

УДК 551.5 (477)

ЗМІНА КЛІМАТУ МІСТА ЛЬВОВА: РЕТРОСПЕКТИВНА ТА ПЕРСПЕКТИВНА ХАРАКТЕРИСТИКИ¹

Іван Круглов , Анатолій Смалійчук , Павло Шубер 
Катерина Кінаш 

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. П. Дорошенка, 41, м. Львів, Україна, 79007
e-mail: ivan.kruhlov@lnu.edu.ua, anatoliy.smaliychuk@lnu.edu.ua,
pavlo.shuber@lnu.edu.ua, kateryna.kinash@lnu.edu.ua*

Адаптація урбанізованих ландшафтів до зміни клімату є одним з основних наукових і політичних пріоритетів. Інформація щодо зміни клімату важлива для Львівської міської громади, яка прагне досягнути “кліматичної нейтральності” до 2030 р. Отже, мета цього дослідження полягає в характеристиці зміни клімату Львова протягом минулих десятиліть, а також в описі можливих майбутніх траєкторій зміни клімату до кінця XXI ст. Для ретроспективного аналізу протягом двох кліматичних періодів, – 1961–1990 та 1991–2020 рр., – використали дані Львівської авіаційної метеостанції щодо середніх та екстремальних місячних температур повітря та середніх місячних значень атмосферних опадів. Ми також скористалися регіонально-відкаліброваними виводами трьох кліматичних моделей СМІР6 для проєкцій середніх місячних значень температури повітря і опадів за двома сценаріями, – SSP2-4.5 і SSP3-7.0, – для трьох майбутніх періодів: 2021–2040, 2041–2060 та 2081–2100 рр.

Зараз (1991–2020) клімат Львова характеризується середньою річною температурою повітря +8,3°C і середньою річною кількістю опадів у 769 мм. Порівняно з попереднім періодом (1961–1990), середньорічна температура зросла на 1,1 °C, а середньомісячна – від 0,4 °C (жовтень) до 2,0 °C (січень). Середньорічна кількість опадів зросла на 39 мм, а середньомісячна змінилася від -11 мм у червні до +18 мм у травні. Абсолютна максимальна температура повітря змінилася від -1,4°C у березні до +4,2°C у вересні та жовтні. Зміни абсолютної мінімальної температури продемонстрували більшу амплітуду – від -5,5 °C у жовтні до +5,0 °C у вересні і жовтні.

Порівняно з періодом 1961–2020 рр., обоє сценаріїв майбутньої зміни клімату передбачають подальше та швидше зростання температури повітря. Середньорічна температура може зрости на 1,2–1,3 °C протягом двох наступних десятиліть та на 3,1 °C (SSP2-4.5) або навіть на 4,5 °C (SSP3-7.0) до кінця століття. Найбільше зростання температури повітря передбачається для зимових місяців – на 1,9–5,5 °C на кінець століття, а найменше – для червня і липня – на 0,6–4,0 °C. Кліматичні проєкції також окреслюють незначне зменшення середньорічної кількості опадів, але невелике підвищення у квітні, червні та липні. Отже, майбутня зміна клімату може спричинити значну модифікацію ландшафтно-екологічних умов Львова.

Ключові слова: Львів, зміна клімату, ретроспективний аналіз, сценарії майбутньої зміни клімату, режим температури повітря, режим атмосферних опадів.

¹ Матеріали цього дослідження були використані у звітах “План дій сталого енергетичного розвитку та клімату Львівської міської територіальної громади” (2022) та “Програма державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря агломерації міста Львова” (2023).

Вступ. Питання мітигації зміни клімату й адаптації є одним з основних наукових [10] і політичних [19] пріоритетів людства. На цьому тлі особливо важливим є завдання кліматичної адаптації урбанізованих територій, які відзначаються високою концентрацією населення та водночас особливо уразливі до зміни клімату через особливості структури і функціонування міського ландшафту [12]. Отже, заходи з мітигації та адаптації до зміни клімату стали звичним компонентом планів розвитку урбанізованих територій [7]. Львівська міська громада також запроваджує адаптаційну кліматичну політику, спрямовану на досягнення “кліматичної нейтральності” до 2030 р. [18]. Однак для її реалізації насамперед потрібно мати уявлення про зміну регіонального та локального клімату як визначального чинника динаміки енергетичного балансу міського ландшафту [16].

