1650.
175. Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matviienko, M. (2020). *A GIS and WUDAPT based mapping of the local climate zones in Ukrainian cities*. Geoinformatics 2020, Kyiv.
176. Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matviienko, M. (2019). Human-biometeorological assessment of Kharkiv (Ukraine) in the summer season. *Hrvatski meteorološki časopis*, 54 (54/55), 43–54.
177. Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matviienko, M. (2019). Simulation of the thermal comfort conditions of urban areas: a case study in Kyiv. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Серія Геологія. Географія. Екологія*, 51, 186–198. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-13>.
178. Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matzarakis, A. (2020). Recent trends on human thermal bioclimate conditions in Kyiv, Ukraine. *Geographia Polonica*, 93 (1), 89–106.
179. Shevchenko, O., Snizhko, S., Zapototskyi, S., Svintsitska, H., & Matviienko, M. (2022). Long-term analysis of thermal comfort conditions during heat waves in Ukraine. *Geographia Polonica*, 95 (1), 53–70.
180. Shi, Y., Xiang, Y., & Zhang, Y. (2019). Urban Design Factors Influencing Surface Urban Heat Island in the High-Density City of Guangzhou Based on the Local Climate Zone. *Sensors*, 19(16), 3459. doi:10.3390/s19163459
181. Skelhorn, C., Lindley, S., & Levermore, G. (2014). 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*, 121, 129–140.
182. SkyHelios model. Retrieved from <https://www.urbanclimate.net/skyhelios/>
183. Smithson, P. A. (1997). Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency. *International Journal of Climatology*, 17(2), 225–226.





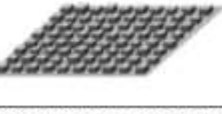







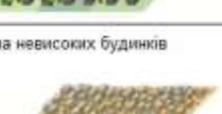

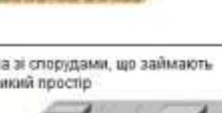


184. Souch C., Grimmond, S. (2006). Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography*, 30(2), 270–279.
185. Stewart, I. D., & Kennedy, C. A. (2016). Metabolic heat production by human and animal populations in cities. *International Journal of Biometeorology*, 61(7), 1159–1171. doi:10.1007/s00484-016-1296-7
186. Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.
187. Tereshchenko, I. E., & Filonov, A. E. (2001). Air temperature fluctuations in Guadalajara, Mexico, from 1926 to 1994 in relation to urban growth. *International Journal of Climatology*, 21, 483–494.
188. Terjung, W. H., & O'Rourke, P. A. (1980). Influences of physical structures on urban energy budgets. *Boundary-Layer Meteorology*, 19(4), 421–439.
189. Tertre, A., Lefranc, A., Eilstein, D., Declercq, C., Medina, S., Blanchard, M., Chardon, B., et al. (2006). Impact of the 2003 heatwave on all-cause mortality in 9 French cities. *Epidemiology*, 17(1), 75–9.
190. Tomczyk, A. M., Bednorz, E., Półrolniczak, M., & Kolendowicz, L. (2019). Strong heat and cold waves in Poland in relation with the large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3–4), 1909–1923.
191. Tomczyk, A., Półrolniczak, M., & Bednorz, E. (2017). Circulation Conditions' Effect on the Occurrence of Heat Waves in Western and Southwestern Europe. *Atmosphere*, 8(12), 31. doi:10.3390/atmos8020031
192. Tong, S., Prior, J., McGregor, G., Shi, X., & Kinney, P. (2021). Urban heat: an increasing threat to global health. *BMJ*, 375. doi:10.1136/bmj.n2467
193. Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1613–1640. doi:10.1016/j.rser.2017.05.248
194. Travis, D. J., Meentemeyer, V., & Suckling, P. W. (1987). Influence of meteorological conditions on urban/rural temperature and humidity differences for a small city. *Southeastern Geographer*, 27, 90–100.

195. Unger, J., Savić, S., & Gál, T. (2011). Modelling of the Annual Mean Urban Heat Island Pattern for Planning of Representative Urban Climate Station Network. *Advances in Meteorology*, 1–9.
196. United Nations. (2018). 2018 Revision of World Urbanization Prospects | Multimedia Library - United Nations Department of Economic and Social Affairs. <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
197. Unwin DJ. 1980. The synoptic climatology of Birmingham's heat island. *Weather*, 35, 43–50
198. Urban Heat Island Pilot Project (UHIPP). Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20020022522>
199. VDI (2008) VDI 3787-2, Environmental Meteorology—Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for Urban and Regional Planning a Regional Level—Part 1: Climate. Beuth, Berlin.
200. Vos, P. E. J., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 183, 113–122.
201. Wania, A., Bruse, M., Blond, N., & Weber, C. (2012). Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 91–101.
202. WUDAPT – World Urban Database and Access Portal Tools. Retrieved from <https://www.wudapt.org/>
203. Zauli, S., Tibaldi, S., Scotto, F., & Lauriola, P. (2008). Bioclimatic characterisation of an urban area: a case study in Bologna (Italy). *International Journal of Biometeorology*, 52(8), 779–785. doi:10.1007/s00484-008-0171-6.
204. Zhang, J., & Gou, Z. (2021). Tree crowns and their associated summertime microclimatic adjustment and thermal comfort improvement in urban parks in a subtropical city of China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, 126912.
205. Zhao L., Bruse M., Meng Q. (2013). Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. *Building and Environment*, 60, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Класифікація локальних кліматичних зон [186]

Типи забудови	Характеристика	Природні зони	Характеристика
ЛКЗ-1 	Щільна забудова заввишки понад 10 поверхів. Мало або повна відсутність зелених насаджень. Будівельні матеріали складають переважно бетон, сталь, камінь та скло.	ЛКЗ-А 	Території зі щільно висадженими деревами висотою від 3 до 30 м, переважно це міські парки або природні ліси.
ЛКЗ-2 	Щільна забудова заввишки від 3 до 9 поверхів. Мало або зовсім немає зелених насаджень. Будівельні матеріали з каменю, цегли, черепиці та бетону.	ЛКЗ-В 	Листяні та/або вічнозелені дерева, що мають висоту 3-15 м. Зони озеленення загального користування: міські парки, сквери, сади, бульвари, міські ліси.
ЛКЗ-3 	Щільна забудова заввишки від 1 до 3 поверхів. Мало або зовсім немає зелених насаджень. Будівельні матеріали з бетону, сталі, каменю та скла.	ЛКЗ-С 	Зона з кущами, чагарниками та невисокими деревами (висотою < 1 м) з низькою щільністю посадки. Земельний покрив здебільшого - ґрунт або пісок. Функція зони - це природні чагарники або сільськогосподарські угіддя.
ЛКЗ-4 	Відкрито облаштовані будинки заввишки понад 10 поверхів. Достатня кількість зелених насаджень. Будівельні матеріали з бетону, сталі, каменю та скла.	ЛКЗ-Д 	Території з низькою рослинністю, без/або з поодинокими деревами: поля, луки або частини міських парків.
ЛКЗ-5 	Відкрито облаштовані будинки заввишки від 3 до 9 поверхів. Достатня кількість зелених насаджень. Будівельні матеріали з бетону, сталі, каменю та скла.	ЛКЗ-Е 	Території під транспортною інфраструктурою та гірські масиви. Мало або зовсім немає дерев.
ЛКЗ-6 	Відкрито облаштовані будинки заввишки від 1 до 3 поверхів. Достатня кількість зелених насаджень. Будівельні матеріали з дерева, цегли, каменю, черепиці та бетону.	ЛКЗ-Ф 	Земельний покрив складають ґрунти та пісок. Мало або зовсім немає зелених насаджень. Функція зони - будівництво, пустеля або ділянки, які підготовлені до посіву.
ЛКЗ-7 	Забудова з легких будівельних матеріалів заввишки від 1 до 2 поверхів. Мало або зовсім немає зелених насаджень. Земельний покрив з твердим покриттям.	ЛКЗ-Г 	Великі відкриті водойми, такі як моря та озера, або невеликі, такі як річки, водойми та лагуни.
ЛКЗ-8 	1-3 поверхові будинки, що розташовані на значній відстані одні від одного. Невелика кількість зелених насаджень.	<p style="text-align: center;">Змінні властивості земельного покриття</p> <p style="text-align: center;">Змінні або ефемерні властивості земельного покриття, що суттєво змінюються в залежності від погодних умов, сільськогосподарської практики та сезону.</p> <p>b. голі дерева Дерева без листя (взимку). Збільшення значення фактору відкритого неба. Зменшення альбедо.</p> <p>s. сніговий покрив Високе альбедо.</p> <p>d. суха поверхня Пересохлий ґрунт. Великий коефіцієнт Боуена. Збільшений альбедо.</p> <p>w. мокра поверхня Перезволожений ґрунт. Висока вступність. Малий коефіцієнт Боуена. Скорочений Альбедо.</p>	
ЛКЗ-9 	Житлові райони з низькою щільністю забудови не вище 3-х поверхів зі земельними ділянками.		
ЛКЗ-10 	Промислові споруди малої та середньої висоти (вежі, цистерни, штабелі). Мало або зовсім немає зелених насаджень. Будівельні матеріали з бетону, металу та сталі.		

Додаток Б

Опис ділянок, обраних для моделювання

Ділянка 1 (ЛКЗ – 1, 26-й А мікрорайон).

Локальна кліматична зона 1 представлена ділянкою в межах спального району в житловому масиві Вигурівщина-Троєщина, що розташований на лівому березі Дніпра в Деснянському районі міста Києва. Побудований на місці села Вигурівщина і прилеглих до нього лук. Із заходу межує з селом Троєщина, південною межею є проспект Романа Шухевича та перехрестя вулиць Братиславської та Крайньої, зі сходу – промислова зона, в якій розташовані Банкнотно-монетний двір Національного банку України (БМД НБУ), Київська теплоелектроцентраль № 6 та інші підприємства, з півночі – поле, за яким знаходиться село Погреби. На північному заході цього масиву між вулицями Радунська, Миколи Радухіна та вулицею Градинська знаходиться 26-й А мікрорайон, який був обраний для моделювання (рис.Б.1).



Рис. Б.1 Ділянка 1 (ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон): а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Обрана ділянка характеризується щільною багатоповерховою забудовою, висота житлових будинків від 55 м (22–24 поверховість). За класифікацією шорсткості Девенпорта та Вієринга [67] ділянка належить до хаотичного (англ. – chaotic) класу (8 класу) з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості $\geq 2,0$ м. Площа

непроникних поверхонь (спортивний майданчик, тротуар, наземний паркінг та проїзна частина), разом з територією житлової забудови (до якої входять приямки, ганок, під'їзди та прибудинкова територія) та різними адміністративними будівлями, складає приблизно 90% від загальної площі плану забудови. Рослинний покрив досліджуваної ділянки – незначний (10% від площі земельної ділянки), переважно це газони у прибудинковій зоні та поодинокі дерева (заввишки до 2 м) вздовж вулиці Градинська та у дворах. Значення фактору відкритого неба знаходиться в діапазоні 0,3–0,5.

Ділянка 2 (ЛКЗ – 1, ЖК «Паркові озера»).

До локальної кліматична зона 1 також належить територія житлового комплексу «Паркові озера», який входить до Воскресенського масиву, що розташований в Дніпровському районі міста Києва на лівому березі Дніпра. Територія ЖК (рис. Б.2) розташована в північно-східній частині Дніпровського району між вулицею Воскресенська – на заході, а з півночі та сходу він оточений лісопарковою смугою та парком Перемоги.

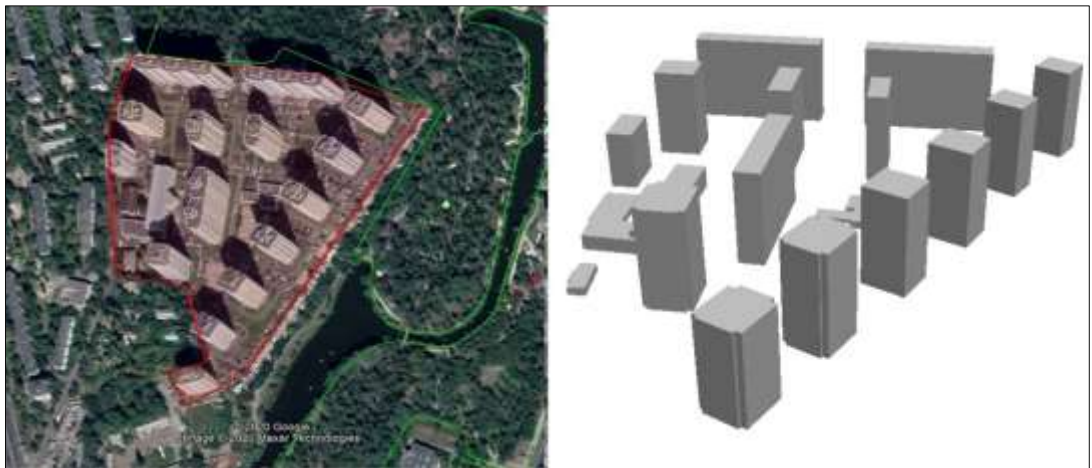


Рис. Б.2. Ділянка 2 (ЛКЗ – 1, ЖК «Паркові озера»: а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Маючи поруч найбільшу зелену зону в Дніпровському районі, сам ЖК характеризується невеликою кількістю зелених насаджень (в межах 10%),

переважно це газони, невисокі дерева та кущі у прибудинковій території. ЖК «Паркові озера» мають добре розвинену інфраструктуру та висотну забудову від 43 м (16–25 поверховість). За класифікацією шорсткості Девенпорта та Вієринга ділянка належить до хаотичного класу з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості $\geq 2,0$ м. Відсоток забудованої території, що включає житлові будинки, дитячий садок та різні адміністративні будівлі становить 40–45% від загальної площі плану забудови. Спортивні майданчики, скейт-парк, тротуари, наземні парковки та проїзні частини доріг, що належать до непроникних поверхонь займають приблизно 45% території забудови. Значення фактору відкритого неба досліджуваної ділянки становить 0,5.

Ділянка 3 (ЛКЗ – 2, 3-й А мікрорайон).

Локальна кліматична зона 2 представлена ділянкою в межах Оболонського району Києва, що розташований на північному заході міста, на правому березі Дніпра. На півночі район межує з Вишгородським районом, зі сходу – річкою Дніпро, а з півдня та заходу – з Подільським районом. До складу району входить 8 житлових масивів. Ділянка (рис. Б.3), що обрана для моделювання (3-й А мікрорайон) розташована в житловому масиві Оболонь, між проспектом Героїв Сталінграда та парком «Наталка».



Рис. Б.3 Ділянка 3 (ЛКЗ – 2, 3-й А мікрорайон. а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Обрана ділянка характеризується щільною середньоповерховою забудовою, з середньою висотою будинків – 22 м (3, 9 і 15 поверховість), відсоток забудованої території становить приблизно 40 – 45%. За коефіцієнтом шорсткості Девенпорта належить до закритого (англ. – closed) та дуже грубого (англ. – very rough) класу (6–7 клас) з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості від 0,5 до 1,0 м. Відношення непроникних поверхонь до загальної площі території становить 45–50%, оскільки в межах земельної ділянки майже половина її території відведена під наземний паркінг та спортивні (заасфальтовані) майданчики. Рослинний покрив досліджуваної ділянки – незначний (5–15% від площі земельної ділянки), переважно це газони/клумби у прибудинковій зоні та у внутрішніх дворах, а також невисокі дерева вздовж Оболонської набережної. Значення фактору відкритого неба змінюється в діапазоні 0,4–0,6.

Ділянка 4 (ЛКЗ – 2, ЖК «Комфорт Таун»).

ЖК «Комфорт Таун» розташований по вулиці Регенераторна в Дніпровському районі столиці в межах житлового масиву Соцмісто – між проспектом Соборності, Березняками, залізницею і Старою Дарницею. Комплекс знаходиться в 500 метрах від Ленінградської площі – одного з найбільших транспортних вузлів Києва.

Територія ЖК (рис. Б.4) характеризується щільною середньоповерховою забудовою, має каскадний тип забудови з висотою житлових будинків від 16 м (6–16 поверховість). За класифікацією шорсткості Девенпорта та Вієринга ділянка належить до закритого та дуже грубого класу з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості від 0,5 до 1,0 м. Відсоток забудованої території, до якої належать житлові будинки, дитячий садок, школа та інші адміністративні будівлі становить 40–45% від загальної площі забудови. Площа непроникних поверхонь, до якої належать пішохідні тротуари, проїзні дороги житлової зони, парковки й спортивні майданчики – становить приблизно 35% території. ЖК «Комфорт Таун» має невелику кількість зелених насаджень (20% від загальної площі), у прибудинковій

зоні розташовані переважно газони, на півночі ЖК має найбільшу на території паркову зону. Значення фактору відкритого неба змінюється в діапазоні 0,3–0,6.

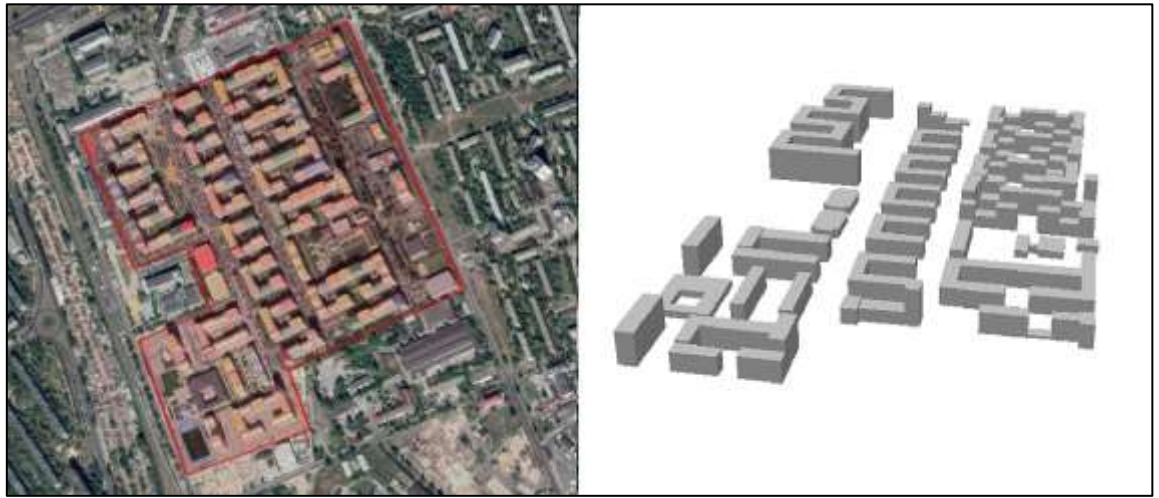


Рис. Б.4 Ділянка 4 (ЛКЗ – 2, ЖК «Комфорт Таун»). а) супутниковий знімок;
б) 3D модель ділянки.

Ділянка 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал»).

Локальна кліматична зона 4 представлена ділянкою в межах мікрорайону Саперне поле в Печерському районі Києва, що розташований у центральній частині столиці на правому березі річки Дніпра. На південному заході цього району на перетині вулиці Василя Тютюнника та вулиці Академіка Філатова знаходиться житловий комплекс «Французький квартал», який був обраний для моделювання (рис. Б.5).

Обрана ділянка це багатоповерхова забудова з низькою щільністю, висота житлових будинків від 40 м (14–25 поверховість). За класифікацією шорсткості Девенпорта та Вієринга ділянка належить до хаотичного та закритого класу (7–8 клас), з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості 1–2,0 м. Відсоток площі непроникних поверхонь (тротуарів, проїзної частини та невеликих наземних парковок) разом з площею забудови становить приблизно 70–75% від загальної площі земельної ділянки ЖК. На внутрішній території проведено озеленення, це переважно газони з невисокими кущами у прибудинковій зоні та поблизу дитячих

майданчиків, а також дерева, що знаходяться в зоні відпочинку мешканців. Значення фактору відкритого неба змінюється в діапазоні 0,4–0,5.

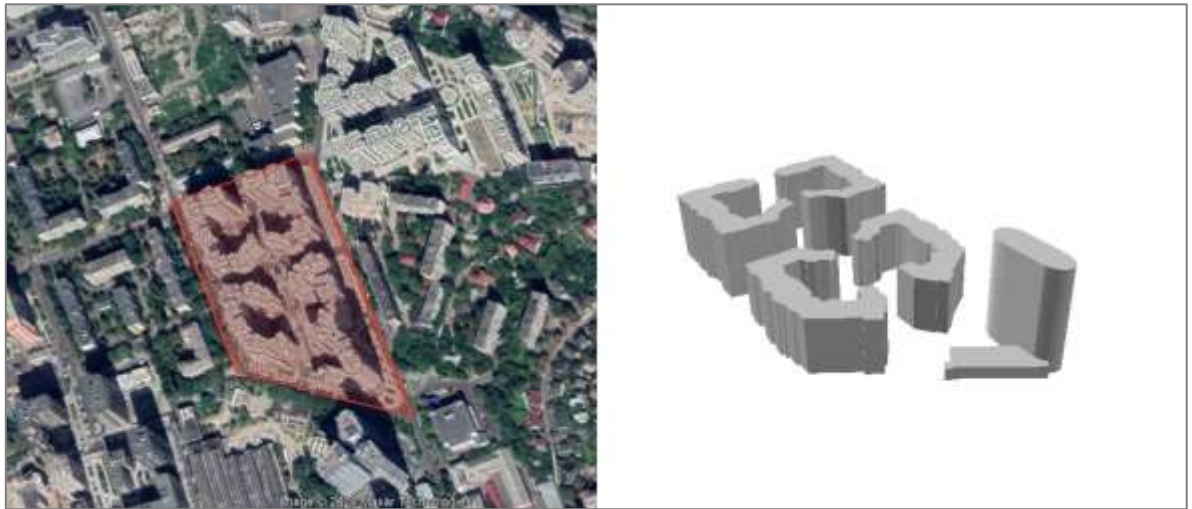


Рис. Б.5 Ділянка 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал»): а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Ділянка 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани).

Локальна кліматична зона 5 представлена ділянкою в межах Святошинського району, що розташований у західній частині міста Києва, та межує з Оболонським, Подільським, Шевченківським та Солом'янським районами міста та Києво-Святошинським районом Київської області. До складу району входить 15 мікрорайонів, в східній частині якого, між проспектом Перемоги, вулицями Дружківською, Екскаваторною та залізницею розташований мікрорайон Галагани, який був обраний для моделювання (рис. Б.6).

Обрана ділянка характеризується середньоповерховою забудовою з низькою щільністю, середня висота житлових будинків – 16 м (3–9 поверховість), відсоток забудованої території становить приблизно 25–30%. За класифікацією шорсткості Девенпорта та Вієринга ділянка належить до грубого (англ. – rough) та дуже грубого класу (5–6 клас) з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості від 0,25 до 0,5 м. До непроникних поверхонь на досліджуваній ділянці належать тротуари та проїзні дороги житлової зони і їх площа становить 30% від загальної площі

території. Обрана територія має достатню кількість зелених насаджень (40% від загальної площі забудови), газони, клумби та високі дерева майже рівномірно розподілені по території. Значення фактору відкритого неба змінюється в діапазоні 0,7 – 0,8.

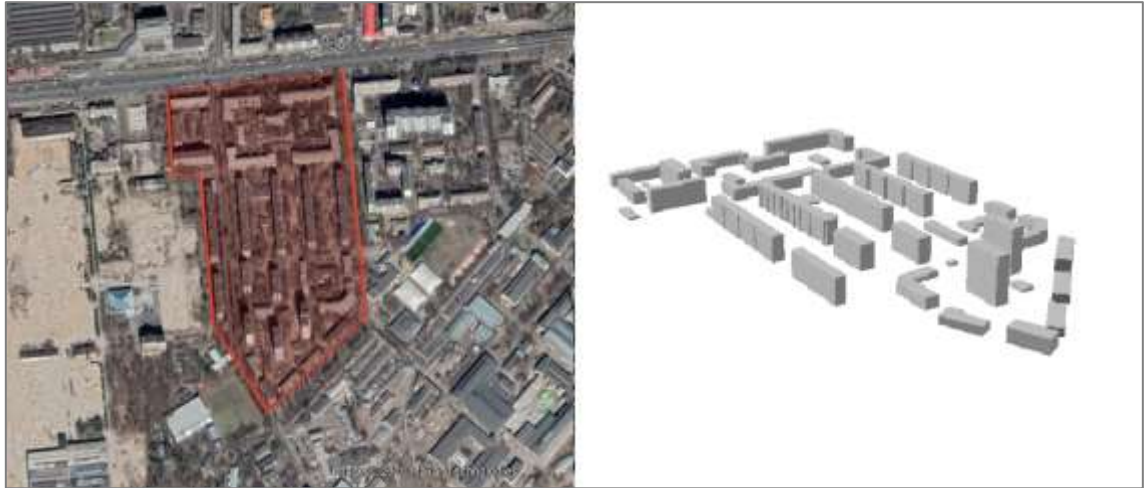


Рис. Б.6 Ділянка 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани: а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Ділянка 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Харківського масиву).

Локальна кліматична зона 5 представлена ділянкою в межах Харківського житлового масиву у Дарницькому районі міста Києва, що побудований на місці села Шевченка (хутір Шевченка). Масив розташований на лівому березі Дніпра та обмежений проспектом Миколи Бажана, вулицею Ревуцького, Тростянецькою вулицею та Харківським шосе. До складу масиву входить 4 житлових мікрорайонів, одним з найбільших є 7-й мікрорайон Харківського масиву, який був обраний для моделювання (рис. Б.7).

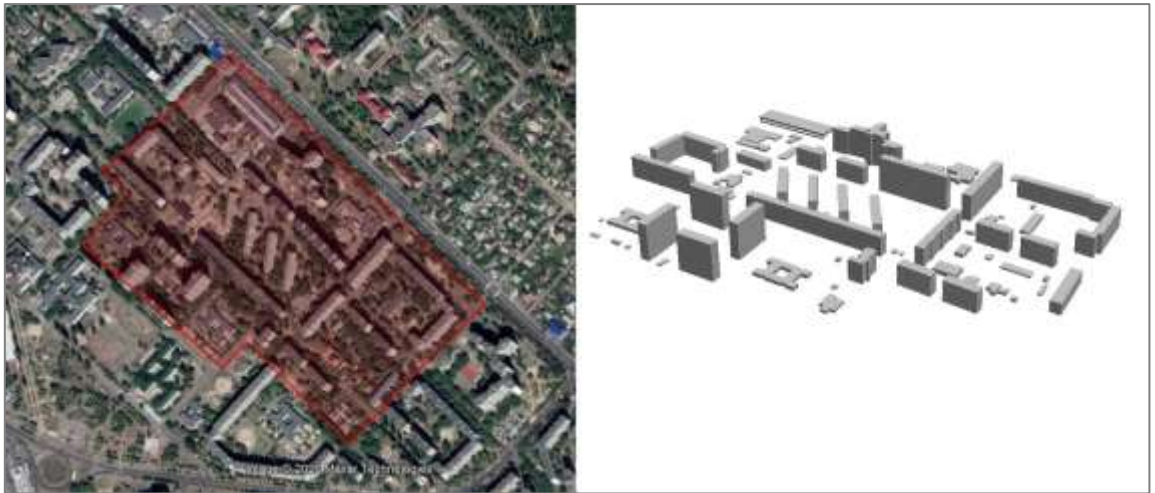


Рис. Б.7 Ділянка 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Харківського масиву): а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Для обраної ділянки характерна середньоповерхова забудова з низькою щільністю, висота житлових будинків від 13 м (5–9 поверховість), відсоток забудованої території становить приблизно 25–30%. За класифікацією шорсткості Давенпорта та Вієринга ділянка належить до грубого та дуже грубого класу з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості 0,25–0,5 м. Площа непроникних поверхонь (до яких належать пішохідні тротуари, проїзні дороги житлової зони, парковки) становить приблизно 20% від загальної площі території. Обрана ділянка характеризується достатньою кількістю зелених насаджень (50%), газони, клумби та високі дерева рівномірно розподілені по території. Значення фактору відкритого неба змінюється в діапазоні 0,6 – 0,8.

Ділянка 8 (ЛКЗ – 6, Жуляни).

Локальна кліматична зона 6 представлена ділянкою в межах мікрорайону Жуляни, що розташований у Солом'янському районі Києва, на південно-західній околиці міста, між Теремками та Борщагівкою. Ділянка, яка була обрана для моделювання, це територія приватної житлової забудови (рис. Б.8).

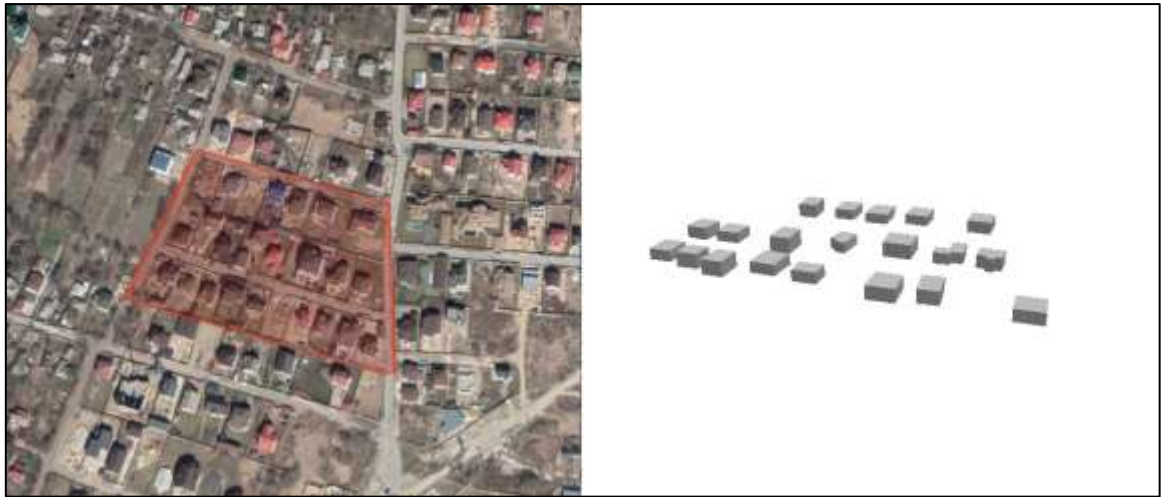


Рис. Б.8 Ділянка 8 (ЛКЗ – 6, Жуляни): а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Обрана ділянка характеризується відкрито облаштованими будинками заввишки від 1 до 3 поверхів (від 3 до 10 м). Коефіцієнт аеродинамічної шорсткості 0,25–0,5 м (5–6 клас) за класифікацією шорсткості Девенпорта та Вієринга). Площа непроникних поверхонь разом з територією забудови становить приблизно 50 – 55% від загальної площі забудови. Досліджувана ділянка має достатню кількість зелених насаджень – 45–50% від загальної площі території, переважно це газони/клумби з або без дерев в межах садибних територій. Значення фактору відкритого неба становить 0,9.

Ділянка 9 (ЛКЗ – 6, Новобіличі).

До локальної кліматичної зони 6 також належить територія житлового масиву Новобіличі, що розташований між вулицями Академіка Булаховського і Генерала Наумова, у Святошинському районі міста Києва. Ділянка, що обрана для моделювання це територія приватної житлової забудови (рис. Б.9).



Рис. Б.9 Ділянка 9 (ЛКЗ – 6, Новобіличі): а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Обрана ділянка це малоповерхова з низькою щільністю забудова заввишки від 3 до 10 м (1–3 поверховість). За класифікацією шорсткості Девенпорта та Вієринга ділянка належить до 5–6 класу. Площа непроникних поверхонь разом із забудовою становить приблизно 50–55% від загальної площі території. Досліджувана ділянка має достатню кількість зелених насаджень – 45–50% від загальної площі території, переважно це газони/клумби з деревами або без них в межах садибних територій. Значення фактору відкритого неба становить 0,9.

Ділянка 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України»).

Локальна кліматична зона А представлена зеленою зоною з лісовими насадженнями та входить до території Національного Експоцентру України (раніше Виставка досягнень народного господарства), що розташований у південній частині міста Києва, у Голосіївському районі (рис. Б.10). Обрана ділянка це зона високих щільно посаджених дерев заввишки від 3 до 30 м з коефіцієнтом аеродинамічної шорсткості $\geq 2,0$ м (8 клас за класифікацією Девенпорта та Вієринга). Оскільки досліджувана ділянка відноситься до типів земельного покриття частина непроникних поверхонь становить менше 10% від загальної площі території, тоді як понад 90% – зелені насадження. Значення фактору відкритого неба становить $<0,4$.

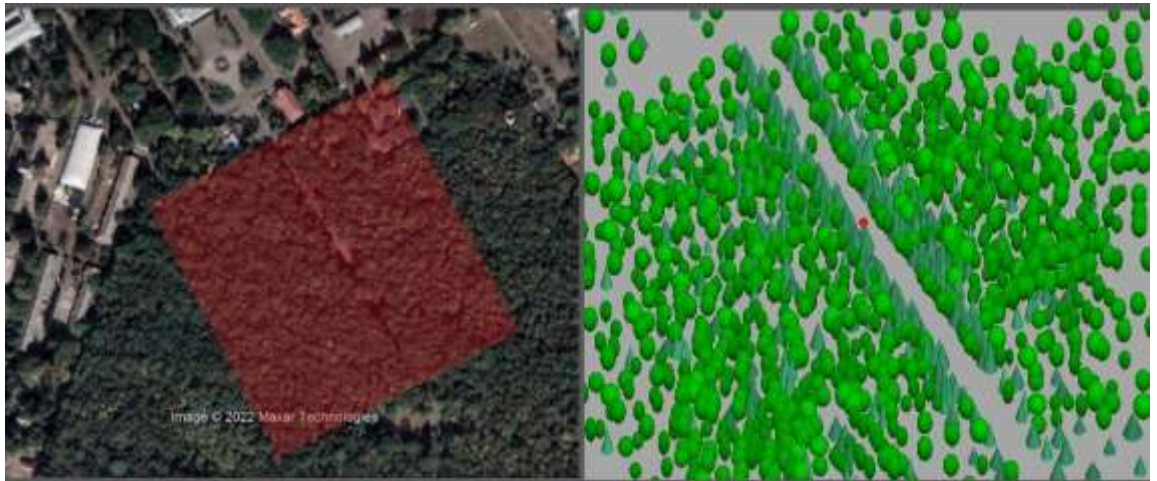


Рис. Б.10 Ділянка 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України»): а) супутниковий знімок; б) 3D модель ділянки.

Додаток В

Аналіз синоптичних ситуацій

Ситуація 1 – Область підвищеного тиску з півдня (23.07.2015)

Південно-східна частина території України знаходилася під впливом циклону, що заповнювався (центр на півночі Уралу) та улоговини – орієнтованої на північний-схід України. В тилу цього баричного утворення відмічалось підвищення значення атмосферного тиску в межах 1,1–1,3 гПа за 3 год. На фоні цього росту майже вся територія України, окрім західних областей, поступово переходила під вплив гребня, де спостерігалась досить тепла погода з невеликою хмарністю та слабким вітром. Температура повітря вночі фіксувалася від 16 до 19 °С, а вдень від 29 до 33 °С тепла.

По Києву та Київській області спостерігалася переважно ясна та спекотна погода при слабкому вітру й невисоких значеннях відносної вологості повітря. В цей день максимальна температура повітря в Києві (за даними АМСЦ) становила +32,4 °С, а мінімальна – +18,2 °С (додаток Г). Амплітуда добового ходу температури повітря в місті становила 14,2 °С. Протягом доби швидкість вітру варіювалася від 1 м/с до 3 м/с.

Ситуація 2 – Умови високого циклону (02.06.2020)

Територія України знаходилась під впливом високого циклону, центр якого протягом доби повільно переміщувався із Чернігівської області на Житомирську. В центрі цього баричного утворення та в передній його частині відмічалось незначне падіння атмосферного тиску (0,2–0,6 гПа/3 год), що призвело до подальшого поглиблення цього циклону. Спостерігалась хмарна погода, дощі, місцями зливи, вітер слабкий змінних напрямків. Температура повітря вночі фіксувалася в межах 2–5 °С, а вдень – 10–15 °С тепла.

По Києву та Київській області спостерігалася хмарна та прохолодна погода, вітер переважно південно-західних напрямків, відносна вологості повітря знаходилась в межах 59 – 91%. За даними АМСЦ Київ у місті максимальна температура повітря становила +14,0 °С, а мінімальна – +5,5 °С (амплітуда

добового ходу температури повітря – 8,5 °С). Протягом доби швидкість вітру становила 1–4 м/с.

Ситуація 3 – Улоговина з півдня, циклонічна депресія (16.08.2019)

Східна частина території України знаходилась під впливом улововини, що орієнтована з півдня, а західна частина – під впливом холодного антициклону з півночі. На території Чернігівської, Київської та Одеської області стаціонавував холодний фронт з хвилями, який впродовж доби поступово розмивався. В зоні цього фронтального розділу спостерігалася хмарна погода, проходили дощі різної інтенсивності місцями з грозами. Температура повітря вночі фіксувалася в межах 14–20 °С в день 16–24 °С тепла.

По Києву та Київській області впродовж доби спостерігалася суцільна хмарність, вітер слабкий північного напрямку, відносна вологість повітря 82–88%. В цей день максимальна температура повітря в Києві (за даними АМСЦ Київ) становила +17,0 °С, а мінімальна – +14,4. Амплітуда добового ходу температури повітря цього дня була невисокою – 2,6 °С. Протягом доби швидкість вітру була 3–4 м/с.

Ситуація 4 – Малоградієнтне баричне поле (20.07.2020)

Впродовж доби територія України знаходилась під впливом малоградієнтного поля підвищеного тиску. Баричне поле біля поверхні землі протягом кількох днів мало змінювалося. В цей день спостерігалася малохмарна, досить тепла, місцями – спекотна погода, зі слабким вітром. Температура повітря вночі варіювалася в межах 15–20 °С, в день 26–30 °С тепла.

По Києву та Київській області спостерігалася переважно ясна та тепла погода зі слабким вітром (переважно північно-східного напрямку) та невисокими значеннями відносної вологості повітря. За даними АМСЦ Київ у місті максимальна температура повітря становила +29,5 °С, а мінімальна – +16,1 °С (додаток Г). Амплітуда добового ходу температури повітря цього дня – 13,4 °С. Протягом доби швидкість вітру варіювалася від 0 м/с до 4 м/с.

Ситуація 5 – Циклон (01.07.2018)

Територія України, окрім західних областей, знаходилась в області низького тиску з центром циклону в південній частині Чернігівської області. Впродовж доби цей циклон переміщувався з півдня на північ. Теплий фронт, що проходив від центру циклона на схід, формував погоду в північно-східних областях України. На решті території погодні умови формувалися під впливом холодного фронту, що проходив від центру циклону через Одесу на західну Європу в широтному напрямку. Спостерігалася хмарна погода з опадами різної інтенсивності, місцями – зливи з грозами. Вітер змінних напрямків до 5–10 м/с, при грозах – поривчастий. Температура повітря вночі 9–13 °С, у східних областях – 18–22 °С, а вдень – в межах 15–23 °С тепла.

По Києву та Київській області протягом доби спостерігалася хмарна та прохолодна погода, вітер слабкий, північного та північно-західного напрямків, висока відносна вологість повітря. Цього дня максимальна температура повітря в Києві становила +16,8 °С, а мінімальна – +10,2 (амплітуда добового ходу температури повітря – 6,6 °С). У першій половині доби відмічалися помірні опади – 12 мм за 12 год. В цей день швидкість вітру змінювалася від 3 до 5 м/с.

Ситуація 6 – Антициклон (02.08.2015)

Майже вся Європа знаходилась під впливом багатоцентрової області підвищеного тиску. Один з таких центрів розташовувався над територією Київської та Чернігівської областей, з максимальним значенням тиску – 1026 гПа. Протягом доби його південна частина поступово руйнувалася за рахунок слабкого падіння атмосферного тиску (0,2–1,2 гПа/3 год), а північна частина підсилювалася за рахунок слабкого росту (0,4–1,6 гПа/3 год). Антициклон формував на території України спекотну суху погоду зі слабким вітром, температура повітря вночі становила 15–17 °С, а вдень – 27–30 °С тепла.

По Києву та Київській області спостерігалася малохмарна та спекотна погода, при слабкому вітру південно-східних напрямків та невисоких значеннях

відносної вологості повітря . За даними АМСЦ Київ (додаток X) у місті максимальна температура повітря становила $+28,6$ °С, а мінімальна $+14,9$ °С, вітер слабкий – $0-2$ м/с. Амплітуда добового ходу температури повітря цього дня становила $13,7$ °С.

Ситуація 7 – Градієнтне баричне поле високого тиску (14.06.2020)

Південь України та Чорне море знаходилися під впливом малоградієнтного поля зниженого тиску, а північні області знаходилися під впливом градієнтного поля високого тиску, з максимумом $1027,5$ гПа. По всій території України відмічався ріст атмосферного тиску від $0,2$ до $1,5$ гПа за 3 год. Спостерігалася хмарна погода з поривчастим вітром та опадами різної інтенсивності. Температура повітря вночі становила $15-20$ °С, а вдень – $24-29$ °С.

По Києву та Київській області протягом доби спостерігалася хмарна та тепла погода, вітер переважно змінних напрямків за високих значень відносної вологості повітря. В цей день максимальна температура повітря в Києві становила $+26,1$ °С, а мінімальна – $+17,8$. Амплітуда добового ходу температури повітря у місті становила $8,3$ °С. В другій половині дня спостерігалися опади (4 мм/12 год). Швидкість вітру протягом доби змінювалася від 1 м/с до 4 м/с.

Ситуація 8 – Південна периферія антициклону (14.08.2010)

Територія України знаходилася під впливом гребня антициклону, центр якого розташовувався на півночі Росії. Протягом доби гребінь поступово відходив на схід за рахунок слабкого падіння атмосферного тиску ($0,2$, $-0,6$ гПа/ 3 год). Також Україна знаходилася і в теплому секторі двох циклонів з центрами: перший – в районі о. Нової Землі; другий – в районі Північного моря. З цими циклонами пов'язані фронтальні розділи, які перешкоджали доступу холодного арктичного повітря на західну частину Росії та України. Тому на території України спостерігалася ясна суха та спекотна погода, з температурою повітря вночі – $19-26$ °С, вдень – $34-37$ °С тепла.

Вранці, по Києву спостерігалася ясна тепла, безвітряна погода, починаючи з 12 години і до кінця доби – хмарна з проясненнями та жарка (з максимальною температурою – 37,1 °С) погода за низької відносної вологості повітря. Амплітуда добового ходу температури повітря цього дня становила 15,7 °С. Протягом доби швидкість вітру варіювалася від 0 м/с до 3 м/с.

Ситуація 9 – Область підвищеного тиску (26.06.2020)

Україна знаходилась в області підвищеного тиску й в теплому секторі північного циклону. Максимальне значення тиску 1026,1 гПа спостерігалось в місті Києві й протягом доби продовжувало зростати. По території східних областей проходив теплий фронт, яких поступово переміщувався на схід. Спостерігалася ясна спекотна погода зі слабким вітром. Температура повітря вночі становила 15–19 °С, а вдень – 27–32°С тепла.

По Києву та Київській області спостерігалася ясна та спекотна погода зі слабким вітром (переважно південного напрямку) та невисокими значеннями відносної вологості повітря. За даними АМСЦ Київ у місті максимальна температура повітря становила +28,5°С, а мінімальна – +16,7°С (амплітуда добового ходу температури повітря – 11,8°С). Протягом доби швидкість вітру становила 1–3 м/с.

Ситуація 10 – Тилова частина циклону (04.07.2019)

Погодні умови території України формувалися за рахунок області високого тиску, що розповсюджувалася із заходу в тил циклону, центр якого розташовувався в районі Карелії. Впродовж доби спостерігалася помірна тепла без опадів погода, вітер слабкий до 2 – 3м/с, температура повітря вночі – 11–15 °С, а вдень – 20–24°С тепла.

По Києву та Київській області протягом доби спостерігалася мінлива хмарність, тепла погода зі слабким вітром та невисокими значеннями відносної вологості повітря. В цей день максимальна температура повітря в Києві становила +21,8 °С, а мінімальна – +13,5. Амплітуда добового ходу температури повітря у місті

становила 8,3 °С (додаток Г). Протягом доби швидкість вітру варіювалася від 1 м/с до 4 м/с.

Додаток Г

Значення основних метеорологічних параметрів на АМСЦ «Київ», що використовувалися для моделювання.

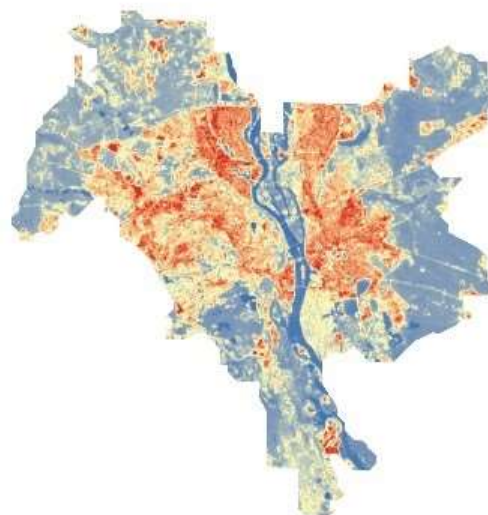
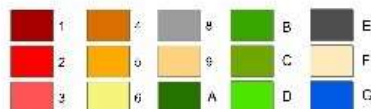
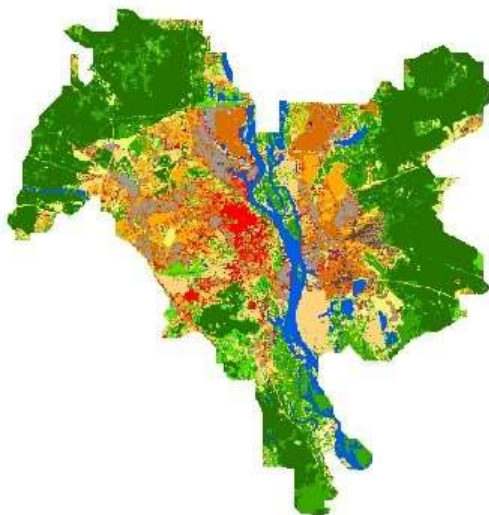
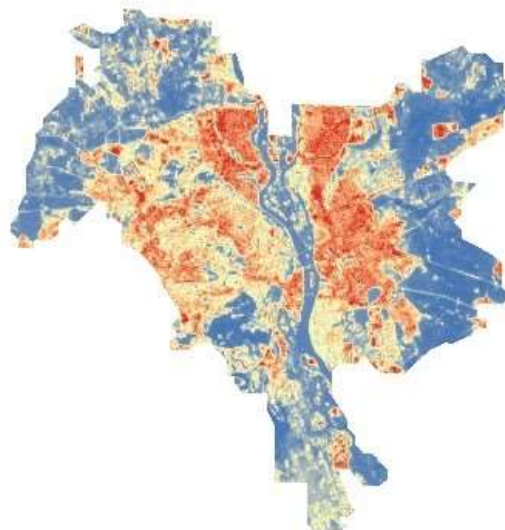
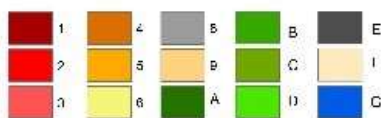
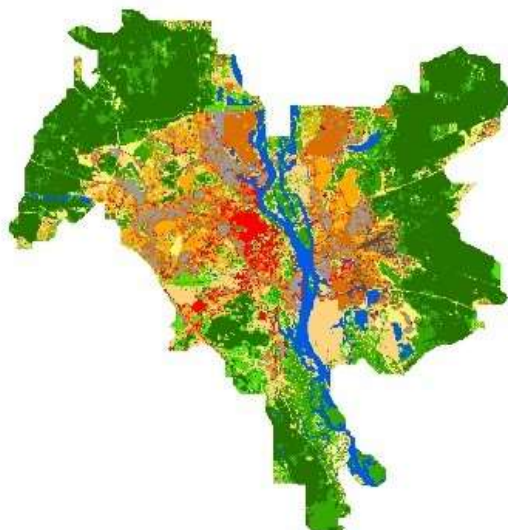
Синоптичні ситуації	Дата	Час	Хмарність (окт)	Напрямок та швидкість вітру (град. м/с)		Температура повітря (°C)	Вологість повітря (%)	Температура max (°C)	Температура min (°C)	Опади (мм)
Область підвищеного тиску з півдня	23.07.2015	0:00	0	340	3	25,3	43			
		6:00	0	320	1	18,8	62		18,2	
		12:00	0	280	2	27,6	34			
		18:00	0	130	2	31,6	35	32,4		
Умови високого циклону	02.06.2020	0:00	2	330	2	8,5	75			
		6:00	2	260	2	5,7	91		5,5	
		12:00	7	200	4	10,5	70			
		18:00	6	210	3	13,4	59	14,0		
Улоговина з півдня (циклонічна депресія)	16.08.2019	0:00	8	360	4	16,1	82			
		6:00	8	360	3	15,1	88		14,4	
		12:00	8	360	4	15,4	88			
		18:00	8	10	4	15,6	86	17,0		
Малогradientне поле	20.07.2020	0:00	0	–	0	19,4	62			
		6:00	0	–	0	16,2	78		16,1	
		12:00	6	20	4	26,2	38			
		18:00	6	50	2	26,4	37	29,5		
Циклон (обл низ тиску)	01.07.2018	0:00	8	360	4	13,0	94			
		6:00	8	350	3	10,3	95		10,2	
		12:00	8	310	4	12,9	87			12
		18:00	6	280	5	15,8	61	16,8		
Антициклон	02.08.2015	0:00	2	–	0	18,7	62			
		6:00	0	–	0	15,4	76		14,9	

Продовження додатку Г

		12:00	3	120	1	25,5	38			
		18:00	0	160	2	28,1	29	28,6		
Градiєнтне поле (теплий сектор)	14.06.2020	0:00	7	60	4	22,4	66			
		6:00	8	50	3	18,2	82		17,8	
		12:00	8	60	3	21,0	77			
		18:00	6	200	1	25,7	57	26,1		4
Пiвденна периферія антициклону	14.08.2010	0:00	0	170	2	25,8	55			
		6:00	0	–	0	21,8	71		21,4	
		12:00	6	10	3	33,3	30			
		18:00	6	160	2	35,6	26	37,1		
Область підвищеного тиску (тепл сектор між фронтами)	26.06.2020	0:00	0	–	0	20,5	48			
		6:00	0	–	0	17,4	70		16,7	
		12:00	0	190	3	25,7	38			
		18:00	0	170	2	27,9	31	28,5		
Тилова частина циклону	04.07.2019	0:00	0	360	2	17,7	45			
		6:00	0	350	1	13,8	62		13,5	
		12:00	5	330	3	19,8	37			
		18:00	7	300	4	21,0	34	21,8		