Клімат Львова другої половини ХХ ст. був доволі детально описаний у спеціальній монографії [1]. Згодом були опубліковані його деякі характеристики станом на початок ХХІ ст. [3]. Проте питання зміни клімату в недалекому минулому та ближчому майбутньому залишилося значною мірою невисвітлене. Тому, мета цього дослідження полягає у з'ясуванні зміни, яка відбулася протягом попередніх десятиліть, а також в окресленні перспективи зміни клімату Львова протягом ХХІ ст.

Територія дослідження. Місто Львів розташоване приблизно на 50° пн. широти та на 24° сх. довготи. Воно знаходиться на Великому європейському вододілі в центральній горбисто-рівнинній частині континенту на альтитуді ~250–400 м і на віддалі понад 600 км від морів на півночі та півдні та за 2 000 км від узбережжя Атлантичного океану на заході. За міжнародною класифікацією Кьоппена-Гайгера клімат Львова належить до типу Dfb – холодний, без сухого сезону, з теплим літом [15]. Цей тип клімату охоплює величезні площі Євразії та Північної Америки, зокрема майже всю територію України (окрім півдня). Згідно з вітчизняною кліматичною регіоналізацією, Львів розміщений у північній атлантико-континентальній області помірного поясу [2].

Методологія. Клімат є статистичною характеристикою погоди протягом кількох десятиліть. Погоду та, відповідно, клімат першочергово описують на підставі таких властивостей приземного шару атмосфери, як температура й опади [9]. Кліматоловно зумовлюють планетарні фактори, як-от куляста форма Землі та розподіл океанів і континентів, рівнин і гір [13]. Отже, безпосередніми факторами клімату є геолокація, яка значною мірою визначає надходження сонячної радіації та положення у системі циркуляції атмосфери, а також підстильна поверхня, зокрема рельєф. Під зміною клімату розуміють довготривалі (понад 20 років) зміни режиму передусім температури і опадів, а також інших властивостей приземного шару атмосфери, які зумовлені глобальними природними й антропогенними чинниками [9]. Новітні зміни клімату охоплюють ХХ і ХХІ століття.

Ретроспективну характеристику зміни клімату Львова уклали на підставі даних Львівської авіаційної метеорологічної станції (координати WGS84: 23,943° сх.д.; 49,811° пн.ш.; альтитуда: 318 м), яка розташована на відкритій вододільній поверхні Львівського плато на південно-східній границі Львівської територіальної громади. Для характеристики використали середні та екстремальні місячні значення температури повітря і середні місячні значення опадів, які згрупували за метеорологічними роками – від грудня попереднього року до листопада поточного. Опрацювали дані за 60-річний період (1961–2020), які для порівняння також розділили на два кліматичні періоди: 1961–1990 рр. та 1991–2020 рр. Для цих періодів обрахували середні значення, стандартні відхилення та лінійні тренди.

Перспективну зміну клімату Львова протягом XXI ст. охарактеризували на підставі проєкцій зміни середньорічних і середньомісячних показників температури та опадів. Ці проєкції базуються на глобальних результатах, отриманих шостим етапом Проєкту взаємного порівняння пов'язаних моделей – CMIP6 [5]. Зокрема використали виводи ансамблю трьох кліматичних моделей: CNRM-ESM2-1 [17], IPSL-CM6A-LR [4] і MIROC-ES2L [8]. Виводи додатково відкалібрували для геолокації Львова з використанням глобальних кліматичних геопросторових даних WorldClim v2.1 [6], які привели до геометричного розділення 2,5 кутові мінуси (~4 км для широти Львова). Проєкції здійснили за двома глобальними сценаріями зміни клімату – “Звичайний шлях” (SSP2-4.5) і “Регіональне суперництво” (SSP3-7.0) [14] – для трьох часових горизонтів: близьке майбутнє (2021–2040), середина століття (2041–2060) та кінець століття (2081–2100).