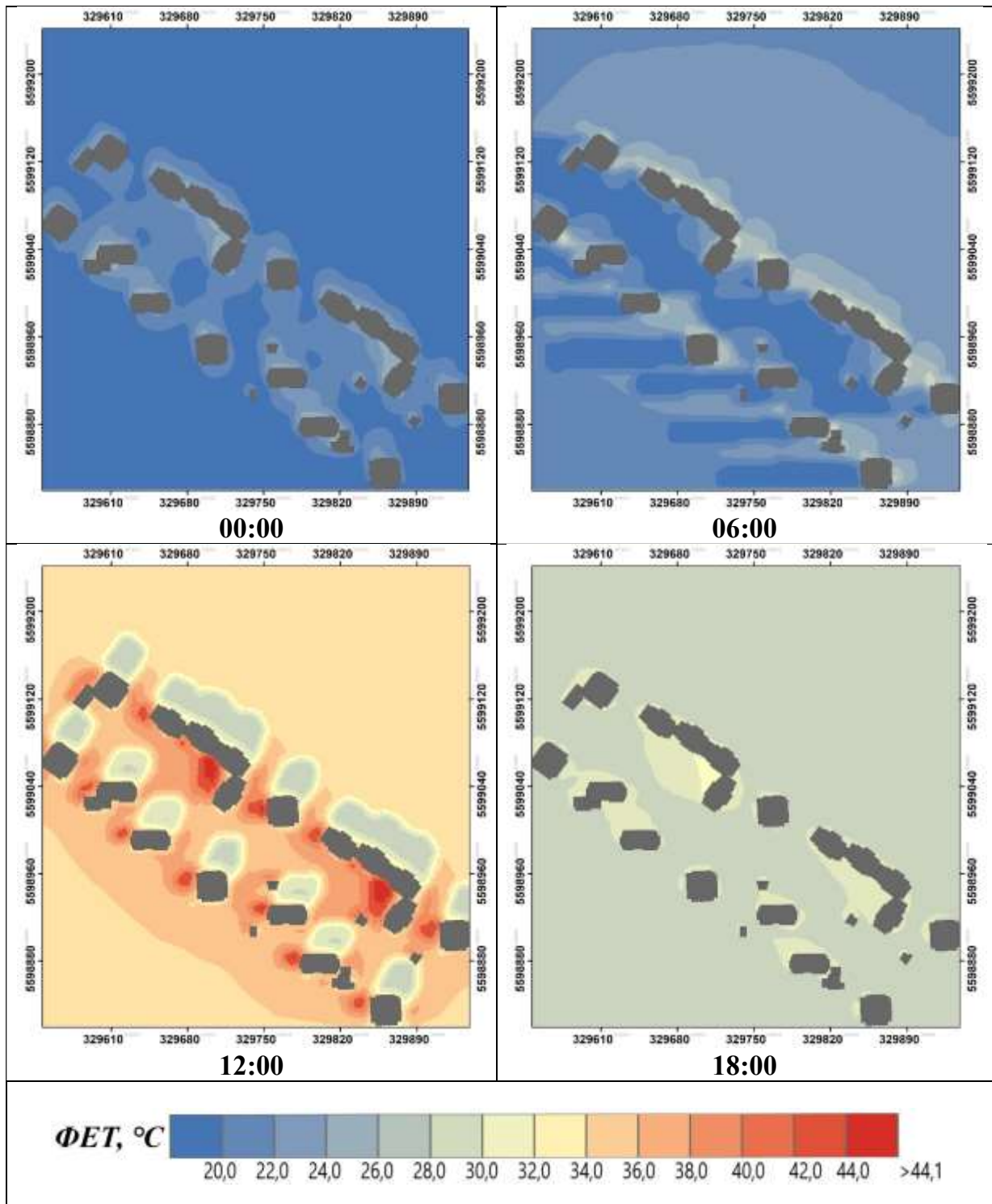
Додаток Д

Просторовий розподіл ЛКЗ та ТПП для сцен Landsat-8

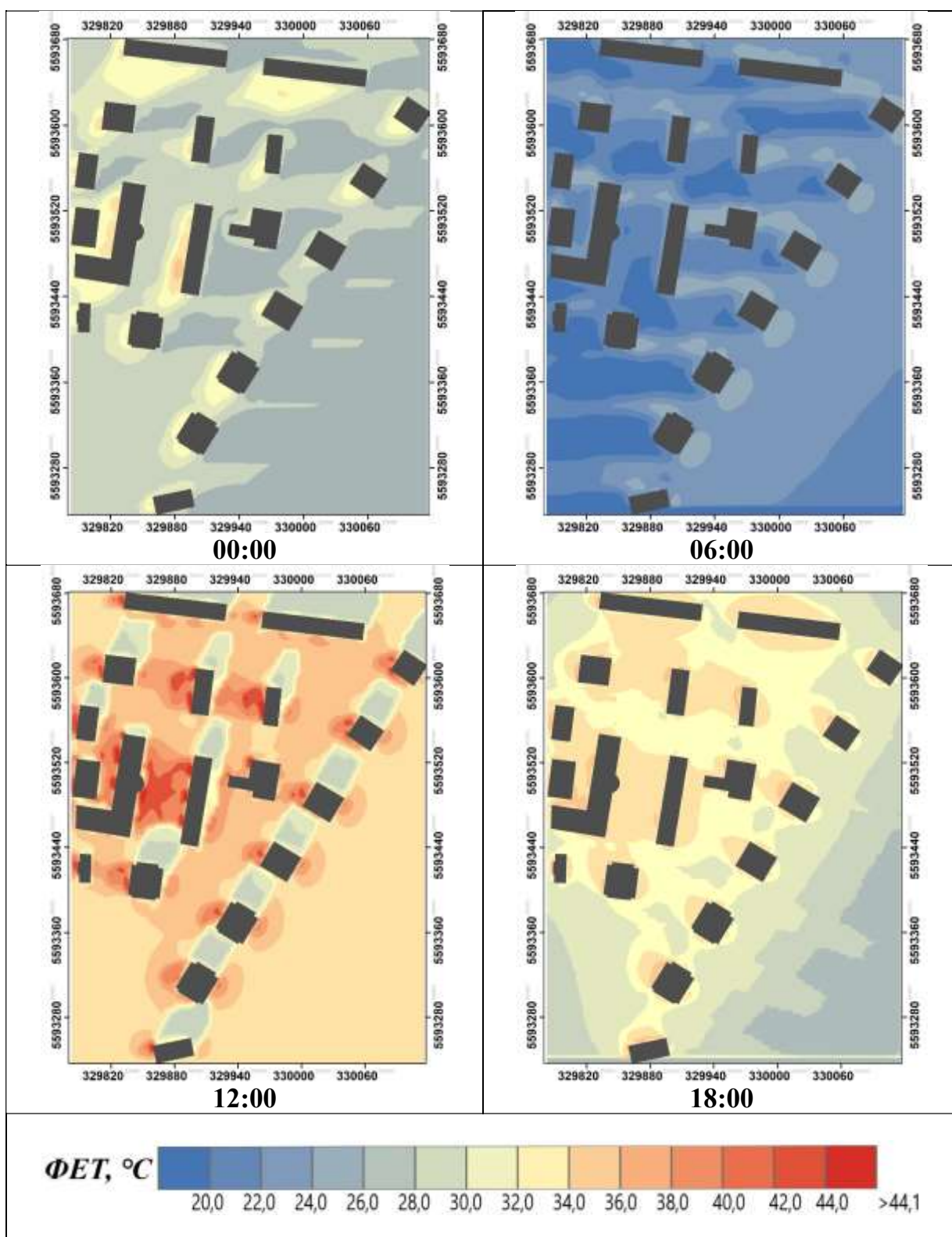


Додаток Е

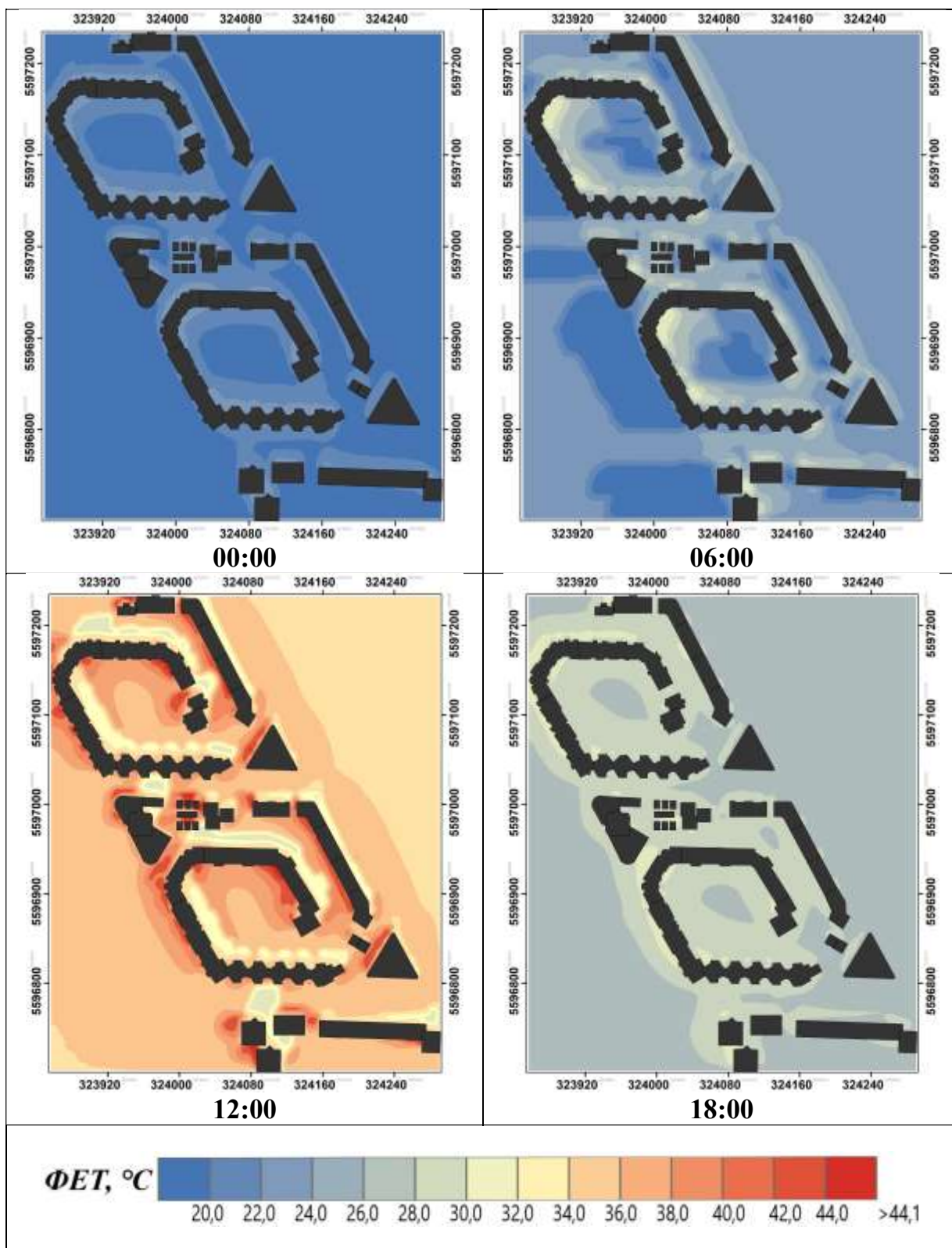
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 1 (ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



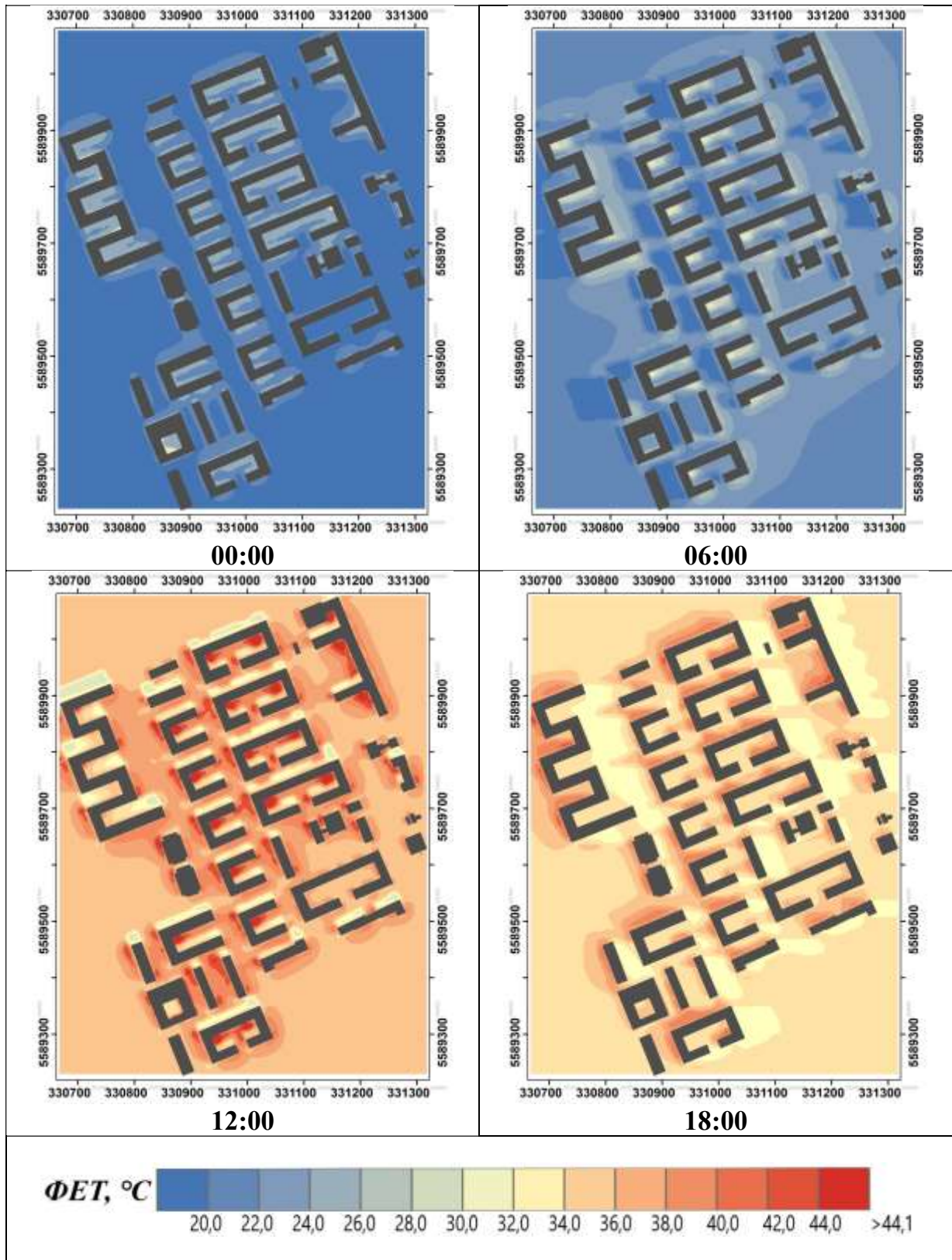
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



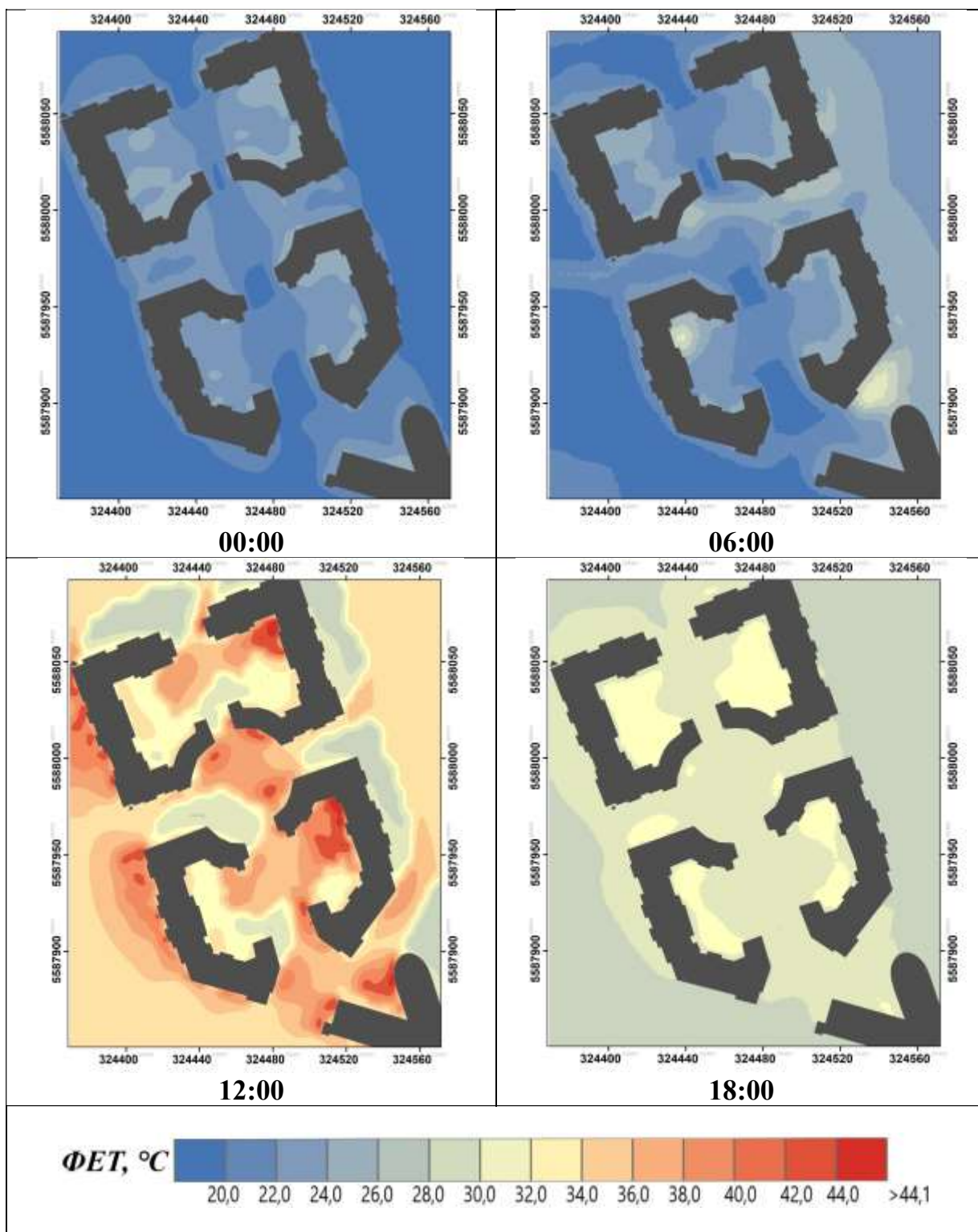
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



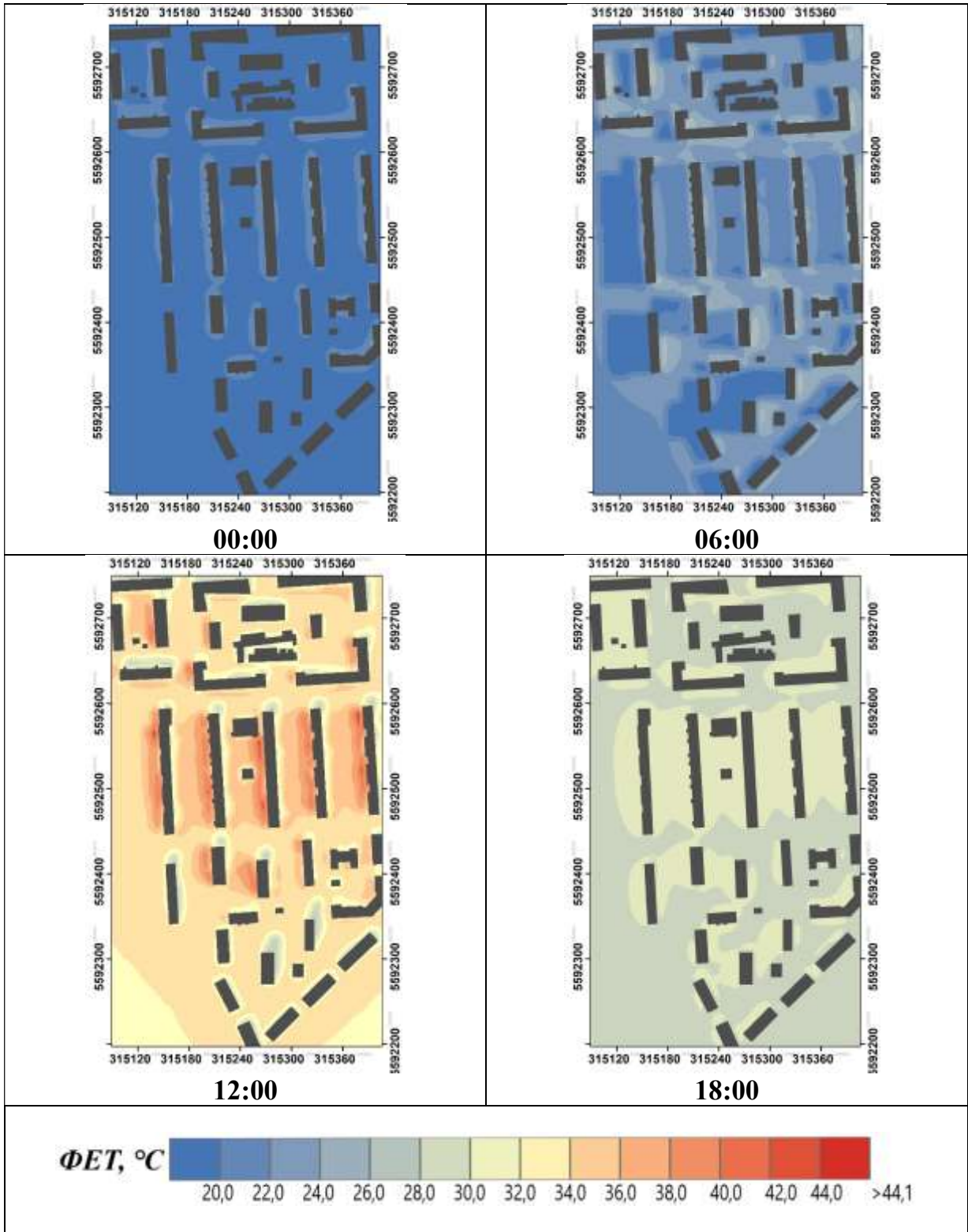
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



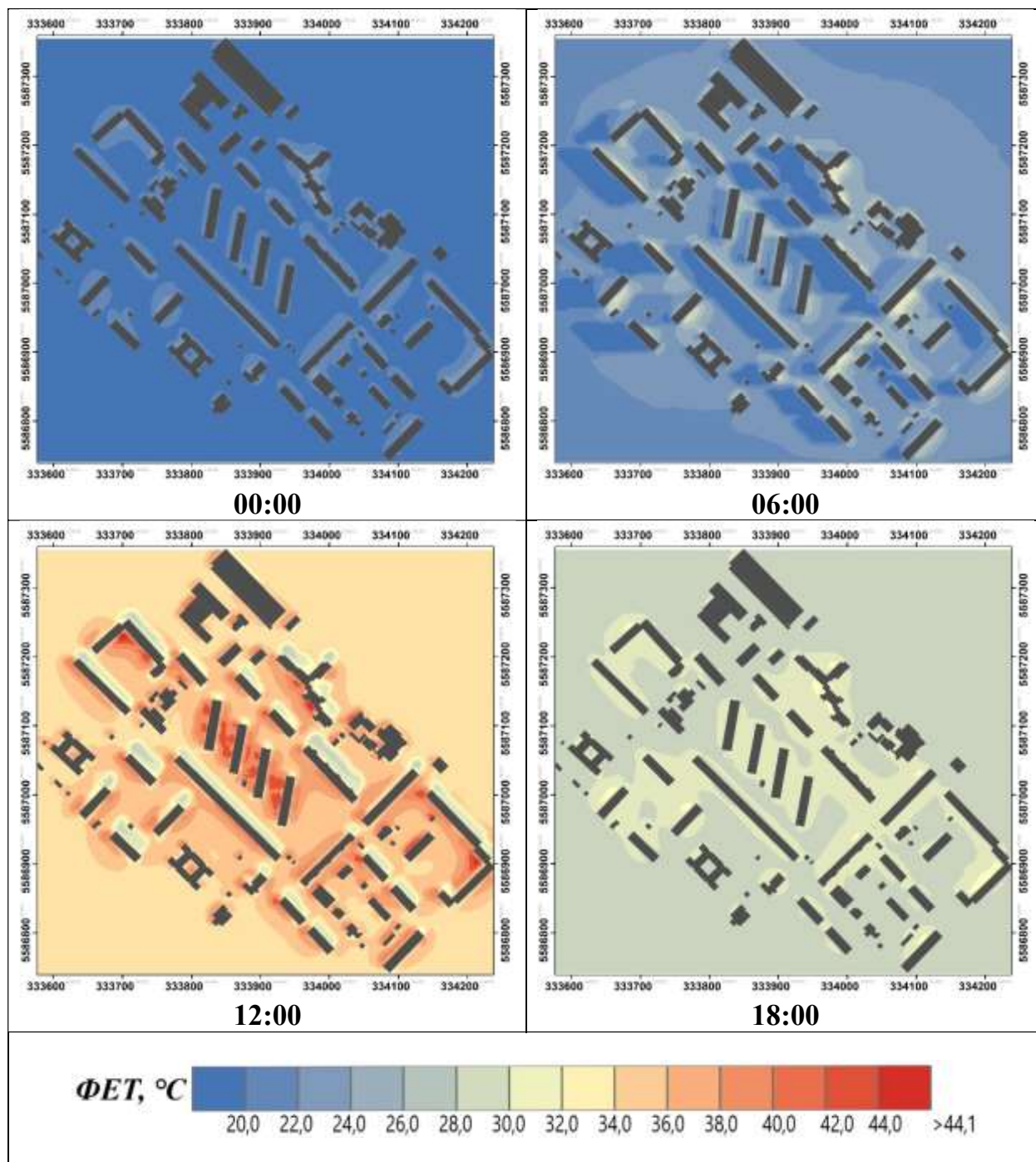
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



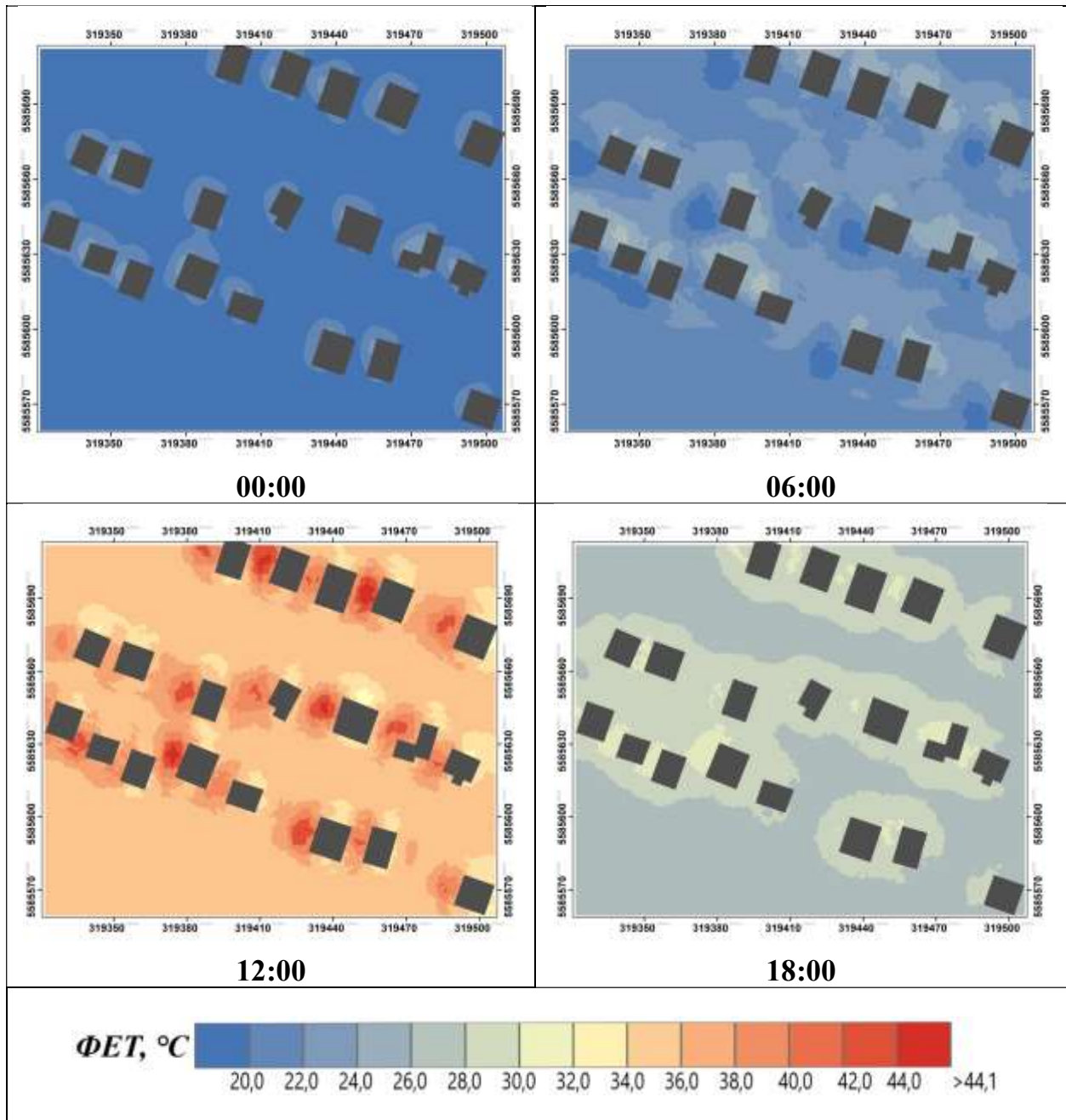
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



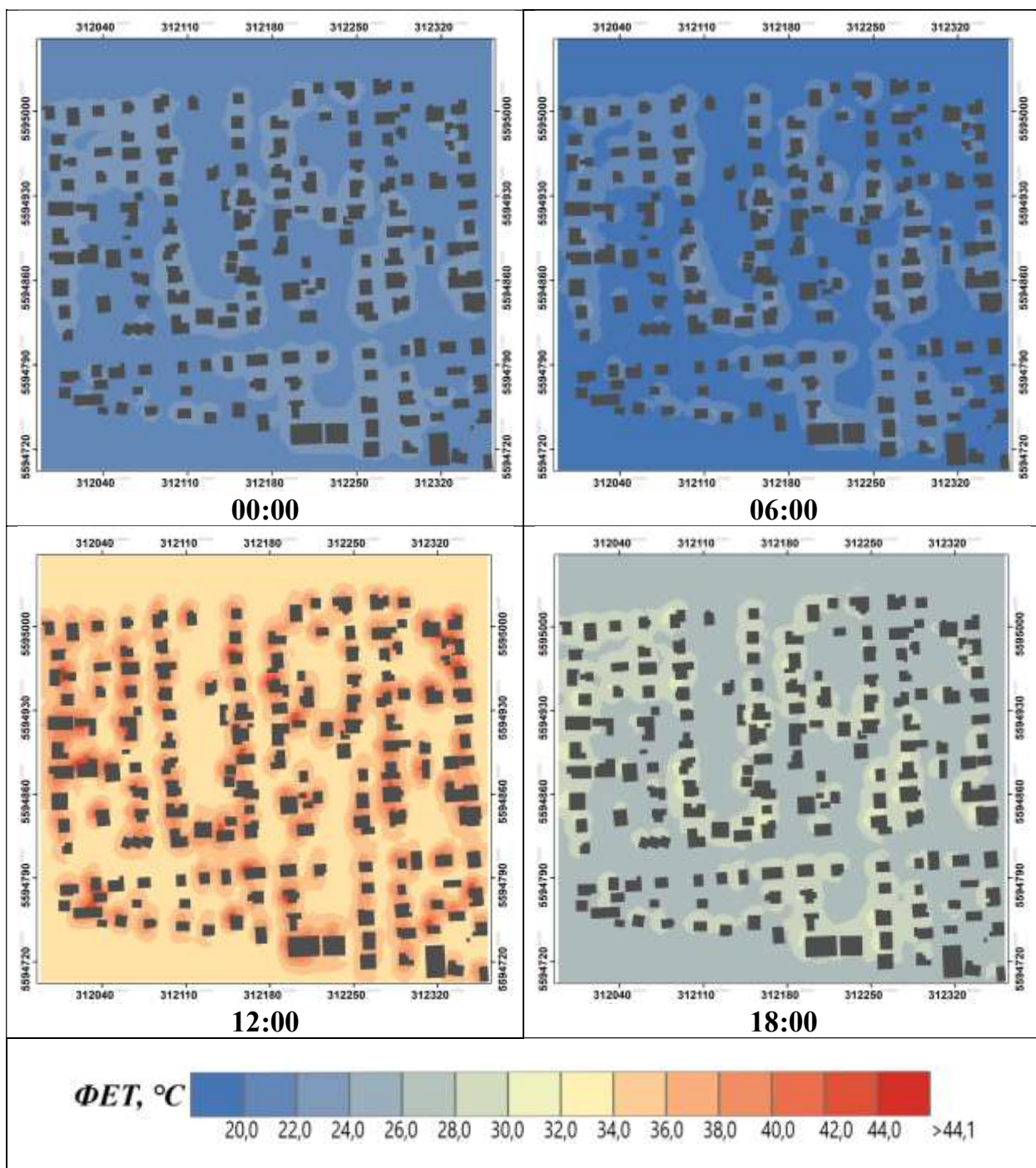
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Харківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



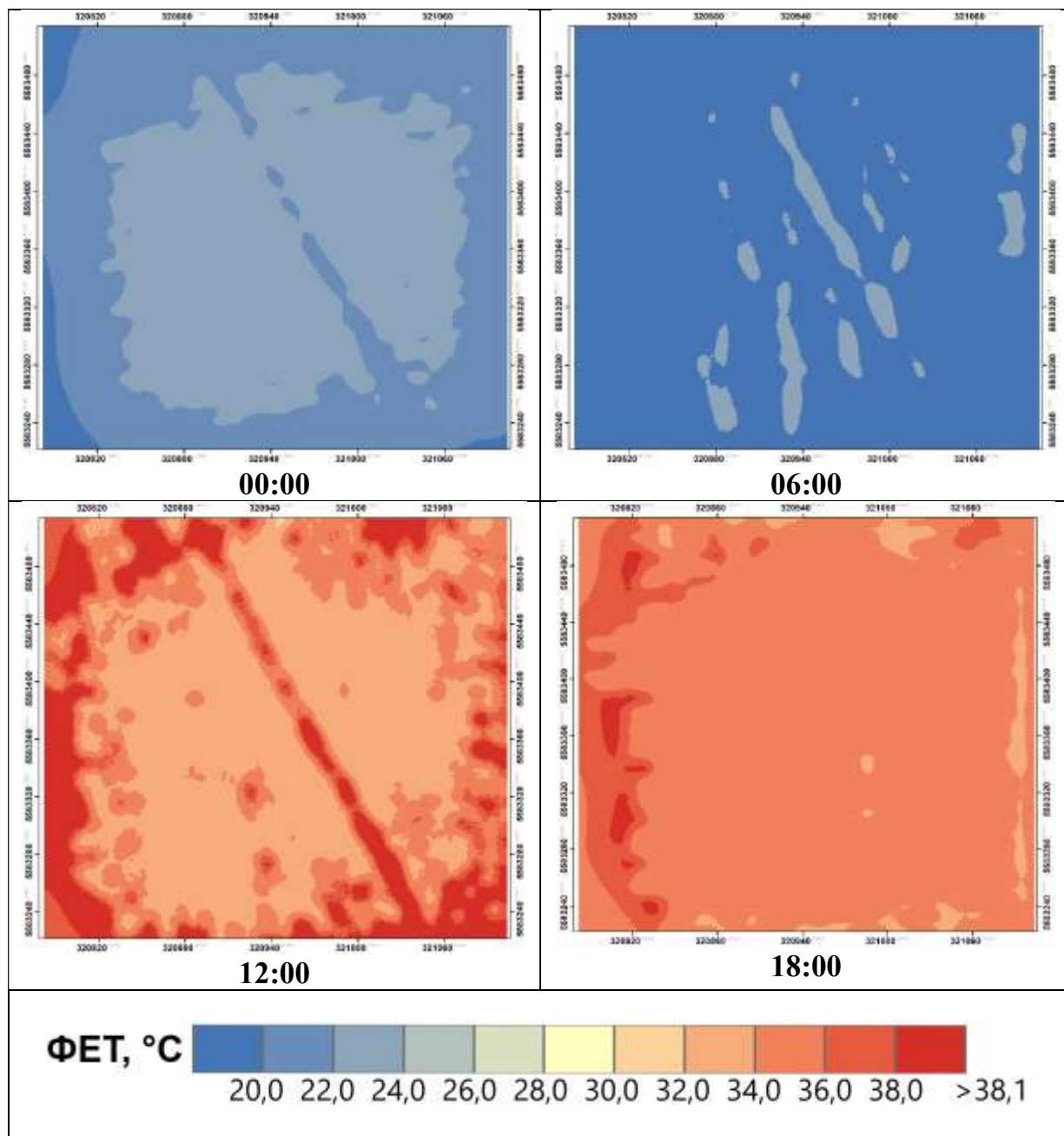
Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

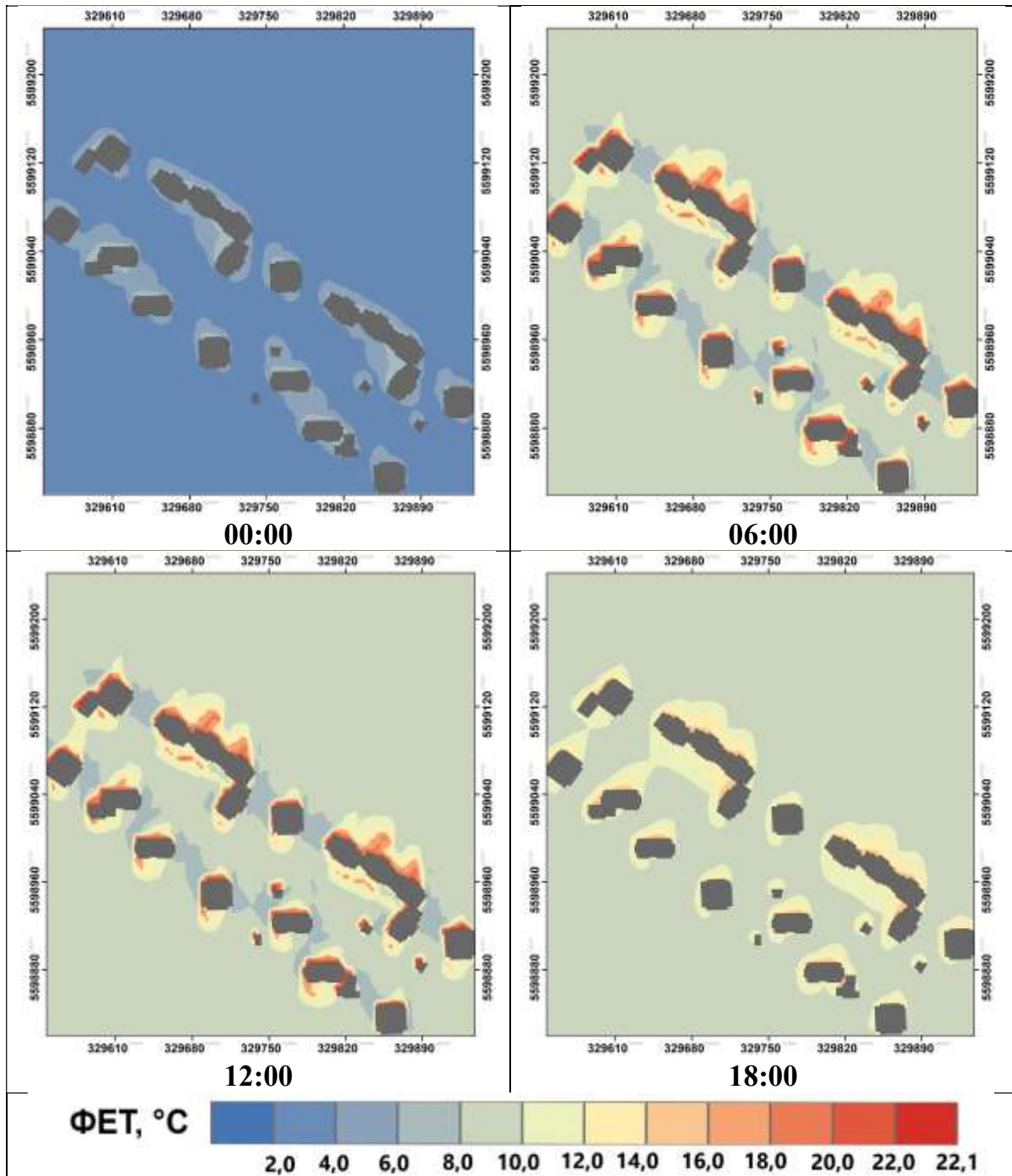


Результати моделювання значень ФЕТ за 23 липня 2015 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

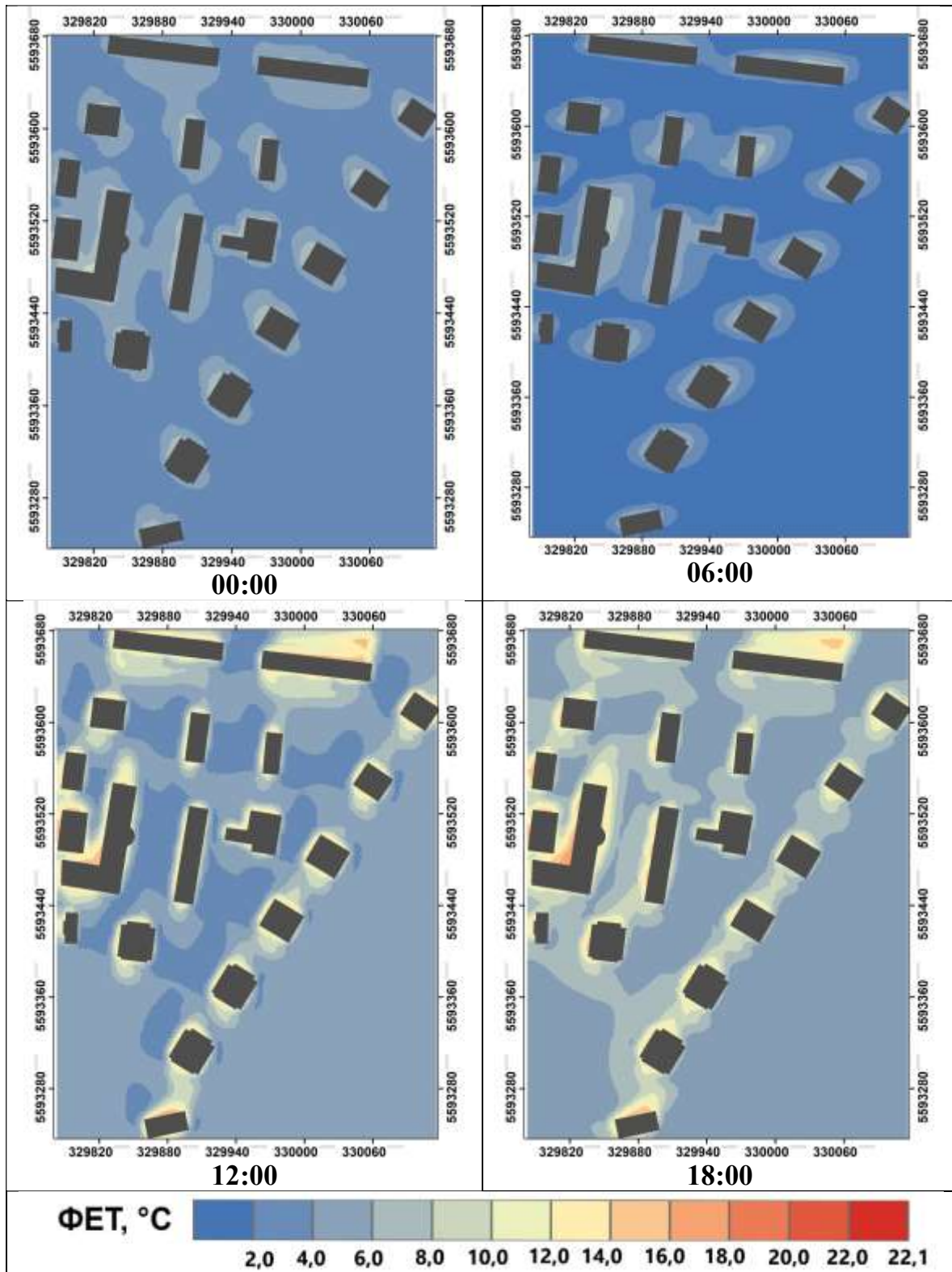


Додаток Ж

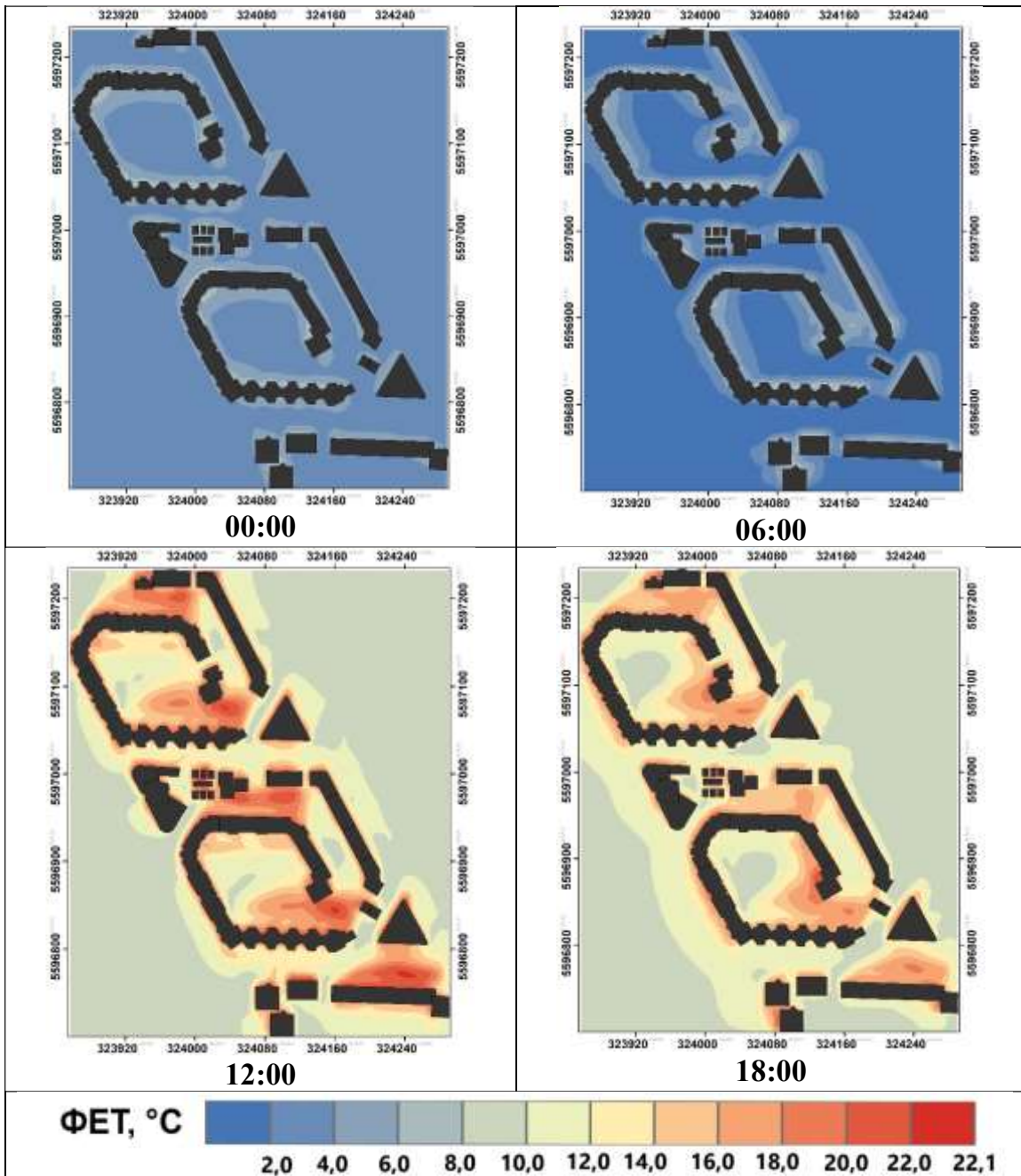
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 1
(ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



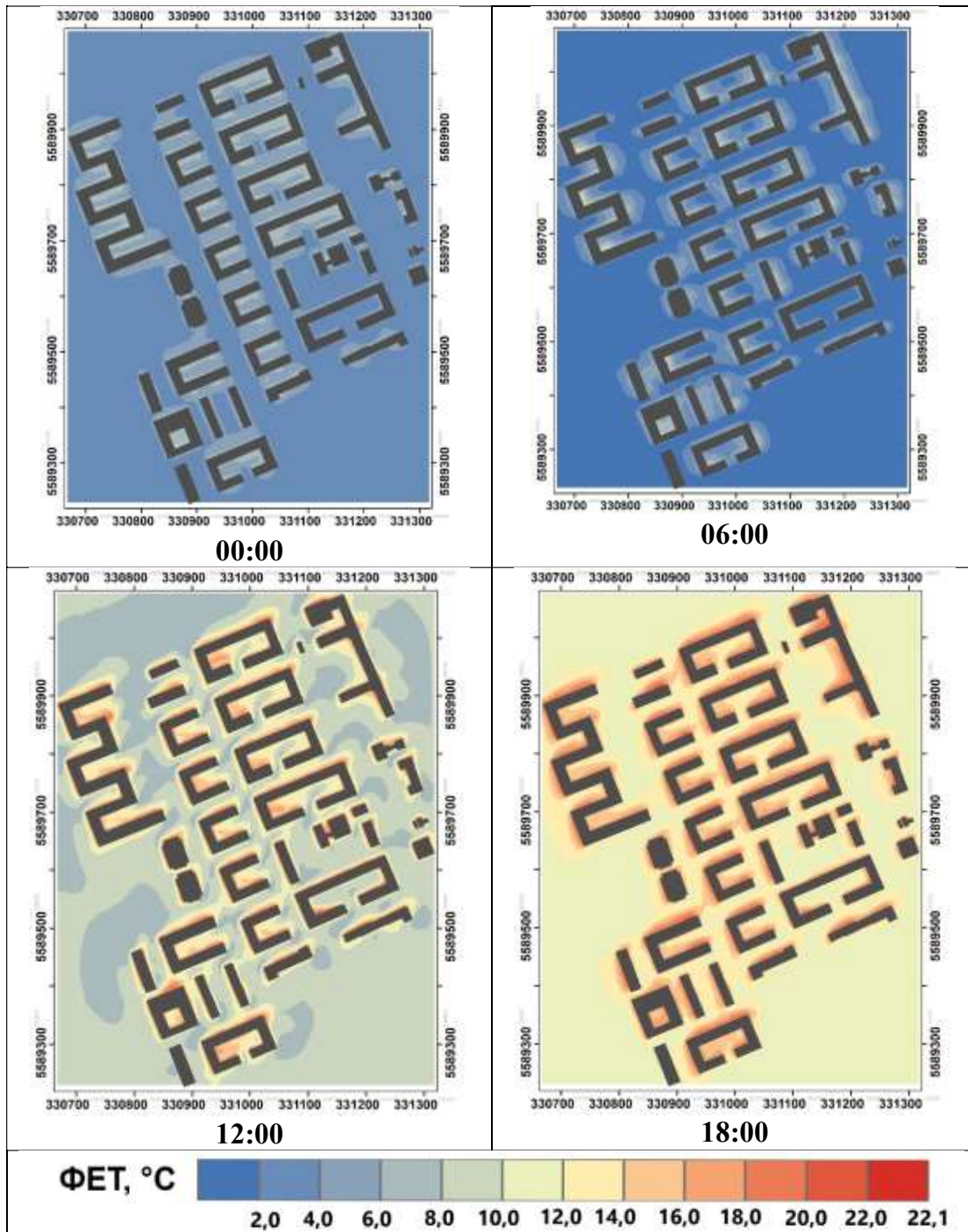
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



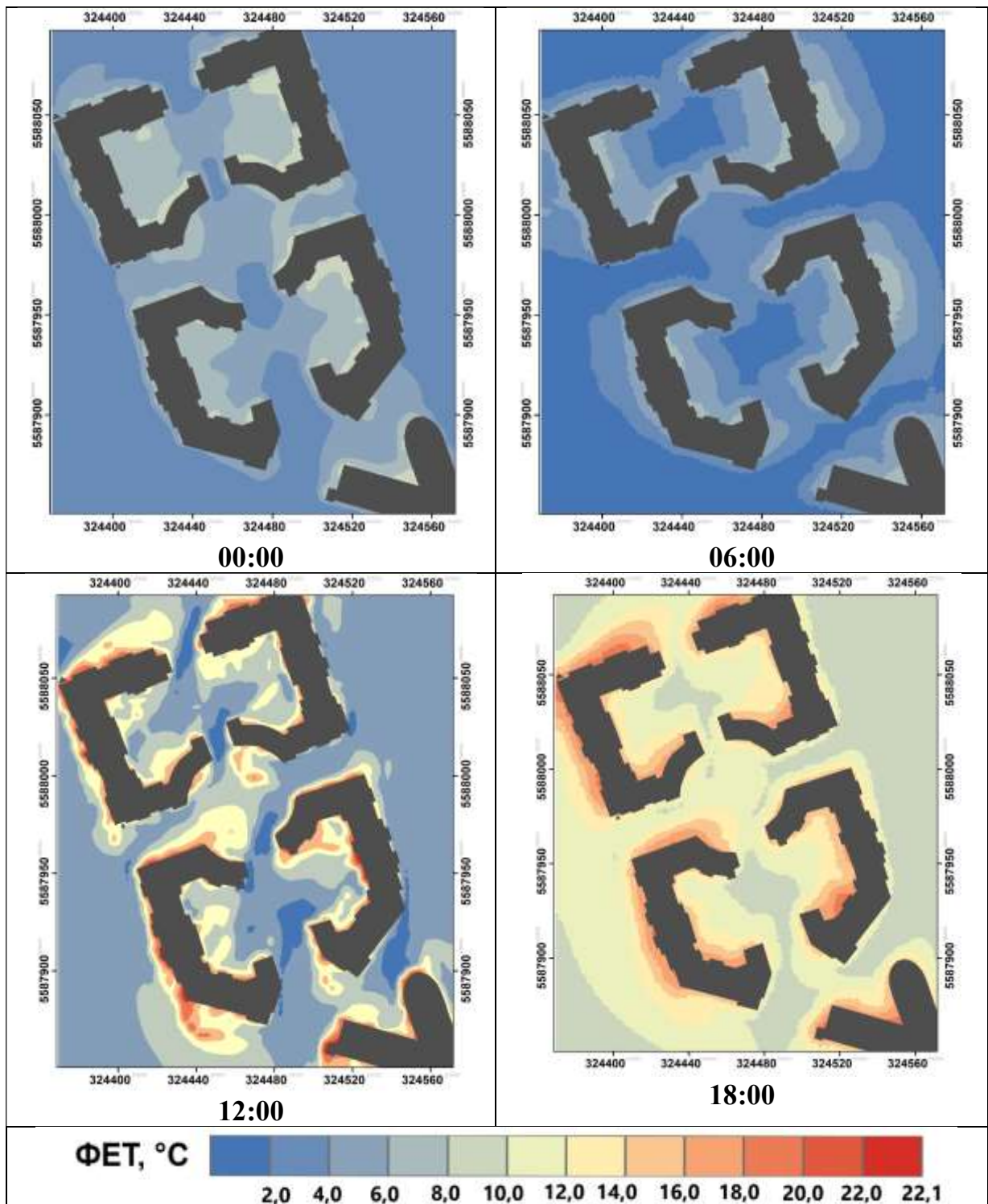
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