Результати та їхнє обговорення. Протягом сучасного кліматичного періоду (1991–2020) середньорічна температура повітря становила +8,3 °C. Найхолоднішим був 1996 р. зі середньою температурою +6,4 °C, а найтеплішими – 2019 та 2020 рр. зі середньою температурою +9,7 °C. Стандартне відхилення середньорічної температури для цього періоду дорівнювало 0,9 °C. Статистично найхолоднішим місяцем був січень зі середньою температурою -2,7 °C, а найтеплішим – липень з показником у +19,0 °C (рис. 1). Отже, середня річна амплітуда температури повітря становила 21,7 °C. Багаторічна мінливість середньомісячної температури була найбільшою для зимових місяців, а найменшою – для літніх. Зокрема максимальне стандартне відхилення середньомісячної температури повітря протягом 1991–2020 рр. властиве для лютого, і воно становило 3,1 °C, а мінімальне – для серпня, з показником 1,2 °C. Найнижча середня місячна температура була зафіксована в лютому 2012 р. (-8,8 °C), а найвища – в серпні 2015 р. (+21,6 °C). Абсолютний мінімум температури спостерігали також у лютому 2012 р. – -28,6 °C, а максимум – +35,6 °C – у серпні того ж 2012 р.

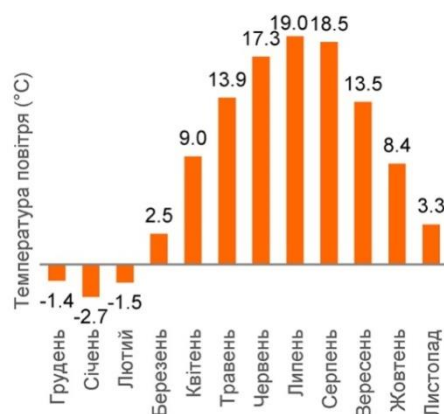


Рис. 1. Середньомісячна температура повітря (°C) для кліматичного періоду 1991–2020 рр.

(Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 1. Average monthly air temperature (°C) for 1991–2020 climatic period (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

Дані за 60-річний період (1961–2020) відображають чіткий тренд підвищення і середньорічної температури, і середньомісячних значень (рис. 2). Порівняно з минулим кліматичним періодом (1961–1990), середньорічна температура 1991–2020 рр. зросла на 1,1 °С. Потепліло усі місяці року: найбільше в січні – на 2,0 °С, а найменше – жовтні – на 0,4 °С; значно теплішими стали липень і серпень – на 1,7 °С (рис. 3). Водночас стандартне відхилення середньорічної температури протягом 1961–1990 рр. було таким самим, як і протягом 1991–2020 рр. – 0,9 °С. Це свідчить, що варіабельність температури залишається загалом сталою.