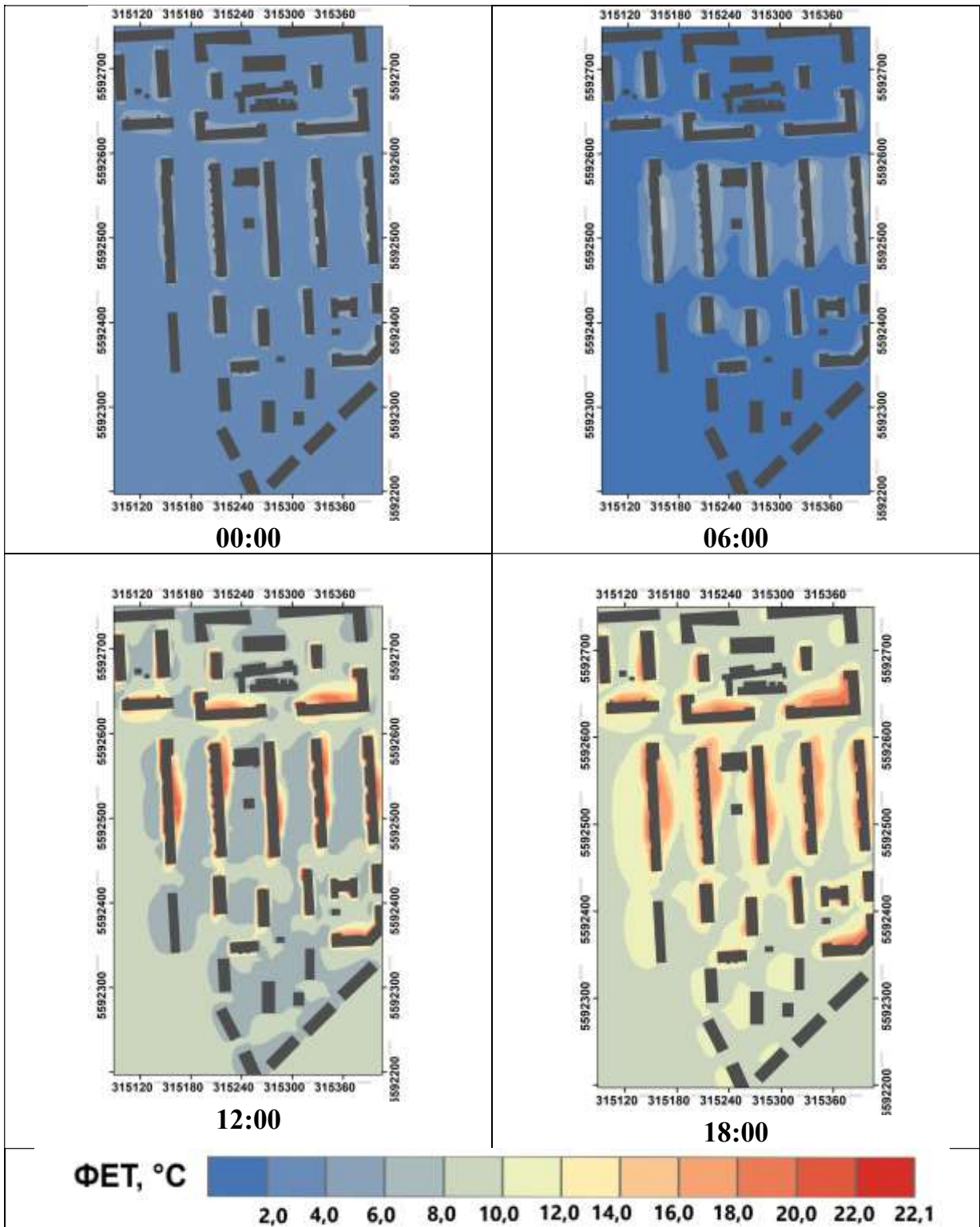
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



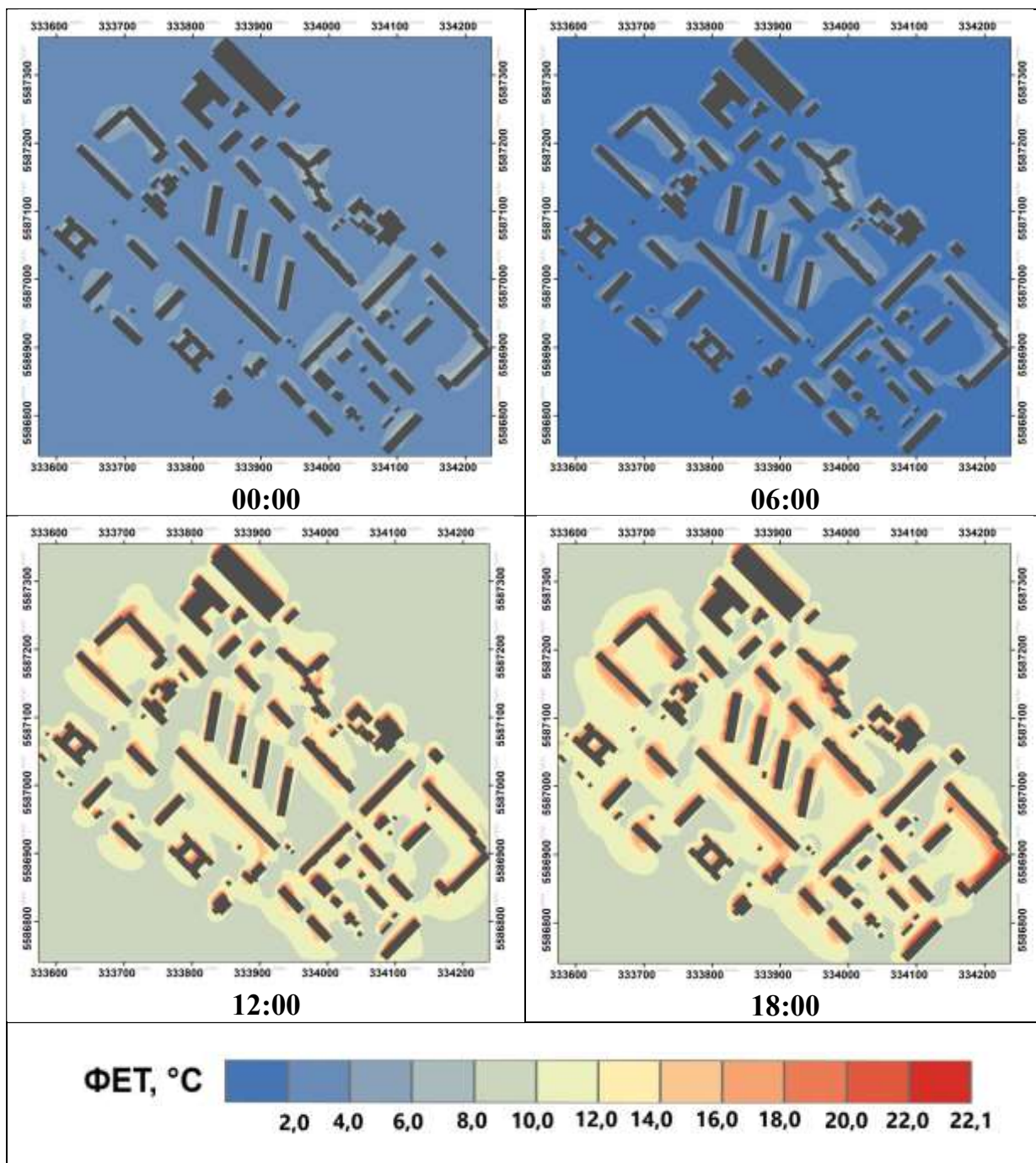
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



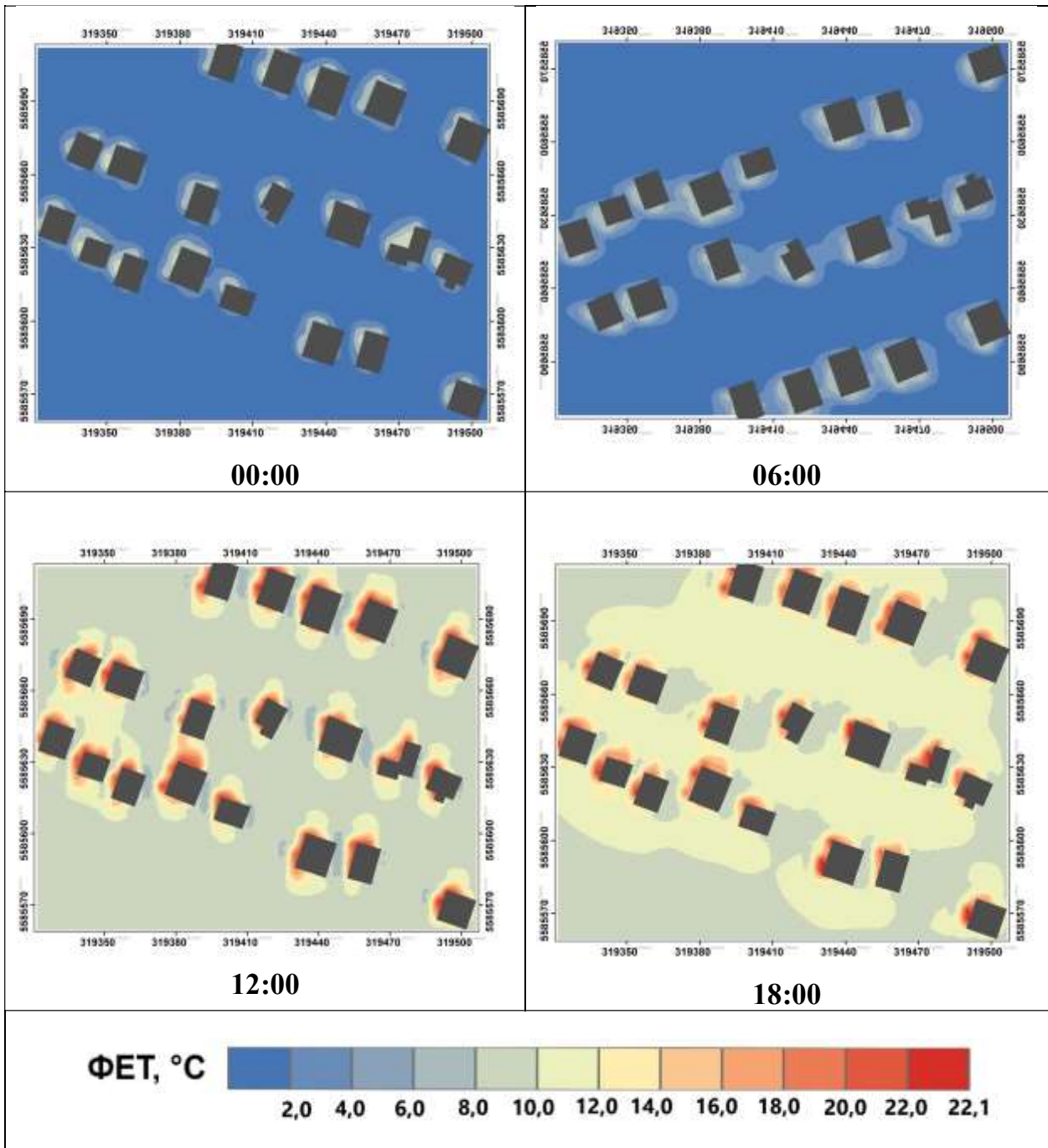
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



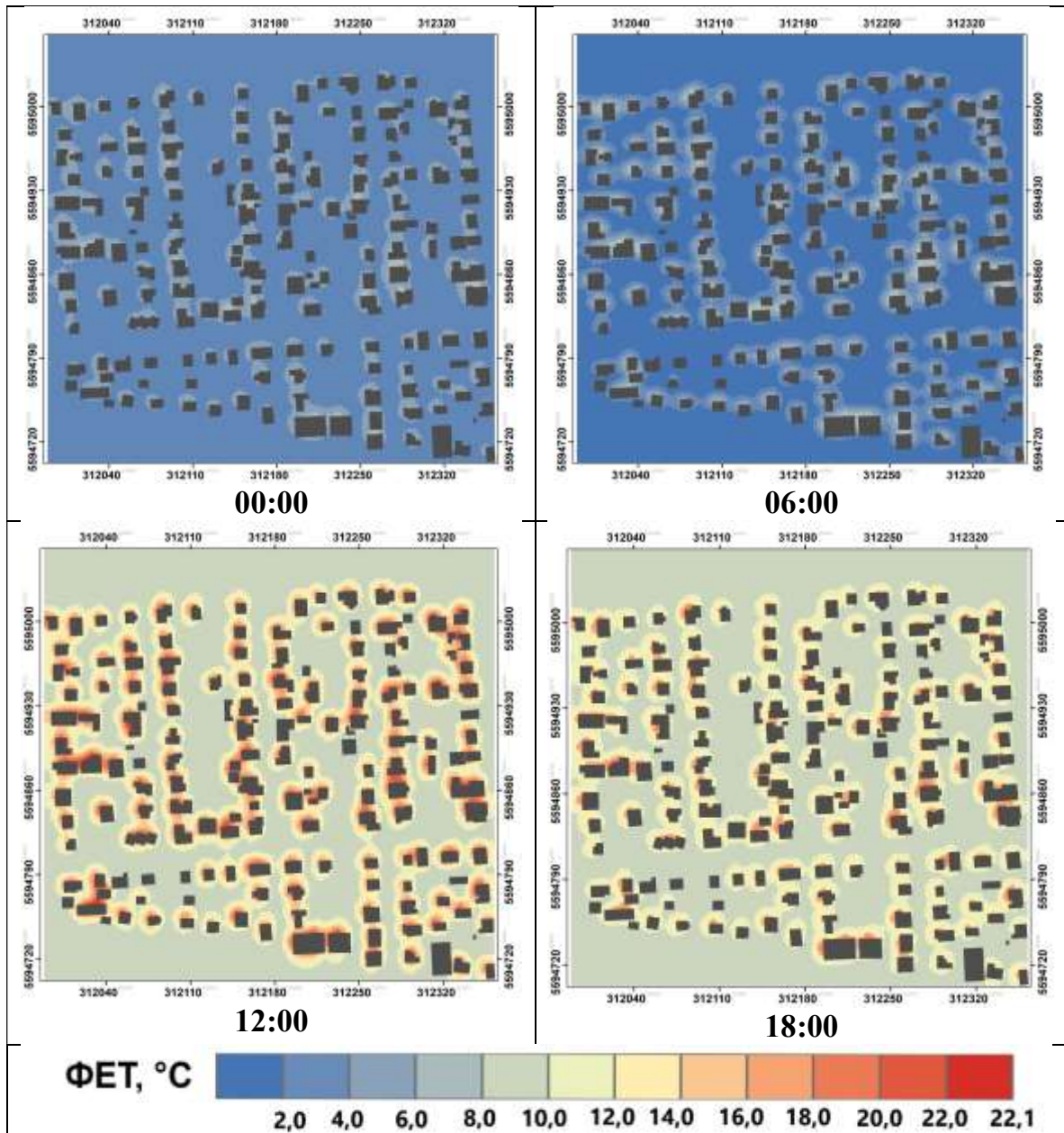
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Жарківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



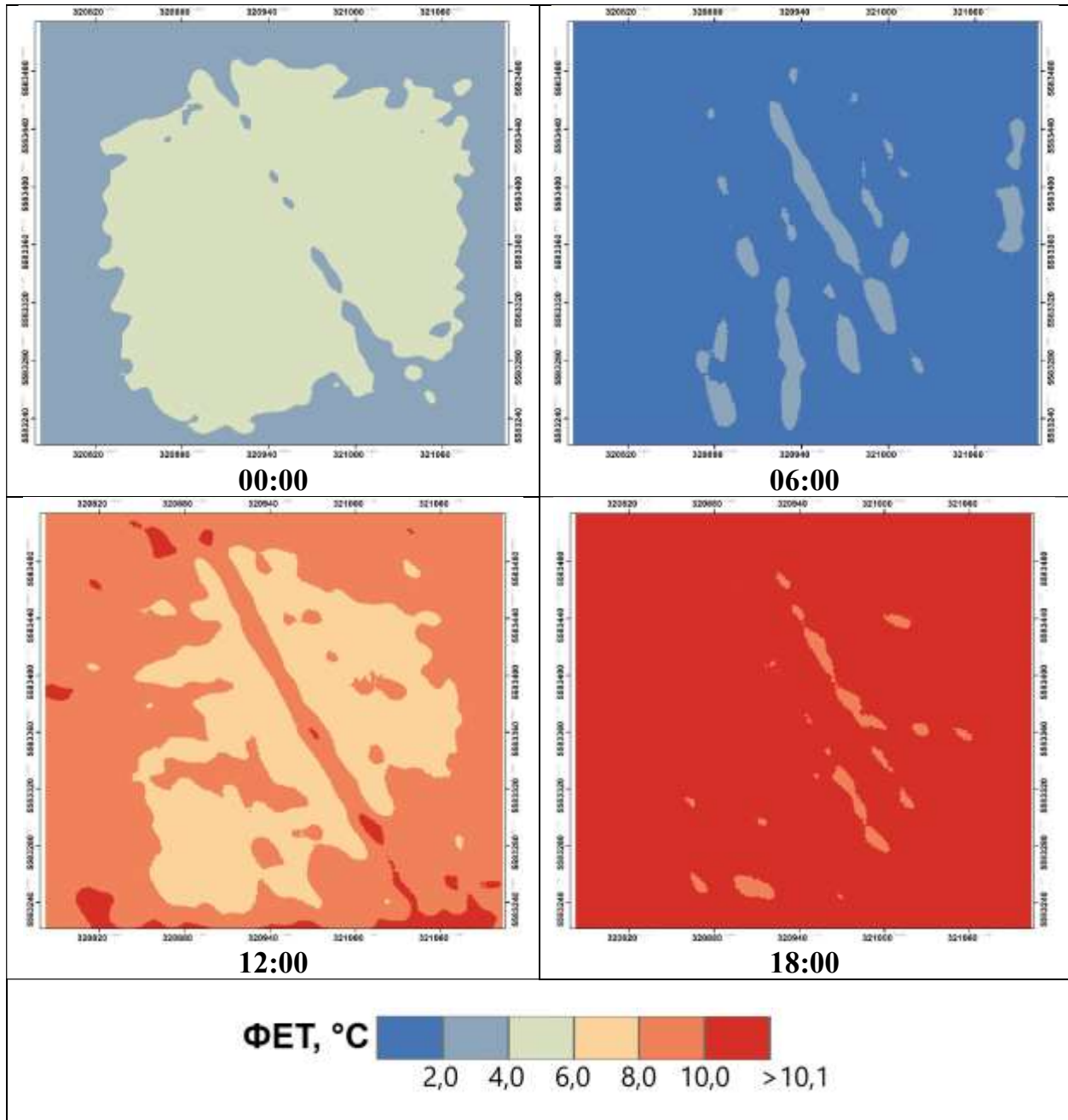
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

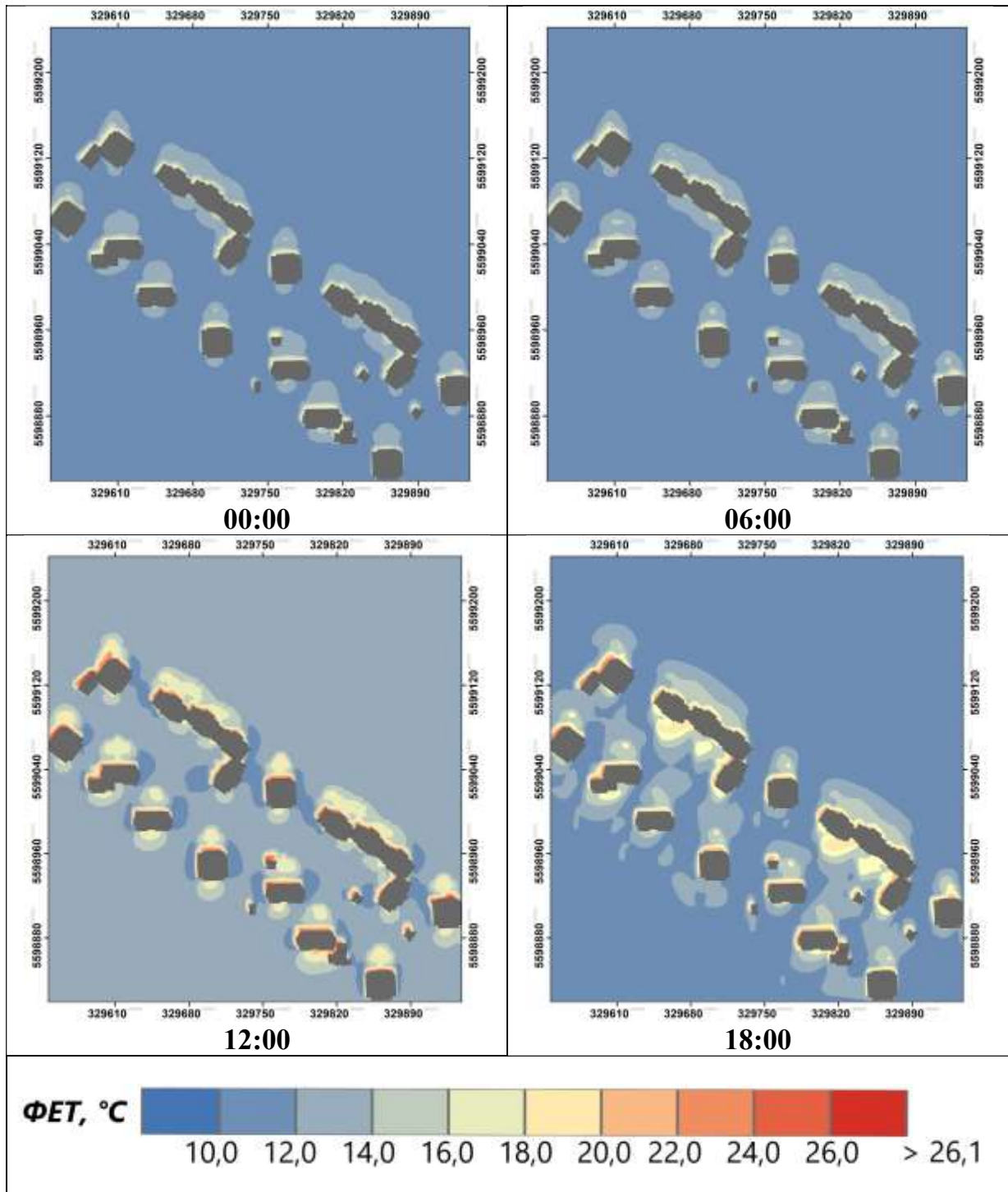


Результати моделювання значень ФЕТ за 2 червня 2020 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

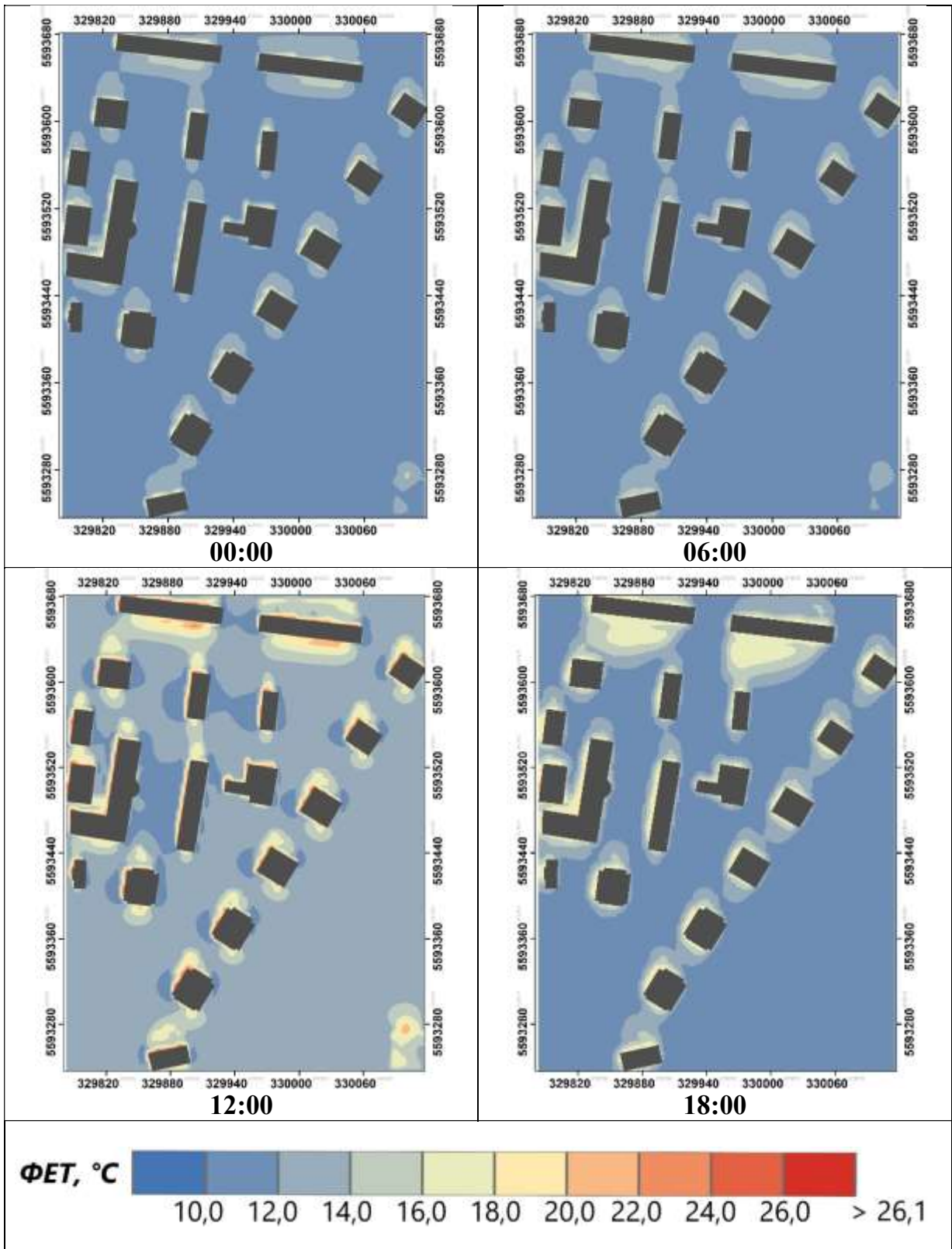


Додаток 3

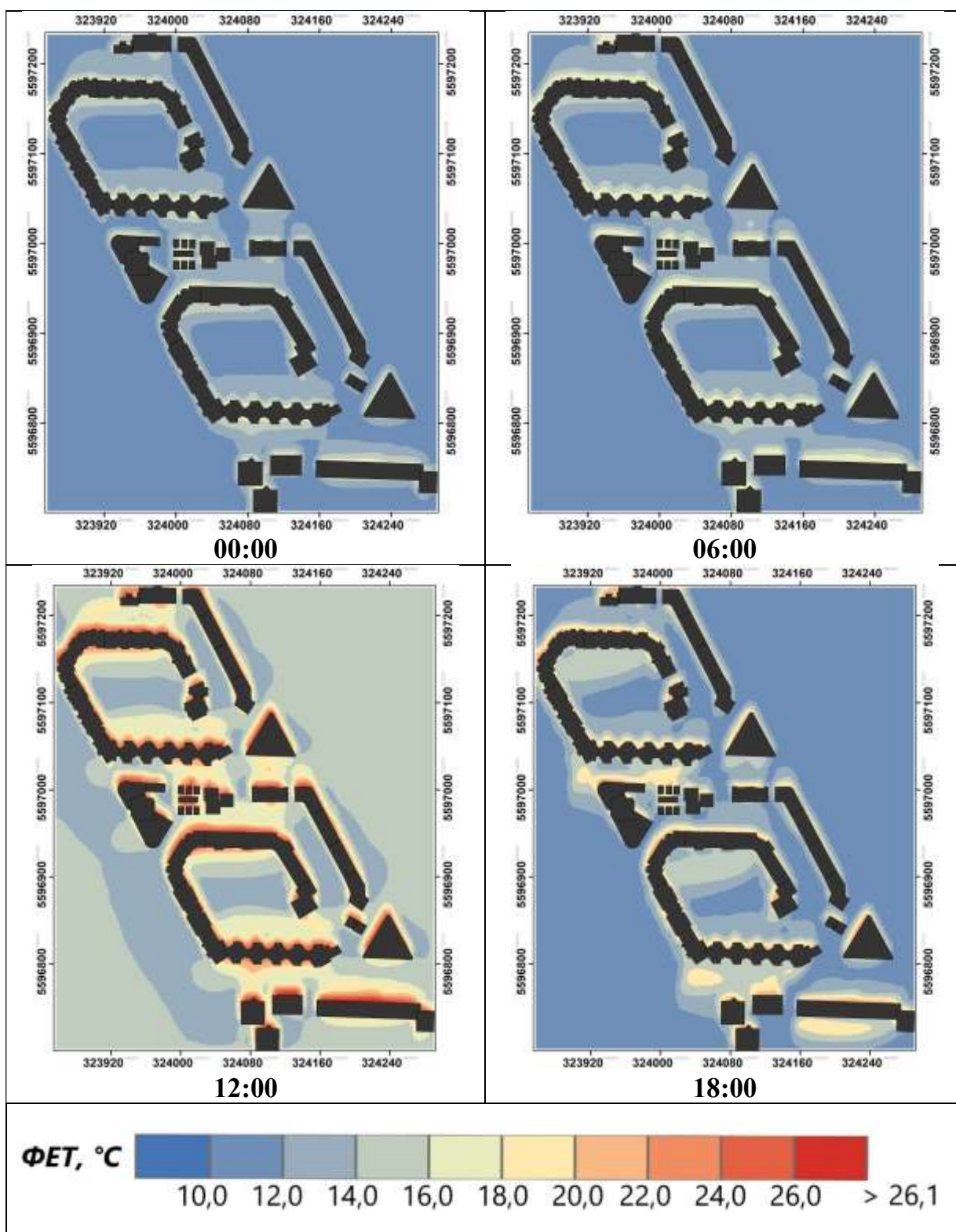
Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 1 (ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



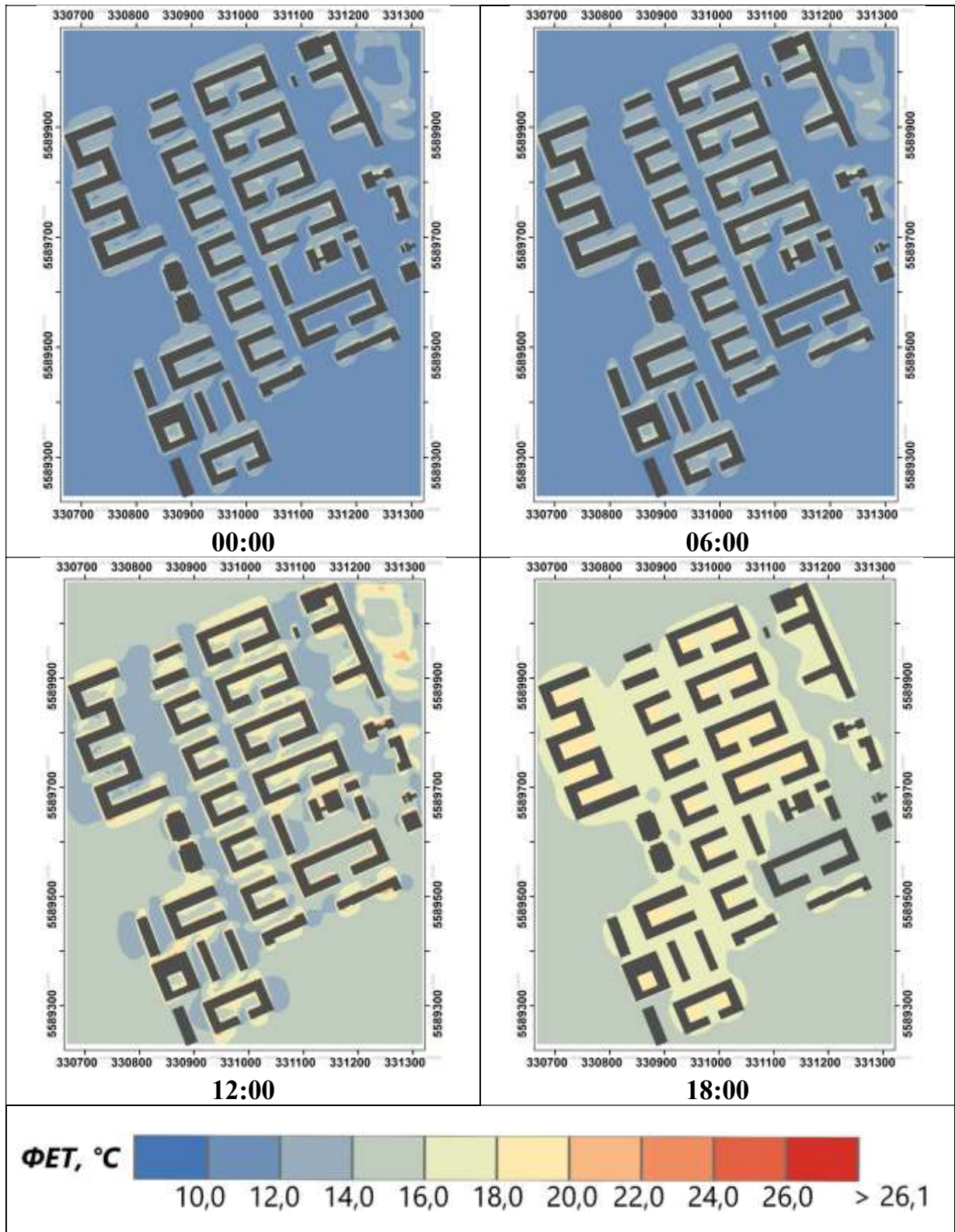
Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



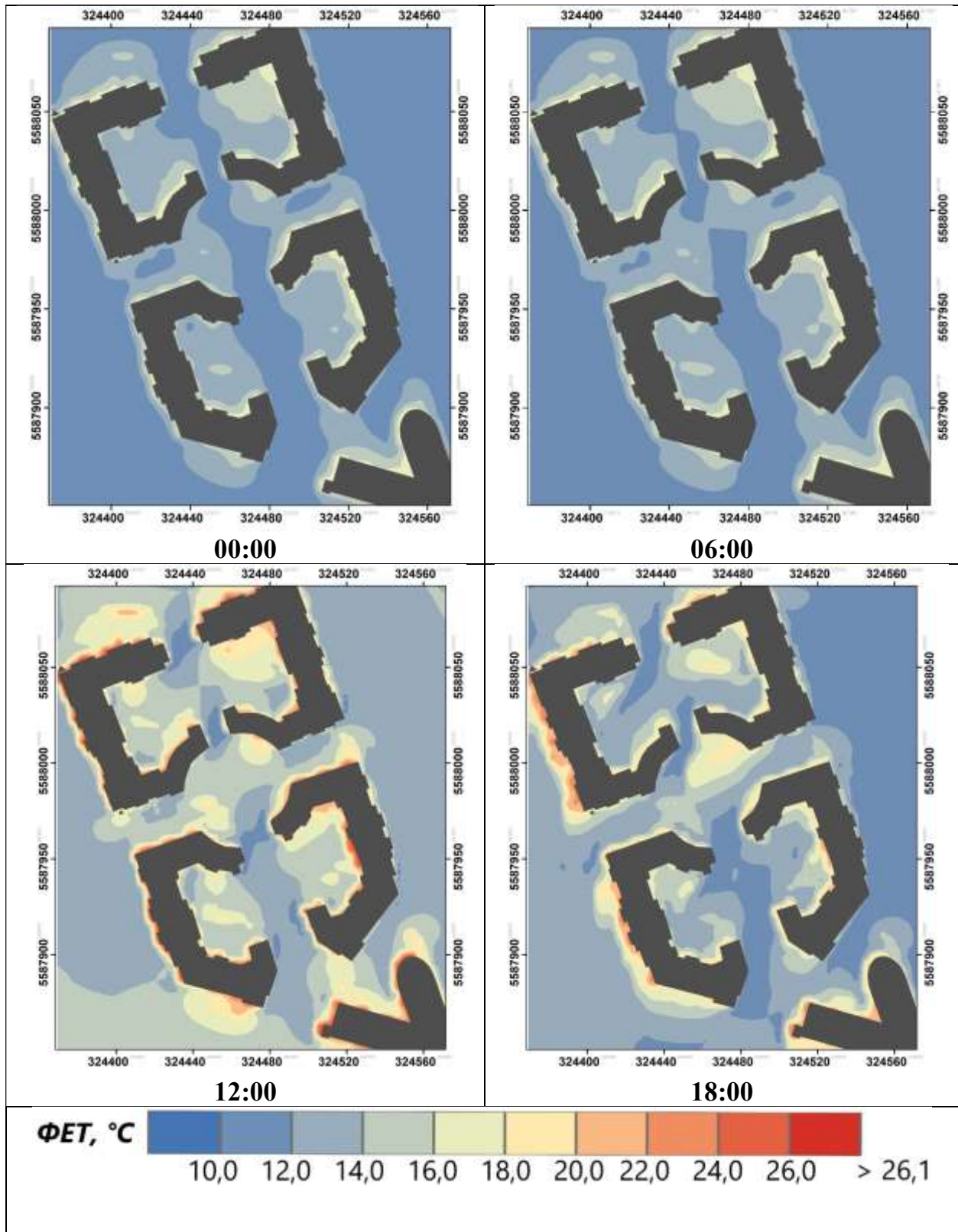
Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



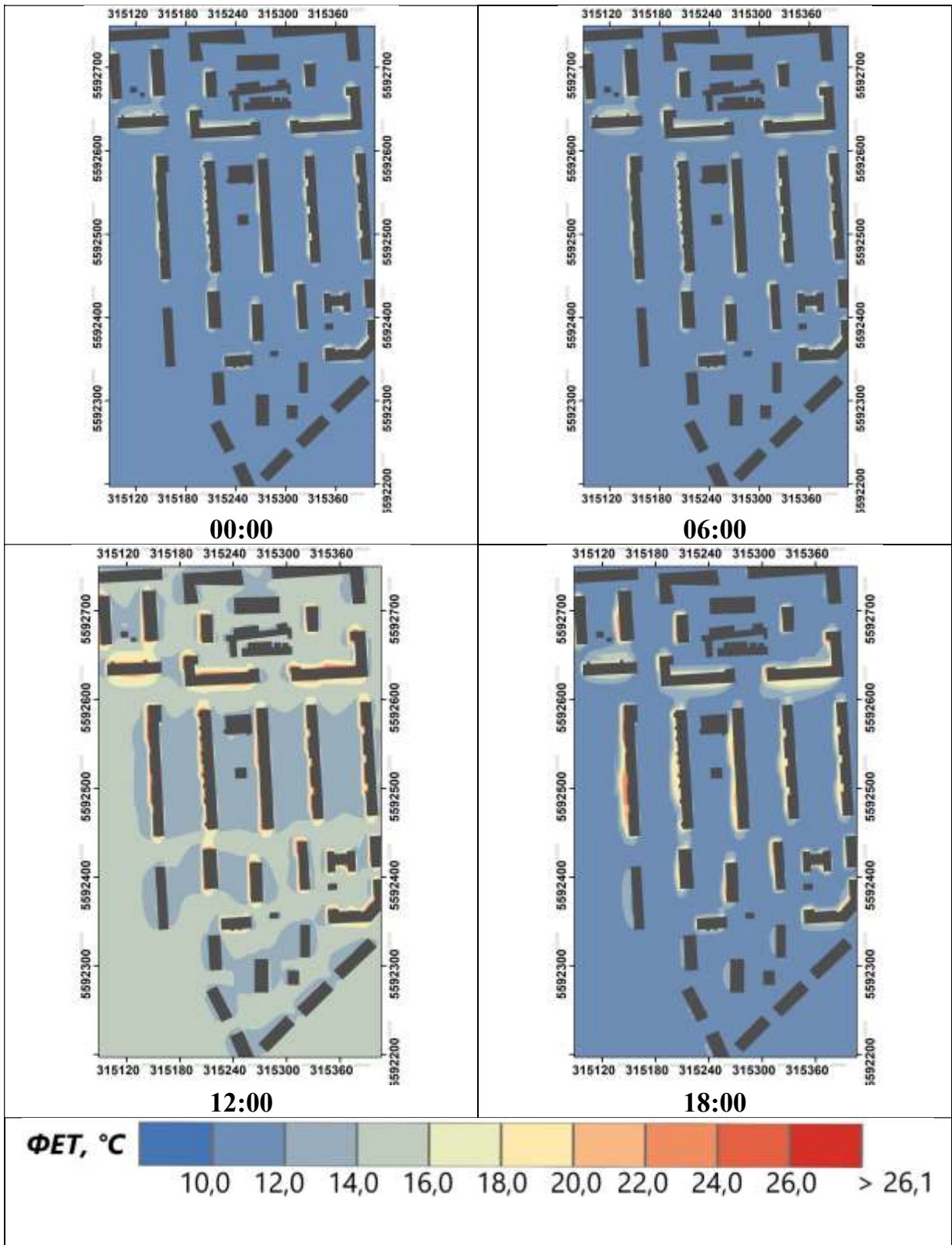
Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

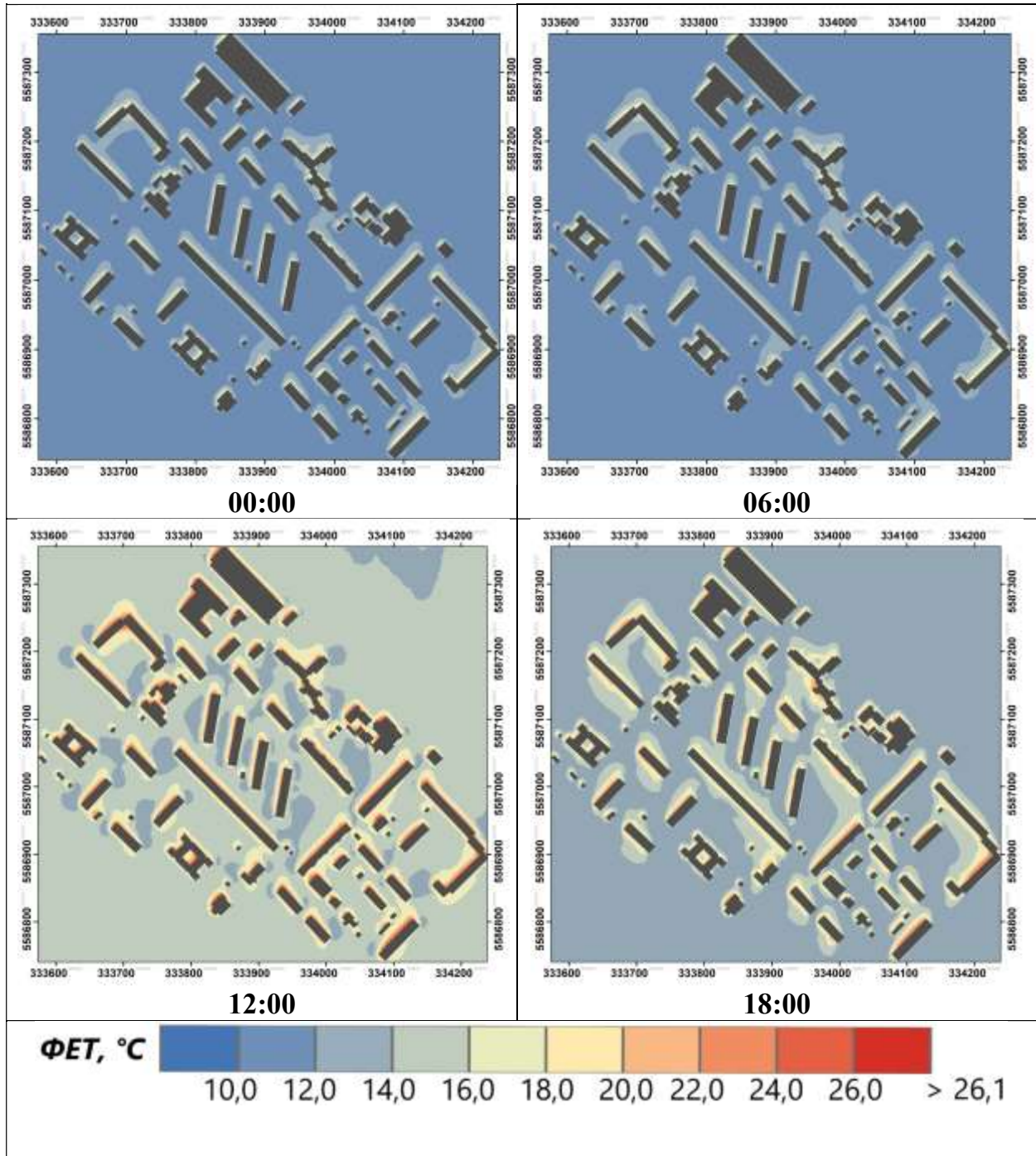


Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

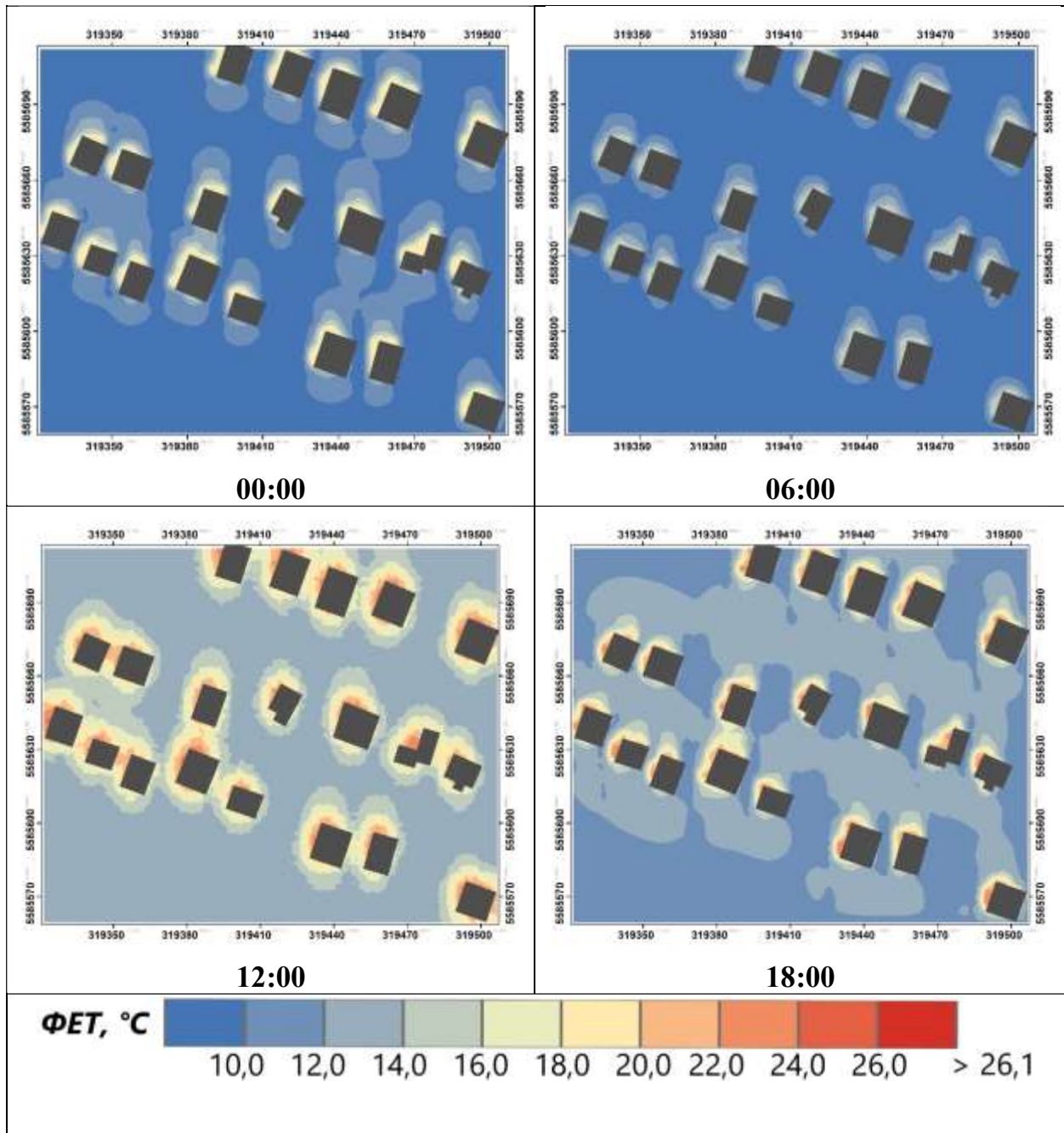


Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Зарківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за

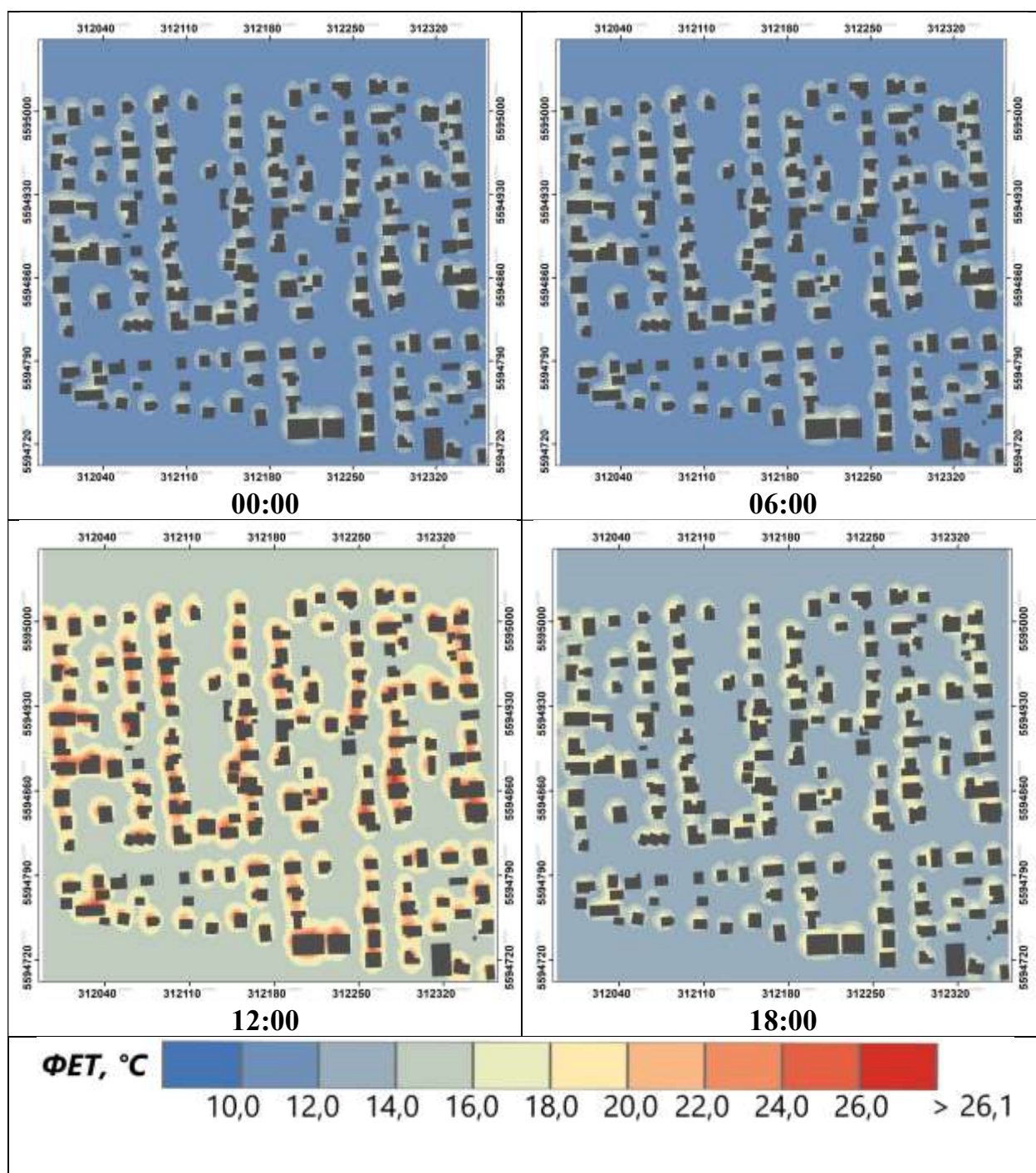
СЛЧ



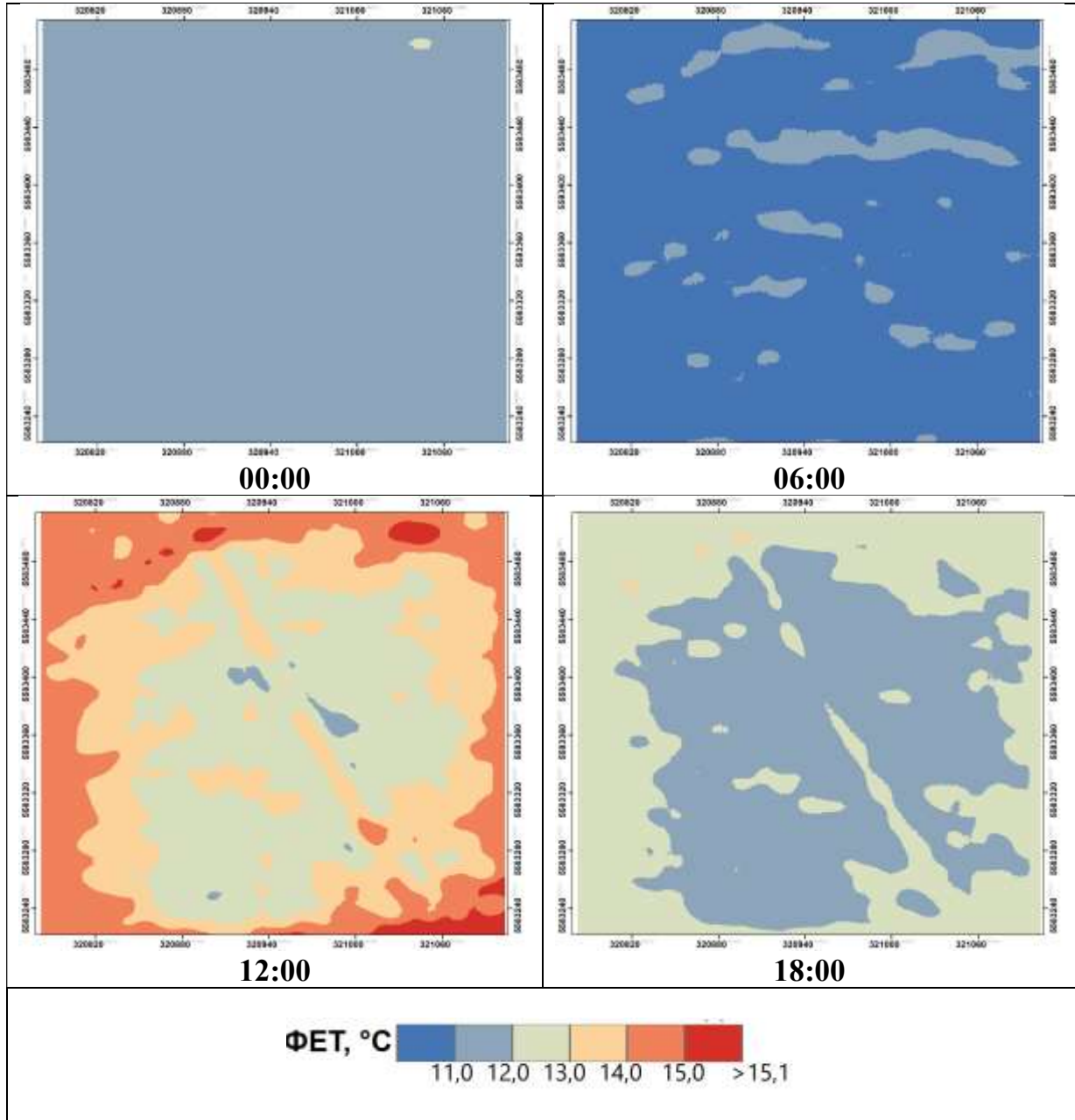
Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

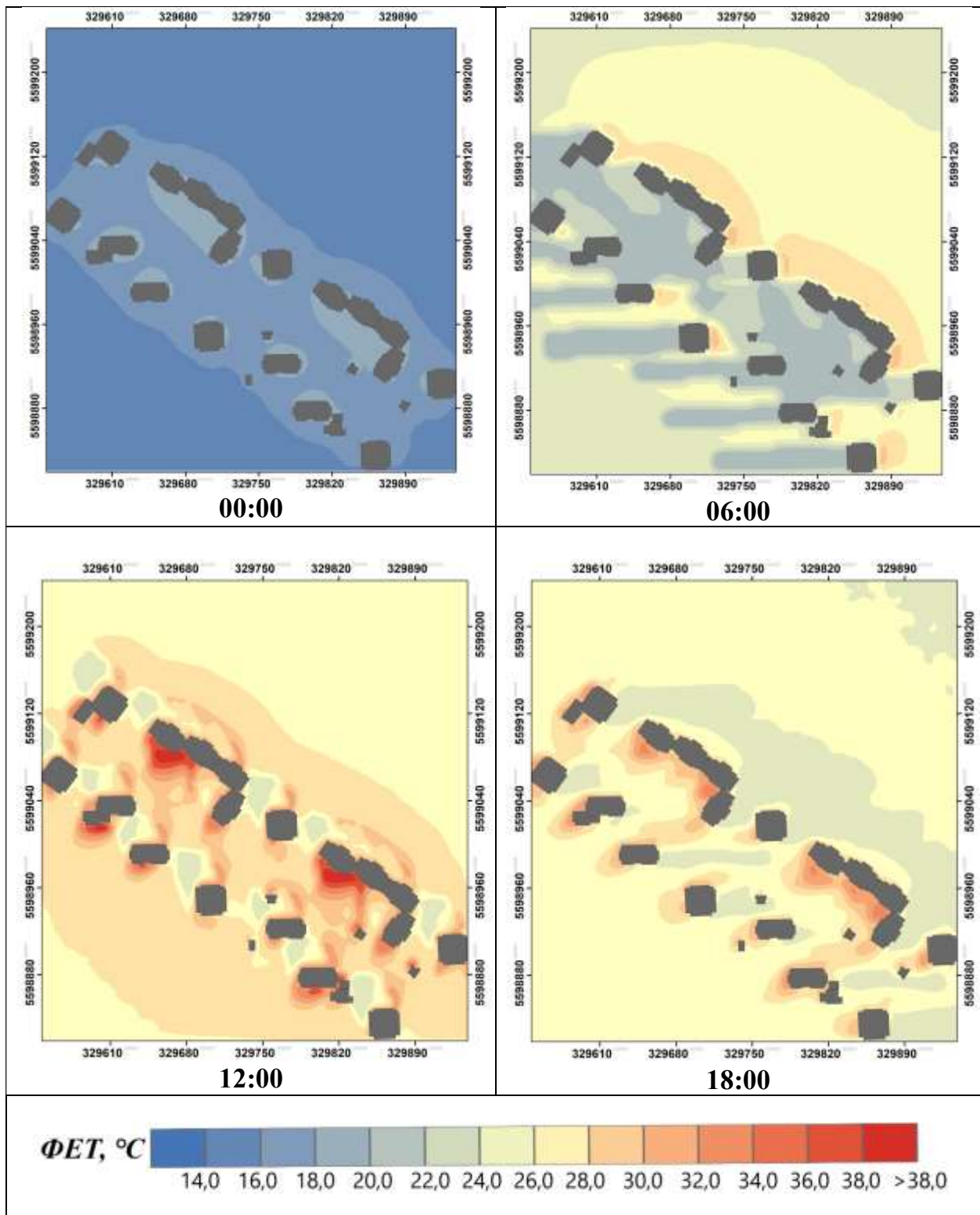


Результати моделювання значень ФЕТ за 16 серпня 2019 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

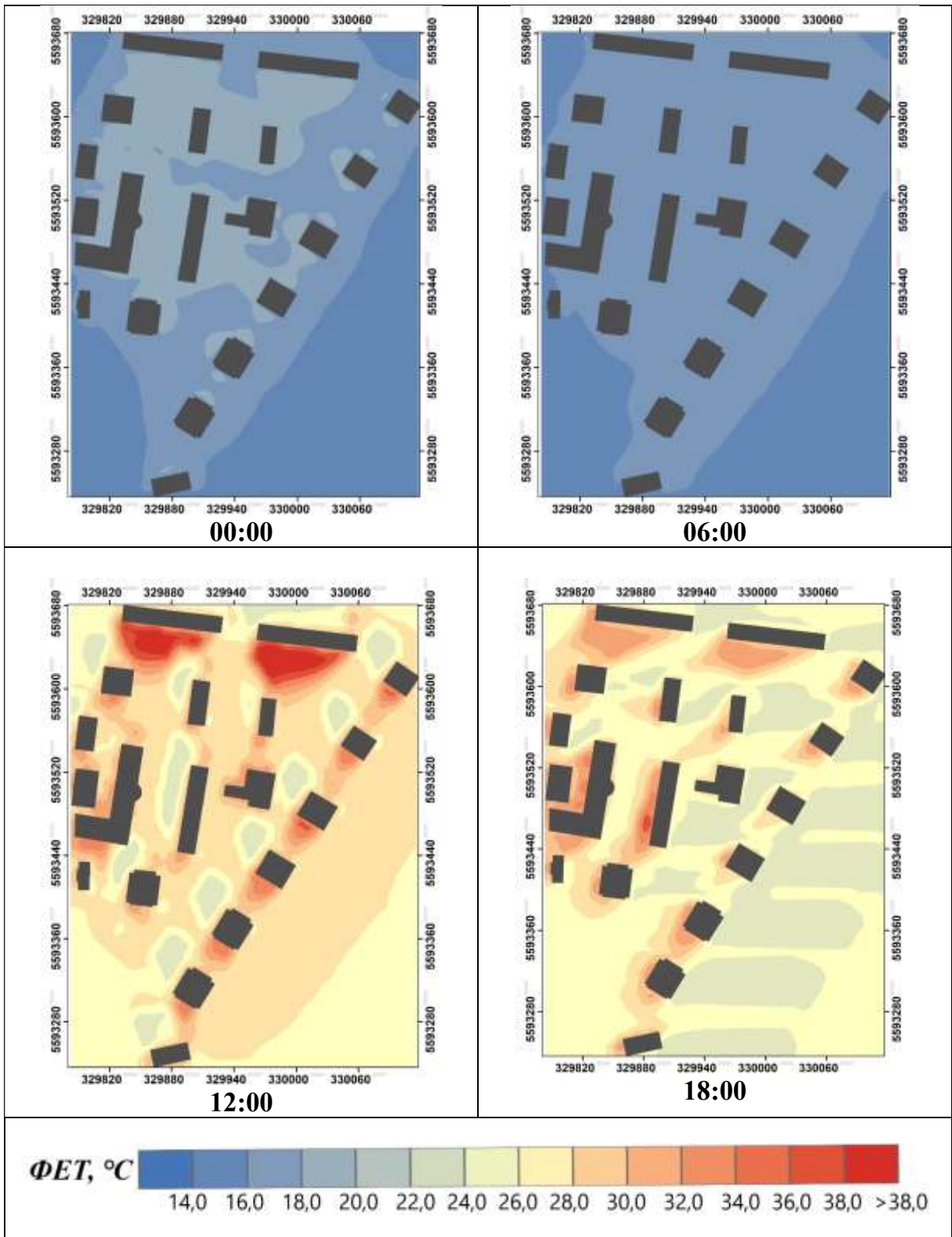


Додаток І

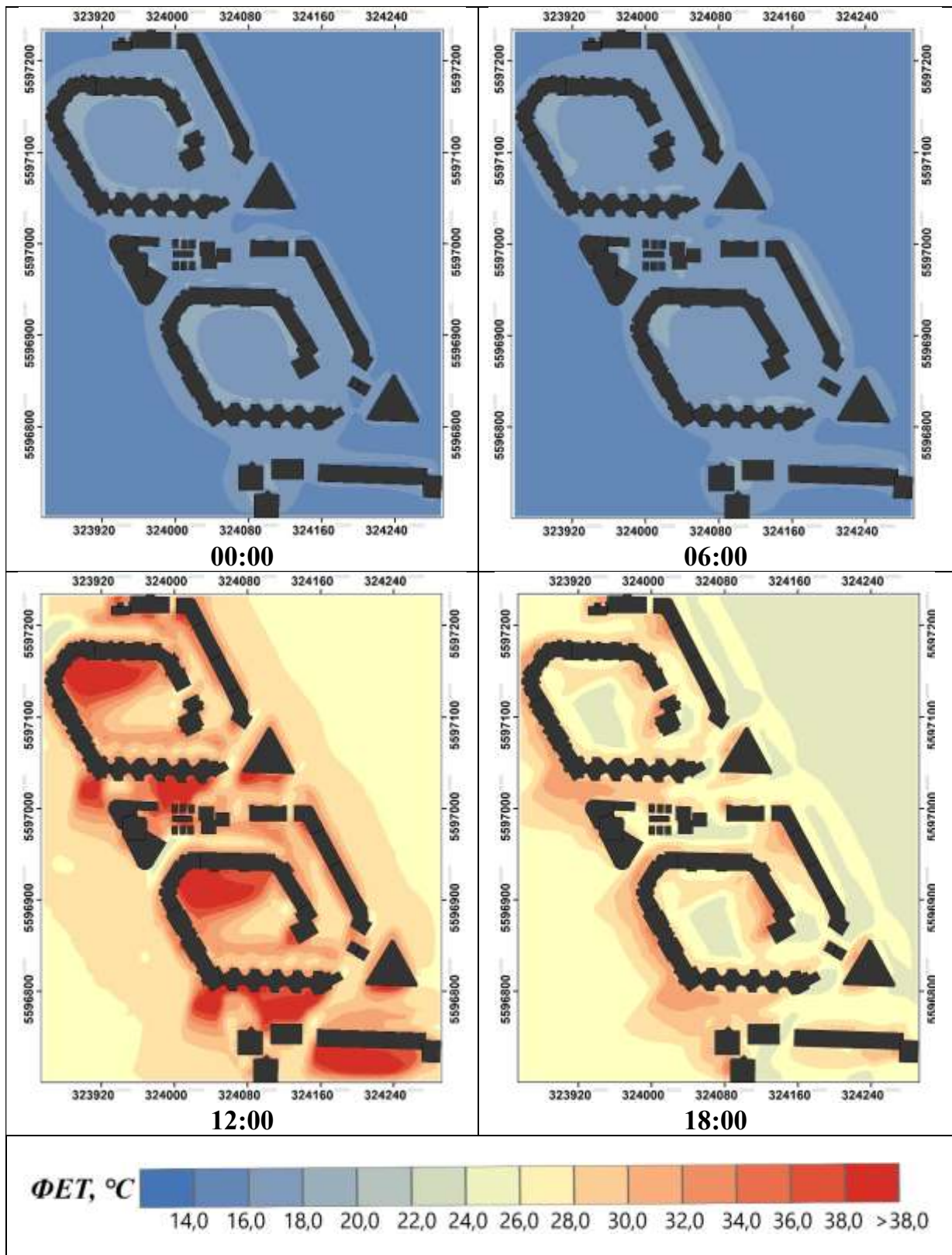
Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 1
(ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



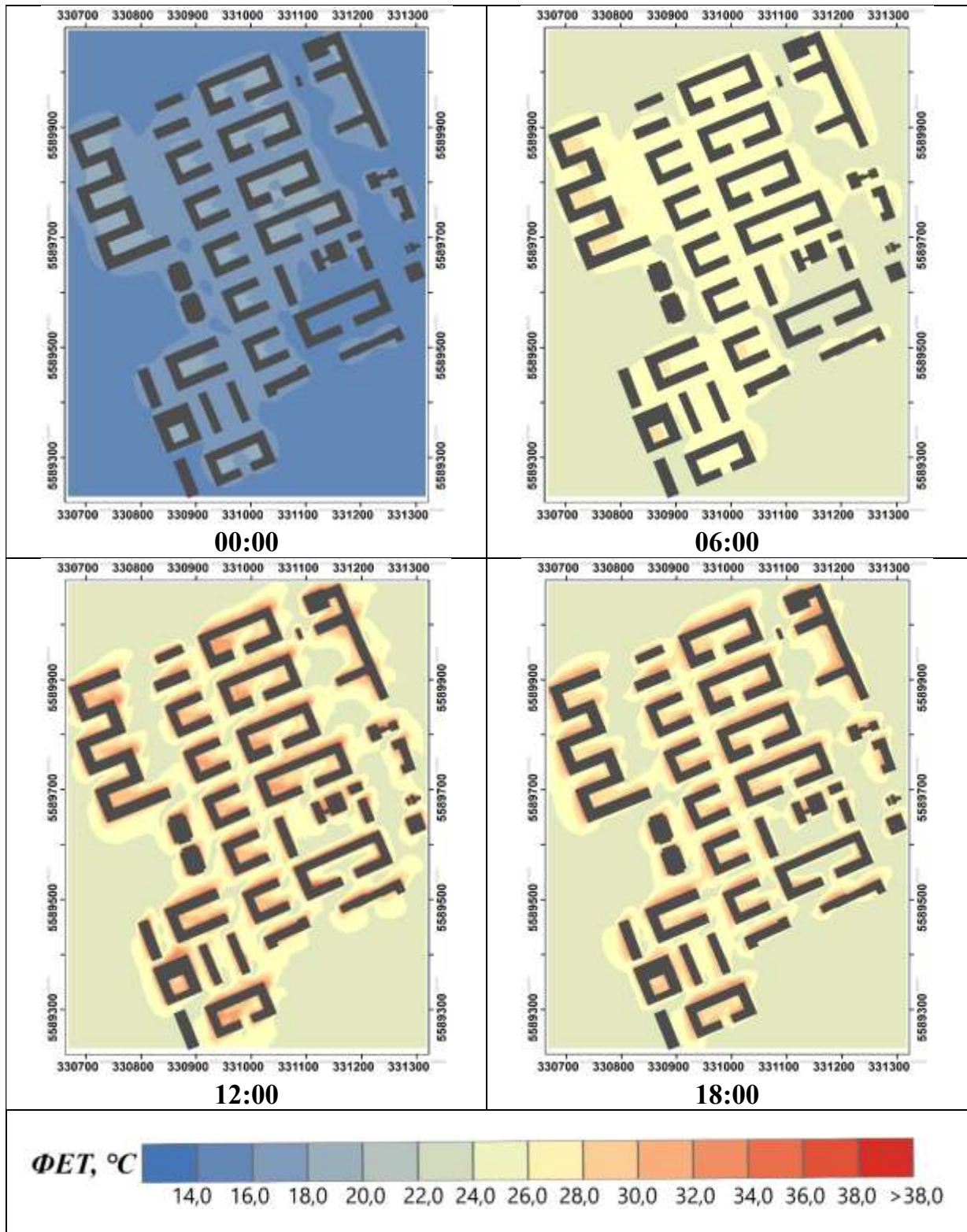
Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



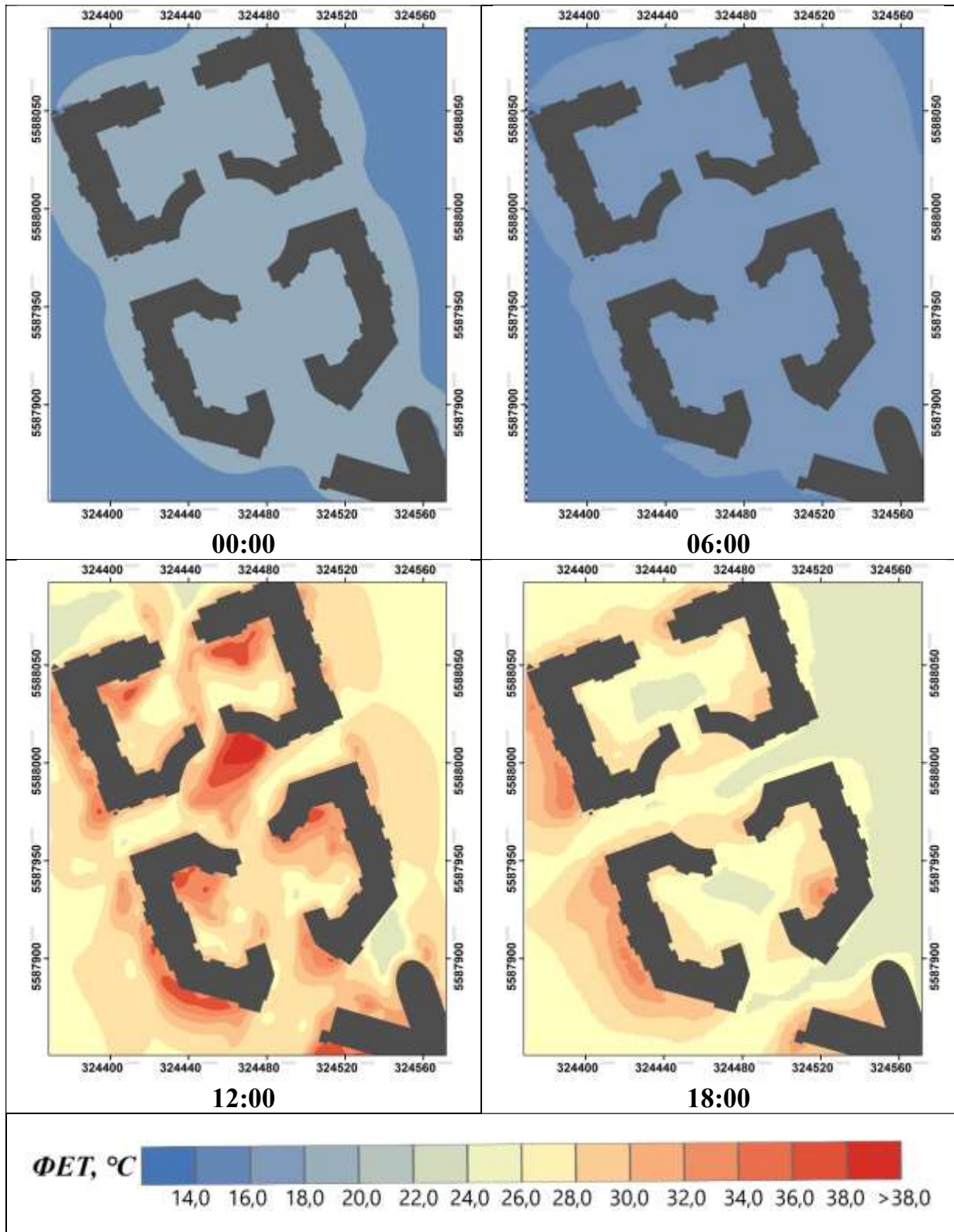
Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



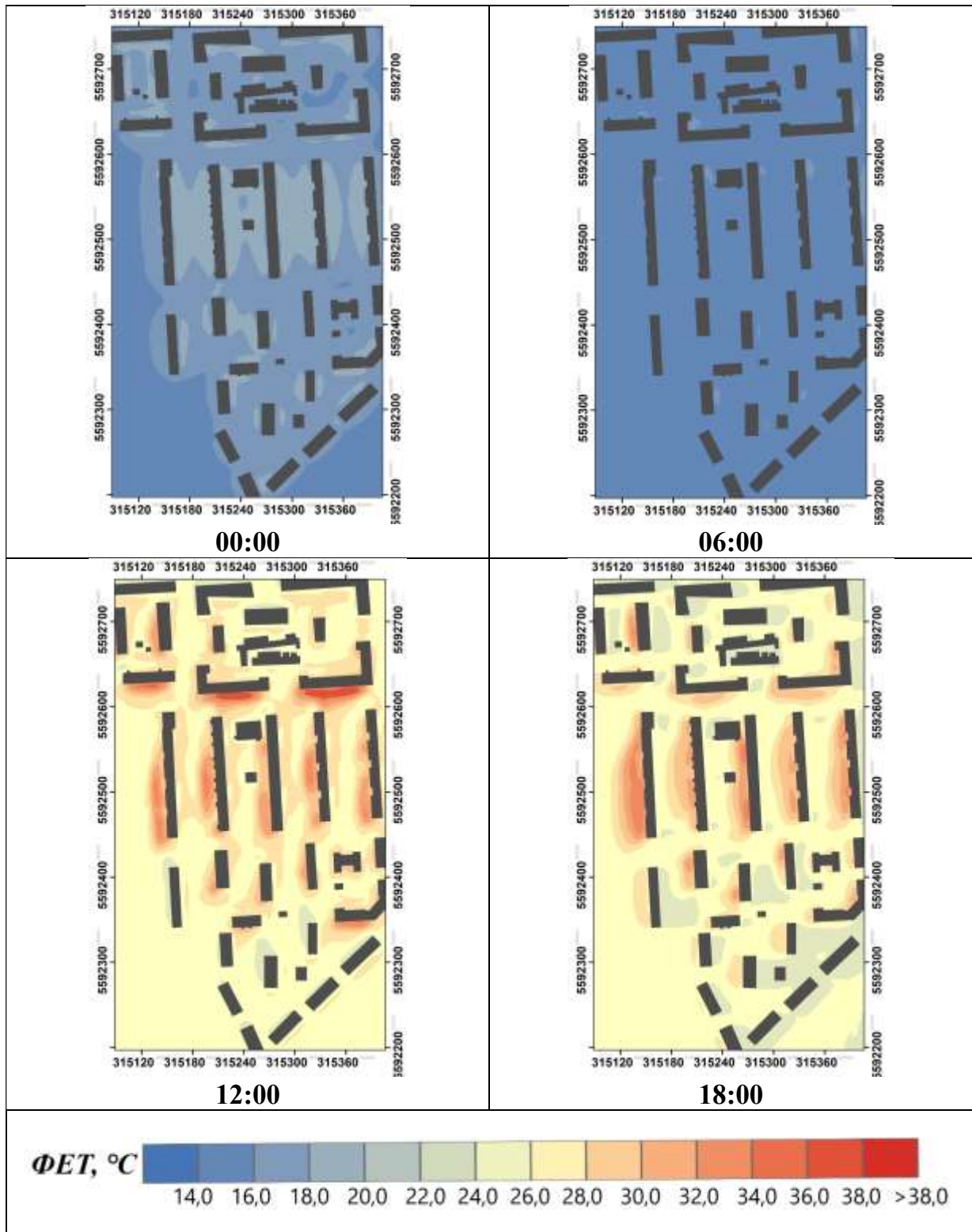
Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

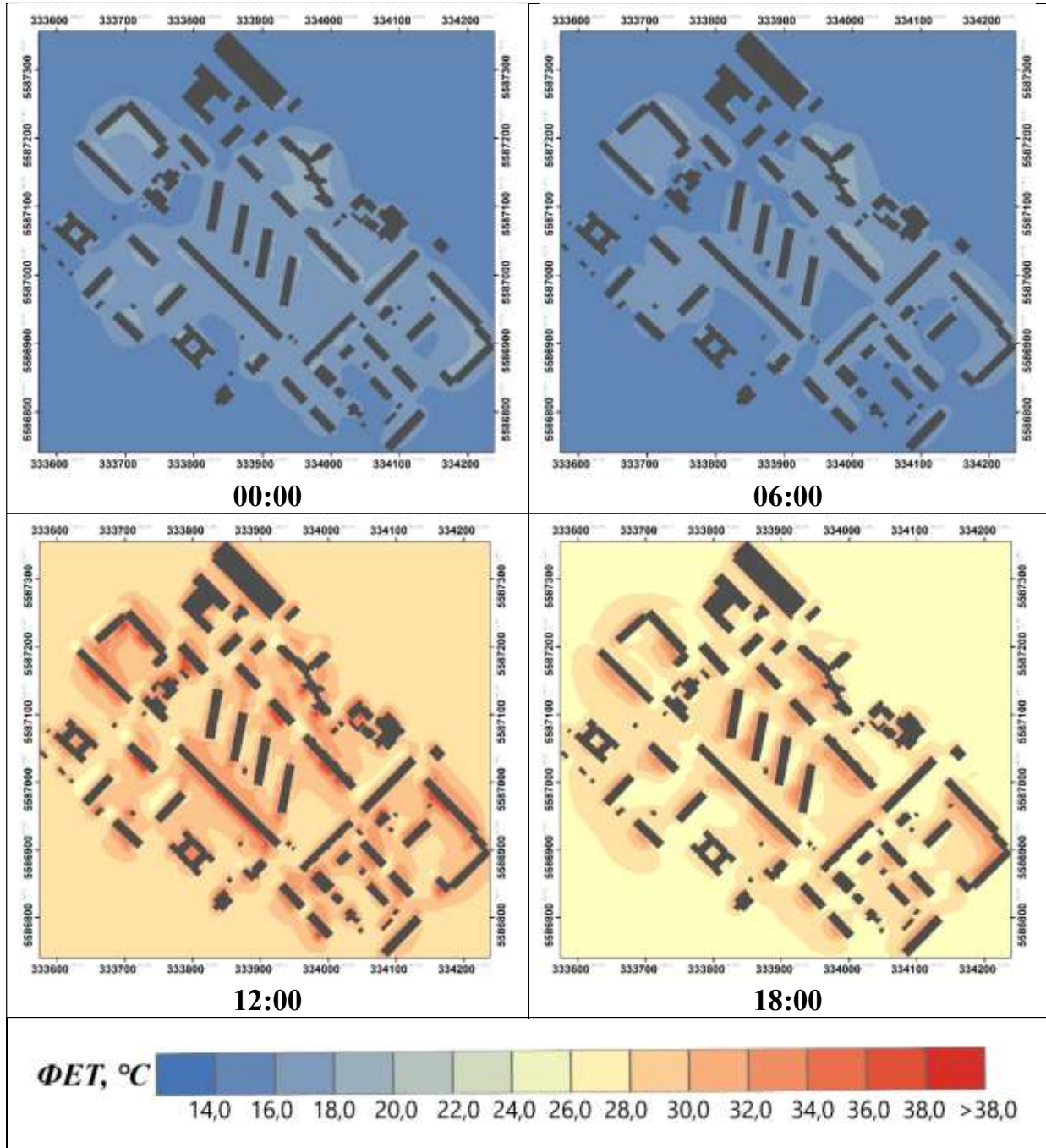


Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

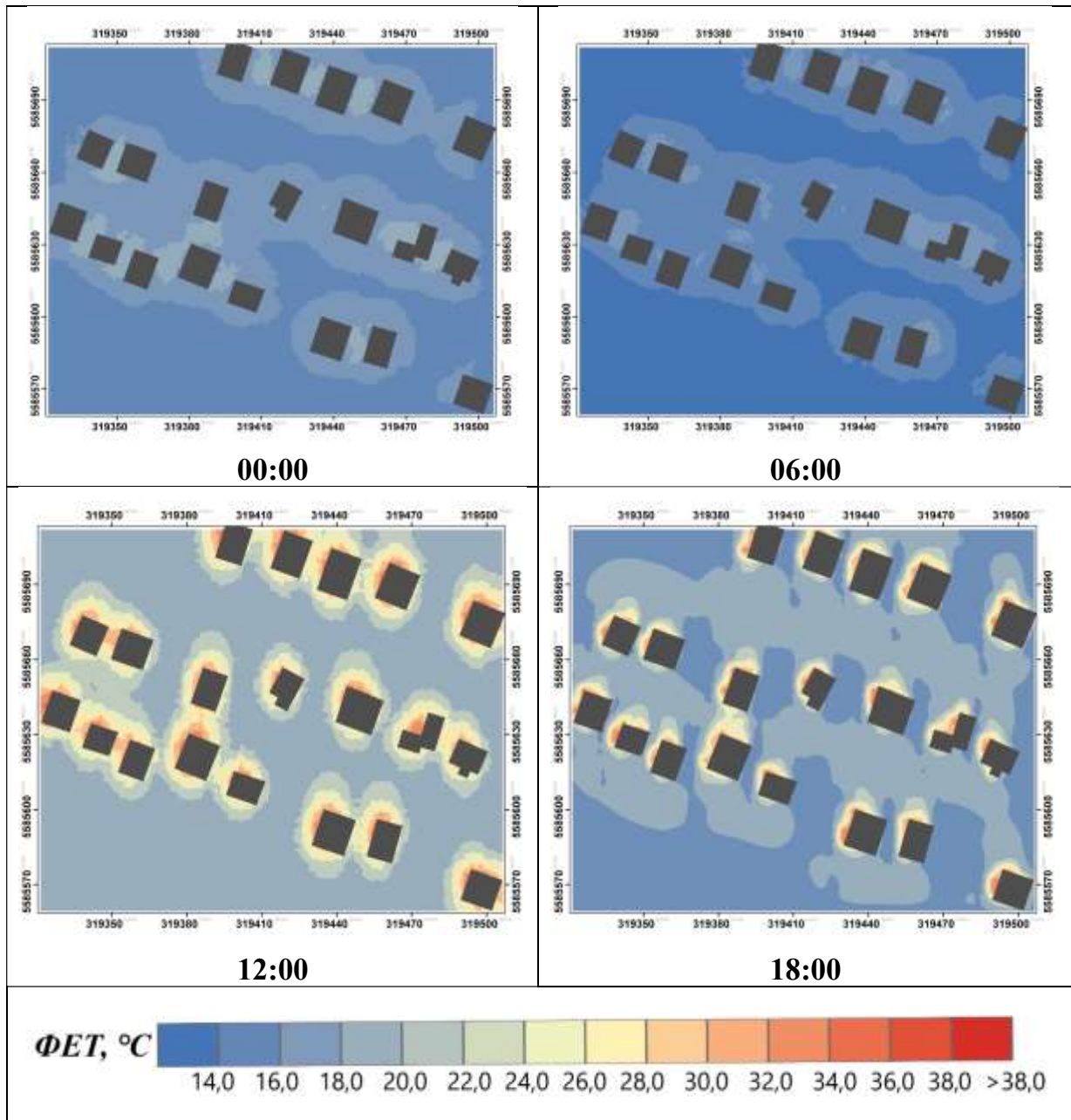


Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Іарківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за

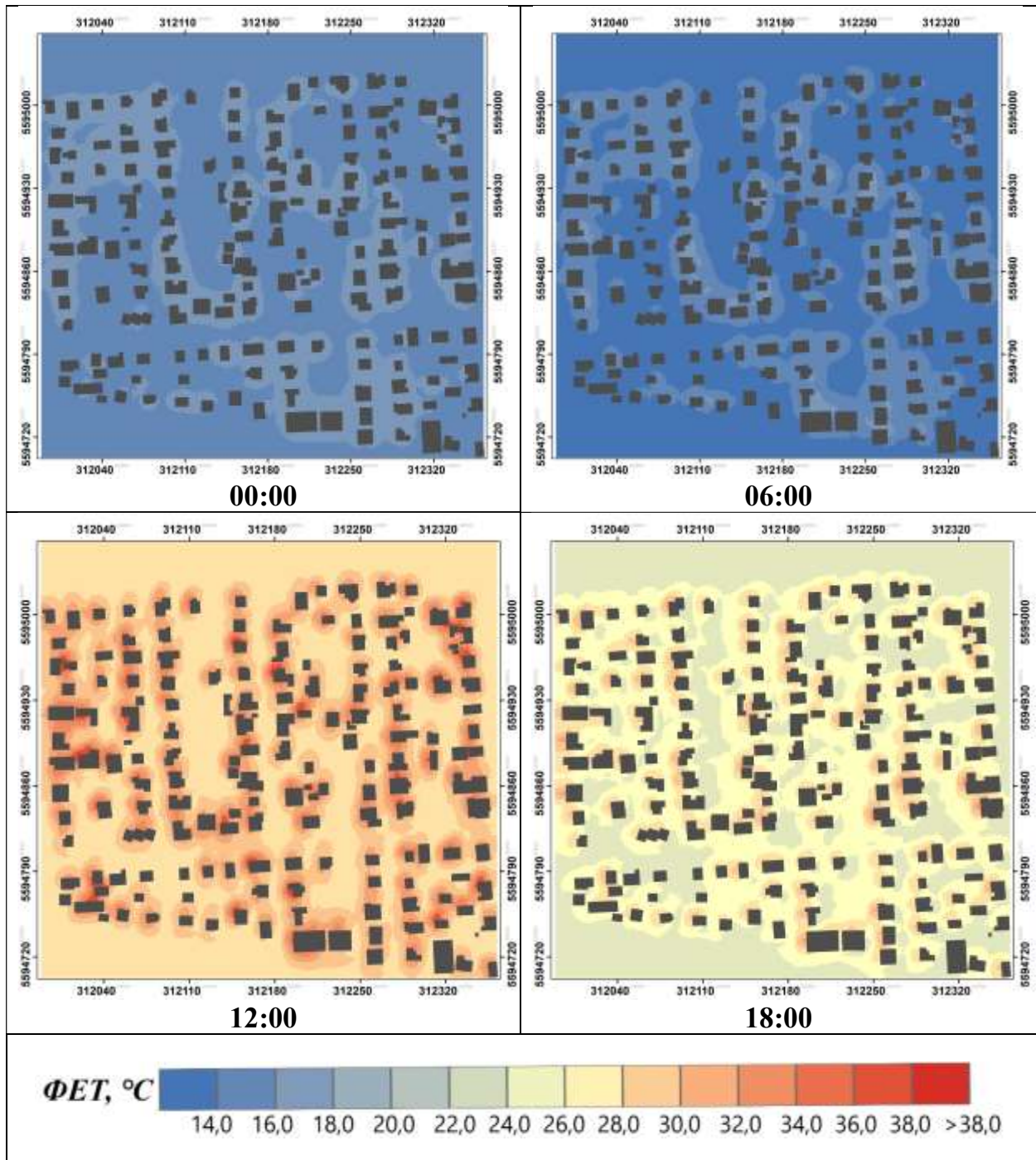
СЛЧ



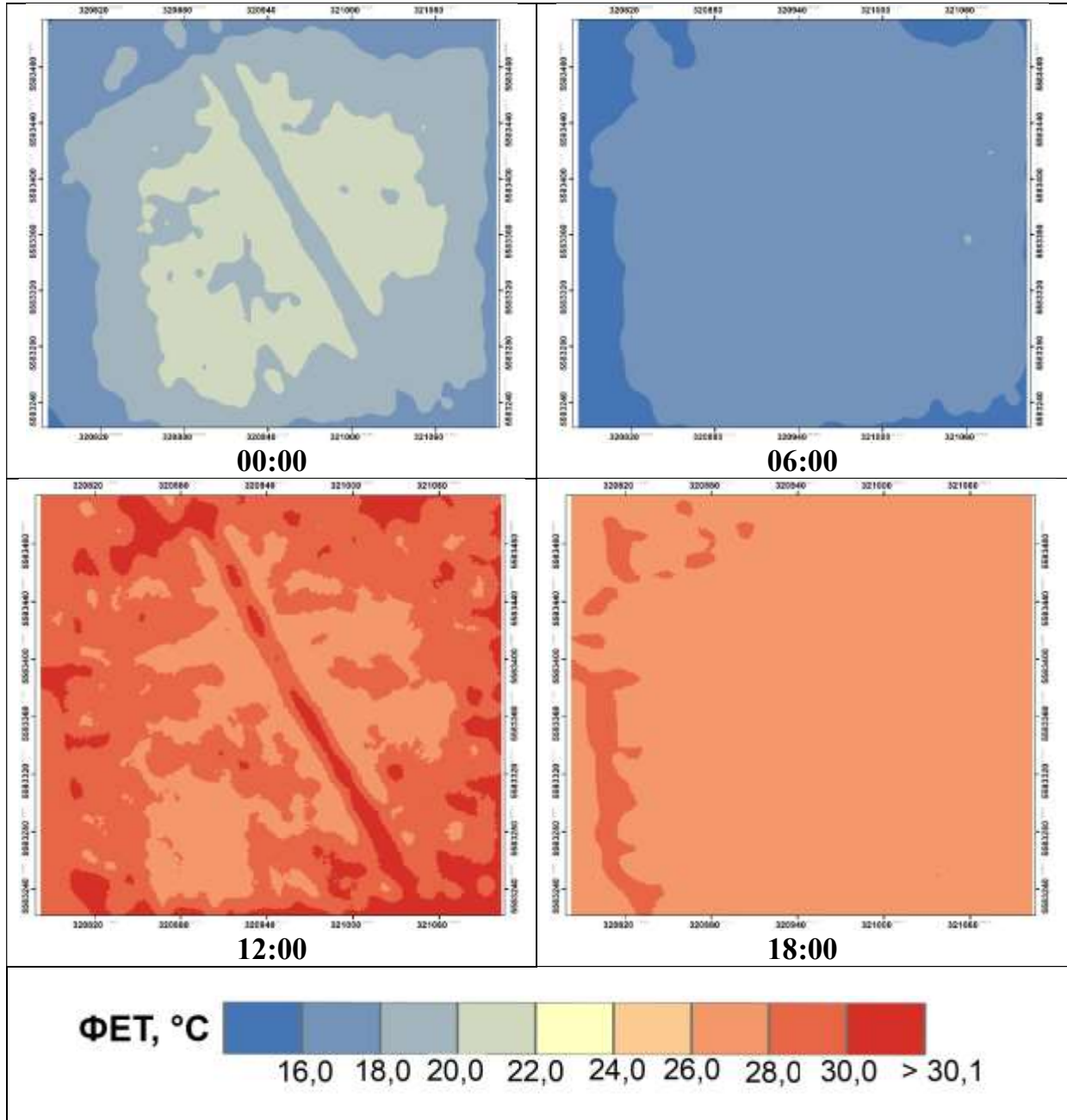
Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

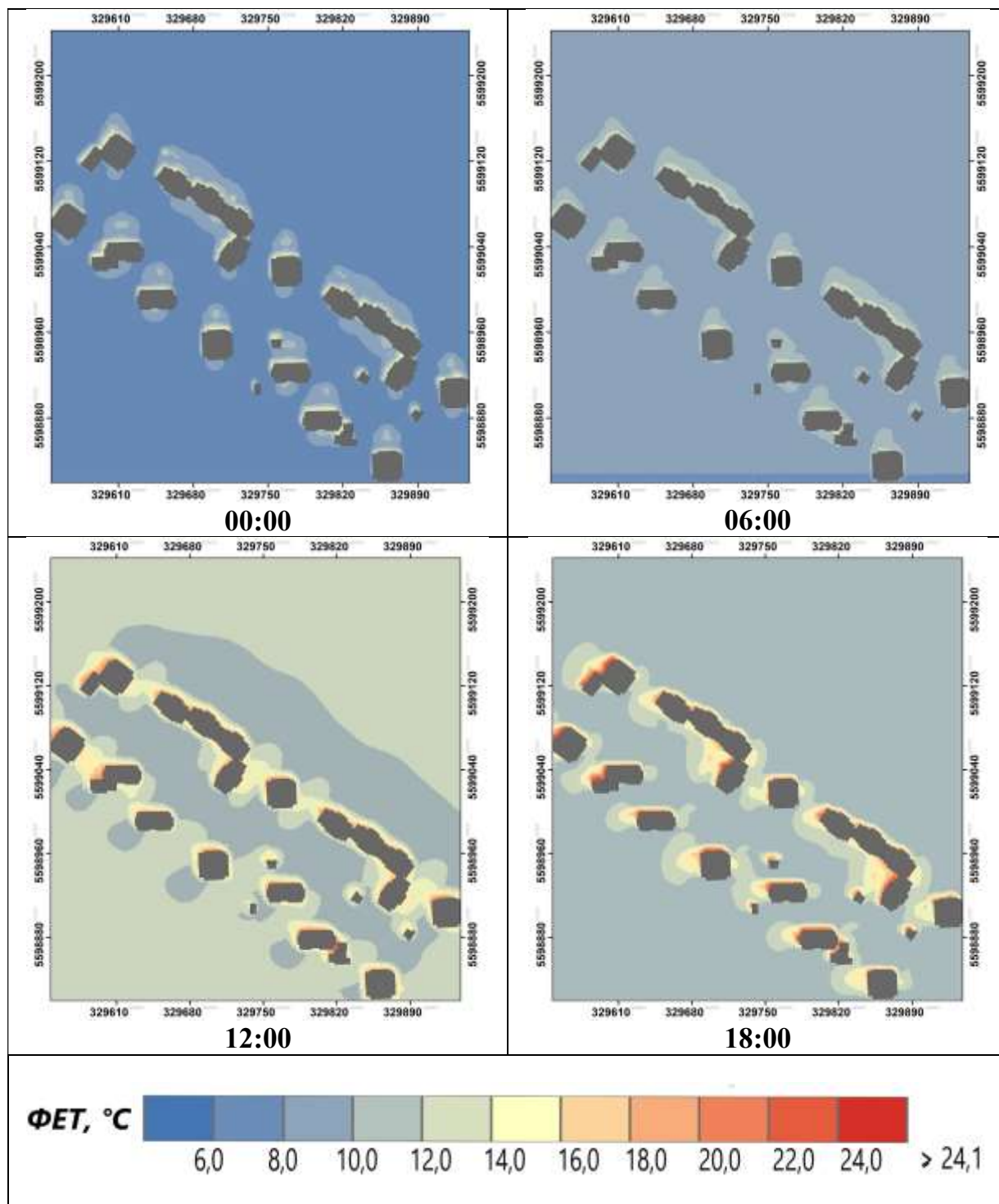


Результати моделювання значень ФЕТ за 20 липня 2020 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

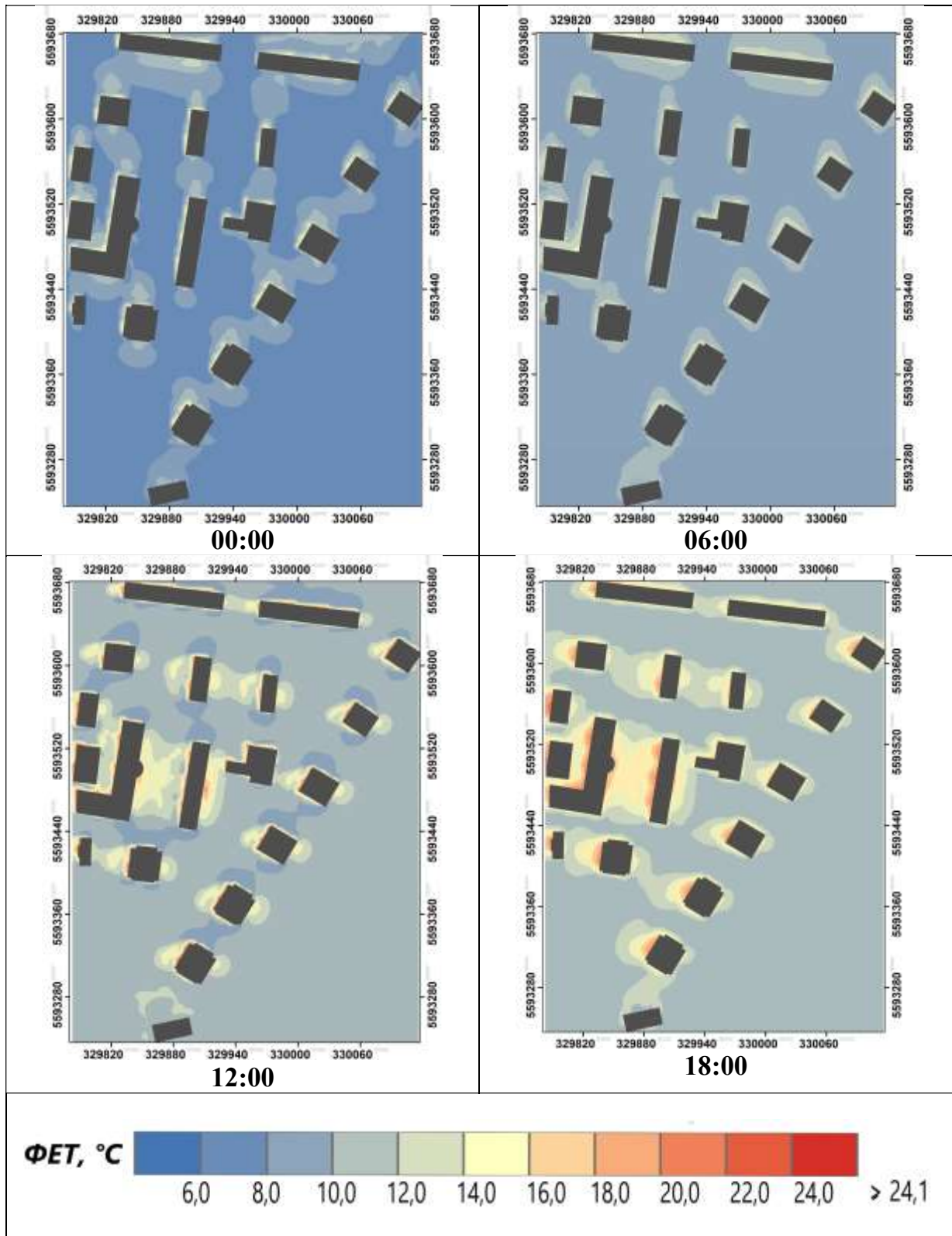


Додаток К

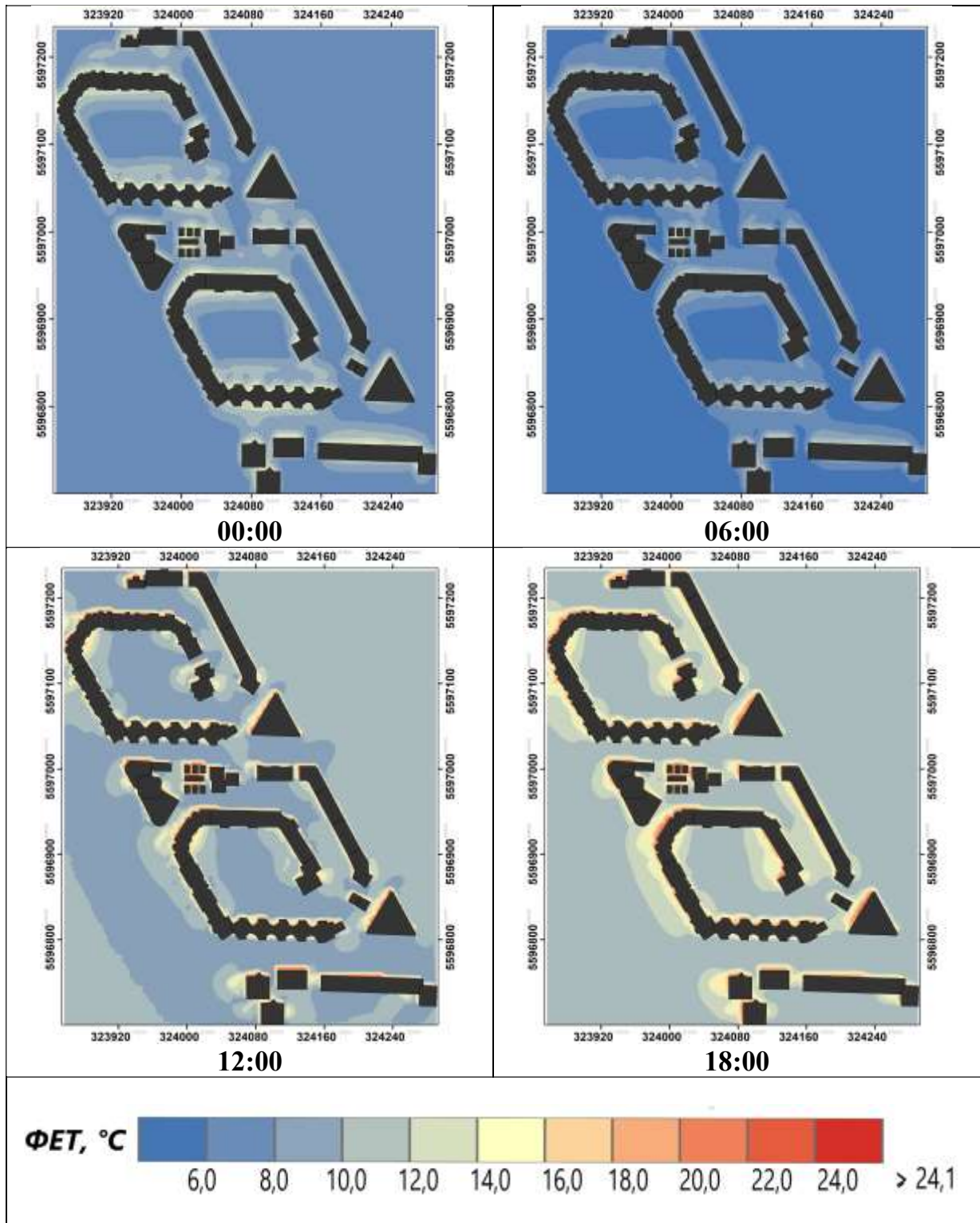
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 1 (ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



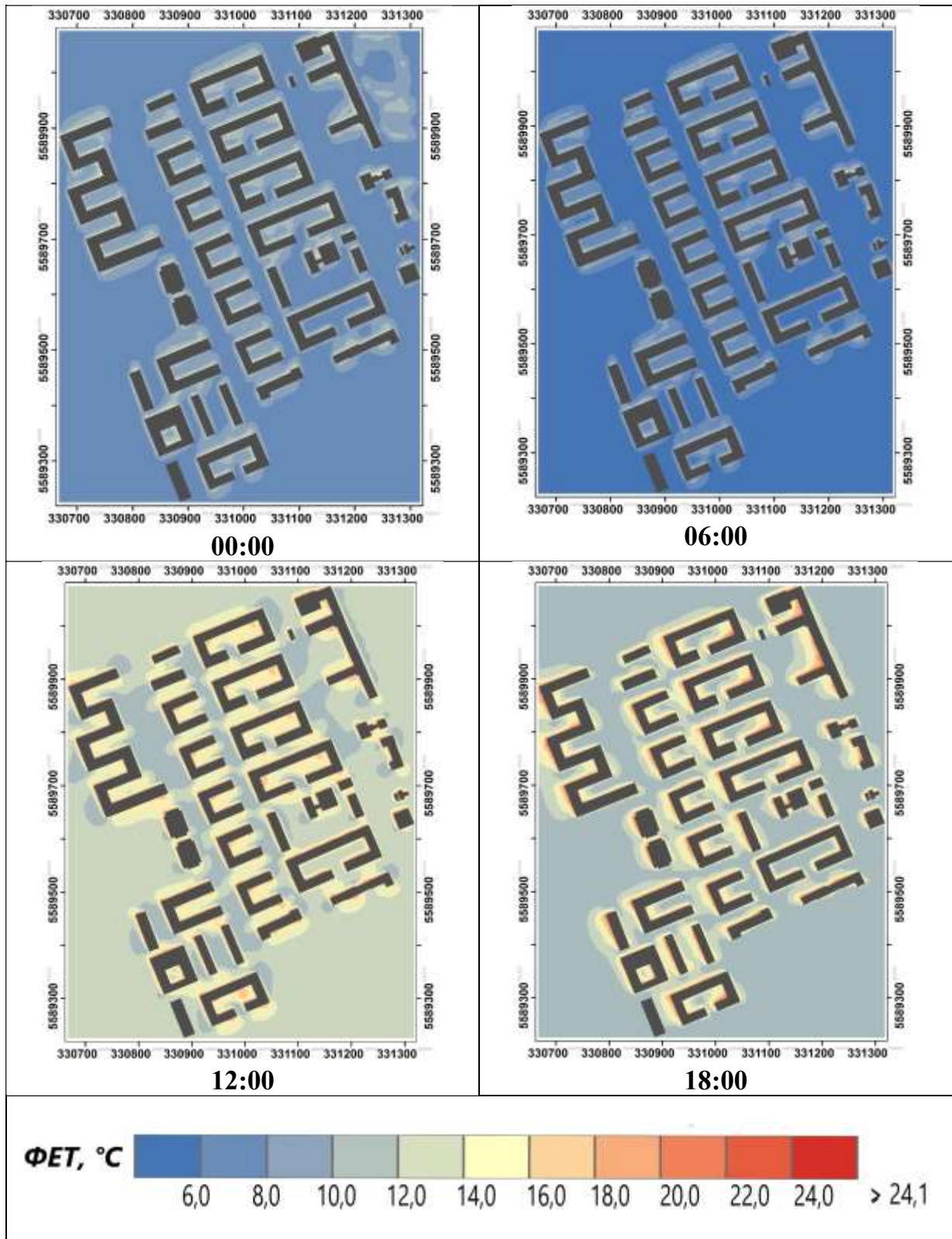
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