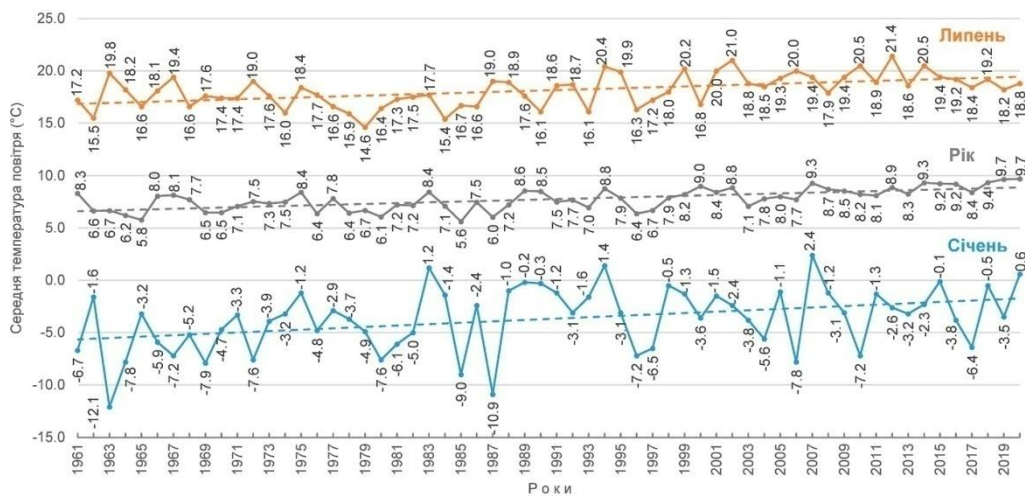


Рис. 2. Зміна середньої температури повітря (°C) протягом 1961–2020 рр.

(Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 2. Change of average July, annual, and January air temperature (°C) during 1961–2020. (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

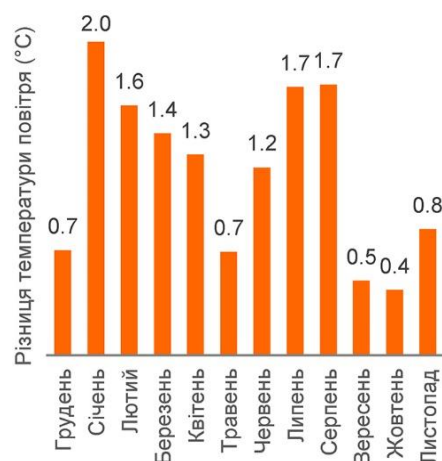


Рис. 3. Різниця середньомісячної температури повітря (°C) між кліматичними

періодами 1991–2020 рр. і 1961–1990 рр. (Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 3. Difference of average monthly air temperature ($^{\circ}\text{C}$) between 1991–2020 and 1961–1990 climatic periods (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

Протягом 1961–2020 рр. також простежувалася тенденція підвищення абсолютних максимумів температури повітря (рис. 4). У минулий кліматичний період (1961–1990) абсолютний максимум був зафіксований у серпні 1961 р. – $+33,4^{\circ}\text{C}$. Але він на $2,2^{\circ}\text{C}$ менший, ніж рекорд серпня 2012 р. – $+35,6^{\circ}\text{C}$. Однак найбільше абсолютні помісячні показники кліматичного періоду 1991–2020 рр. зросли для вересня і жовтня – на $4,2^{\circ}\text{C}$. У 2015 р. протягом цих місяців були моменти, коли температура сягала $+34,5^{\circ}\text{C}$. Водночас у грудні, лютому і березні абсолютні максимуми 1991–2020 рр. були меншими, ніж у попередній період (рис. 5).

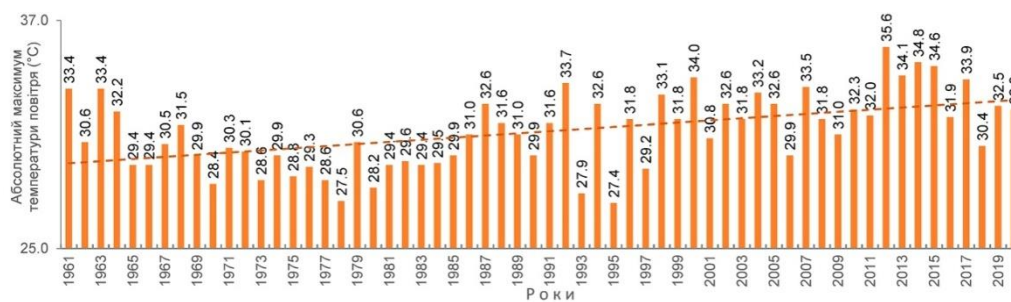


Рис. 4. Зміна абсолютних максимумів температури повітря ($^{\circ}\text{C}$) протягом 1961–2020 рр.

(Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 4. Change of air temperature absolute maximums ($^{\circ}\text{C}$) during 1961–2020.

(Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

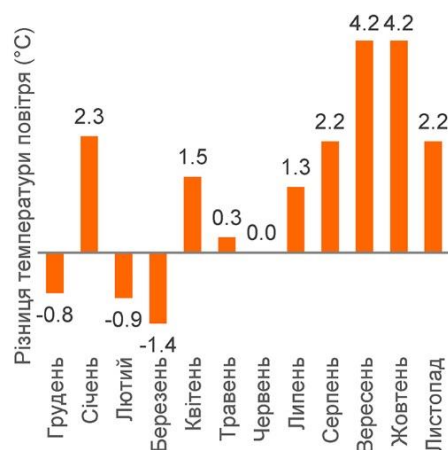


Рис. 5. Різниця абсолютних максимумів температури повітря ($^{\circ}\text{C}$) за місяцями між кліматичними періодами 1991–2020 рр. і 1961–1990 рр. (Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 5. Difference of air temperature absolute maximums ($^{\circ}\text{C}$) between 1991–2020 and 1961–1990 climatic periods (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

1961–1990 climatic periods (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

Зміна абсолютних мінімумів температури протягом 1961–2020 рр. мала менш виразний тренд потепління, ніж середні та максимальні показники (рис. 6). Абсолютний мінімум 1961–1990 рр. був зафіксований у лютому 1985 р. – $-28,5^{\circ}\text{C}$, і він на $0,1^{\circ}\text{C}$ менш екстремальний, ніж рекорд лютого 2012 р. – $-28,6^{\circ}\text{C}$. Нові помісячні екстремуми мінімальної температури протягом періоду 1991–2020 рр. спостерігали в січні, лютому, квітні, травні та жовтні. Зокрема в жовтні 1997 р. мінімальна температура опустилася до рекордних $-13,2^{\circ}\text{C}$, що на $5,5^{\circ}\text{C}$ нижче, ніж попереднє екстремальне значення жовтня 1988 р. – $-7,7^{\circ}\text{C}$. Водночас у грудні, березні, червні, липні, серпні, вересні і листопаді протягом 1991–2020 рр. мінімальні температури повітря були дещо вищими, ніж у період 1961–1990 рр. Зокрема найнижча температура листопада – $-12,6^{\circ}\text{C}$, яку спостерігали в 2016 р., була на $5,0^{\circ}\text{C}$ вища, ніж листопадовий мінімум 1965 р. – $-17,6^{\circ}\text{C}$ (рис. 7).

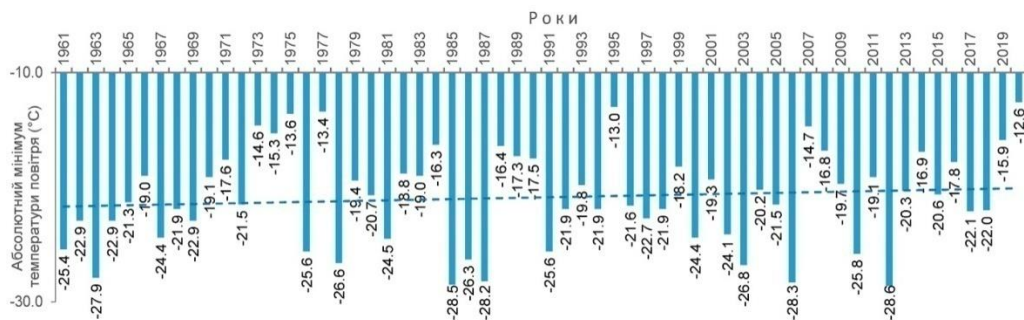


Рис. 6. Зміна абсолютних мінімумів температури повітря ($^{\circ}\text{C}$) протягом 1961–2020 рр.

(Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 6. Change of air temperature absolute minimums ($^{\circ}\text{C}$) during 1961–2020.

(Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

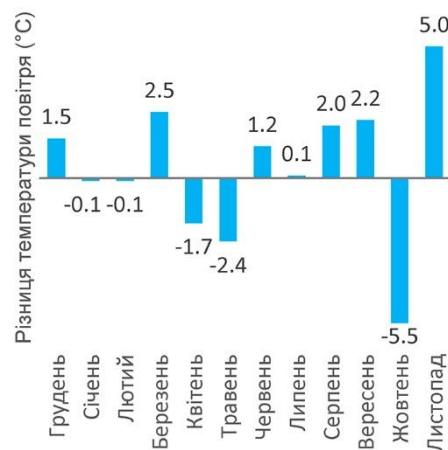


Рис. 7. Різниця абсолютних мінімумів температури повітря ($^{\circ}\text{C}$) за місяцями між кліматичними періодами 1991–2020 рр. і 1961–1990 рр. (Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 7. Difference of air temperature absolute minimums ($^{\circ}\text{C}$) between 1991–2020 and 1961–1990 climatic periods (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

Протягом 1991–2020 рр. середньорічна сума опадів становила 769 мм. Найсухішим був 1995 р. з 614 мм опадів, а найвологішим – 1998 р. з 1009 мм опадів. Стандартне відхилення річної суми опадів протягом цього періоду було рівним 107 мм. Статистично найбільше опадів випадало протягом травня–липня, зокрема в липні – 96 мм, а найменше – протягом січня–березня, зокрема в січні – 45 мм (рис. 8). Отже, найменше опадів припадало на найхолодніший місяць (січень), а найбільше – на найтепліший (липень). Багаторічна мінливість середньомісячних сум опадів мала таку саму відповідність – вона була найбільшою для липня (стандартне відхилення 47 мм), а найменшою – для січня (стандартне відхилення 18 мм). Мінімальна місячна сума опадів становила 1 мм і спостерігалася в листопаді 2011 р., а максимальна – 217 мм – була зафіксована в травні 2010 р. Що стосується добових сум опадів, то вони могли перевищувати 40 мм і були пов’язані з грозами і зливами, викликаними циклонами і холодними фронтами в теплу пору року [3].

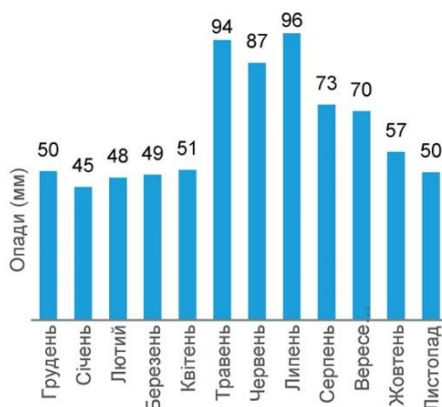


Рис. 8. Середньомісячна кількість атмосферних опадів (мм) для кліматичного періоду 1991–2020 рр. (Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 8. Average monthly precipitation (mm) for 1991–2020 climatic period (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

Протягом 1961–2020 рр. спостерігався не дуже виразний тренд на збільшення кількості опадів (рис. 9) – якщо в період 1961–1990 рр. середньорічна кількість опадів становила 730 мм, то протягом 1991–2020 рр. – 769 мм. Зміна середньомісячної кількості опадів протягом 1991–2020 рр., порівняно з попереднім кліматичним періодом, мала різноспрямований характер – наприклад, помітно вологішим став травень (+18 мм), а червень – навпаки, сухішим (-11 мм) (рис. 10).

Як видно з рис. 11, за обома сценаріями перспективної зміни клімату очікується подальше і швидше, ніж у період 1961–2020 рр., зростання температури повітря. У ближчому майбутньому середньорічна температура, порівняно з кліматичним періодом 1991–2020 рр., може зрости на 1,2–1,3 °C, а у середньостроковій перспективі – на 1,9–2,0 °C. На кінець століття за SSP2-4.5 середньорічна температура зросте на 3,1 °C, а за SSP3-7.0 – на катастрофічні 4,5 °C. Отже, може статися так, що через 80 років середні температури зимового сезону будуть додатними, а літнє тепло буде таким, як у теперішніх субтропіках.