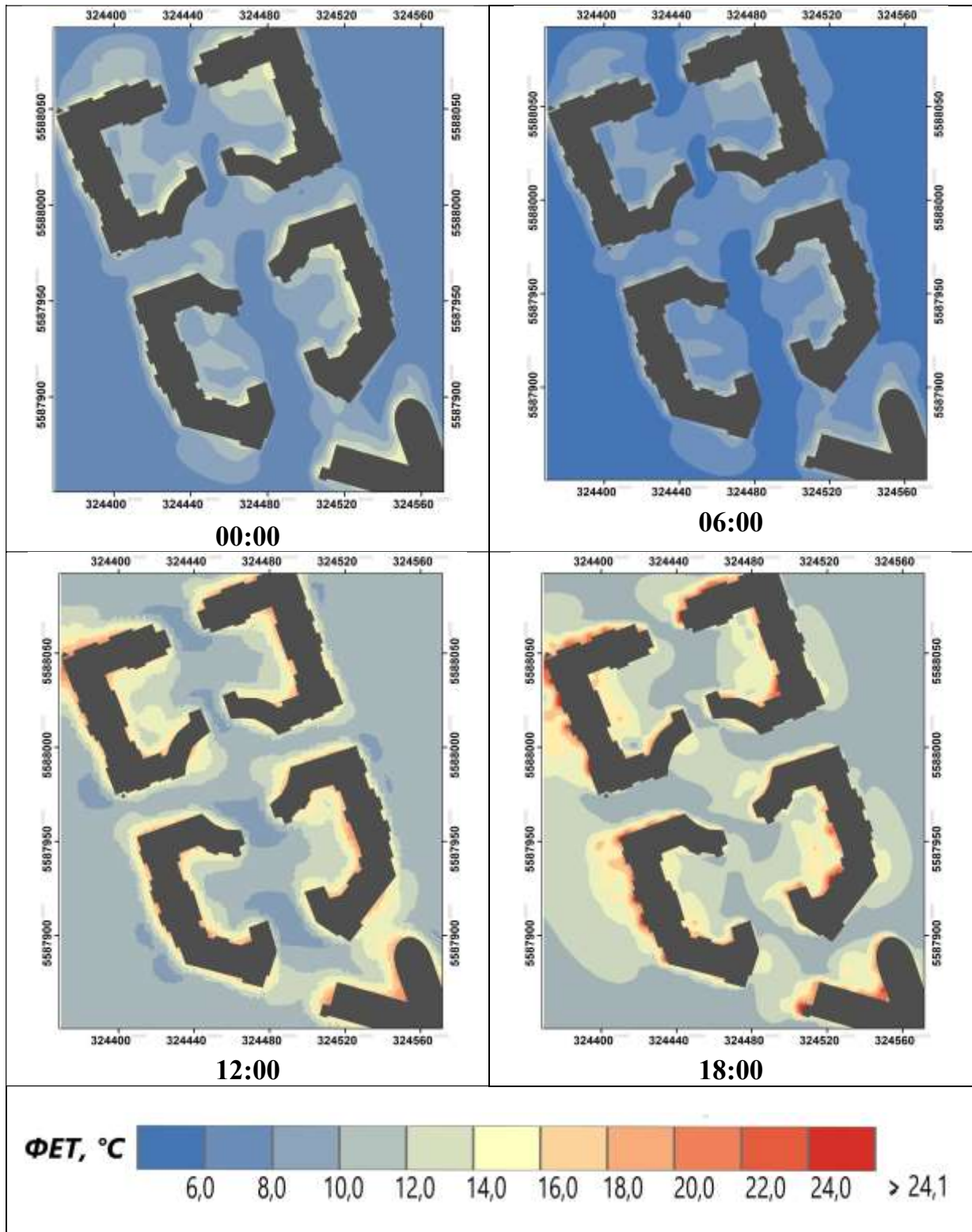
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



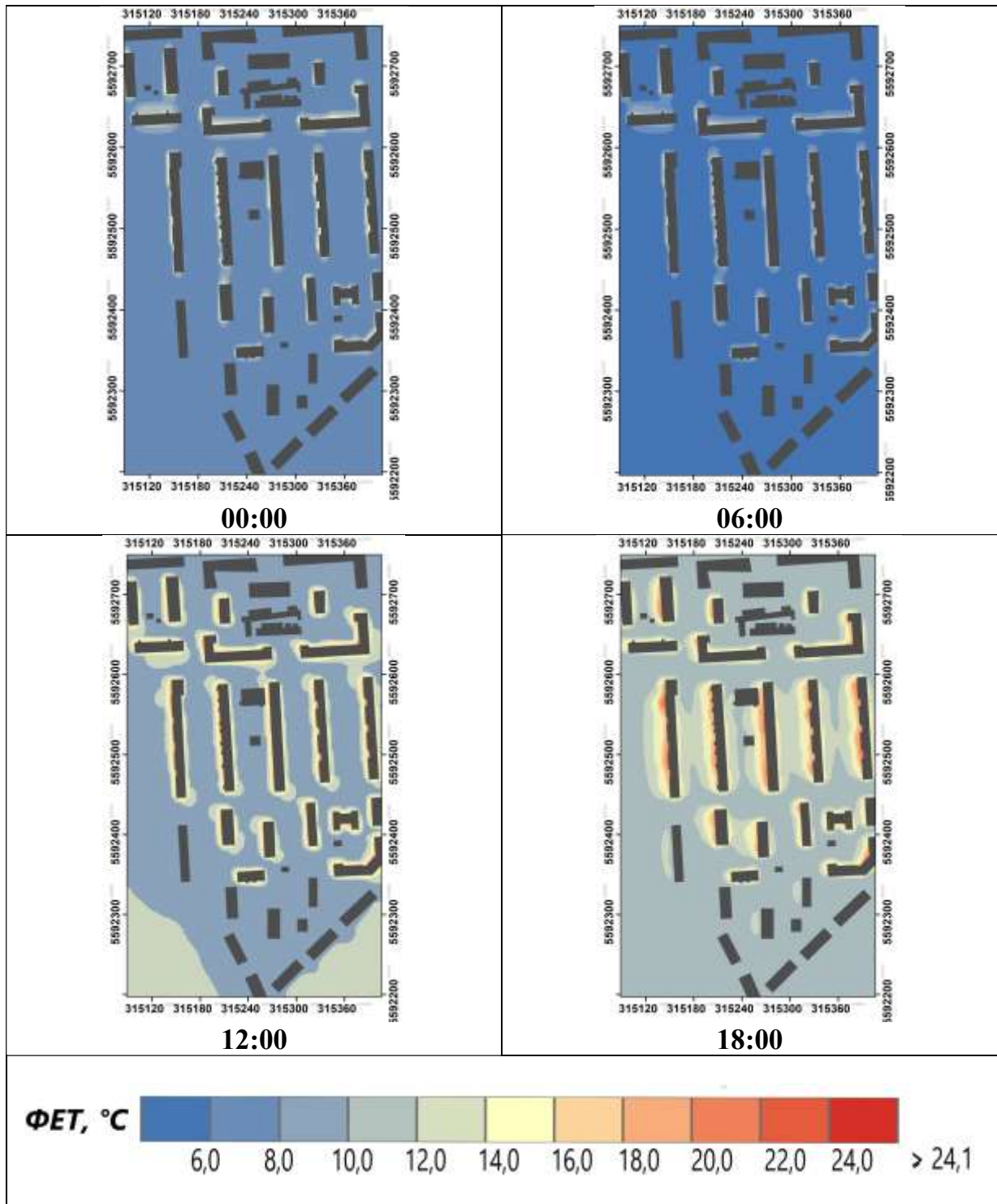
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



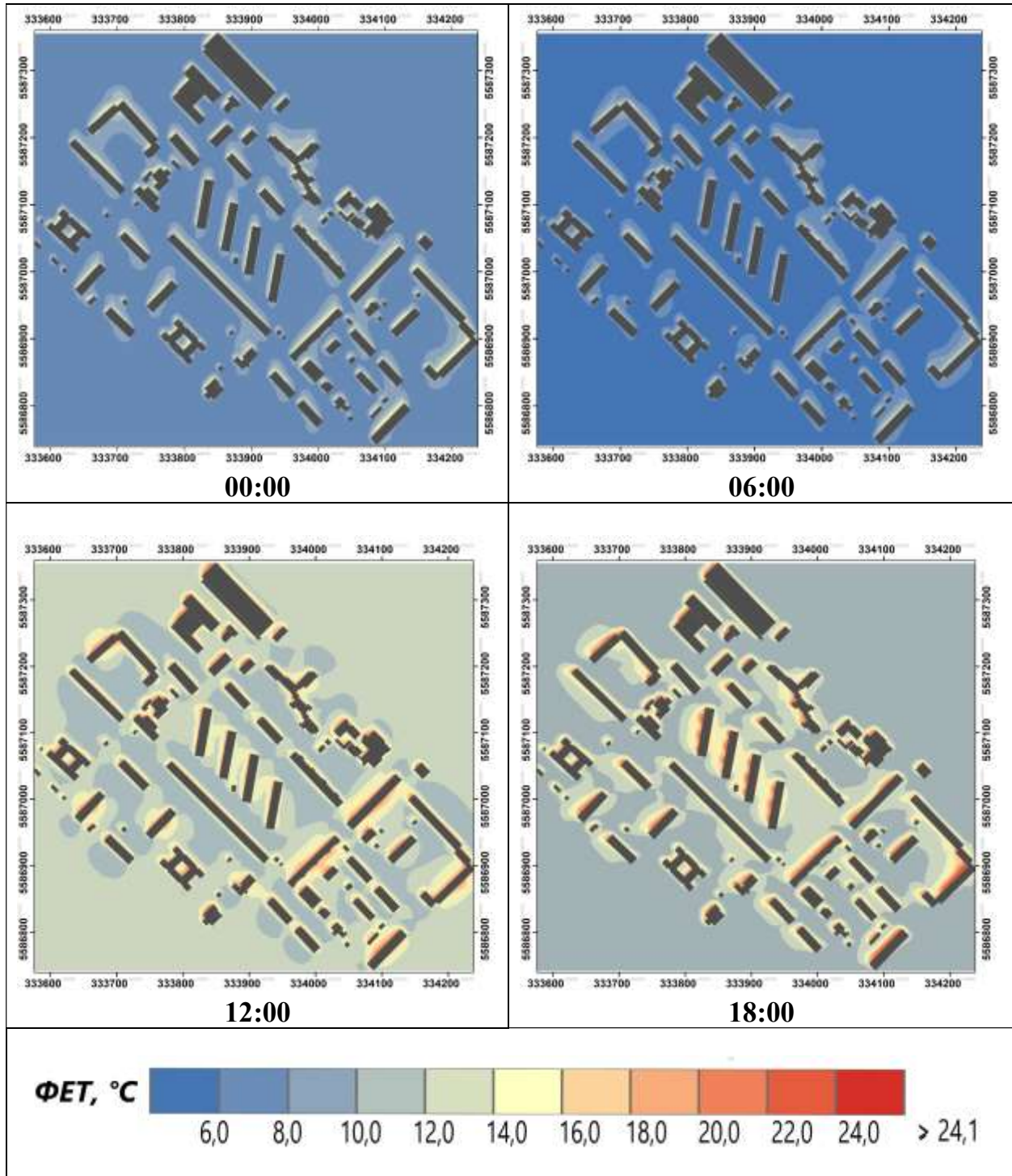
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



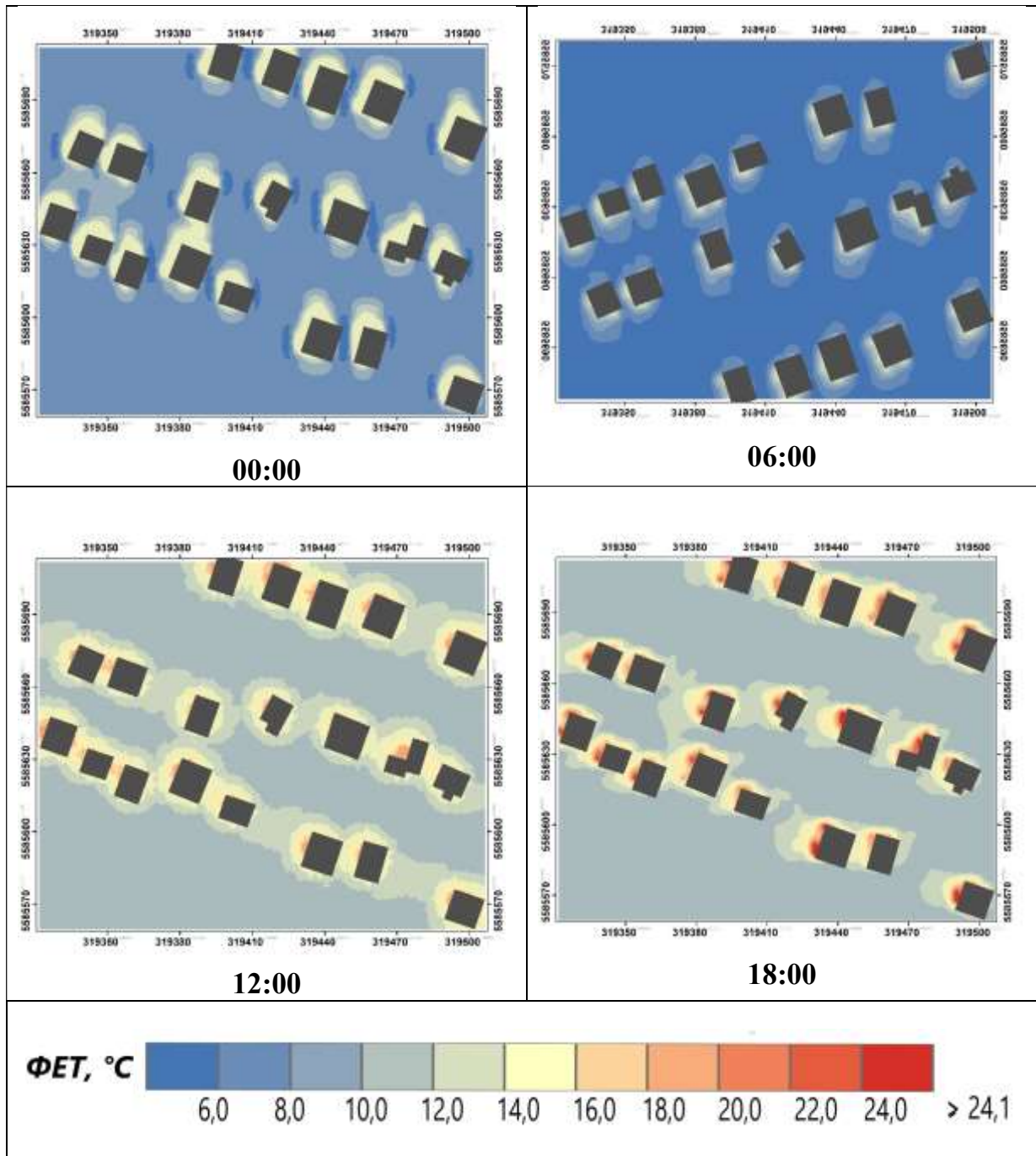
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



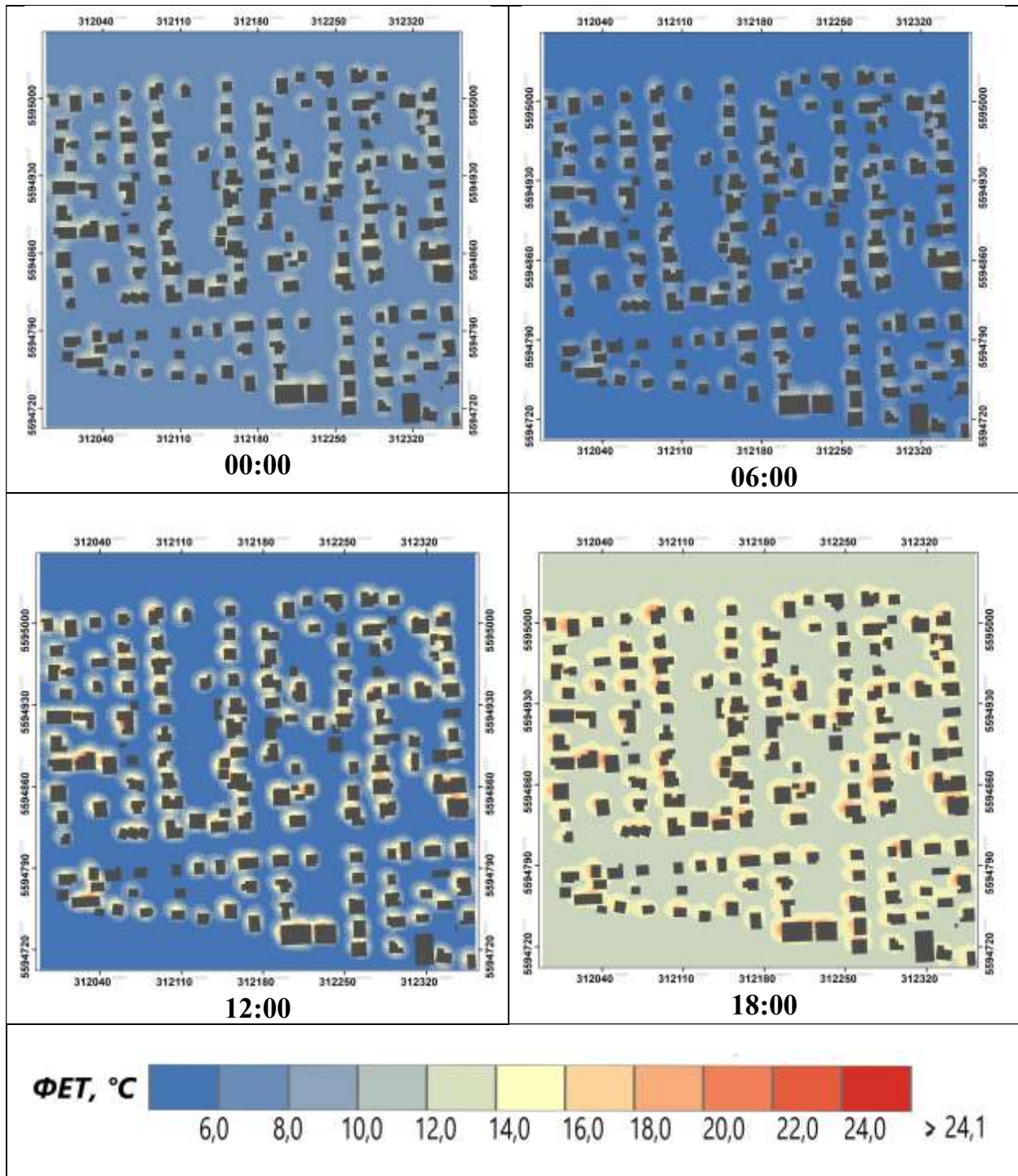
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Карківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



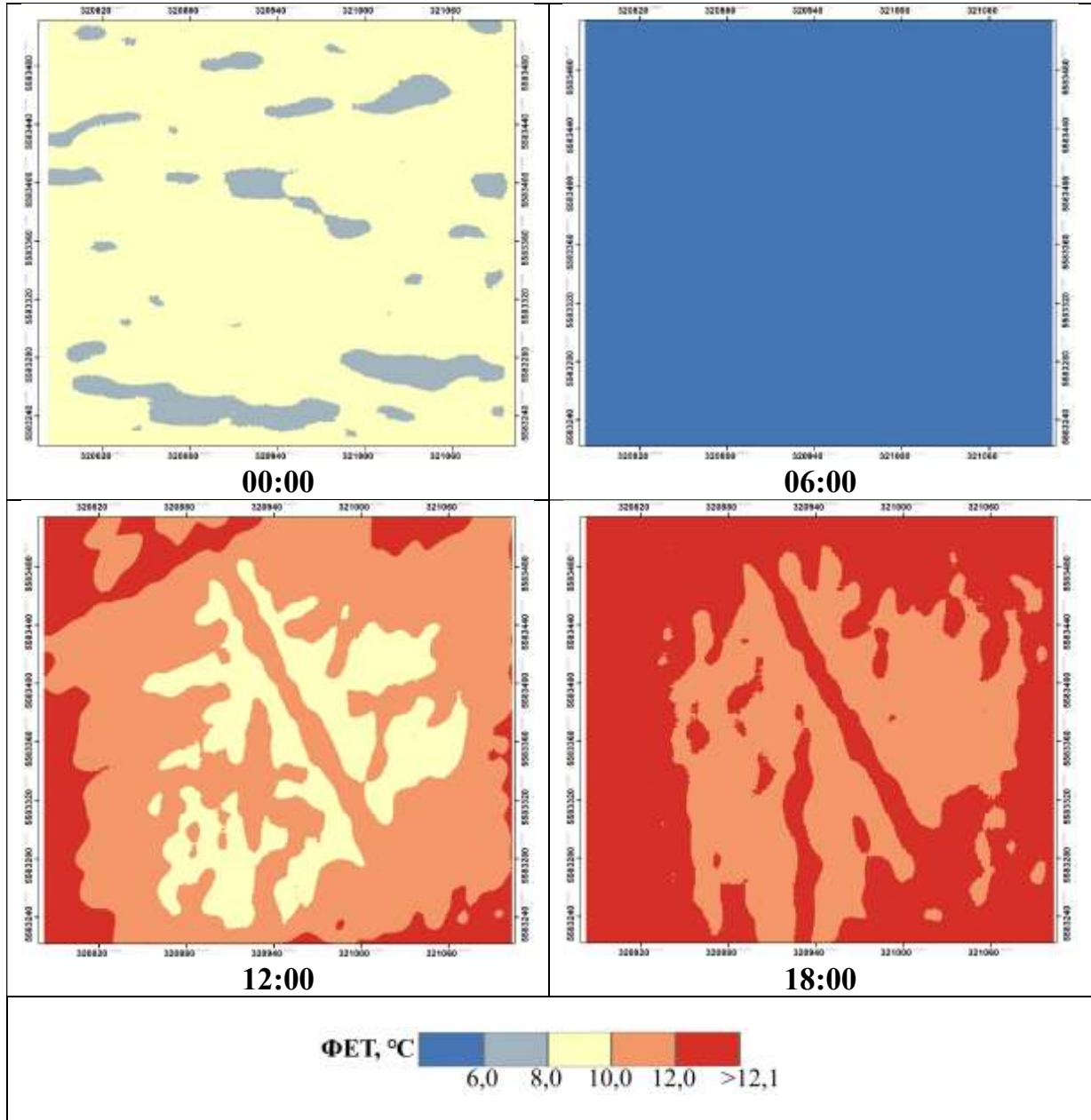
Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

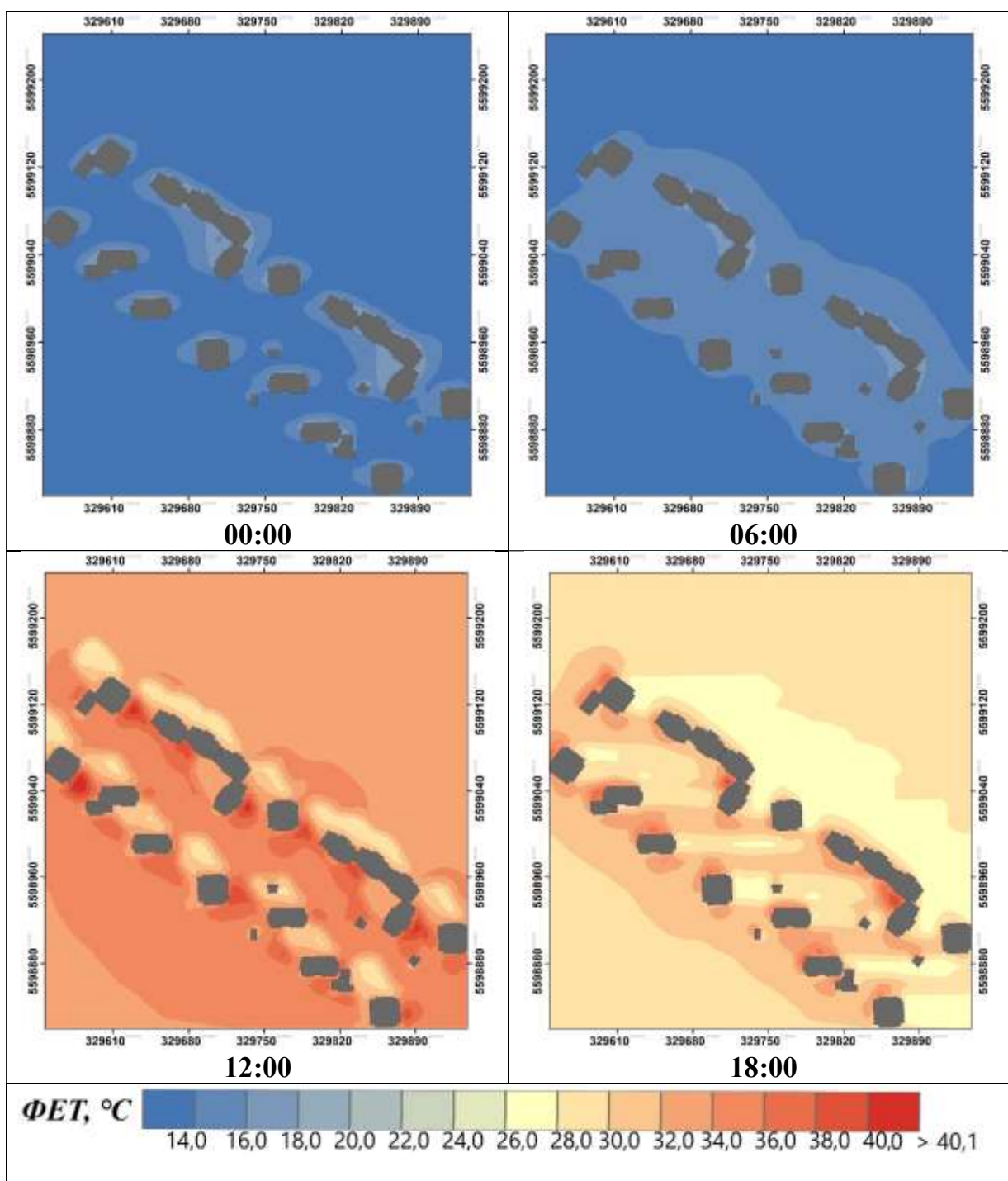


Результати моделювання значень ФЕТ за 1 липня 2018 року для ділянки 10
(ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та
18 годин за СЛЧ

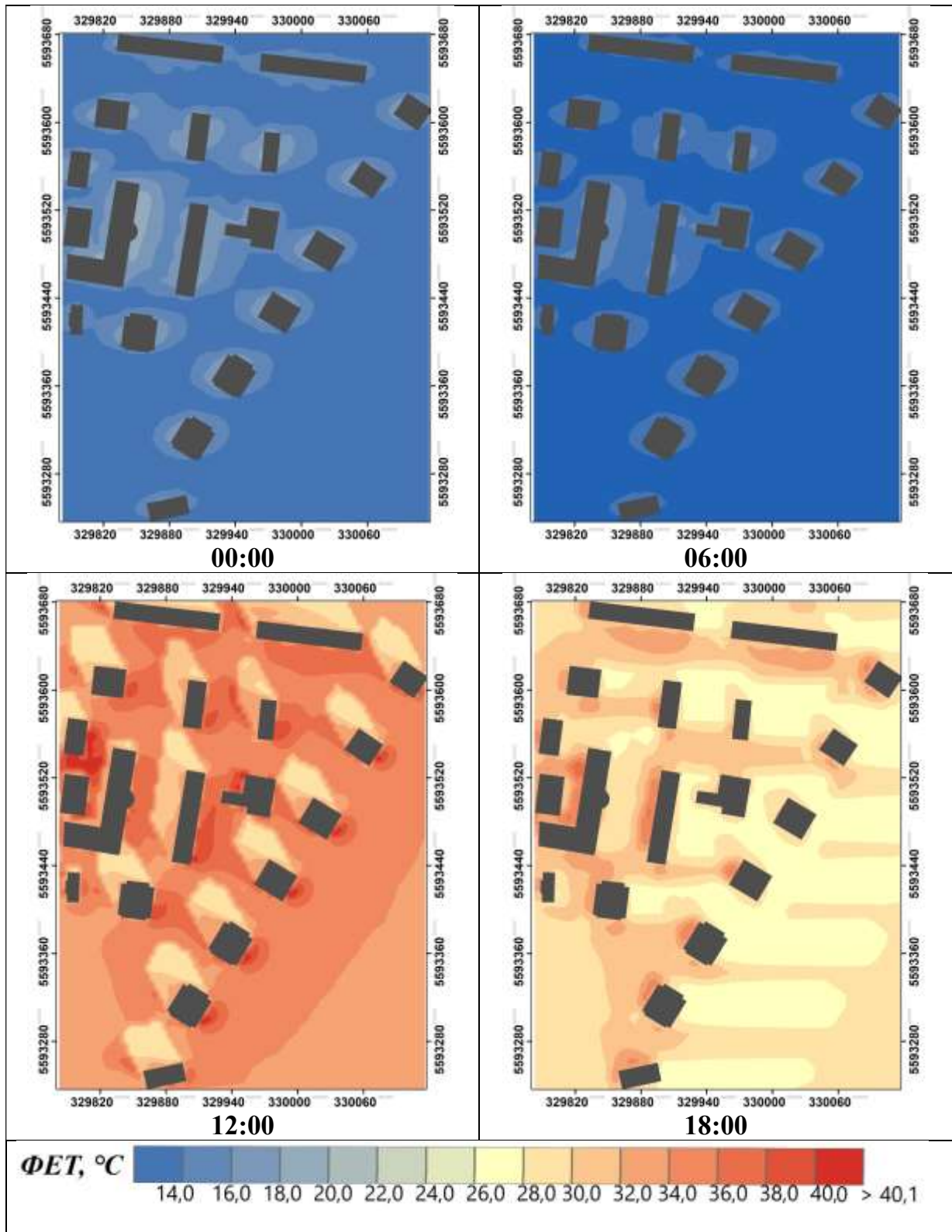


Додаток Л

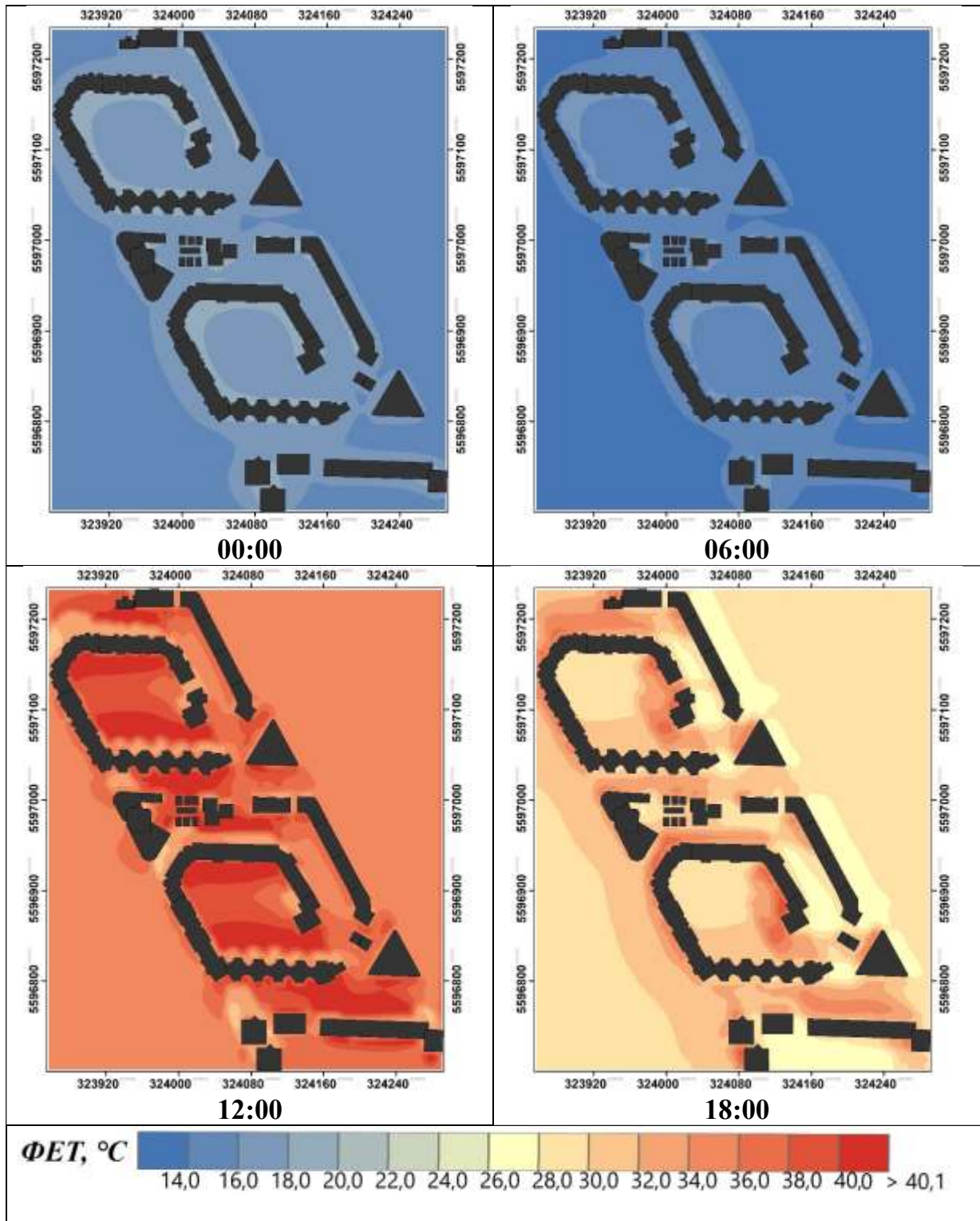
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 1
(ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



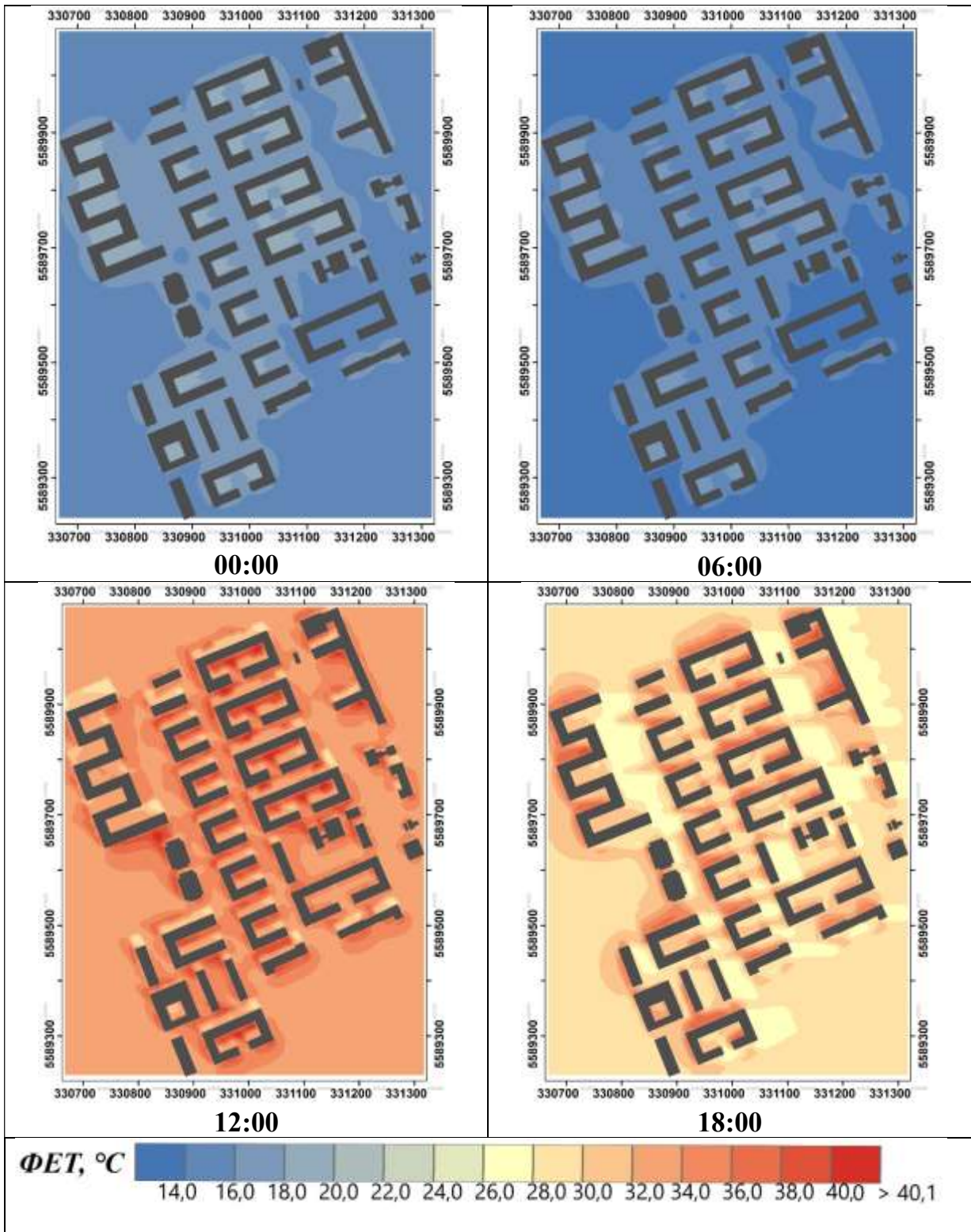
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



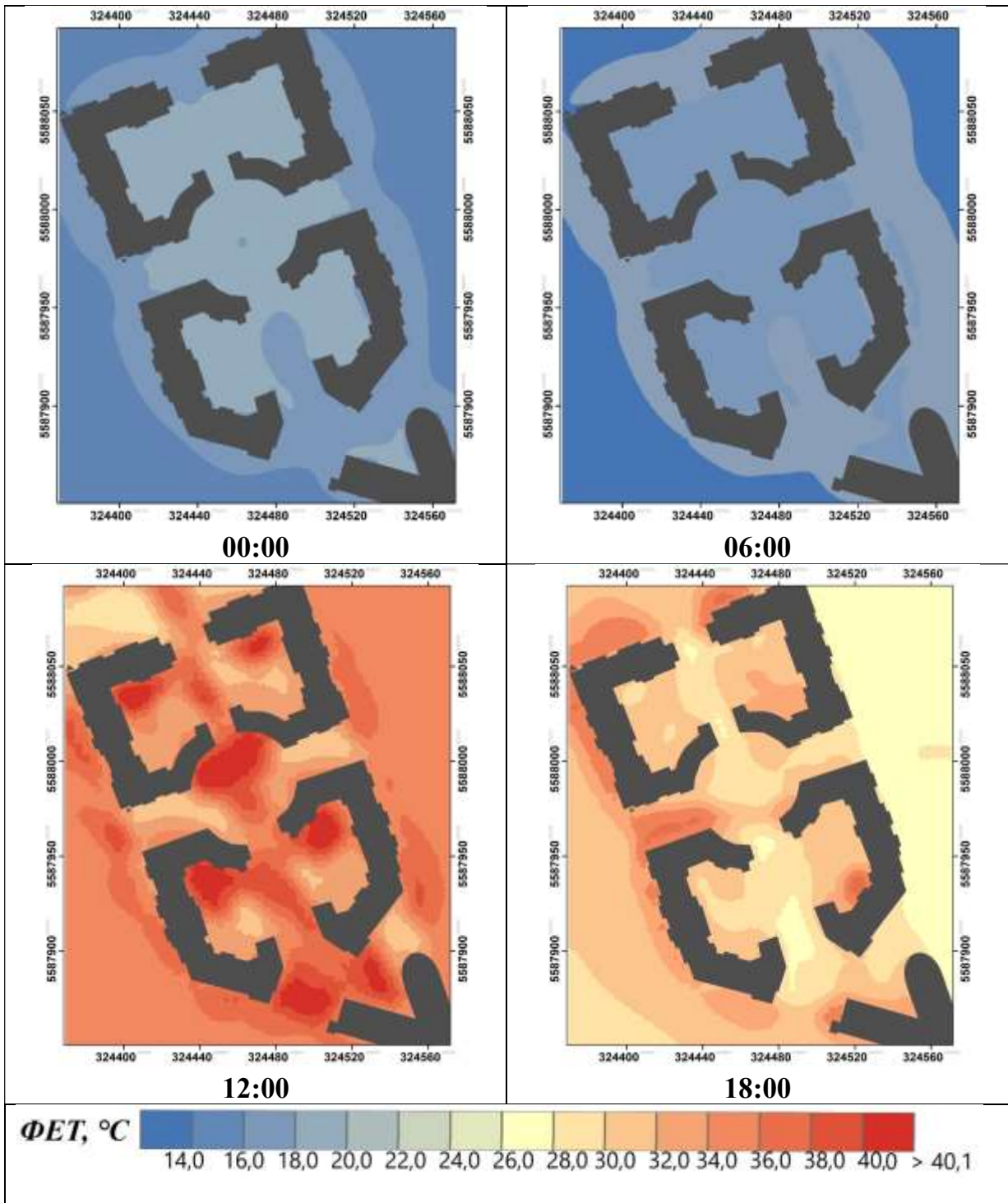
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



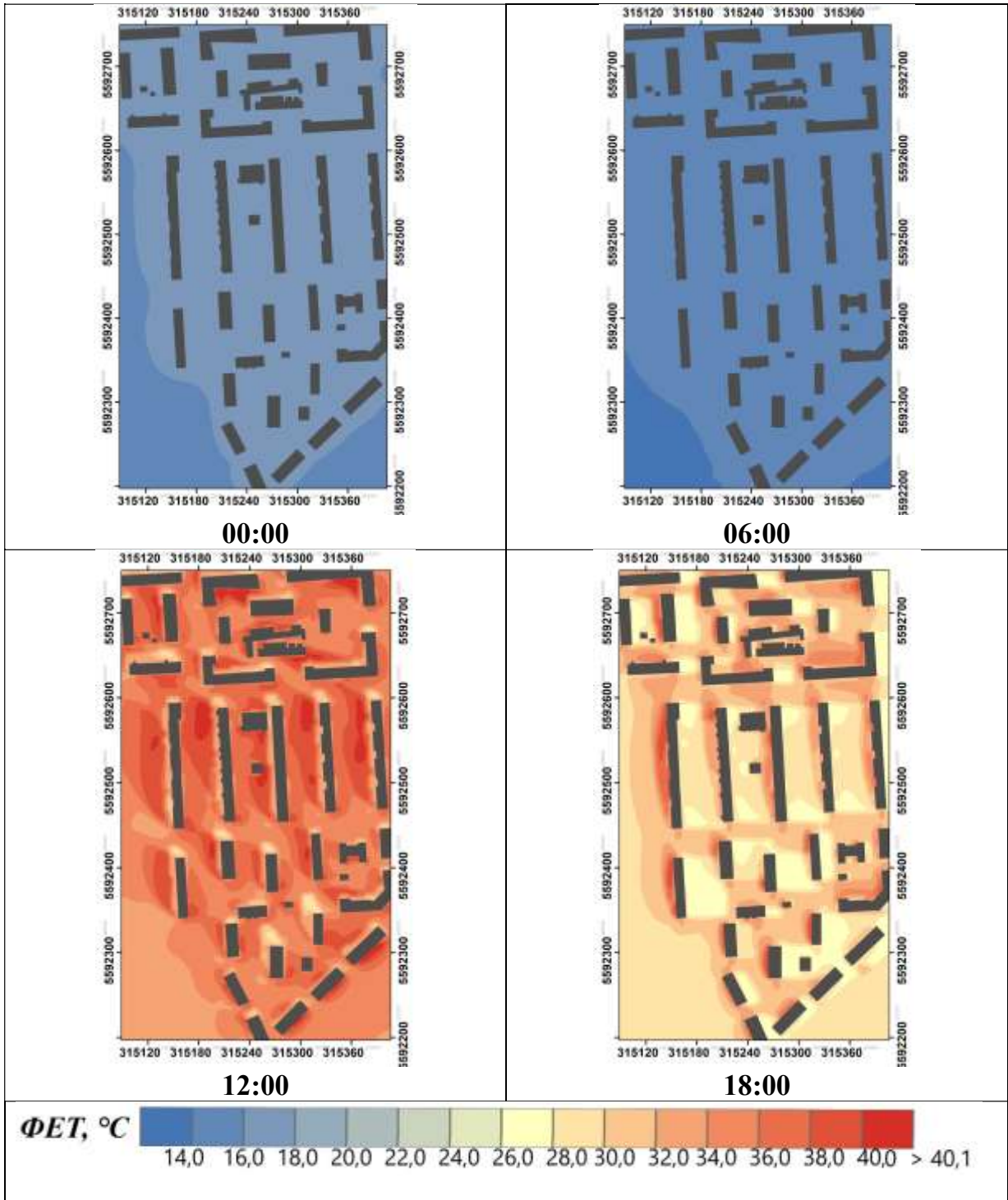
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



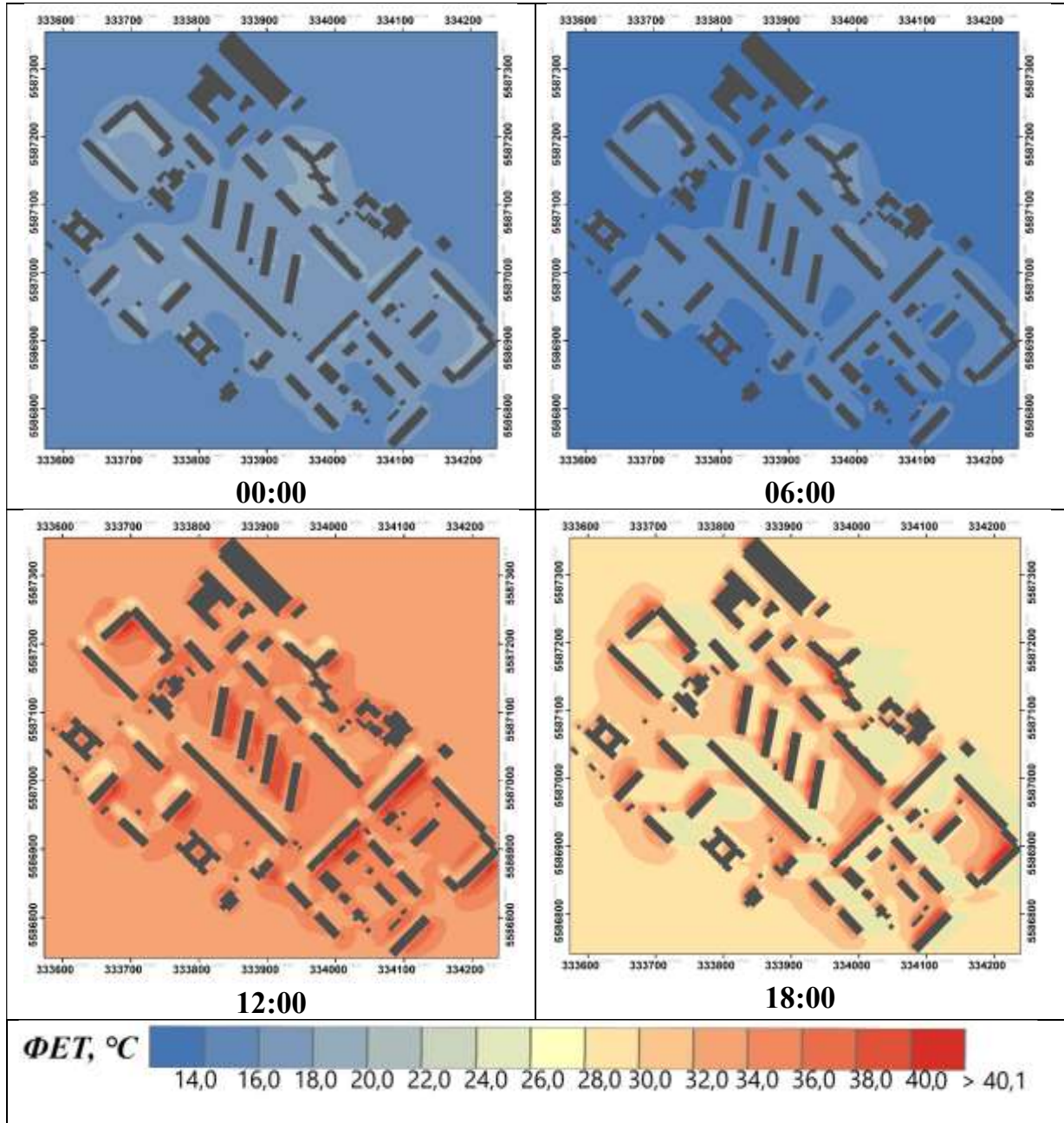
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



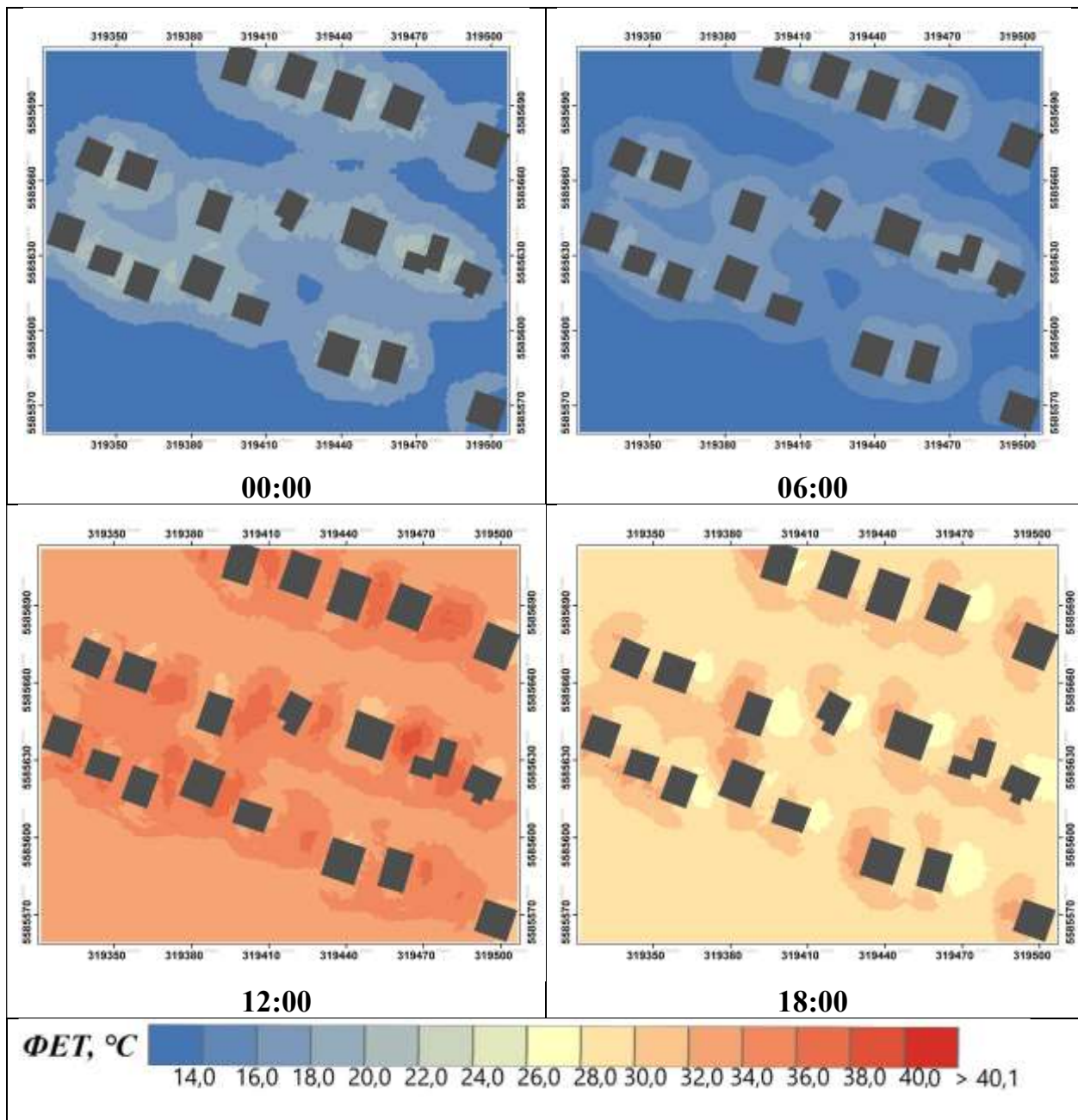
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



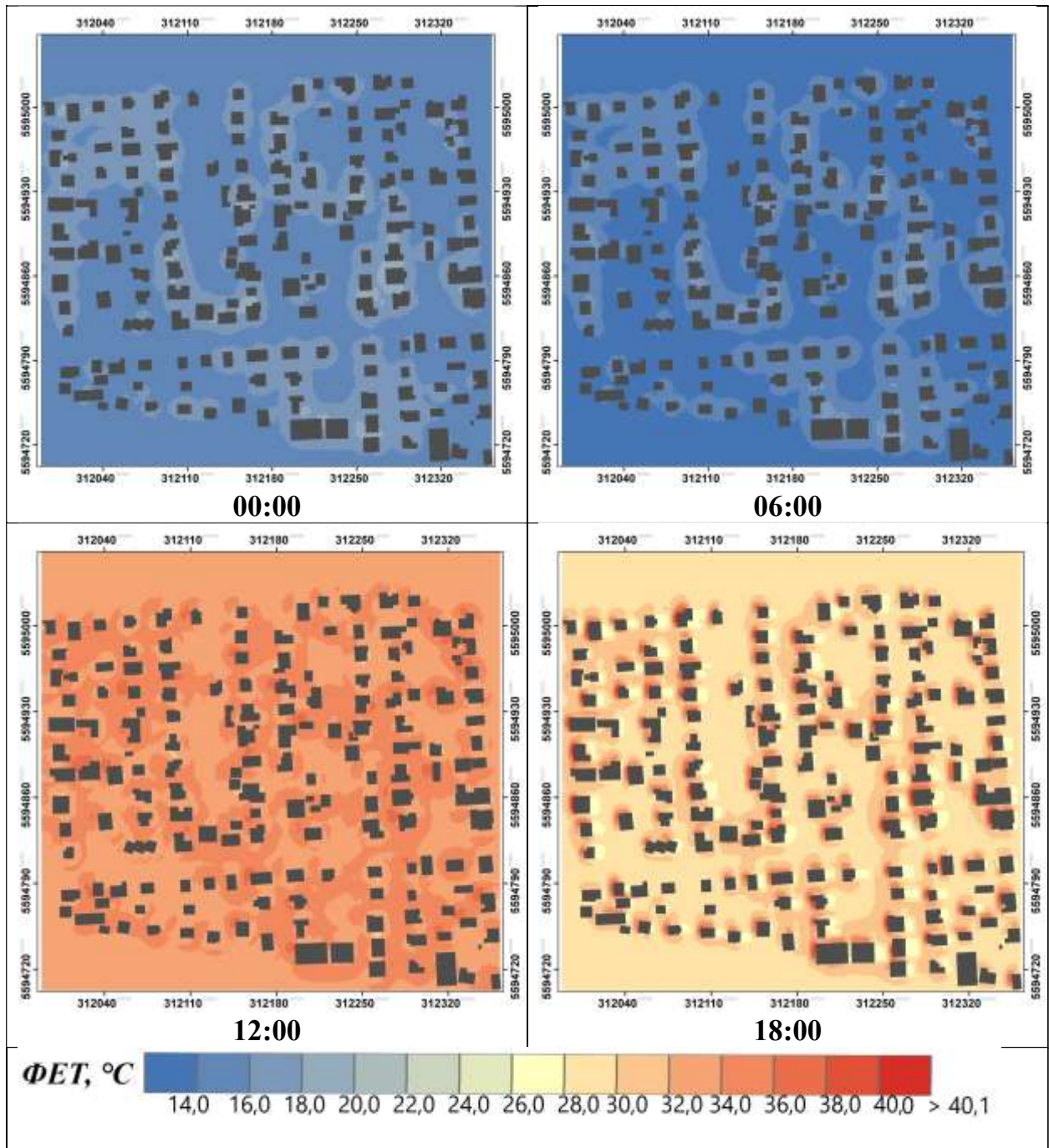
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Ларківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



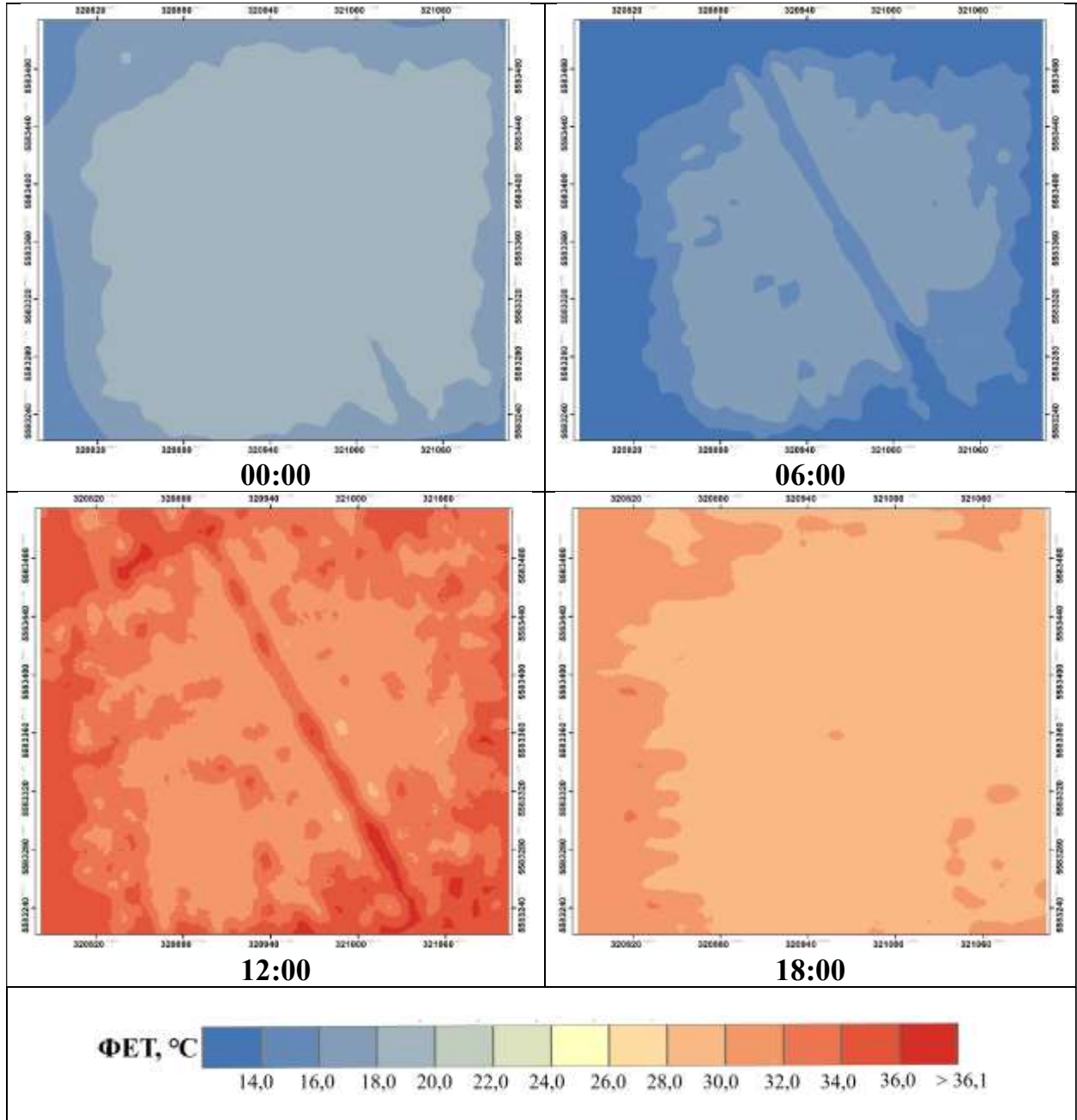
Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

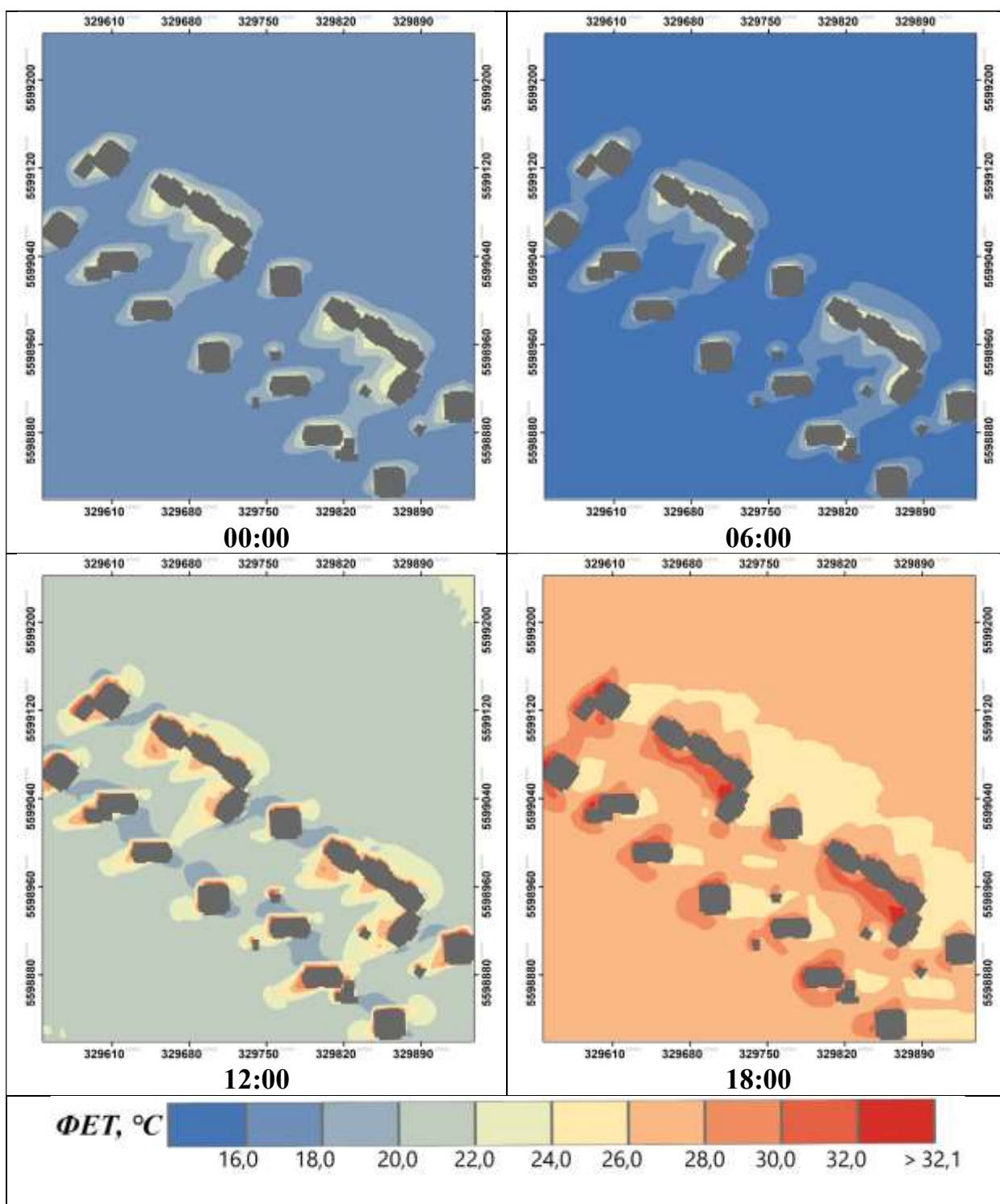


Результати моделювання значень ФЕТ за 2 серпня 2015 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

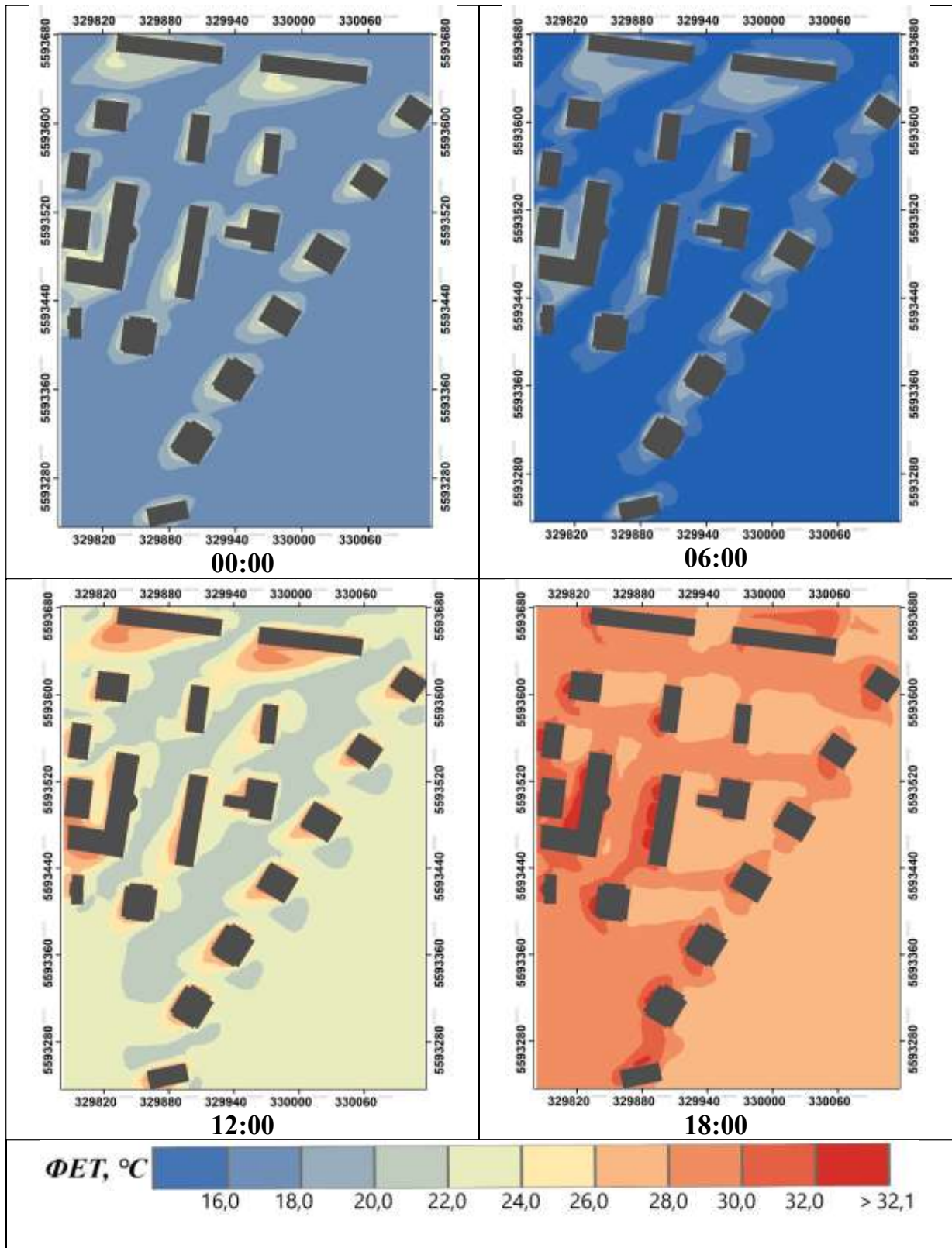


Додаток М

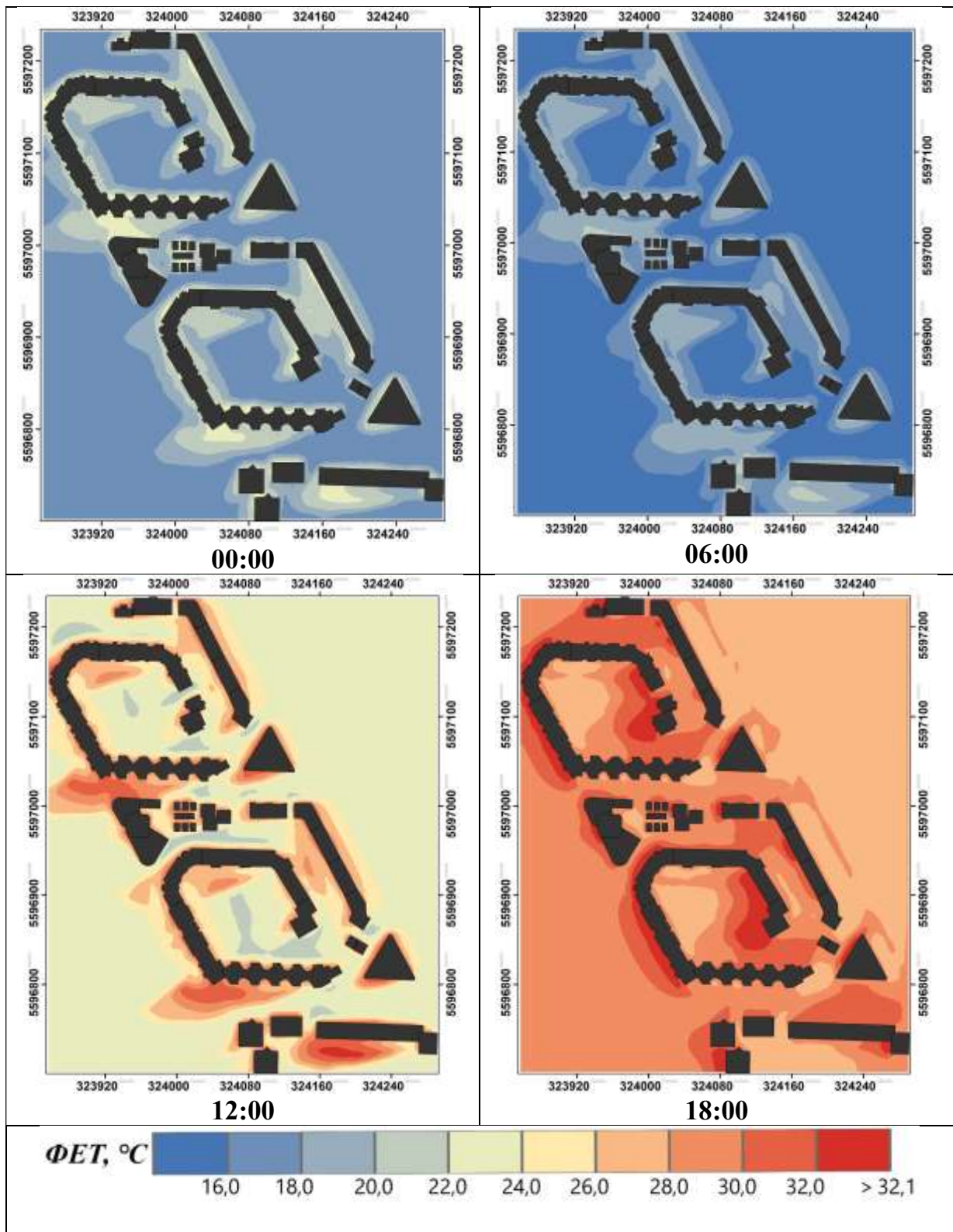
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 1
(ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



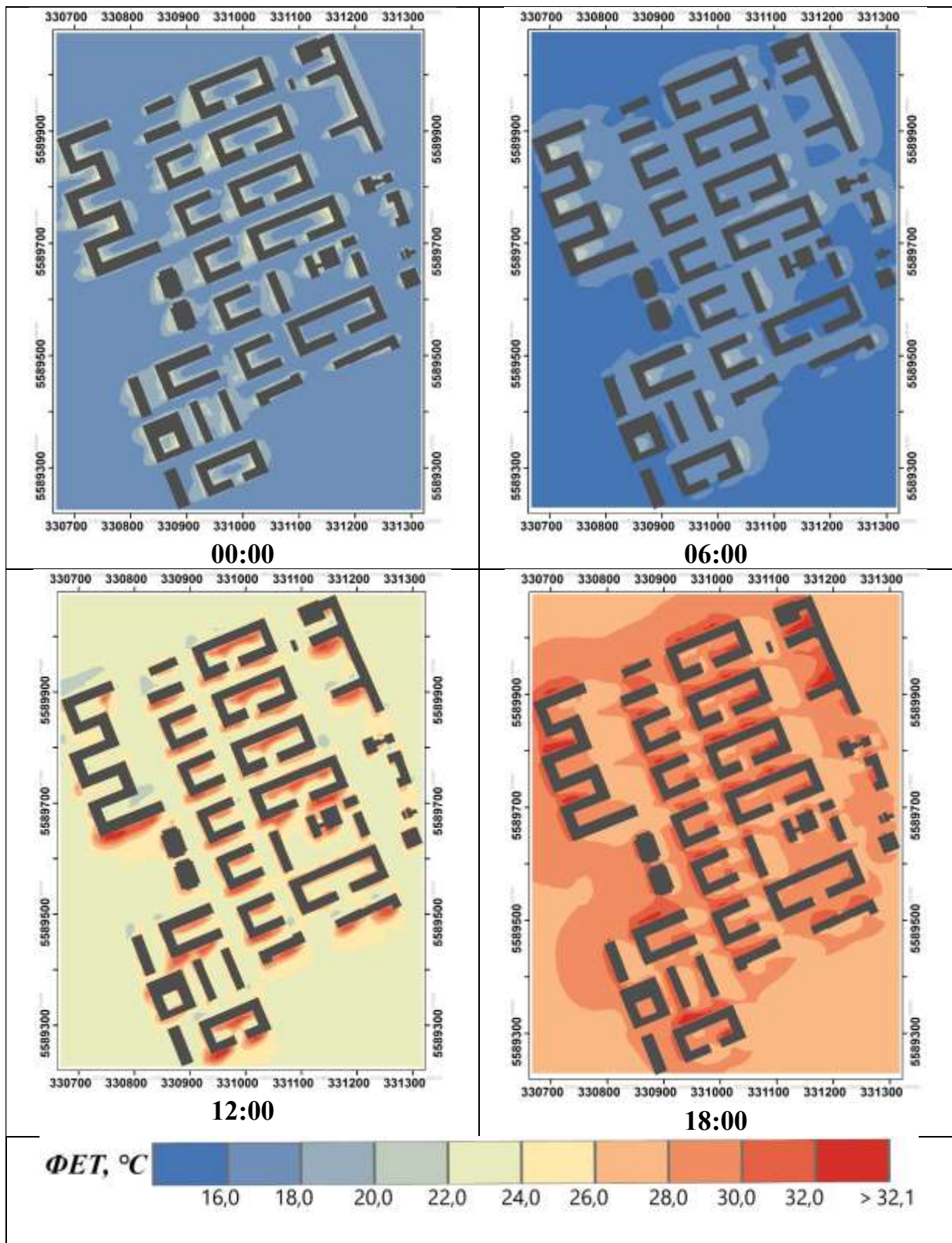
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



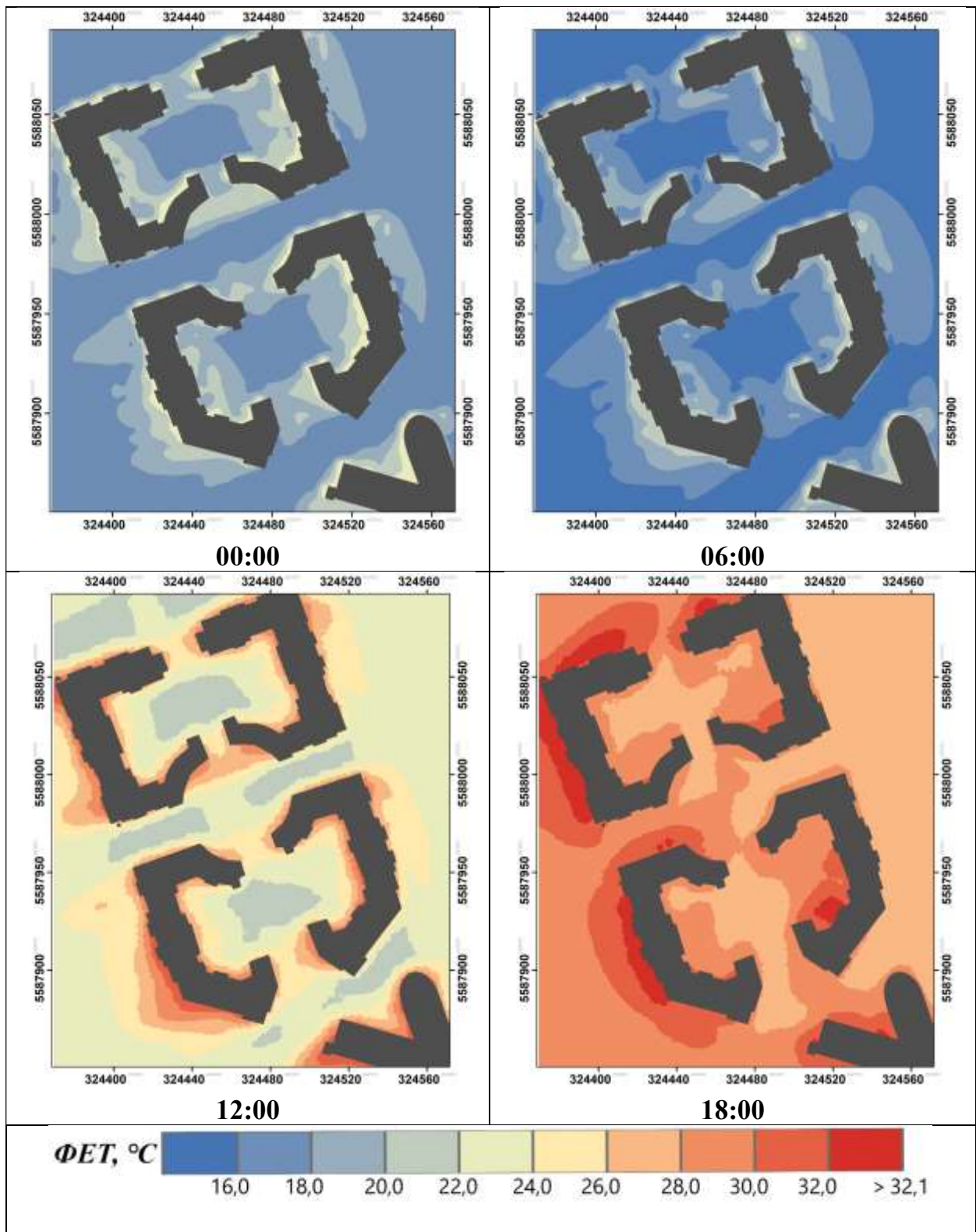
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



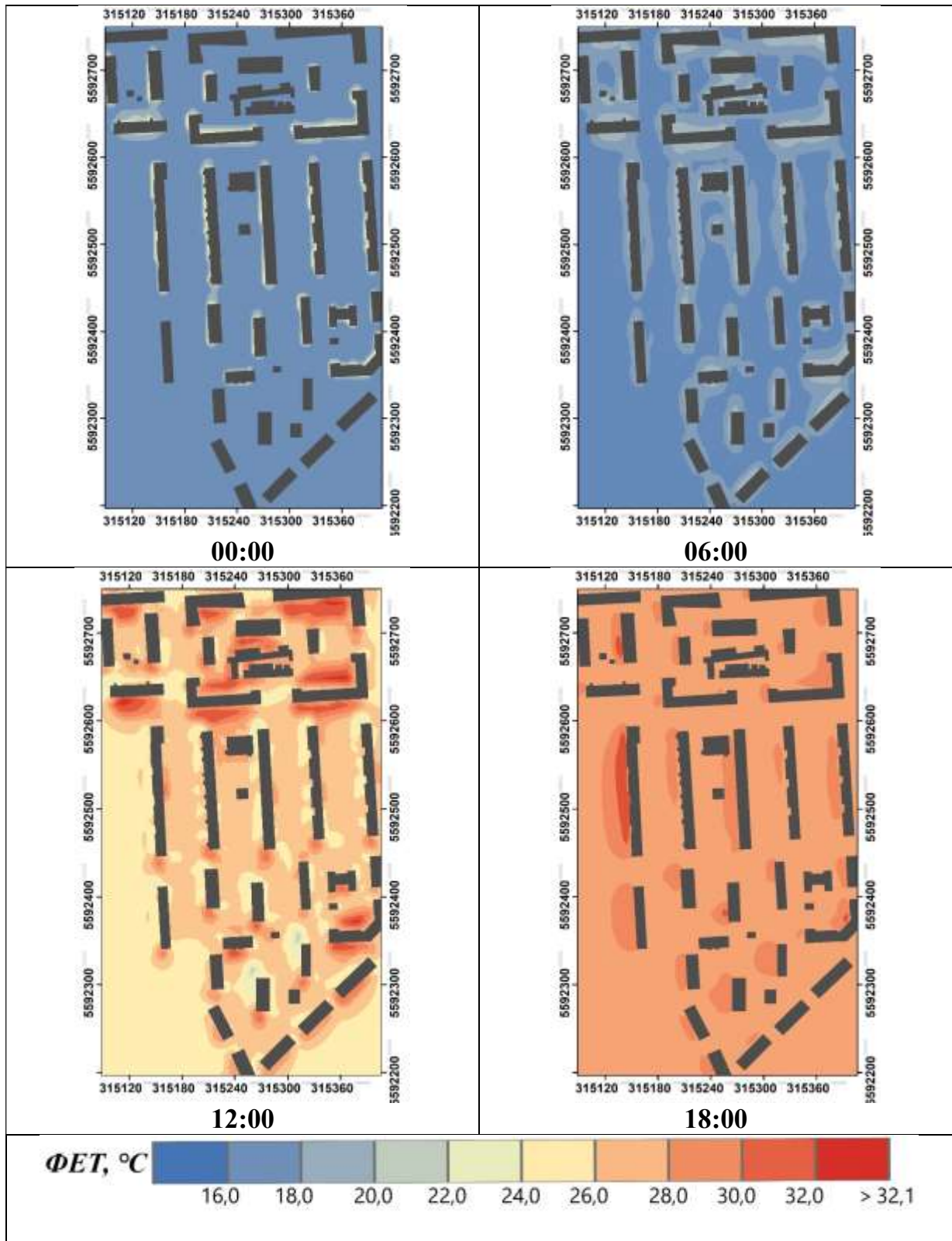
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



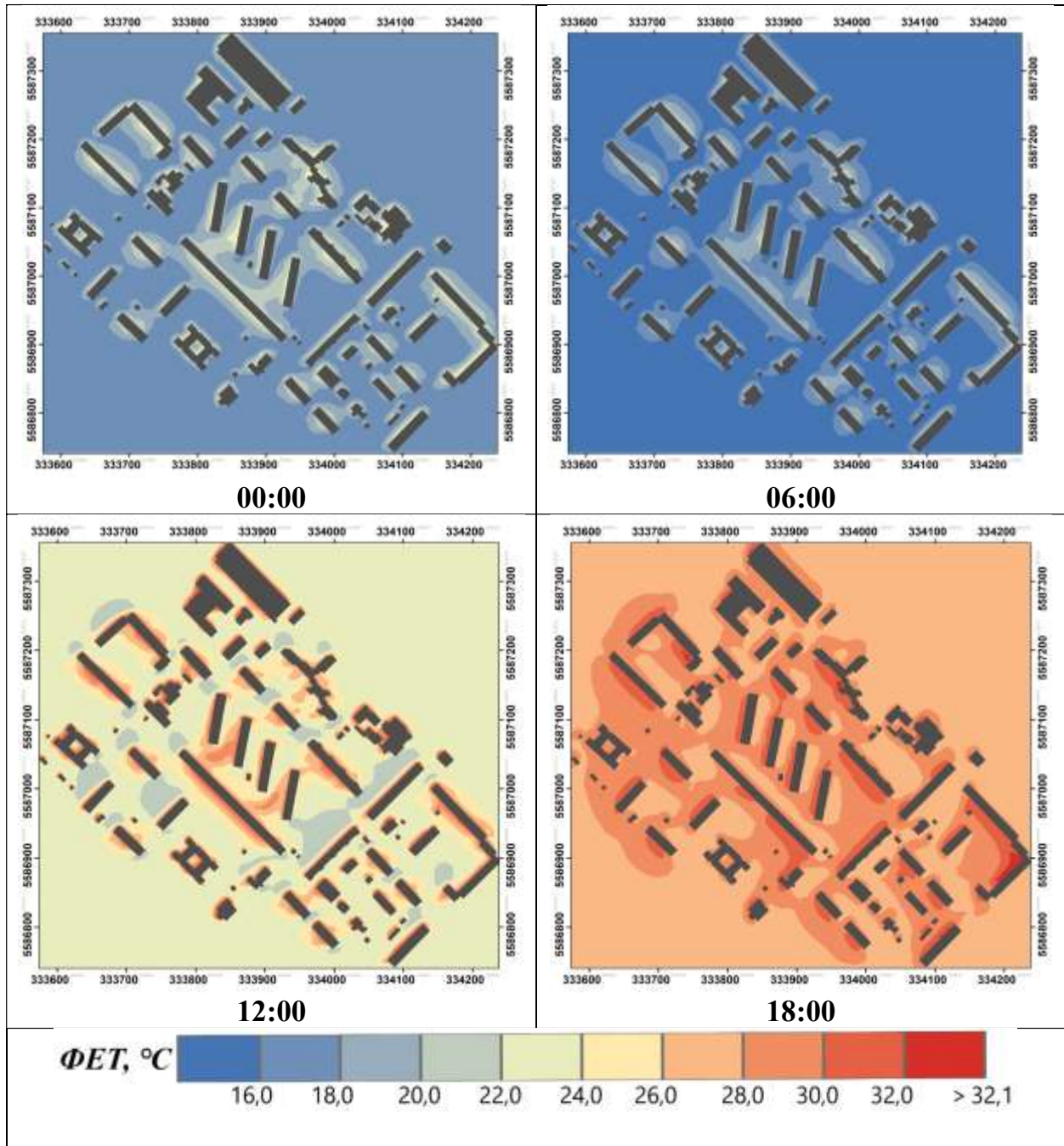
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



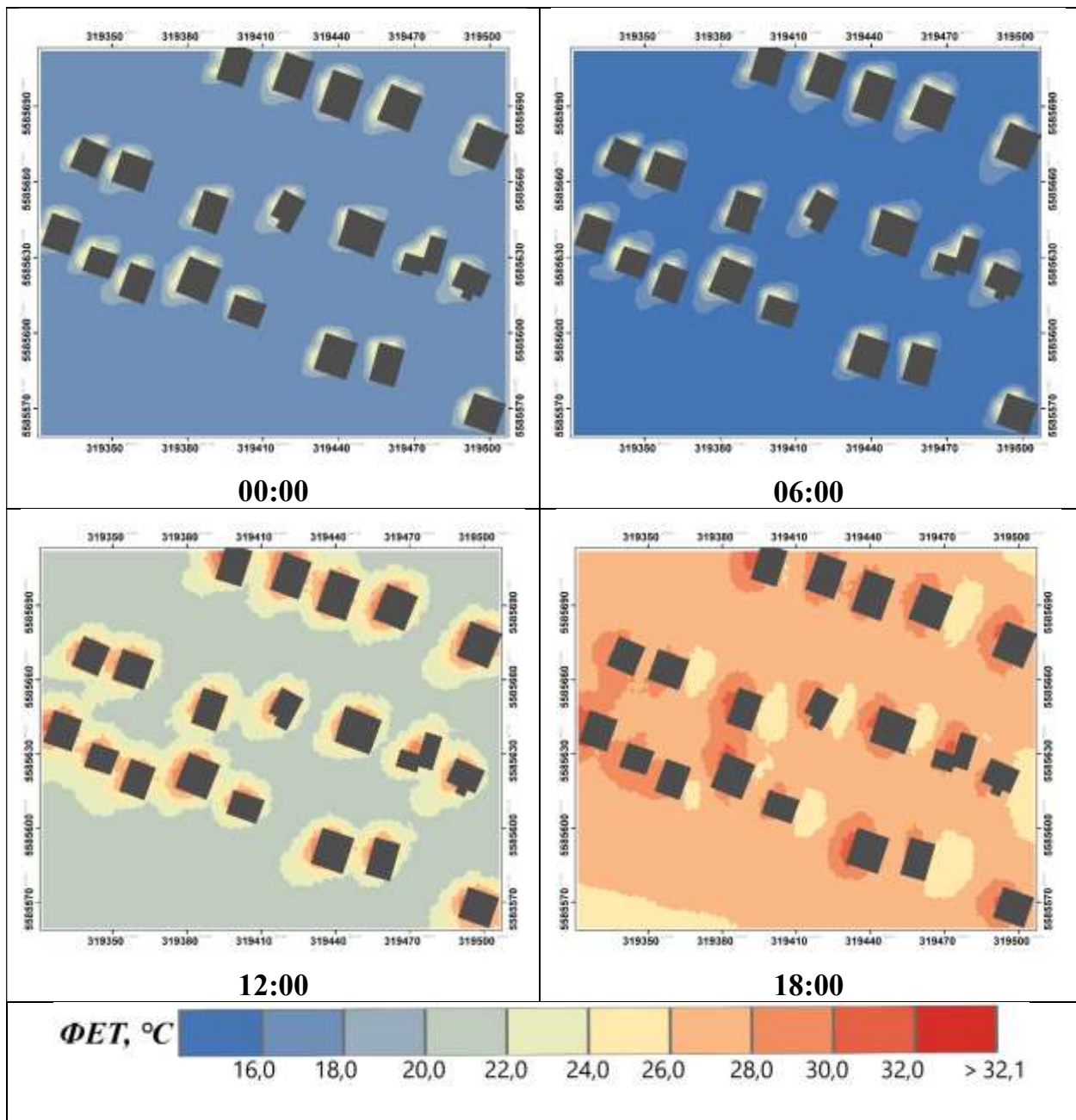
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



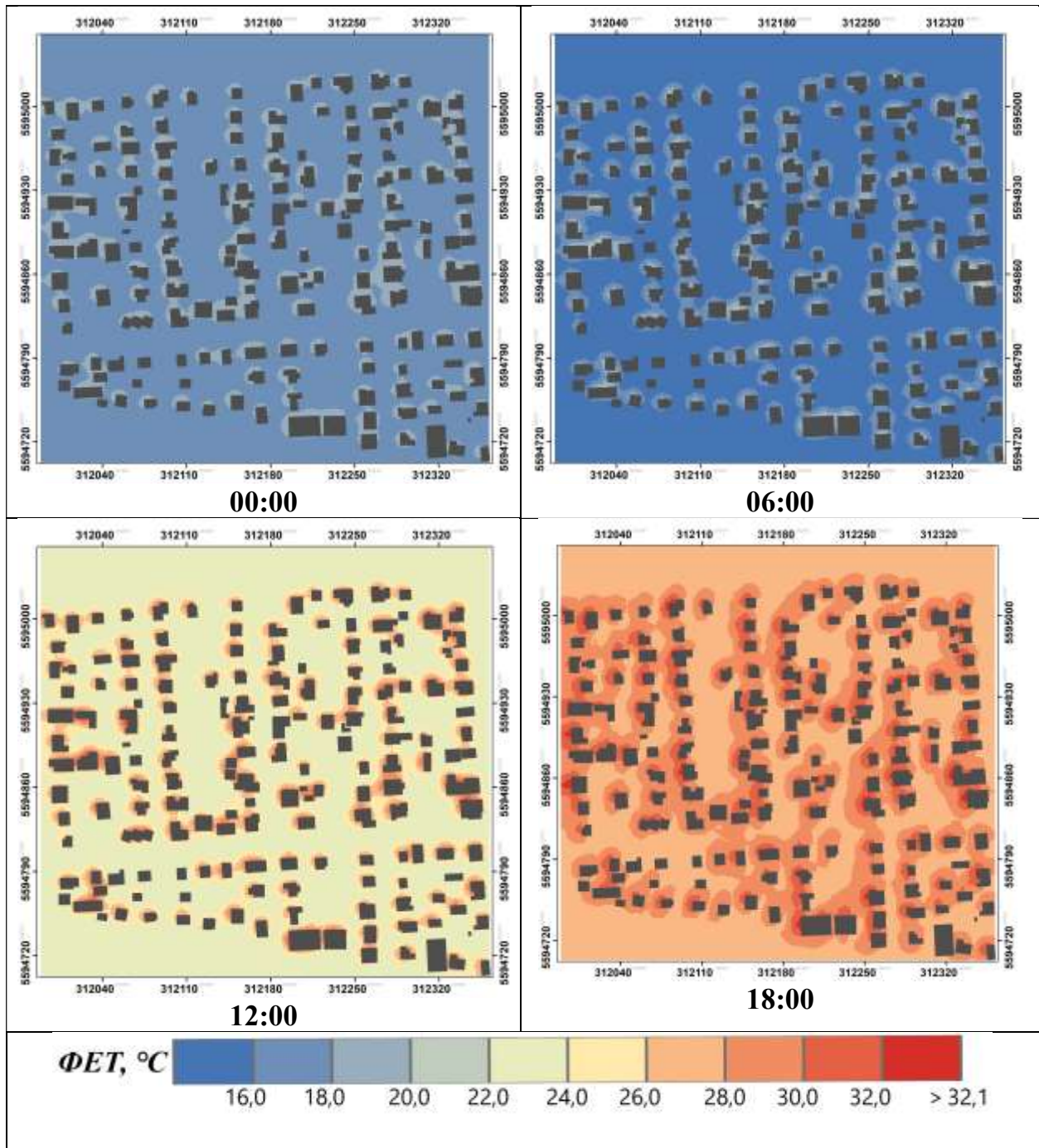
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Марківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



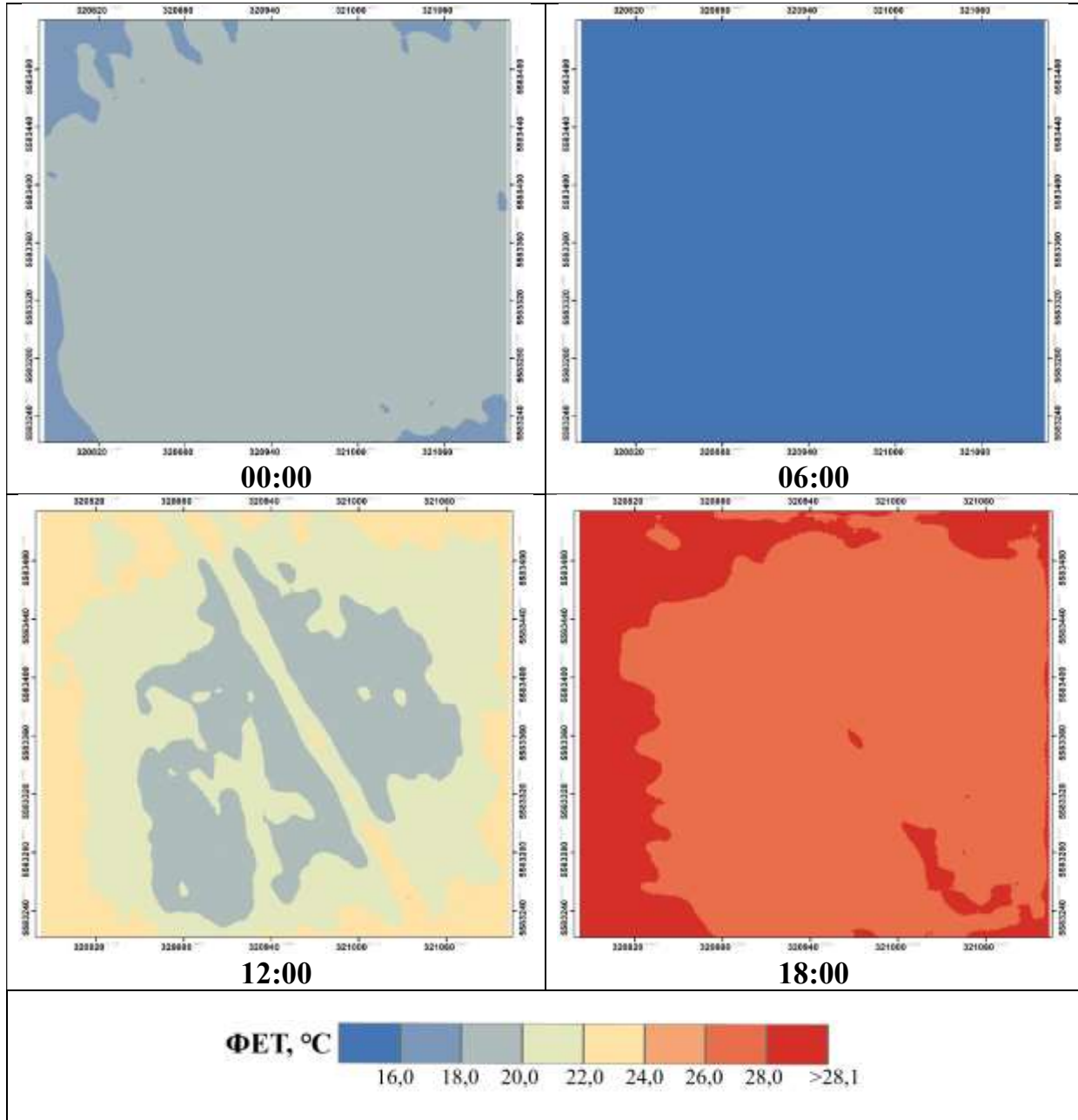
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

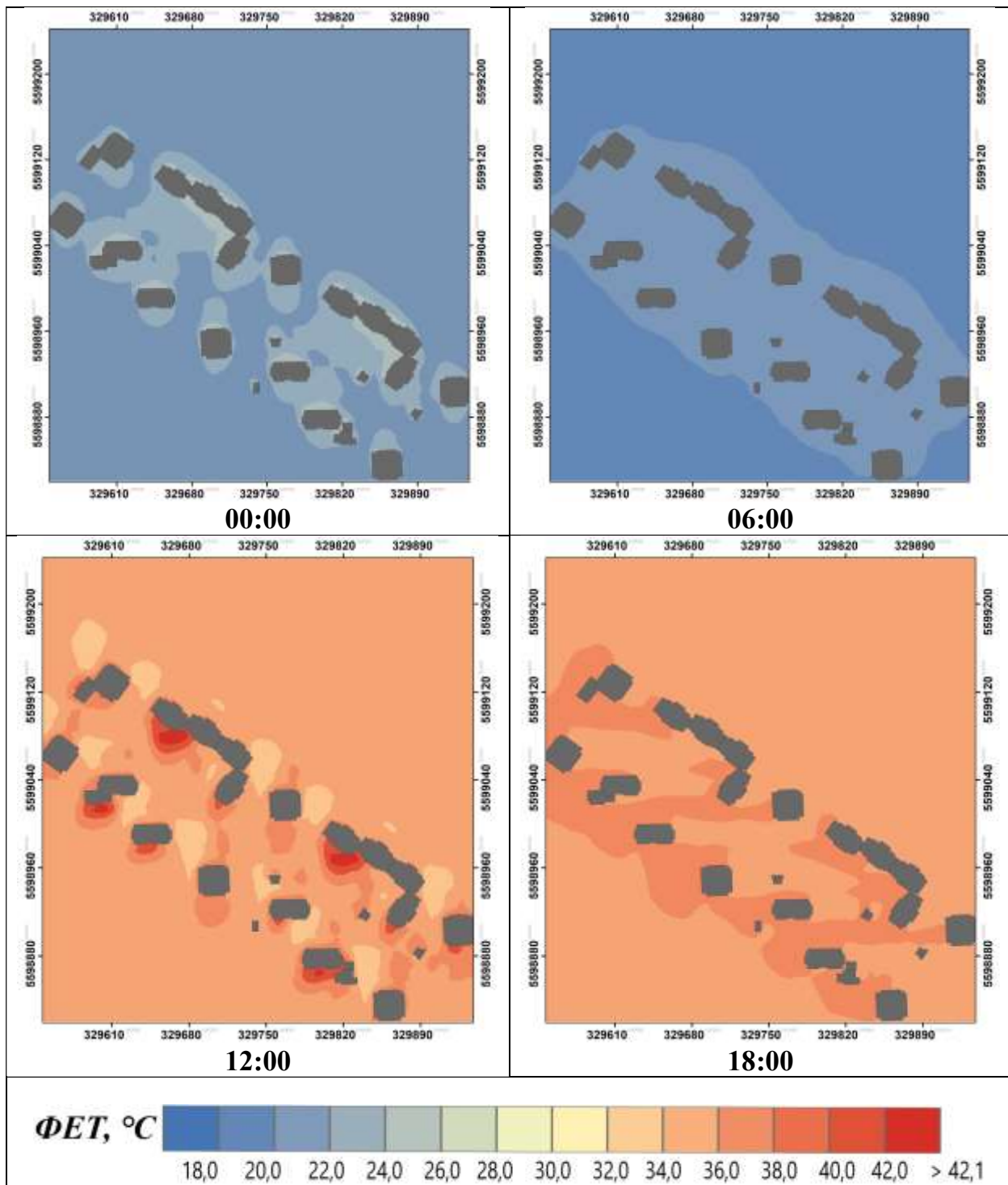


Результати моделювання значень ФЕТ за 14 липня 2020 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

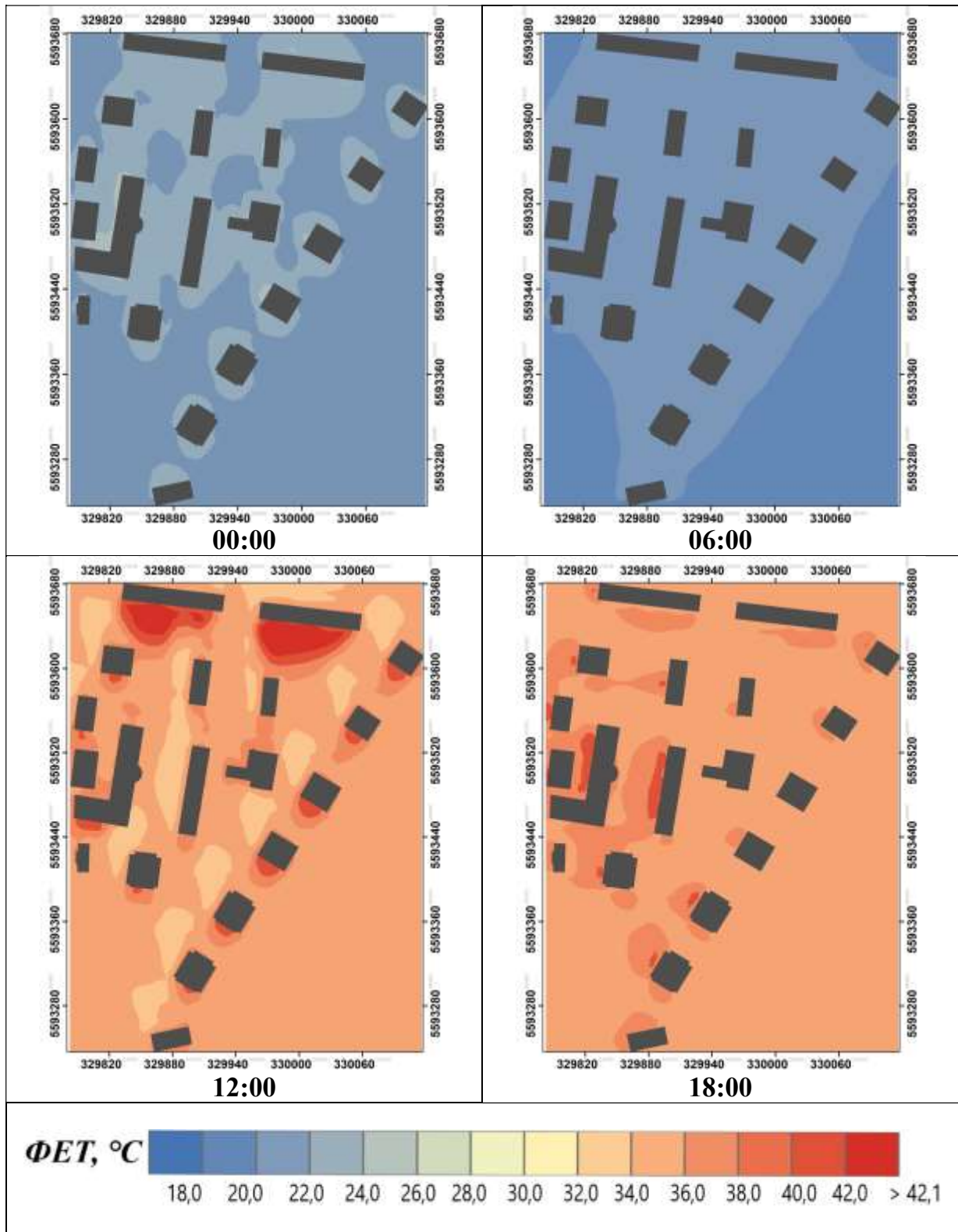


Додаток Н

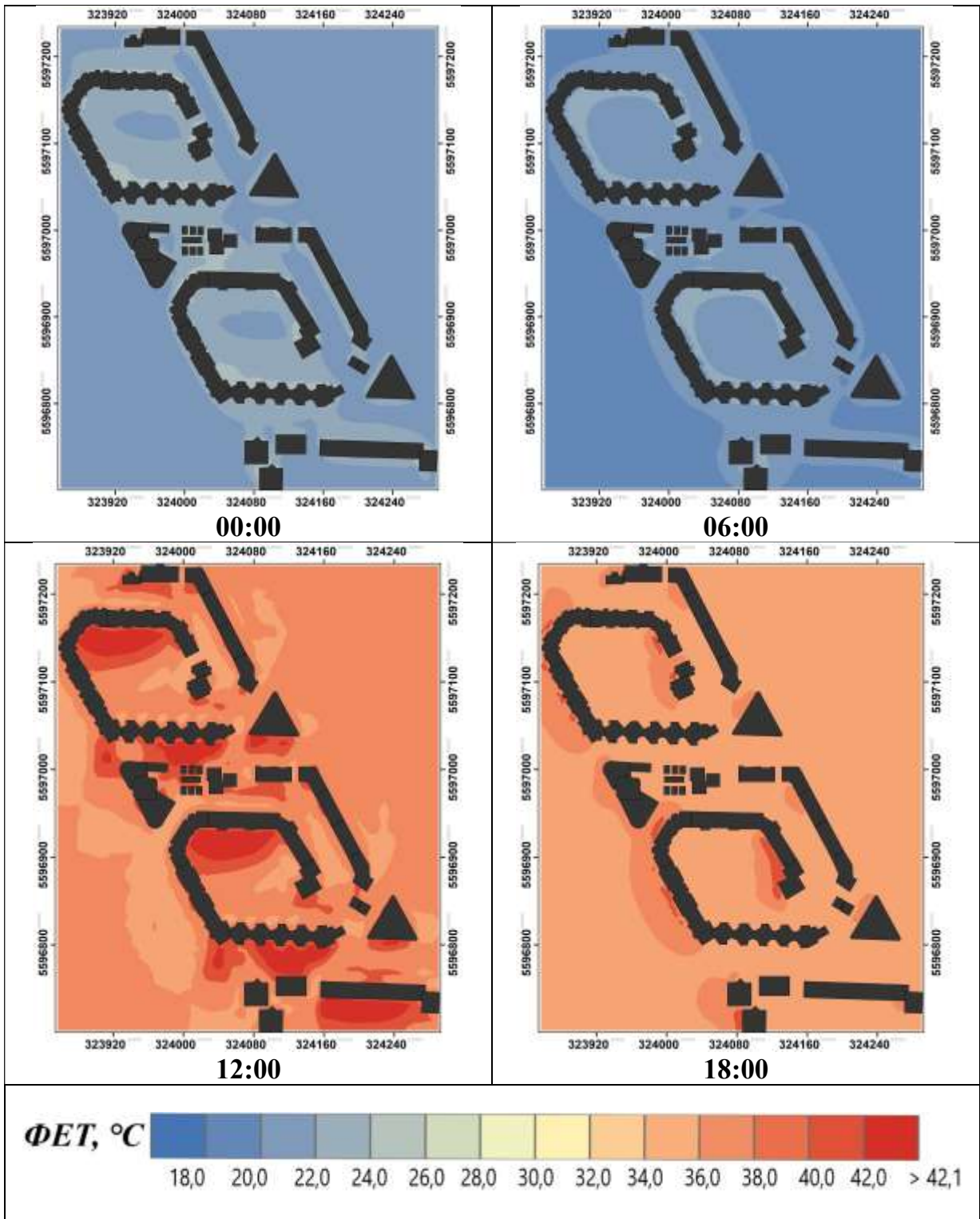
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 1 (ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