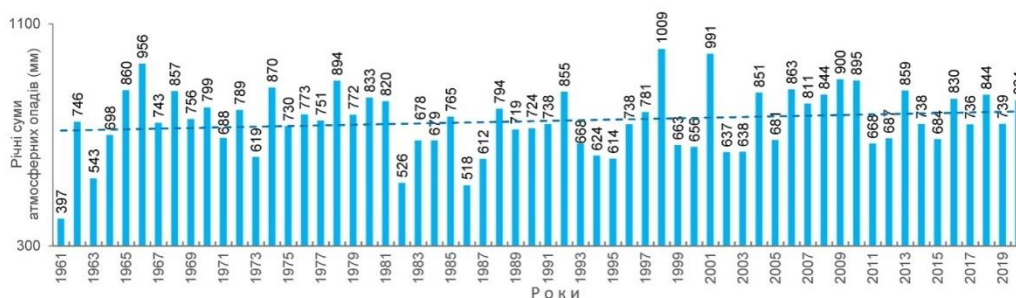


Рис. 9. Зміна середньорічної кількості атмосферних опадів (мм) протягом 1961–2020 рр.

(Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 9. Change of annual precipitation (mm) during 1961–2020. (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

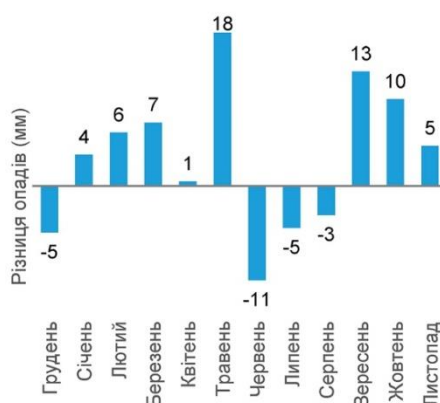


Рис. 10. Різниця середньомісячної кількості атмосферних опадів (мм) між кліматичними періодами 1991–2020 рр. і 1961–1990 рр. (Джерело первинних даних: Львівська авіаційна метеорологічна станція).

Fig. 10. Difference of average monthly precipitation (mm) between 1991–2020 and 1961–1990 climatic periods (Source of primary data: Lviv Aviation Weather Station).

Середньомісячні показники температури повітря для близького (2021–2040) та далекого (2081–2100) часових горизонтів за різними сценаріями мають значні відмінності (рис. 12). Найбільше зростання температури очікується для трьох зимових місяців, яке становитиме від 1,9–2,2 °C до 4,9–5,5 °C відповідно за сценаріями SSP2-4.5 та SSP3-7.0.

За сценарієм SSP2-4.5 найменше температура зросте в червні–липні та листопаді – на 0,6–0,7 °C, а от за сценарієм SSP3-7.0 до кінця століття найменше підвищення температури прогнозується для квітня–червня – в середньому на 3,2–4,0 °C.

Кліматичні проєкції передбачають незначне зменшення річних сум опадів (рис. 13). Однак децю може зрости кількість опадів у квітні, червні та липні (рис. 14). Варто також очікувати на зростання нерівномірності в часовому розподілі опадів – можуть інтенсифікуватися і зливові дощі та буревії, і подовжитися посушливі періоди [11].

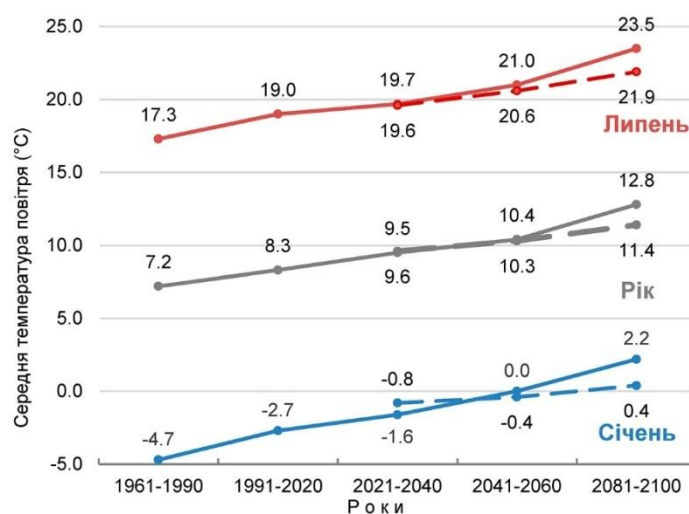


Рис. 11. Проєкції зміни середньої температури повітря (°C).