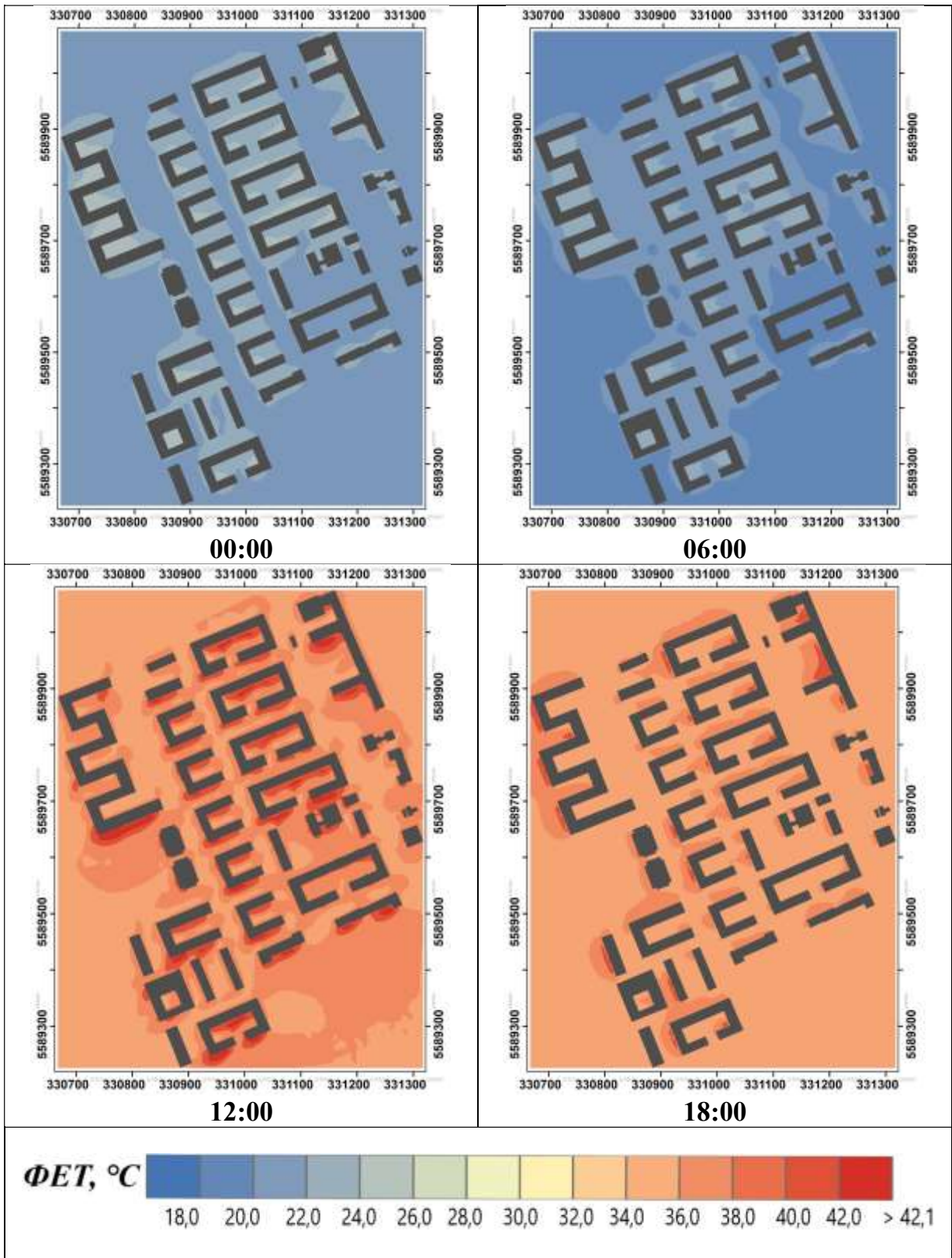
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



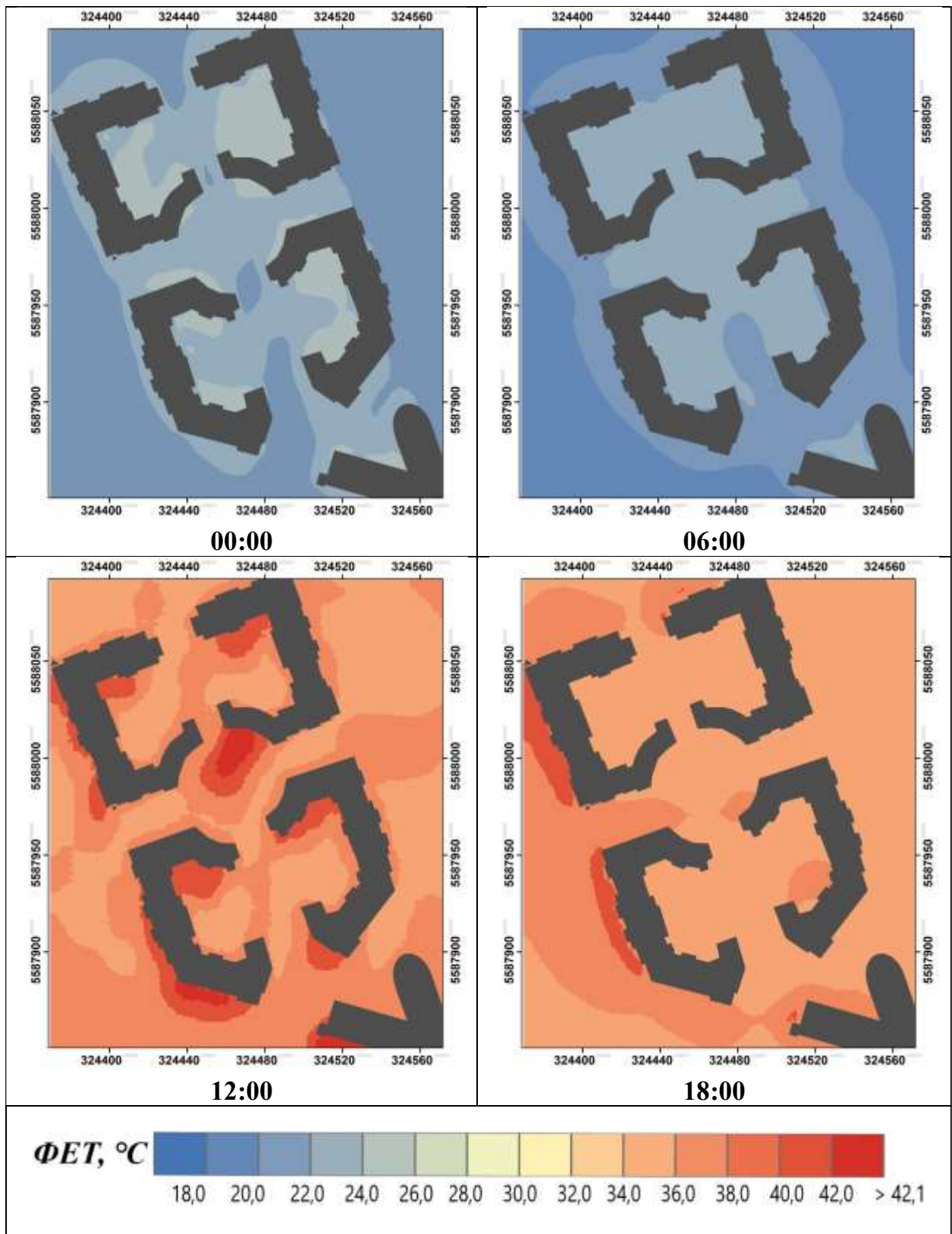
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



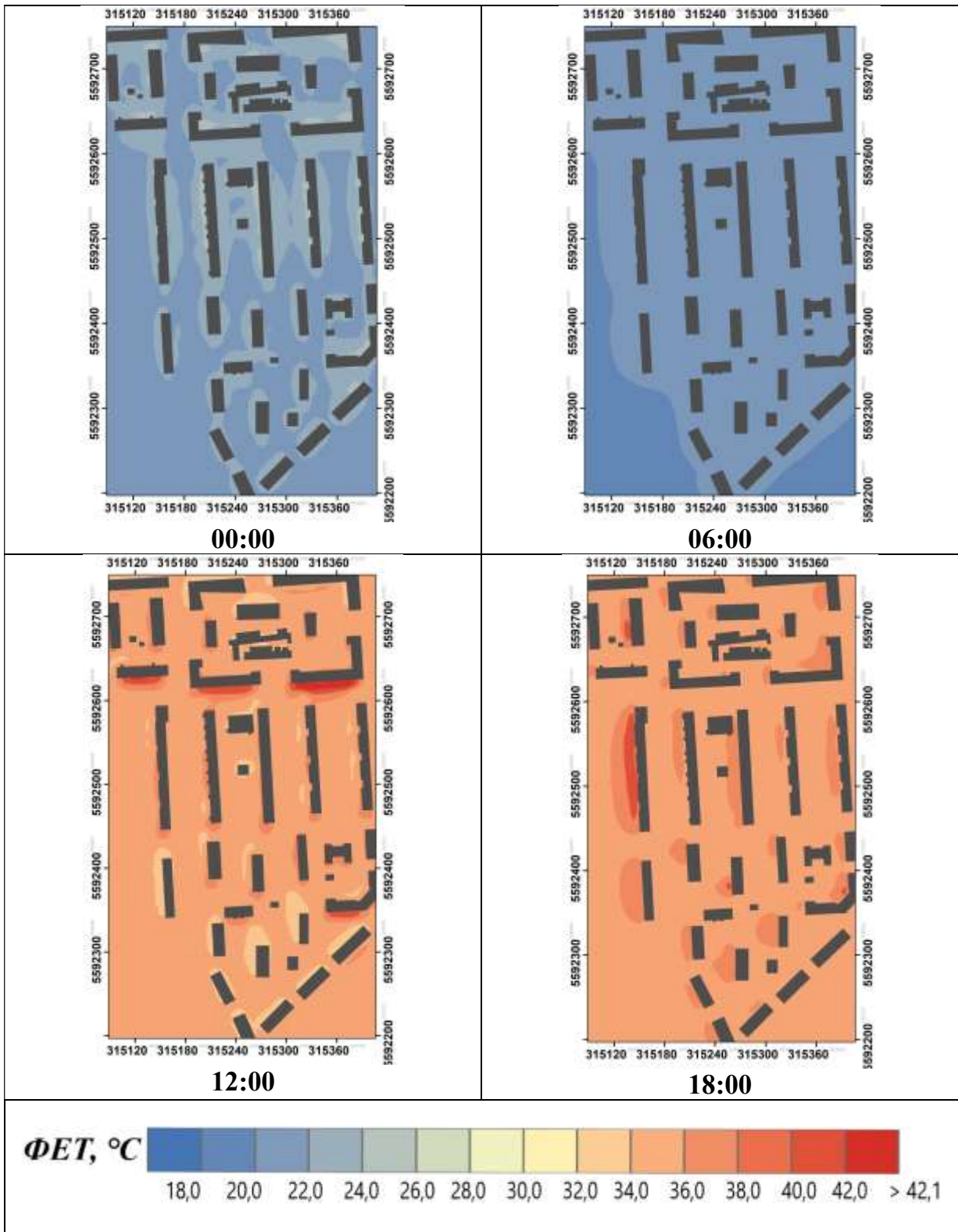
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



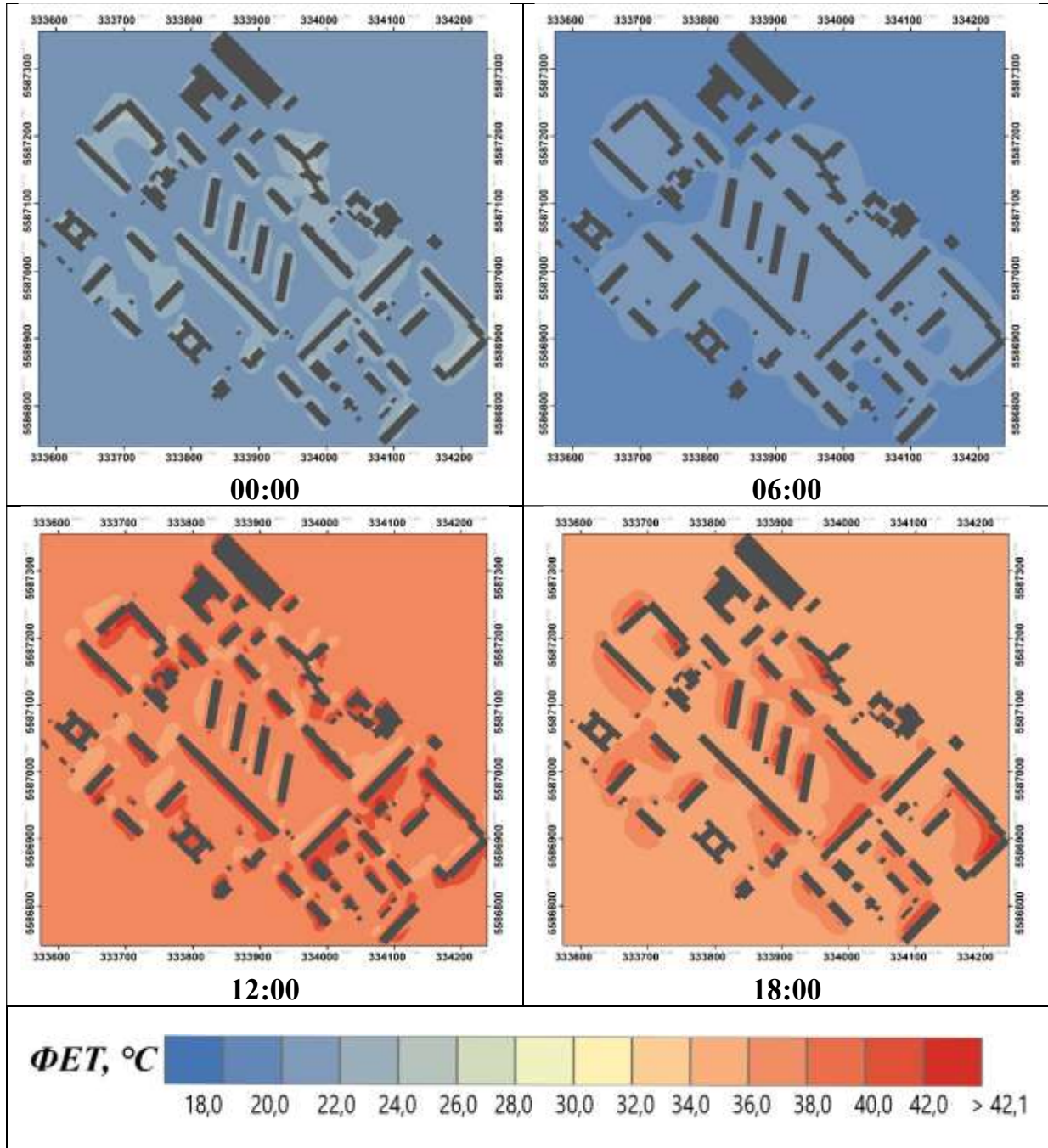
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



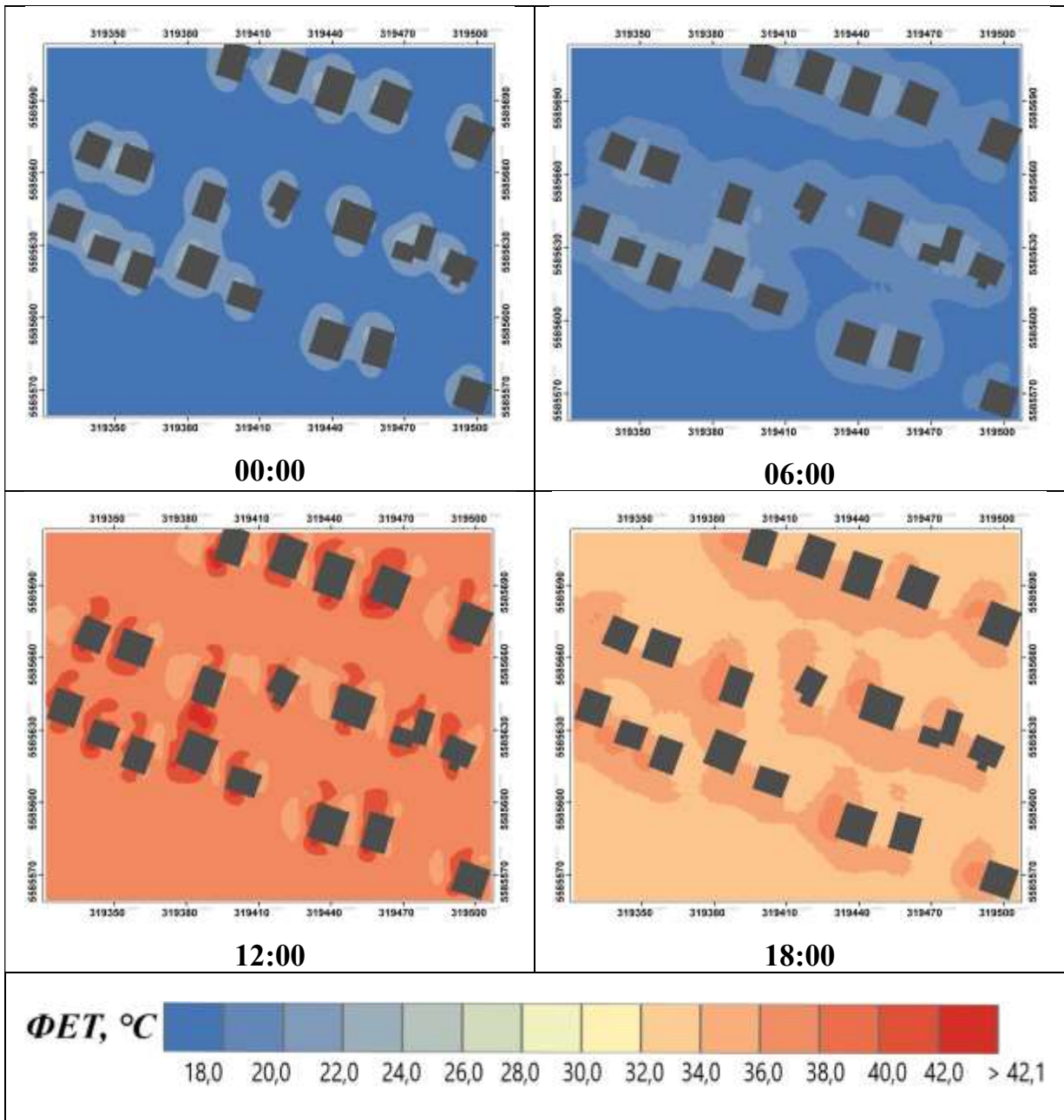
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



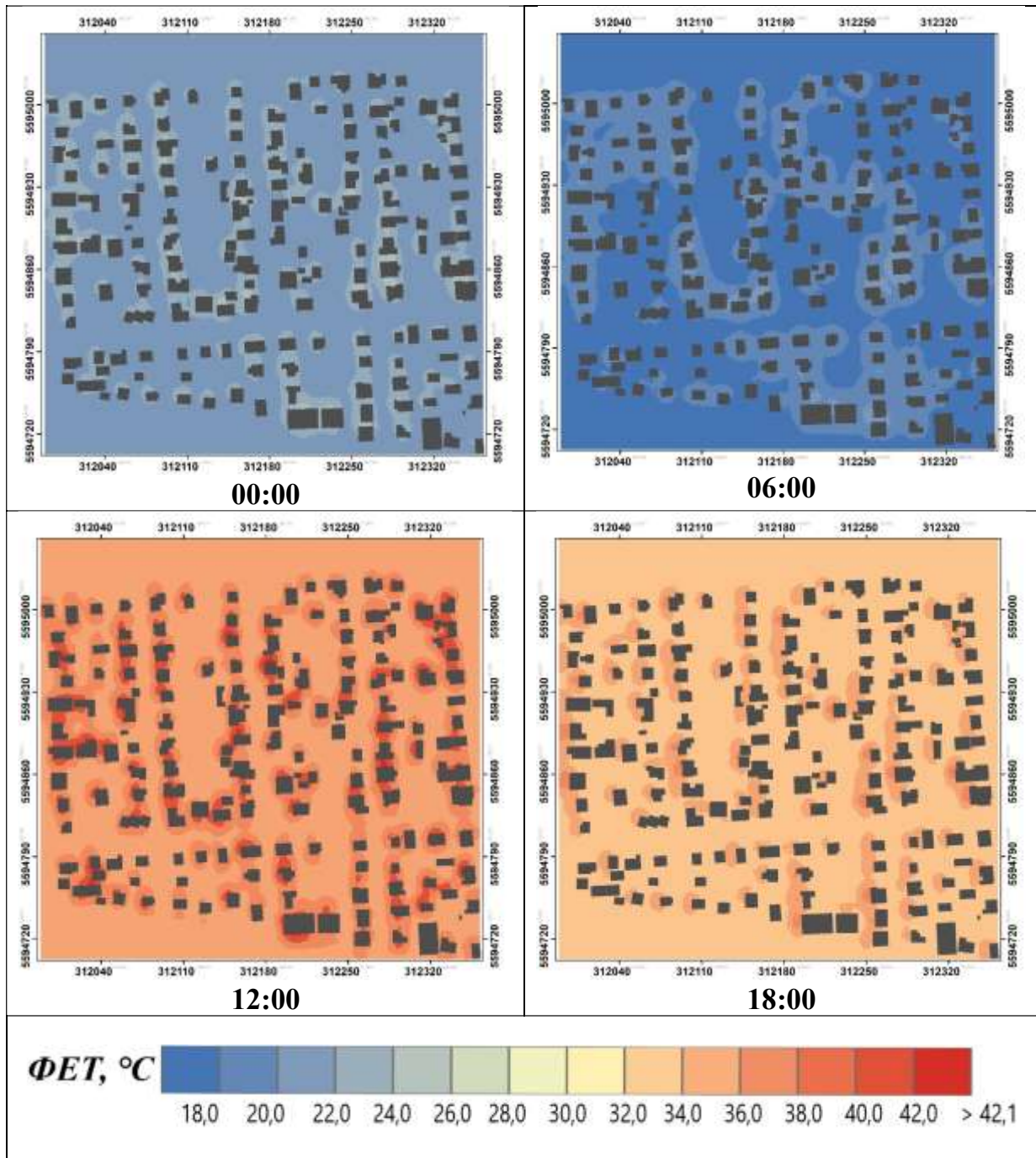
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Нарківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



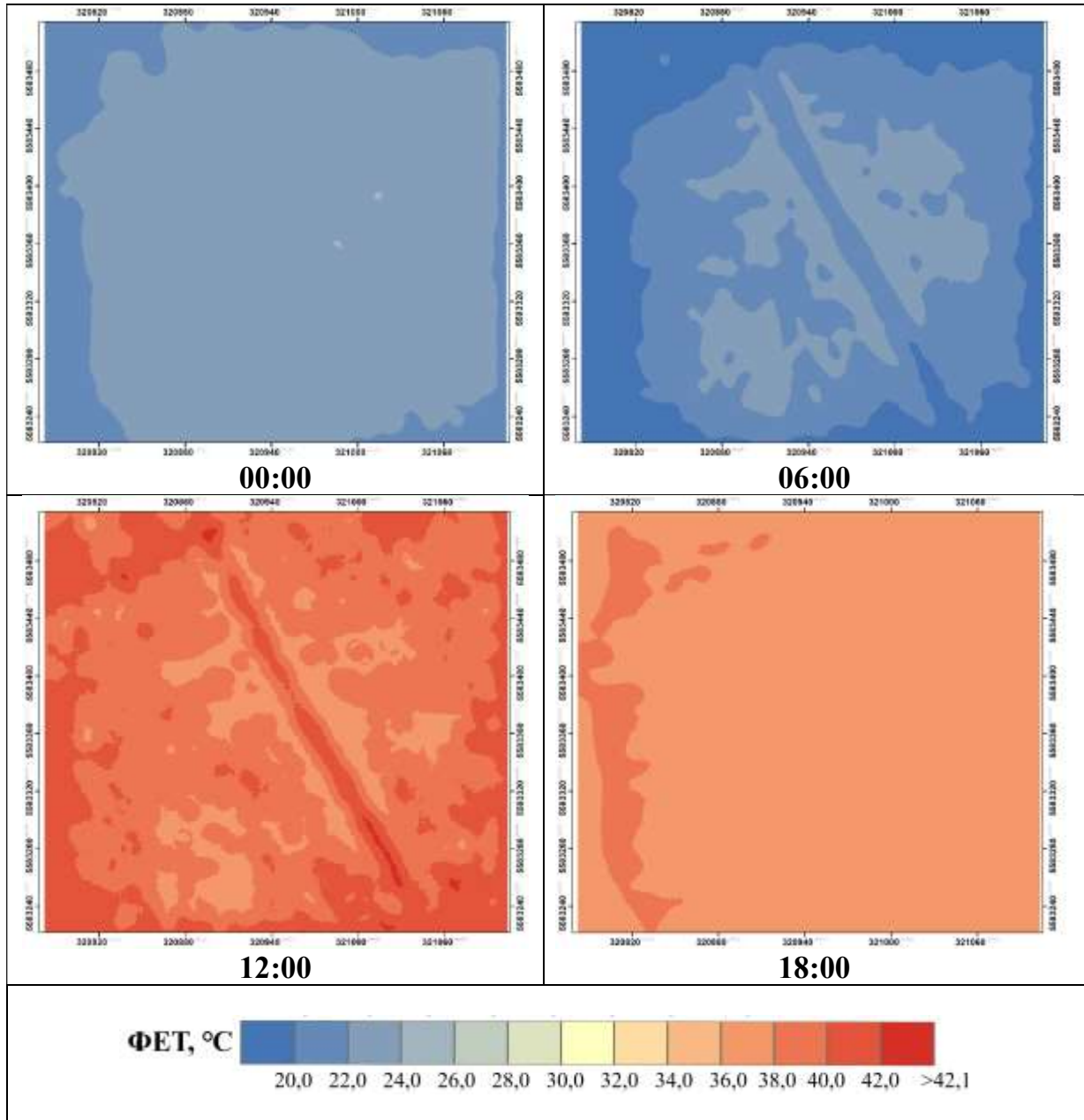
Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

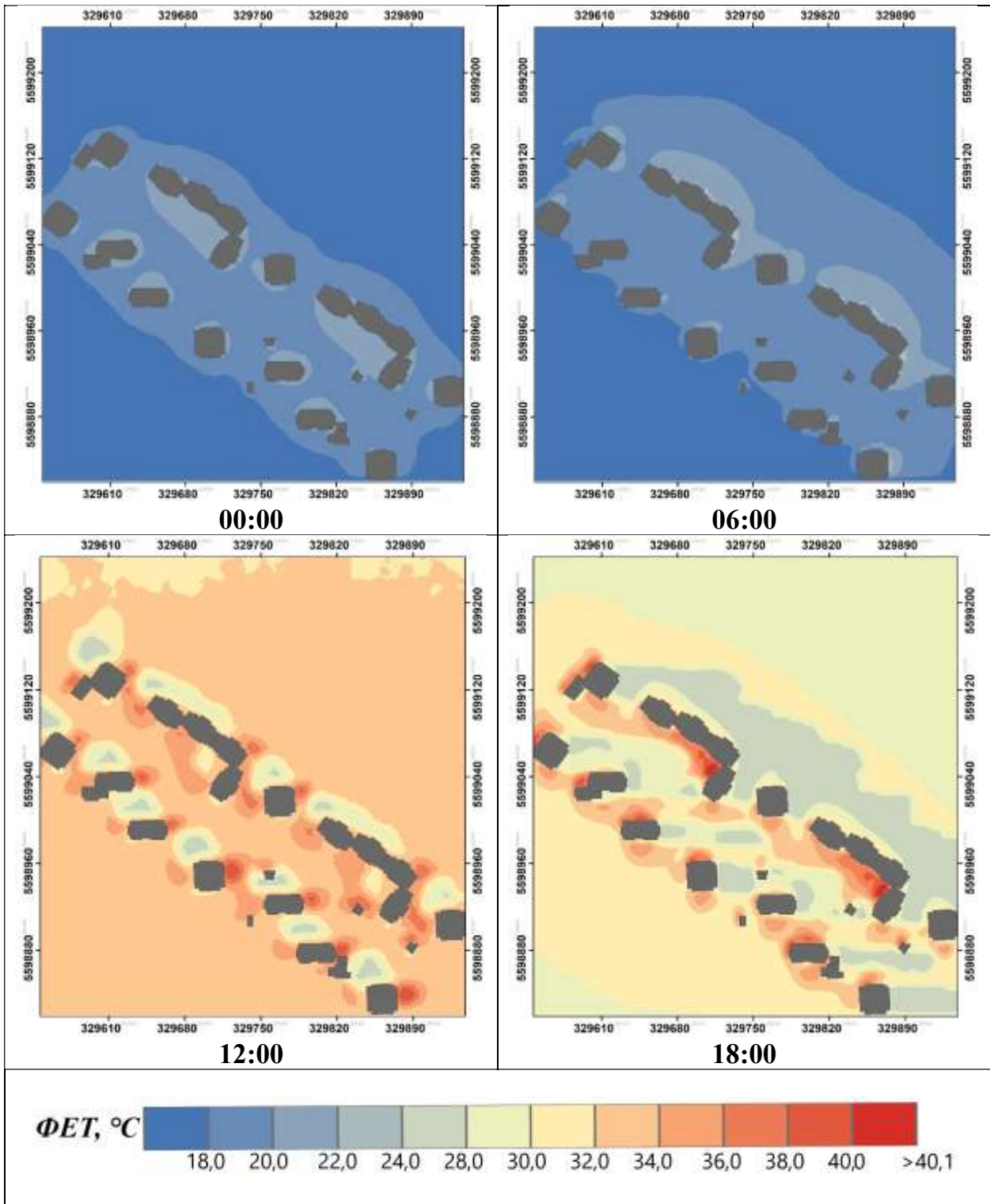


Результати моделювання значень ФЕТ за 14 серпня 2010 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

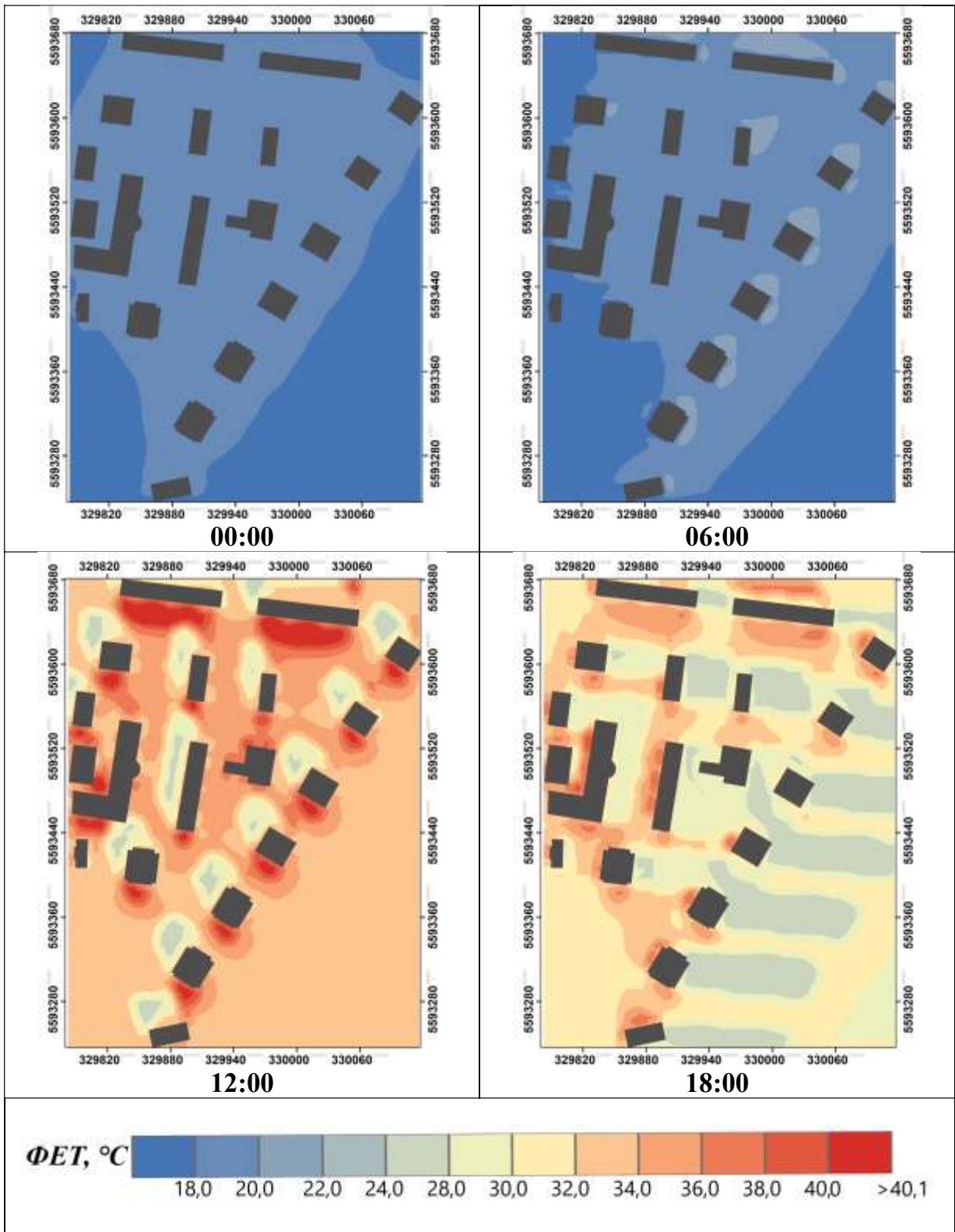


Додаток О

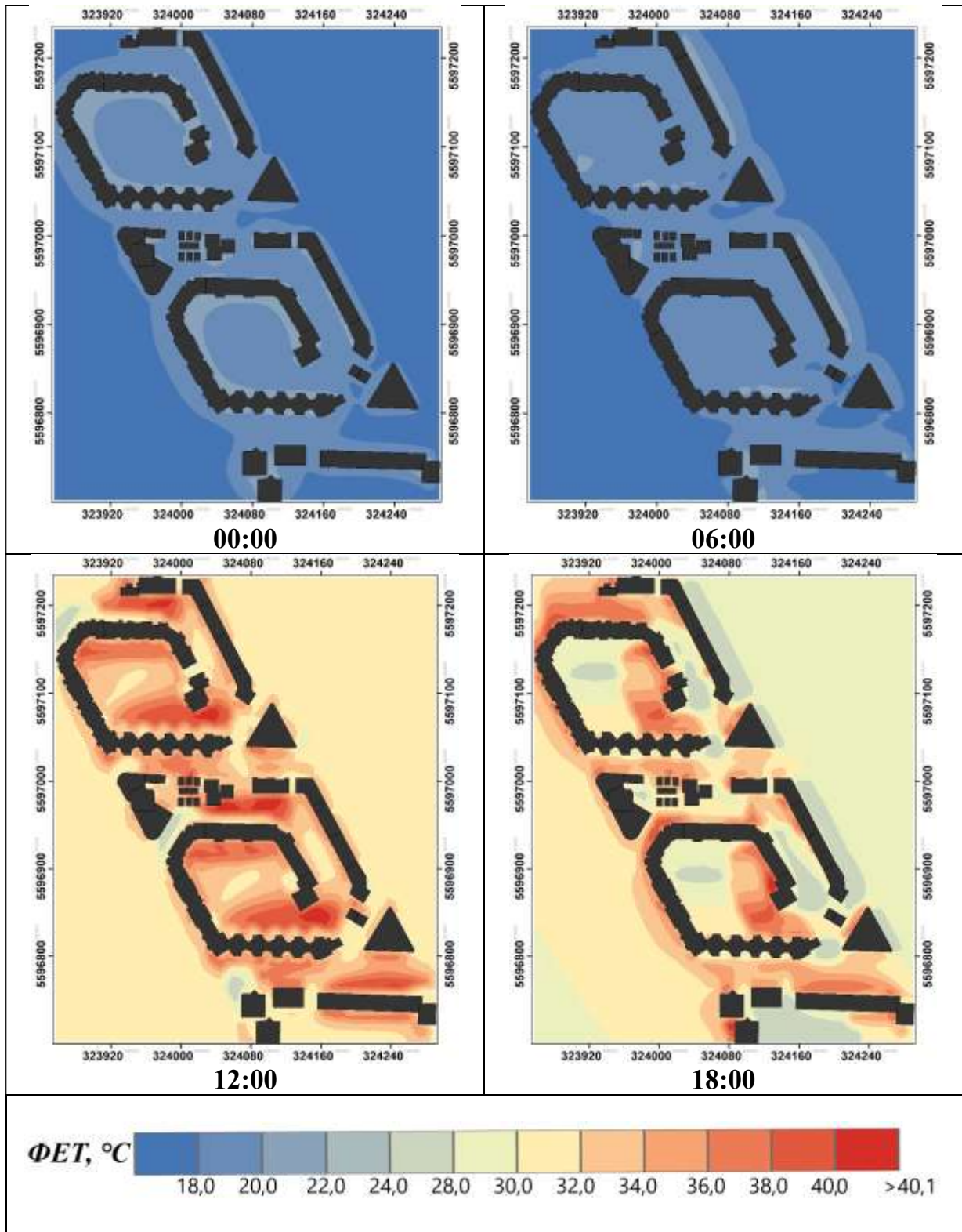
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 1
(ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



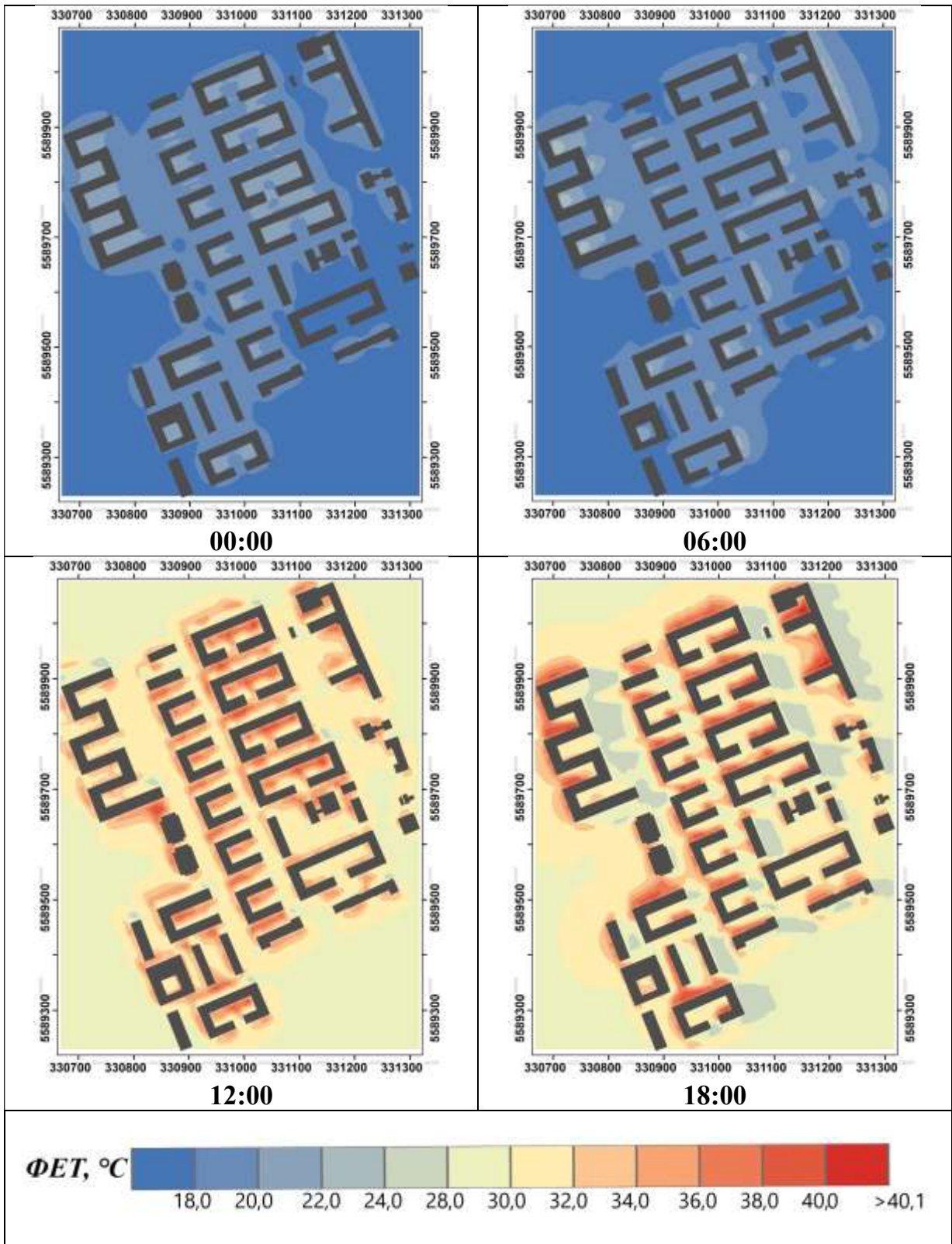
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



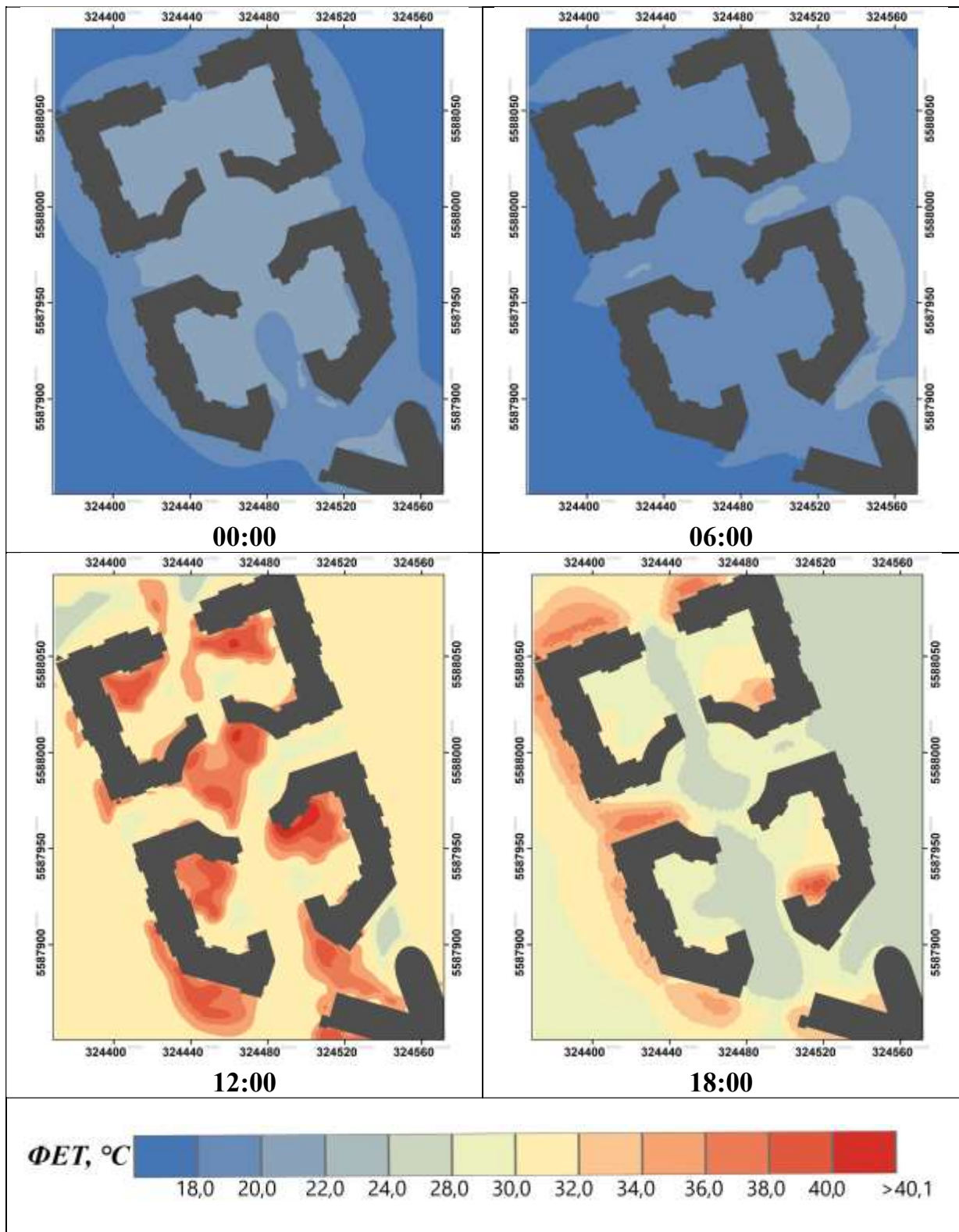
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



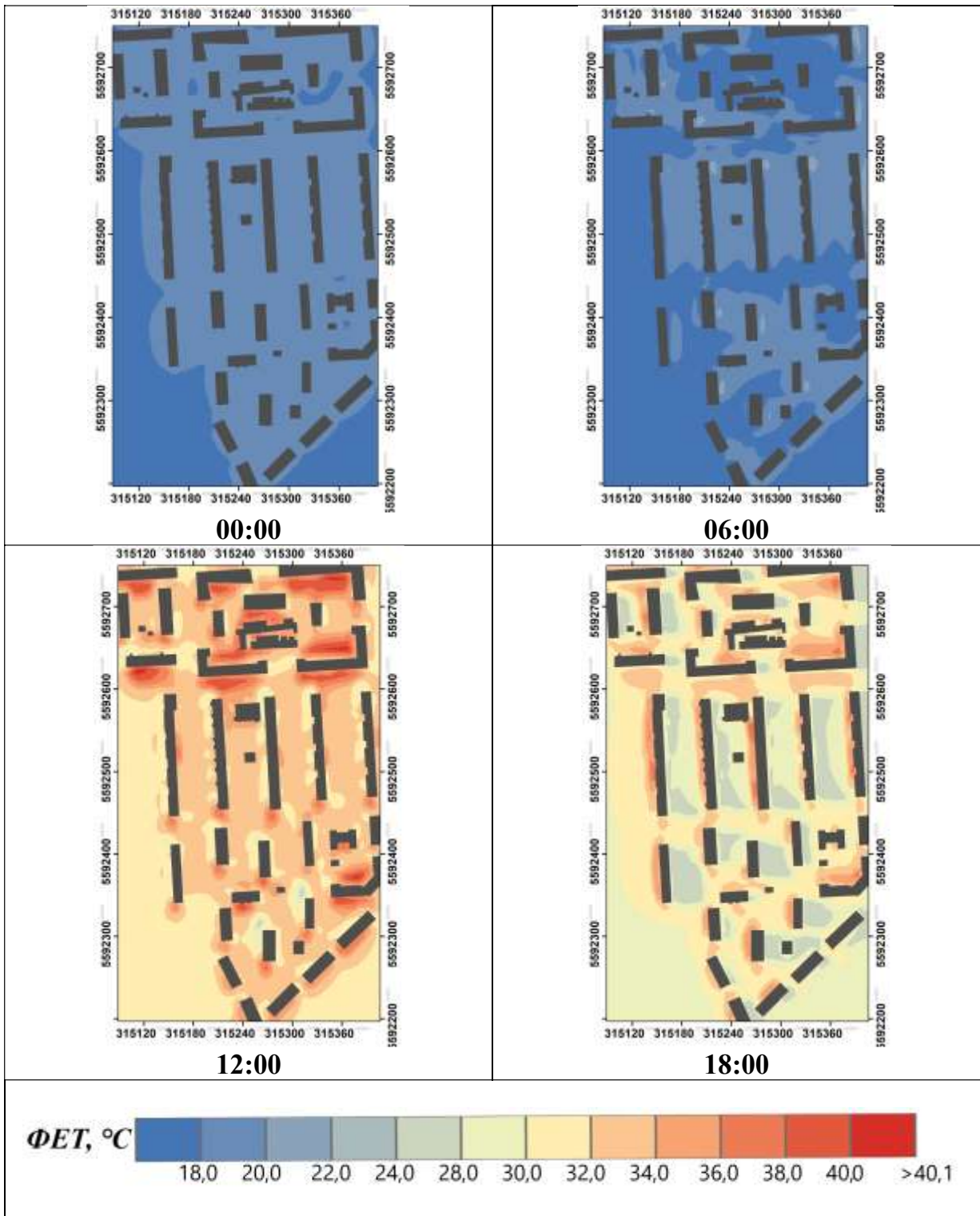
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



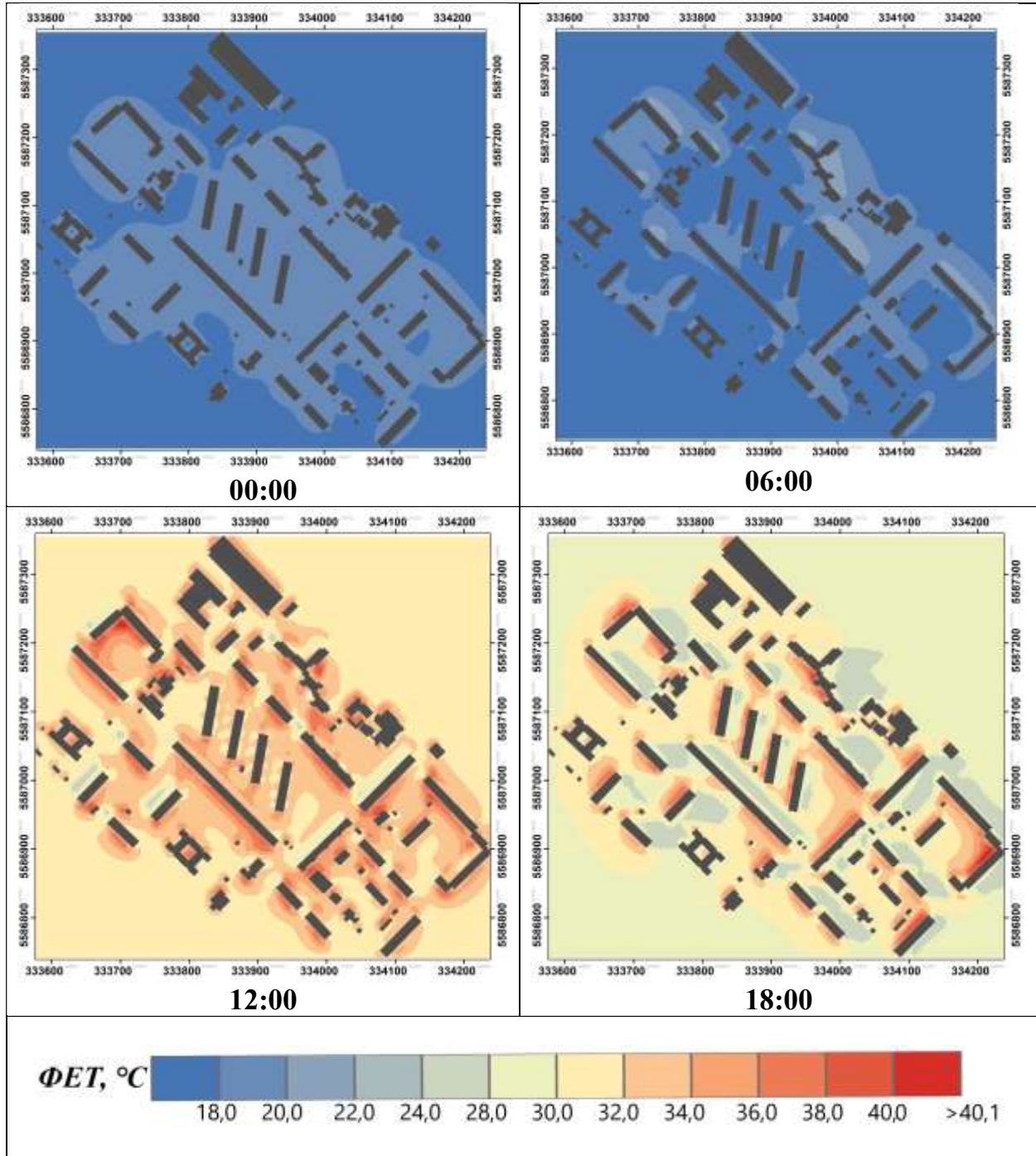
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



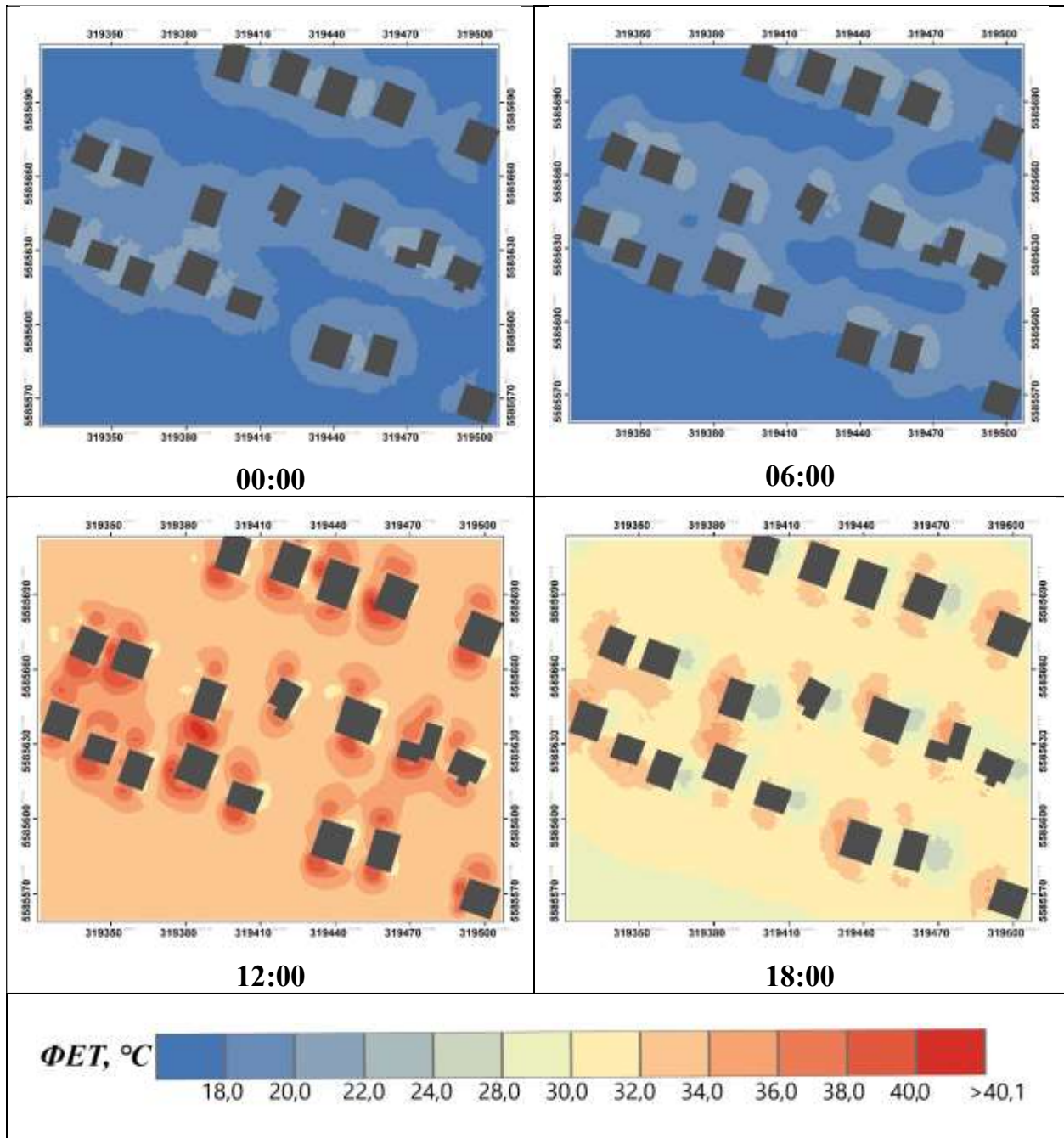
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



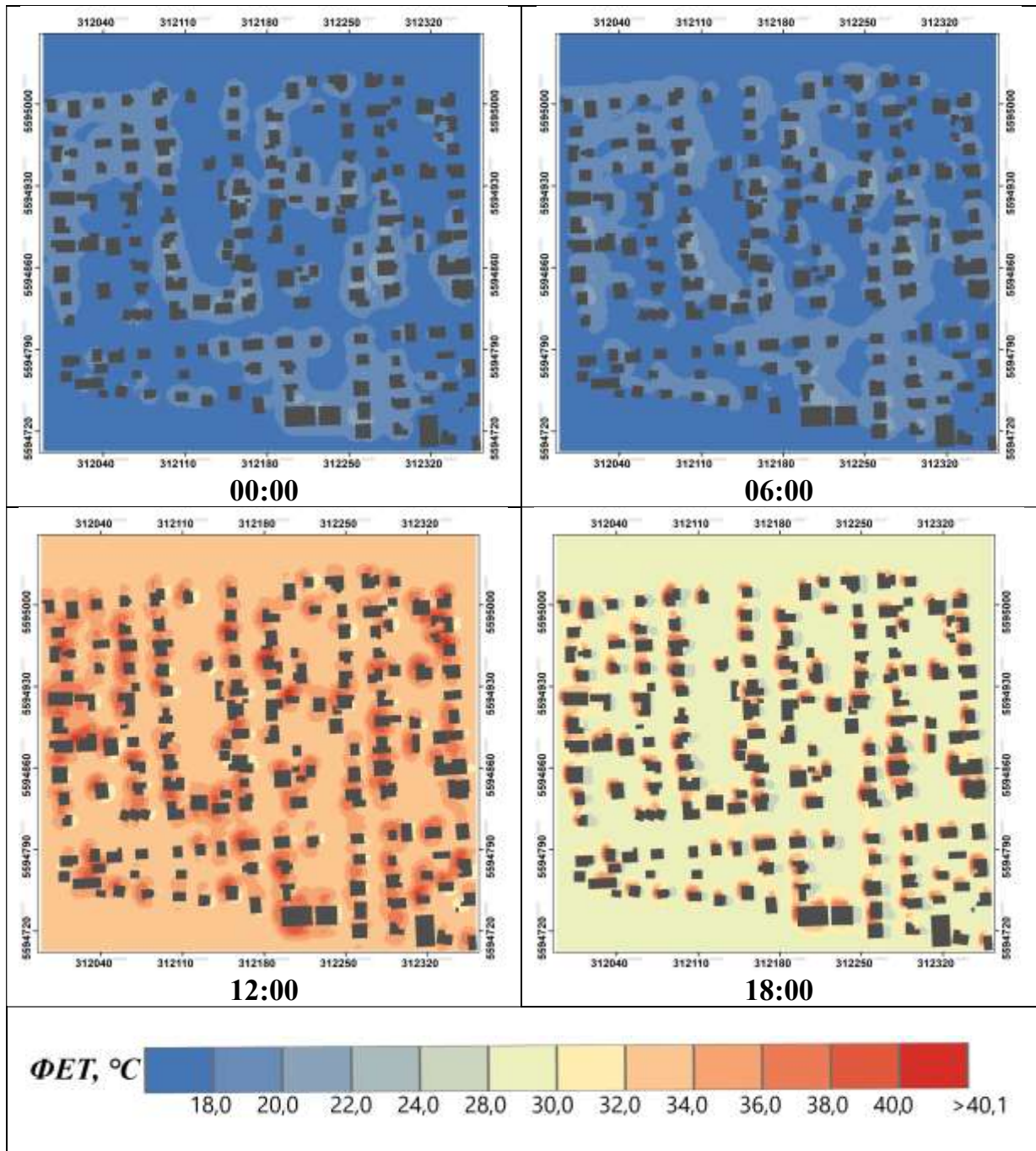
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Оарківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



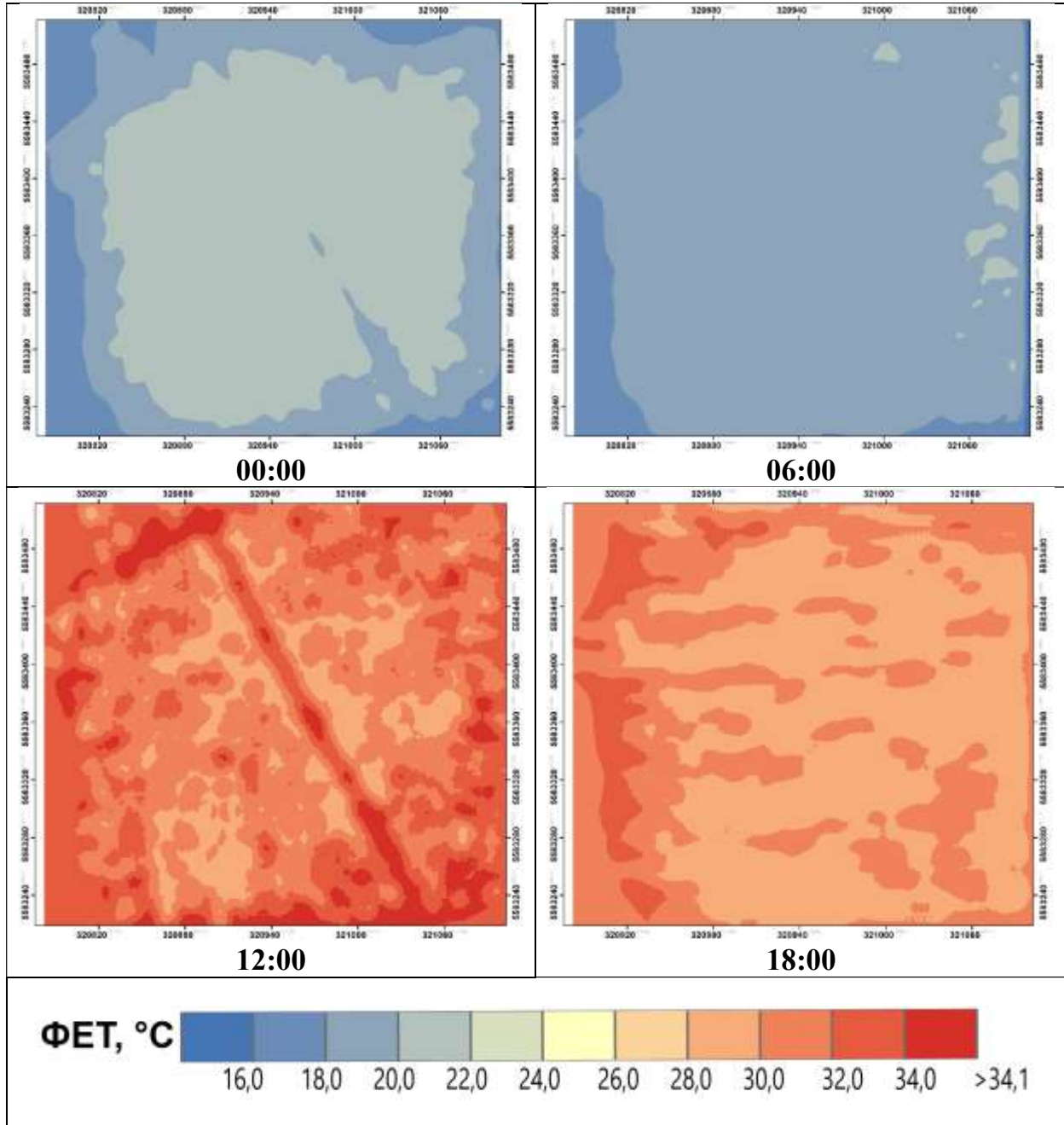
Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

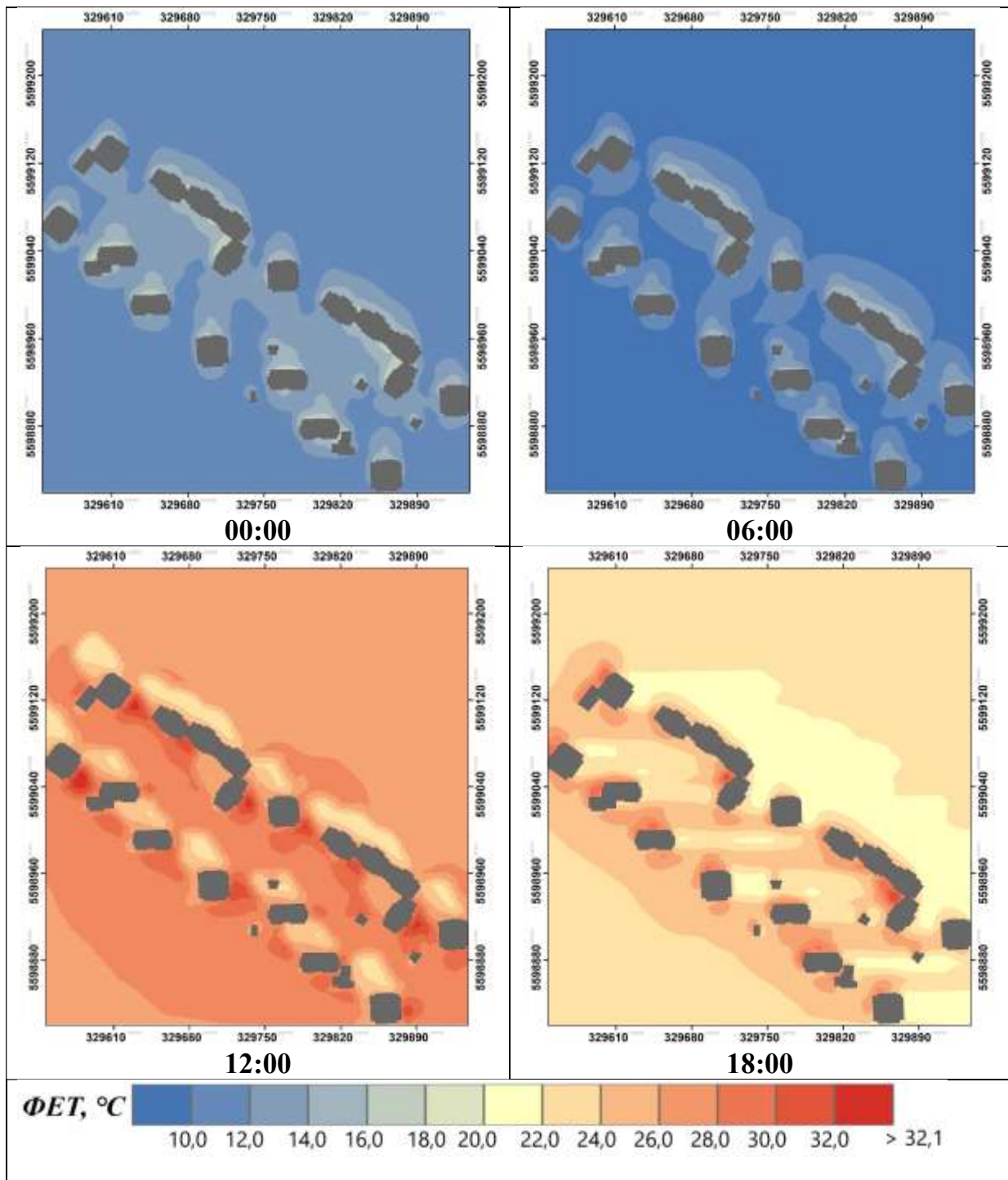


Результати моделювання значень ФЕТ за 26 червня 2020 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ

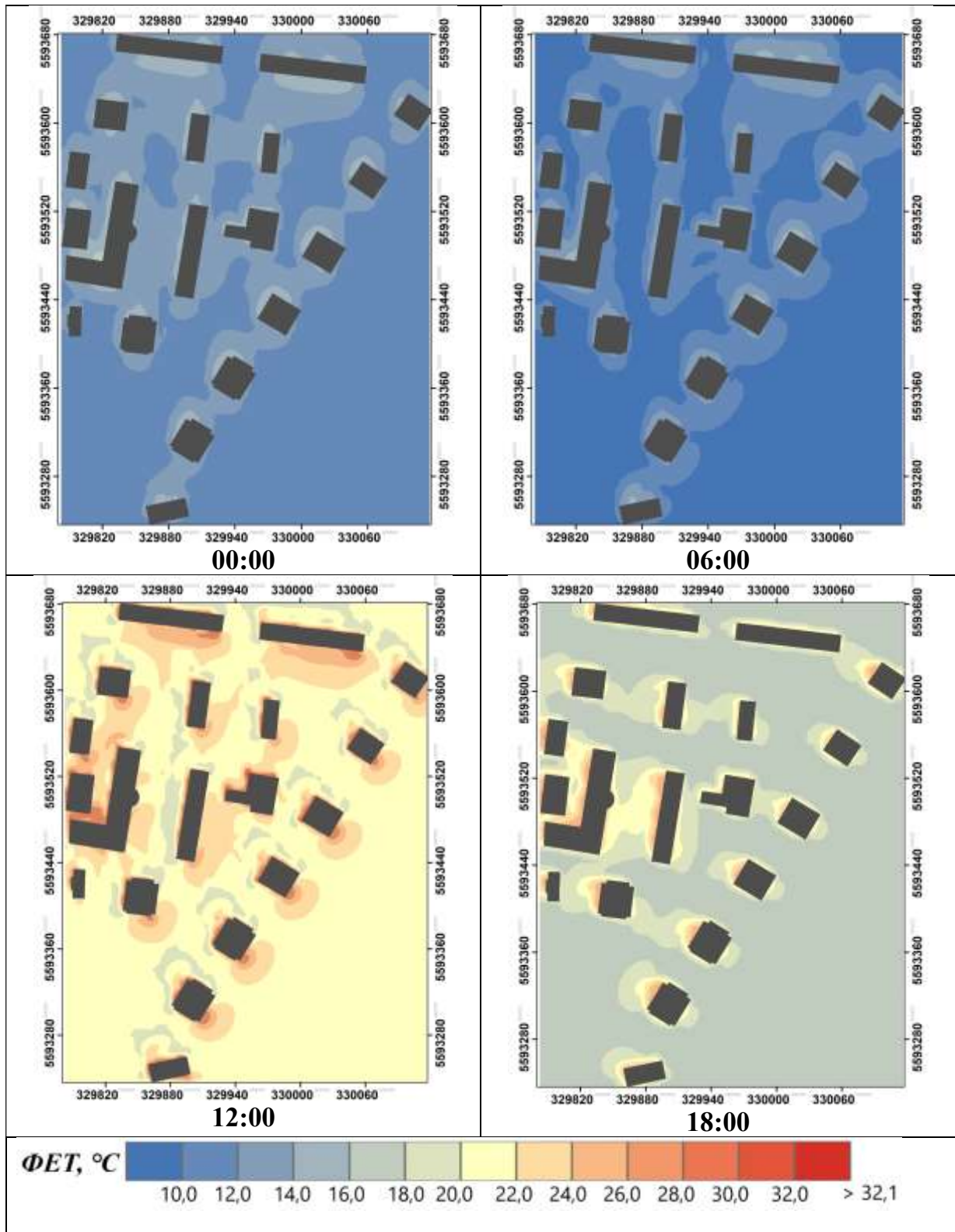


Додаток П

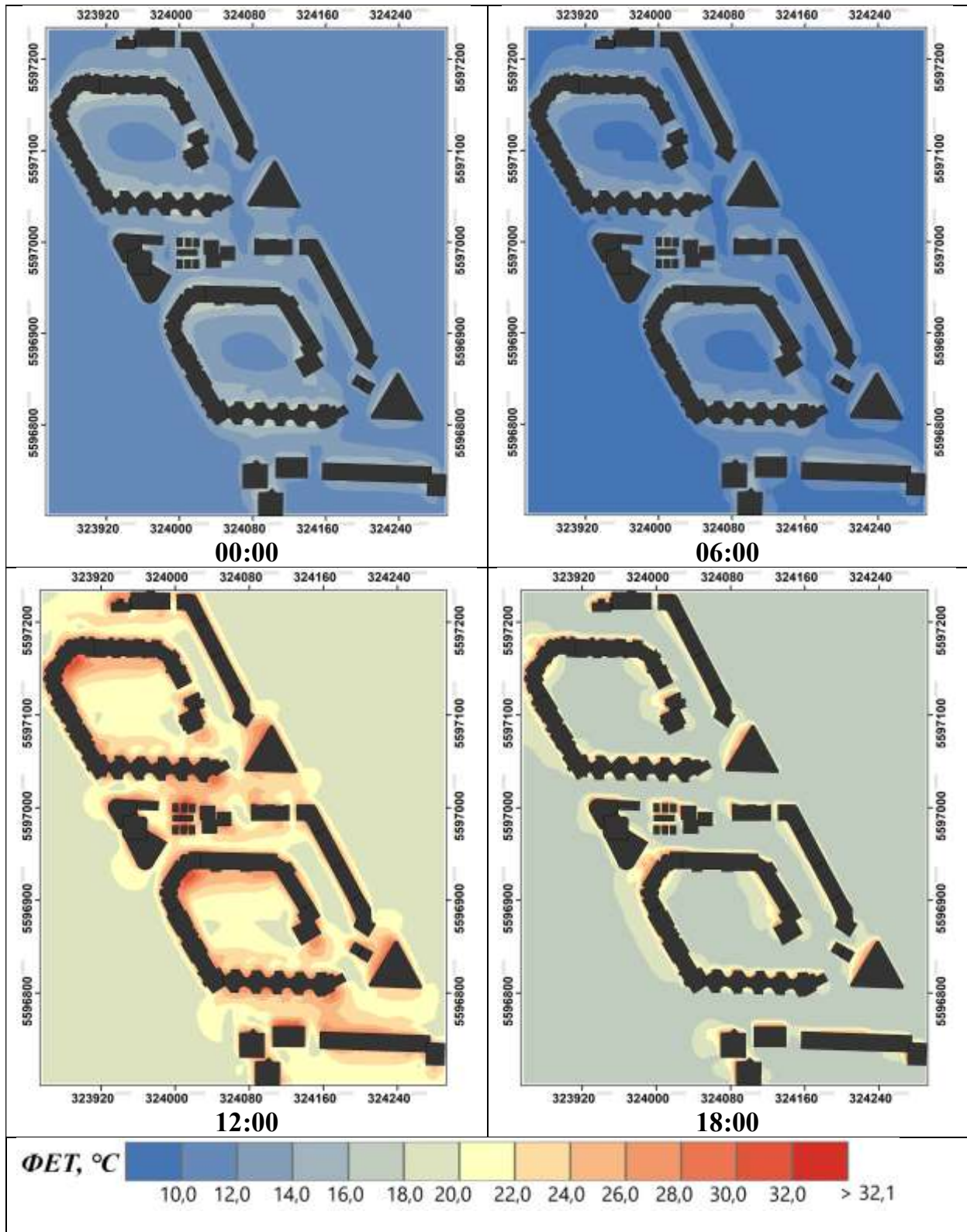
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 1
(ЛКЗ–1, 26-й А мікрорайон). у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



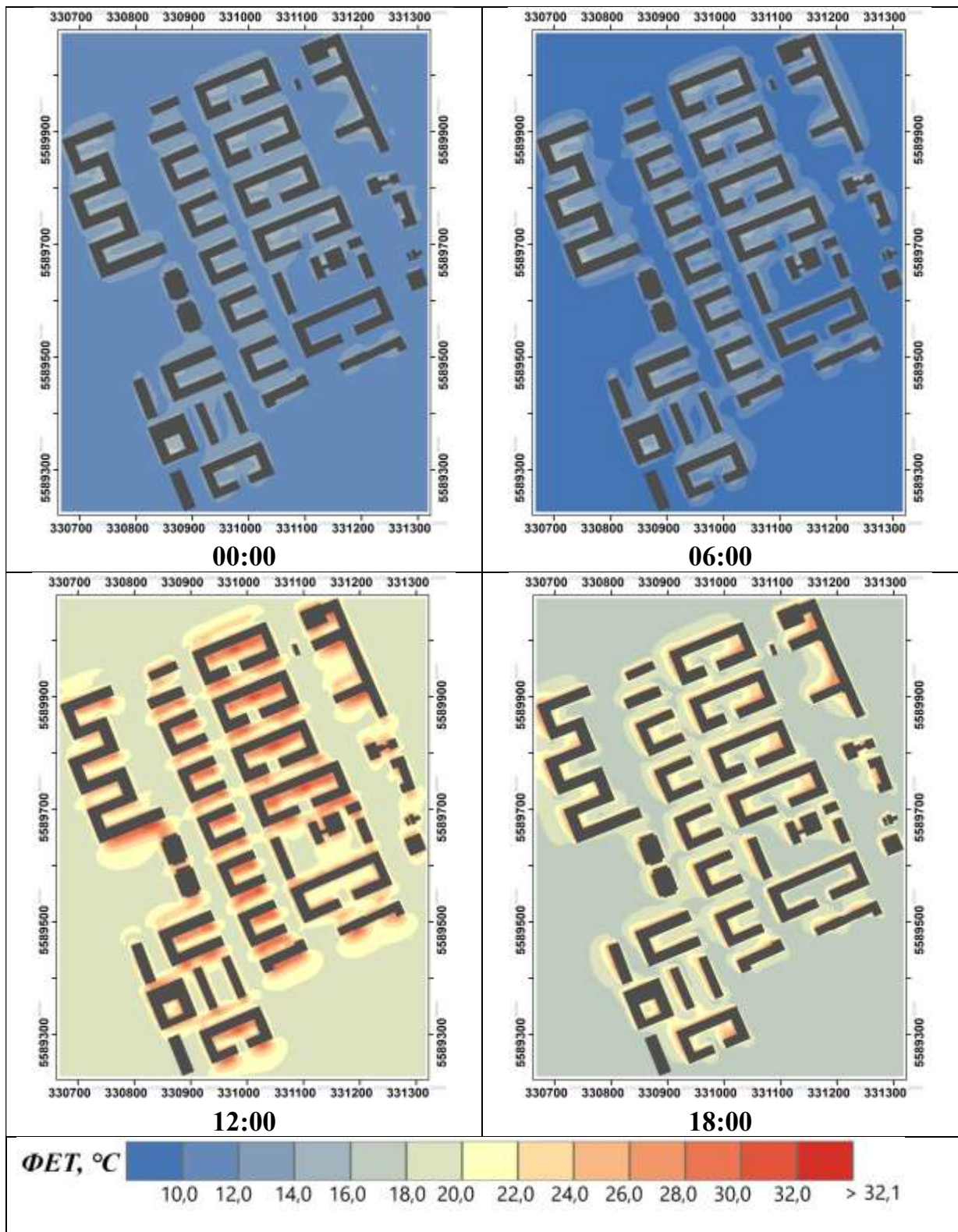
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 2 (ЛКЗ-1, ЖК «Паркові озера») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



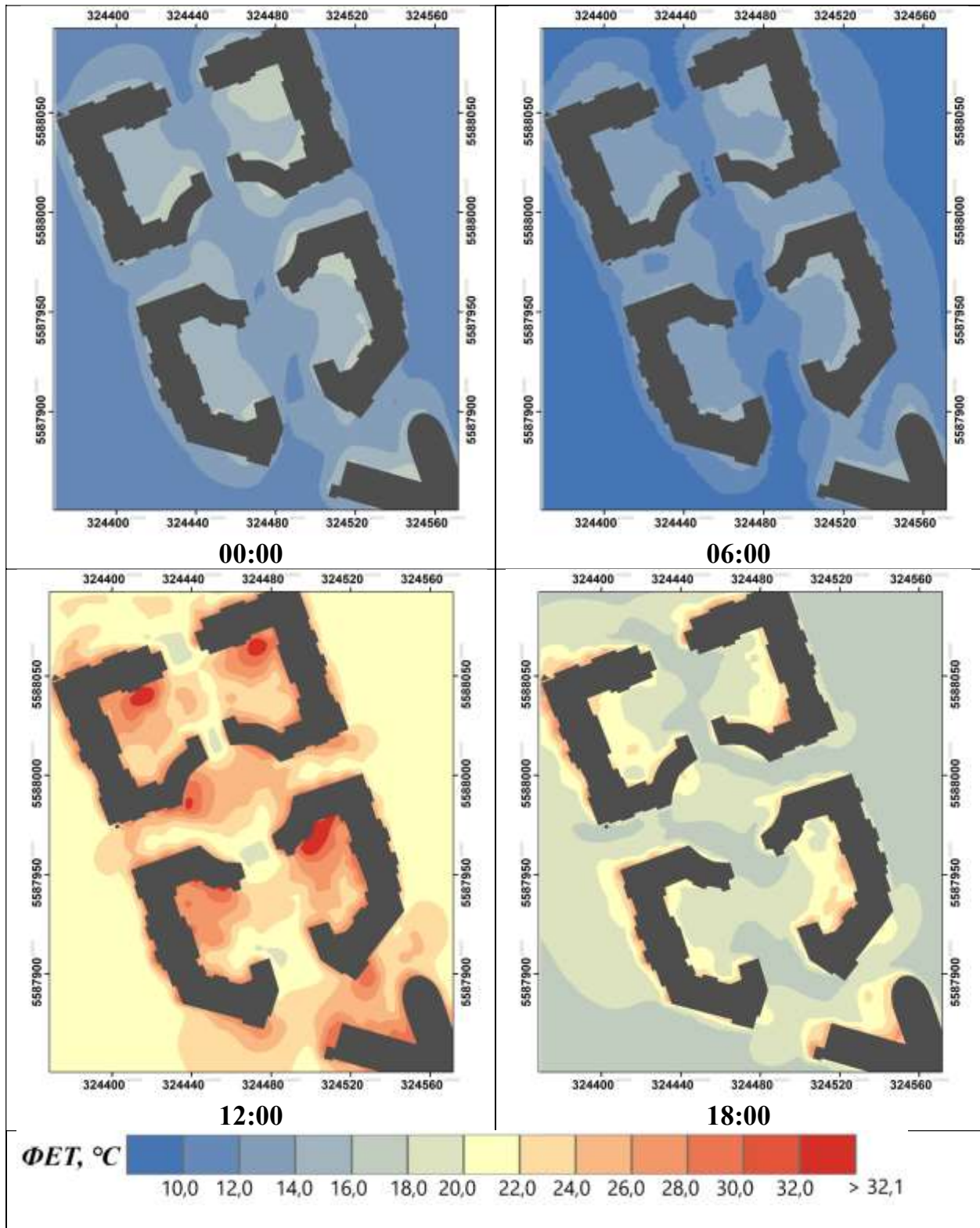
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 3
(ЛКЗ-2, 3-й А мікрорайон) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



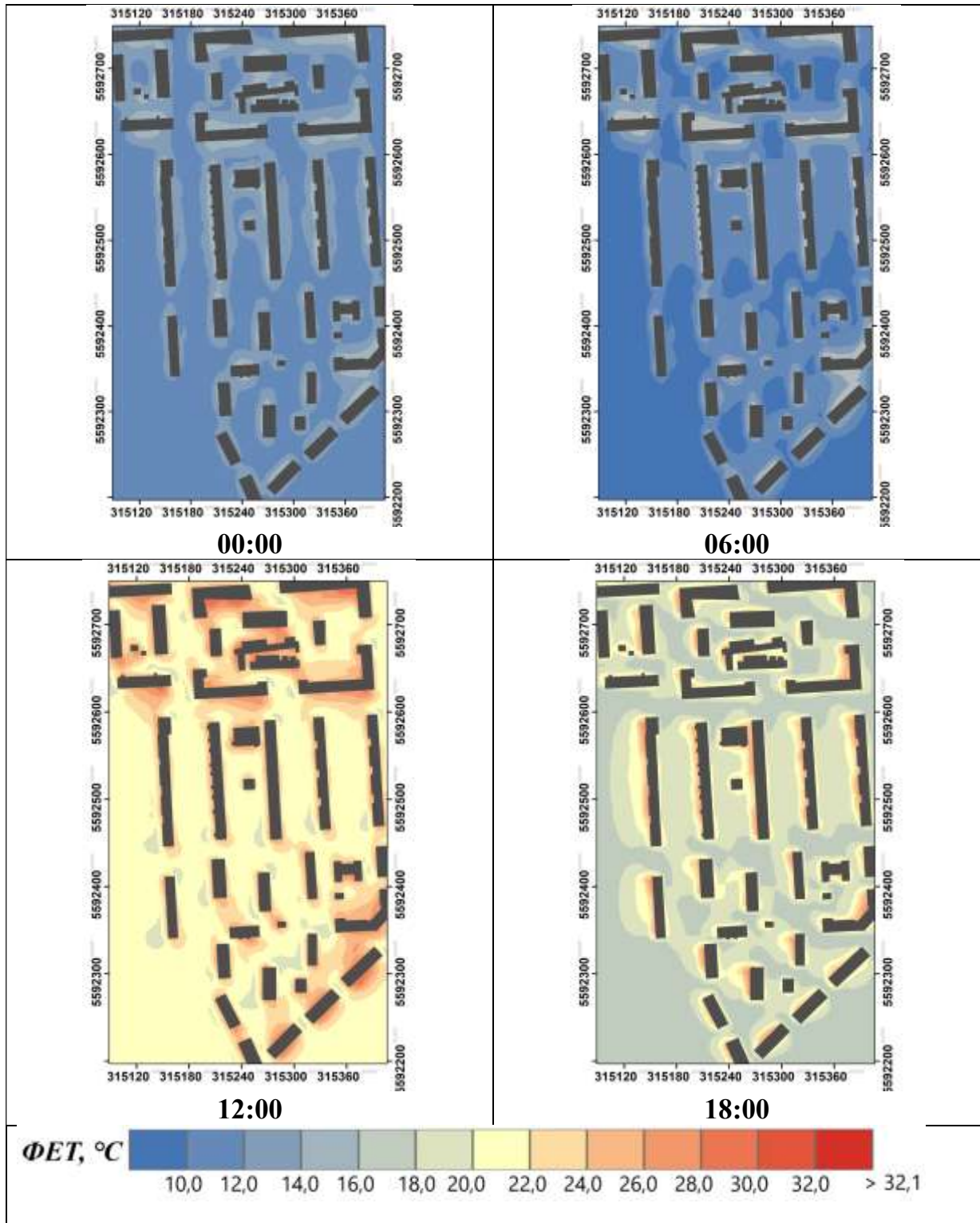
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 4
(ЛКЗ-2, ЖК «Комфорт Таун») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



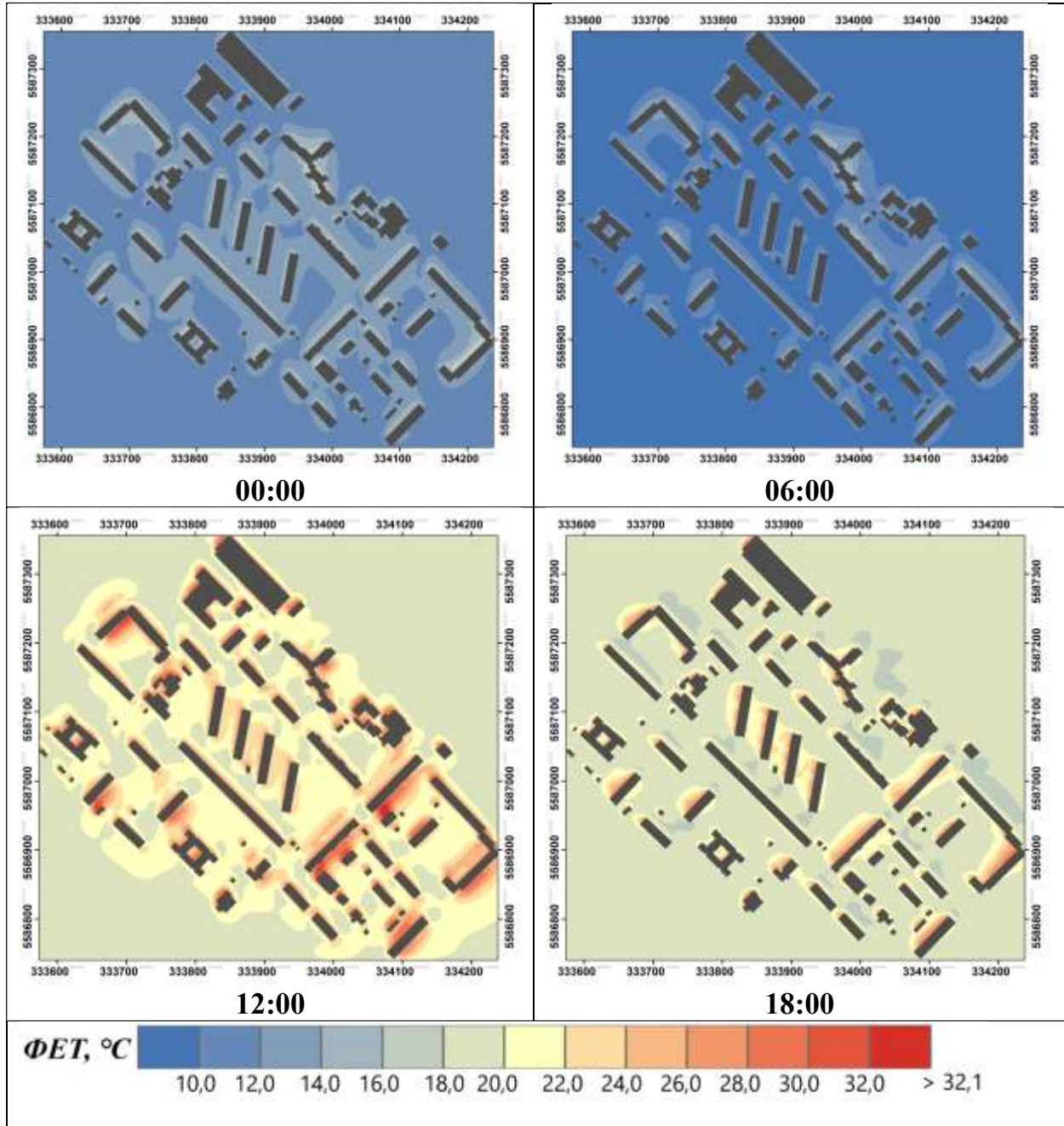
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 5 (ЛКЗ – 4, ЖК «Французький квартал») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



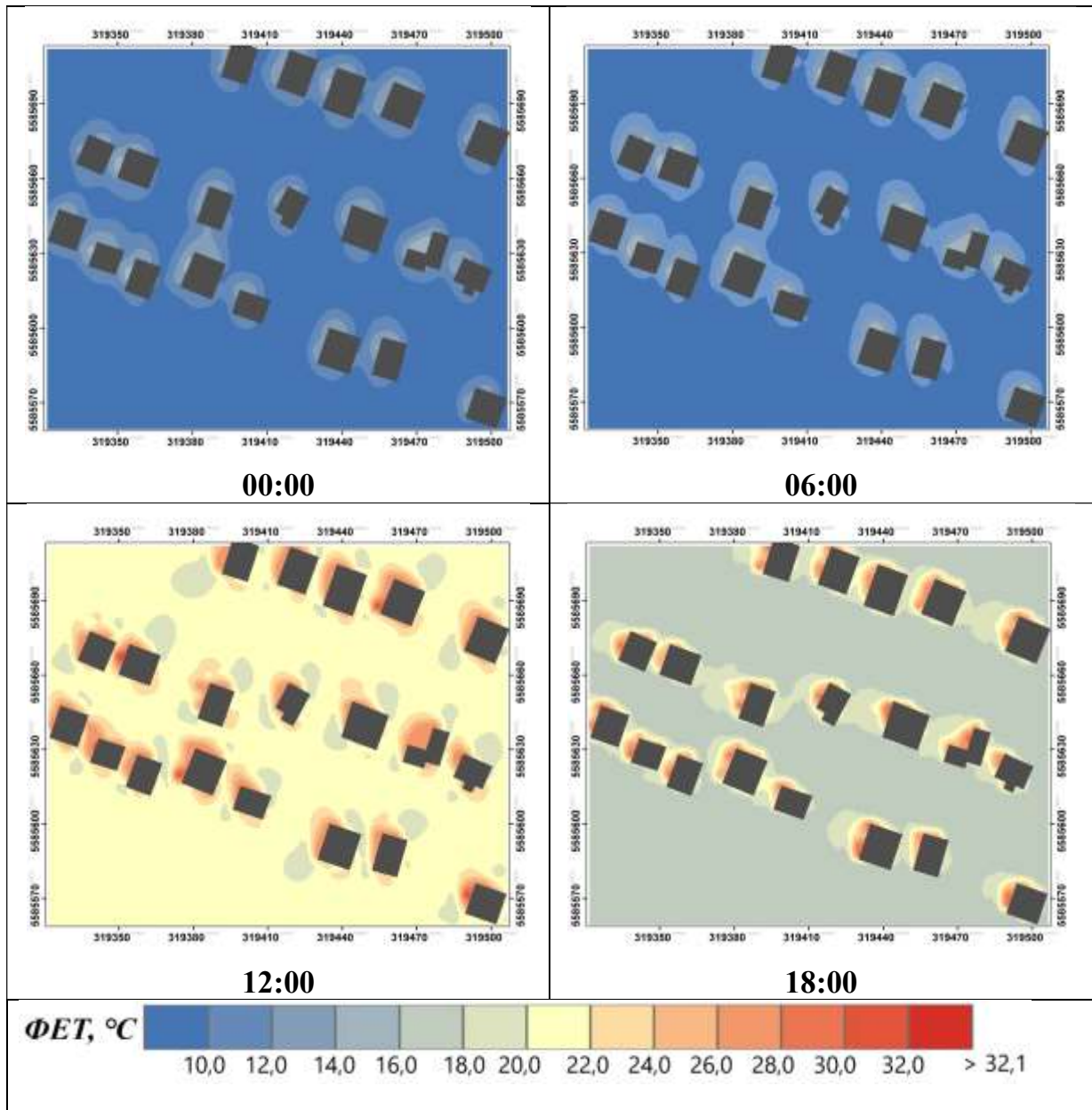
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 6 (ЛКЗ – 5, мікрорайон Галагани) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



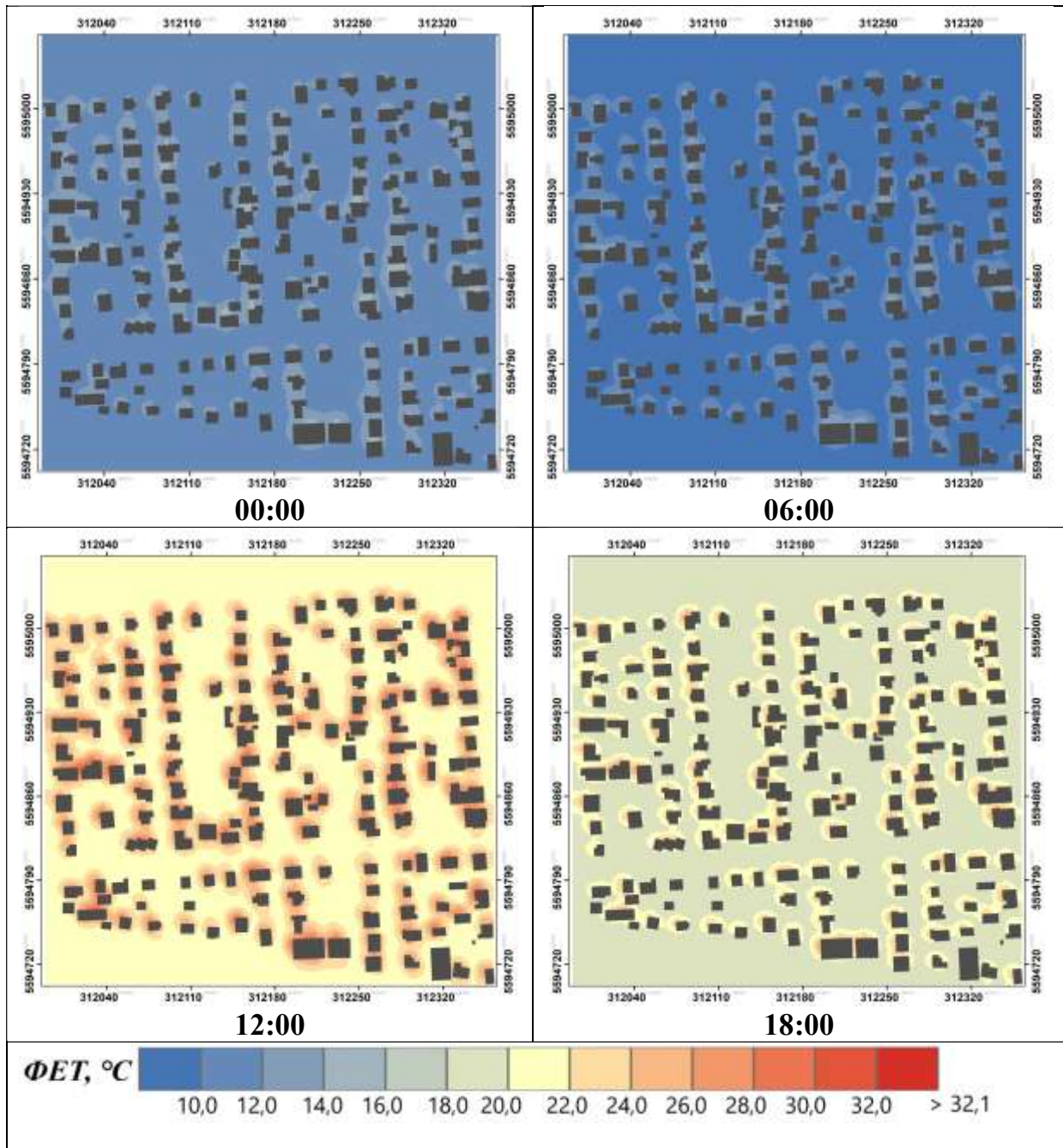
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 7 (ЛКЗ – 5, 7-й мікрорайон Парківського масиву) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



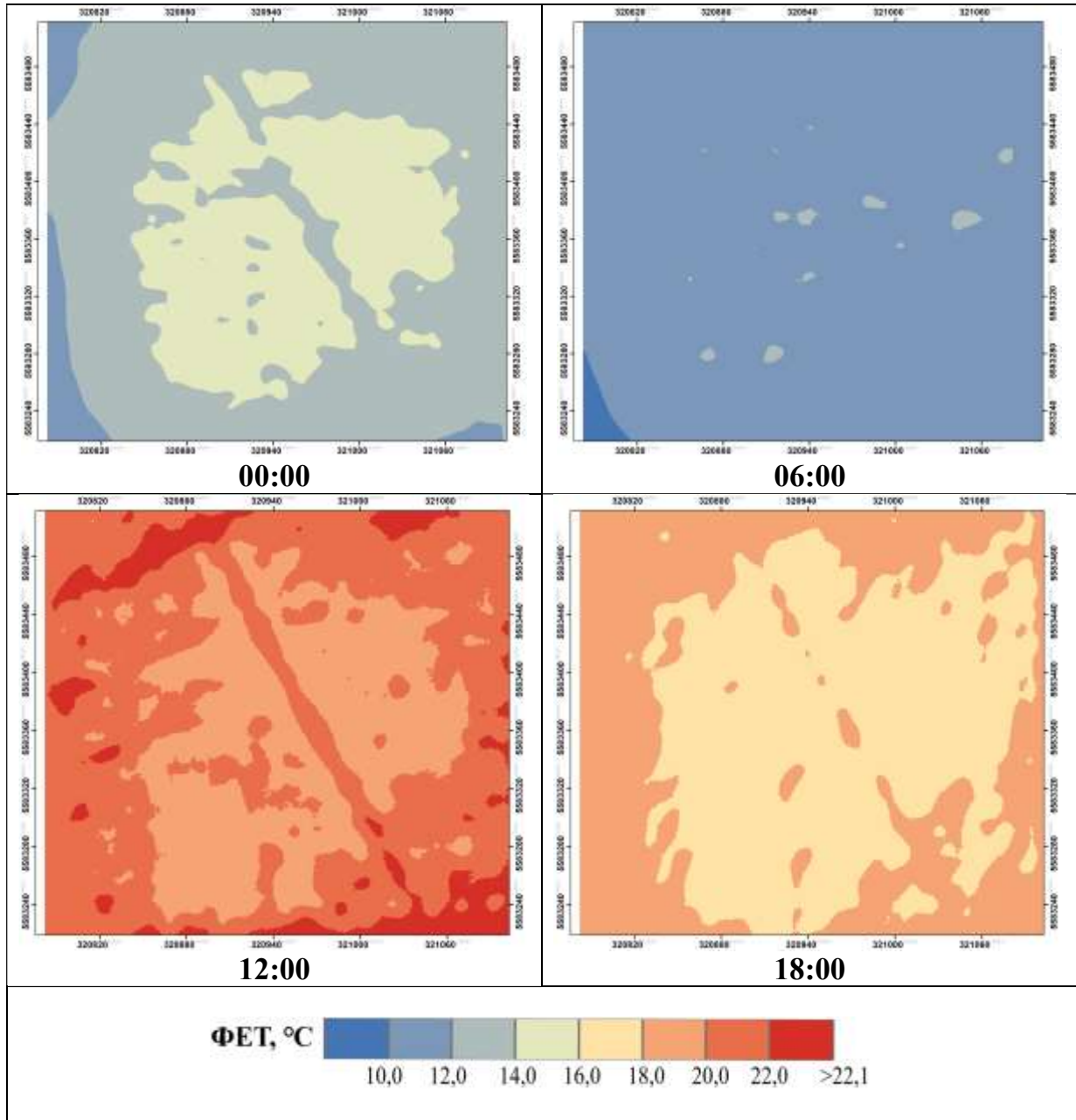
Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 8
(ЛКЗ – 6, Жуляни) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 9
(ЛКЗ – 6, Новобіличі) у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Результати моделювання значень ФЕТ за 4 липня 2019 року для ділянки 10 (ЛКЗ – А, Національний комплекс «Експоцентр України») у строки 0, 6, 12 та 18 годин за СЛЧ



Додаток Р

Статті у фахових наукових виданнях України, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Матвієнко М.О.** (2019) Модель ENVI-met – як інструмент для сучасних урбометеорологічних досліджень. *Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія*, 4(55) 151-163.
2. **Матвієнко М.О., Шевченко О.Г., Сніжко С.І.** (2021). Аналіз локальних кліматичних зон міста Києва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Серія: Географія*, 3(80) 31–36. (Особистий внесок здобувача: охарактеризовано класифікацію локальних кліматичних зон, виконано ідентифікацію локальних кліматичних зон, інтерпретація отриманих результатів).

Статті у фахових наукових виданнях України та за кордоном, що входять до міжнародних наукометричних баз даних

3. **Shevchenko O., Snizhko S., Matviienko M.** (2019). Simulation of the thermal comfort conditions of urban areas: A case study in Kyiv. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Серія Геологія. Географія. Екологія*, 51, 186–198. (0,7 д.а. (Особистий внесок здобувача: виконано моделювання поля температури та вітру, здійснено розрахунок фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).
4. **Shevchenko O., Snizhko S., Matviienko M.** (2019). Human-biometeorological assessment of Kharkiv (Ukraine) in summer season. *Croatian Meteorological Journal*, 54/55(54/55), 43–54. (Особистий внесок здобувача: здійснено збір даних та розрахунок фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).
5. **Shevchenko O., Snizhko S., Zapototskyi S., Svintsitska H., Matviienko M., Matzarakis A.** (2022). Long-term analysis of thermal comfort conditions during heat waves in Ukraine. *Geographia Polonica*, 95(1), 53–70. (Особистий внесок здобувача:

виконано збір даних, ідентифіковано випадки хвиль тепла, здійснено розрахунок фізично-еквівалентної температури, побудова карт).

Статті в інших наукових виданнях

6. **Шевченко О.Г., Сніжко С.І., Матвієнко М.О.** (2021). Біокліматичні умови у м. Львові під час проявів хвиль тепла. *Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів* Випуск 1(1), 15–23. (Особистий внесок здобувача: ідентифіковано випадки хвиль тепла, здійснено розрахунок фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).

Опубліковані наукові праці апробаційного характеру

7. **Матвієнко М.О.** (2018). Біоклімат великого міста в літній період (на прикладі житлового масиву Теремки-2 у м. Києві). «Молоді науковці – географічній науці» збірник наукових праць XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ.

8. **Матвієнко М.О.** (2019). Особливості міського острова тепла в Харкова. Міжнародна науково-практична конференція «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень». Київ.

9. **Матвієнко М.О., Шевченко О.Г.** (2020). Моделювання біокліматичних особливостей в межах складної міської забудови за допомогою моделі «SKYHELIOS». «Шевченківська весна – 2020: Географія» Збірник наукових праць XVIII міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ. (Особистий внесок здобувача: виконано моделювання фізично-еквівалентної температури, інтерпретація отриманих результатів).

10. **Shevchenko O., Snizhko S., Matviienko M.** (2020). A GIS and WUDAPT based mapping of the local climate zones in Ukrainian cities. *Geoinformatics 2020*. Київ. (Особистий внесок здобувача: виконано ідентифікацію локальних кліматичних зон в Україні, інтерпретація отриманих результатів).

11. *Матвієнко М.О, Шевченко О.Г.* (2020). Характеристика біокліматичних умов міста Харкова в літні місяці. *«Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» матеріали VIII Міжнародної наукової конференції молодих вчених.* Харків. *(Особистий внесок здобувача: ідентифіковано випадки хвиль тепла, здійснено аналіз тривалості та інтенсивності випадків хвиль тепла).*

12. *Матвієнко М.О.* (2021). Біокліматичні особливості в межах міської забудови за різних типів погоди. *Шевченківська весна – 2021. Географія: Збірник наукових праць XIX міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених.* Київ.

Брала участь в українських та міжнародних конференціях, а саме:

1. «Молоді науковці – географічній науці», всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених., 15–16 листопада 2018 року, Київ, Україна (доповідь)
2. Міжнародна науково-практична конференція «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень». Київ, Україна (доповідь)
3. «Шевченківська весна – 2020:Географія», XVIII міжнародна наукова міждисциплінарна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 15 квітня, 2020 року, Київ, Україна (доповідь)
4. Geoinformatics 2020, 11–14 травня 2020 року, Київ, Україна (доповідь)
5. VIII Міжнародної наукової конференції молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», 26–27 листопада 2020 року, Харків, Україна (доповідь)
6. XIX міжнародна наукова міждисциплінарна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 20 квітня 2021 року, Київ, Україна (доповідь)

Додаток С

Довідки про впровадження



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601 тел. 239-33-33

04.09.2022 № 050/910-30

На № _____

ДОВІДКА

Видана Матвієнко Марії Олегівні у тому, що результати її дисертаційної роботи «Моделювання мікроклімату та біокліматичних умов великих міст у літній період» впроваджено при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи «Гідроекологічна оцінка та прогноз гідроенергетичного потенціалу річок України в умовах кліматичних змін» (номер держресстрації 0118U001098, 2018–2020 рр.), що виконувалася на географічному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Декан географічного факультету,
доктор географічних наук, професор


Сергій ЗАПОТОЦЬКИЙ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601 тел. 239-33-33

07.09.2022 № 050/941-30

На № _____

ДОВІДКА

Видана Матвієнко Марії Олегівні, аспірантці кафедри метеорології та кліматології Київського національного університету імені Тараса Шевченка в тому, що результати її дисертаційної роботи «Модельовання мікроклімату та біокліматичних умов великих міст у літній період» упродовж 2020–2022 рр. були впроваджені у навчальний процес географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, зокрема під час викладання навчальних дисциплін «Урбометеорологія» та «Основи біометеорології» для студентів бакалаврату та магістратури спеціальності 103–Науки про Землю, ОП–Метеорологія.

Декан географічного факультету,
доктор географічних наук,
професор

Сергій ЗАПОТОЦЬКИЙ