Пунктирна лінія – SSP2-4.5; суцільна лінія – SSP3-7.0.

Fig. 11. Projections of average temperature change.

Dashed line – SSP2-4.5; solid line – SSP3-7.0.

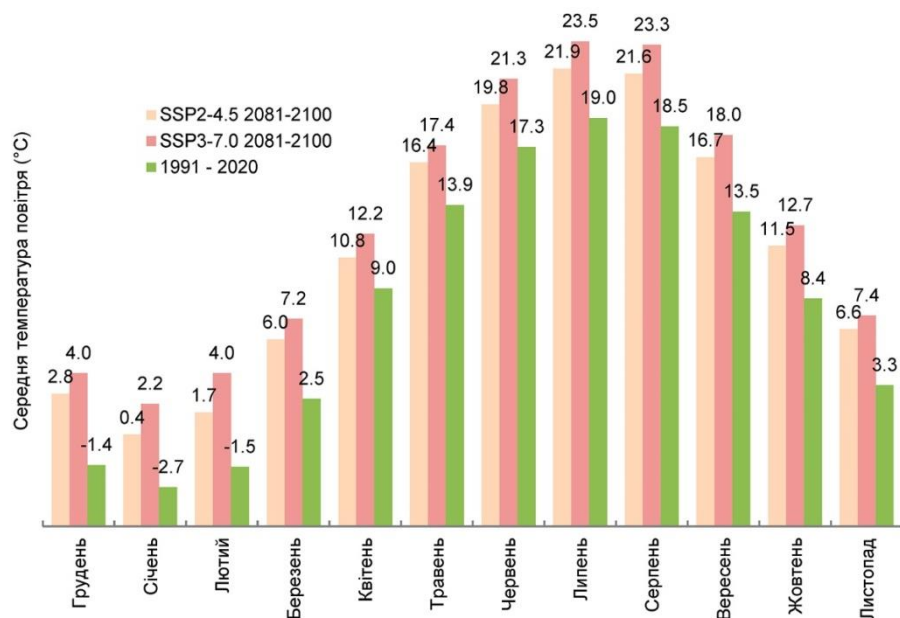


Рис. 12. Проекції середньомісячної температури повітря (°C).

Fig. 12. Projections of average monthly air temperature (°C).

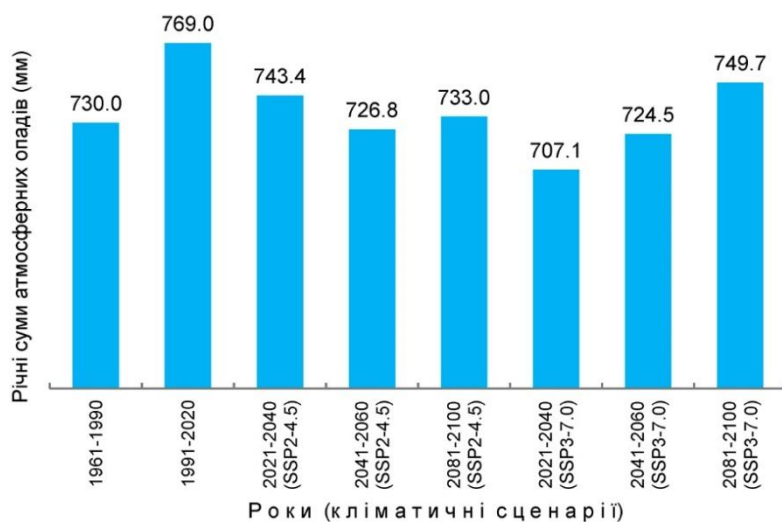


Рис. 13. Проекції середніх річних сум атмосферних опадів (мм).

Fig. 13. Projections of average annual precipitation (mm).

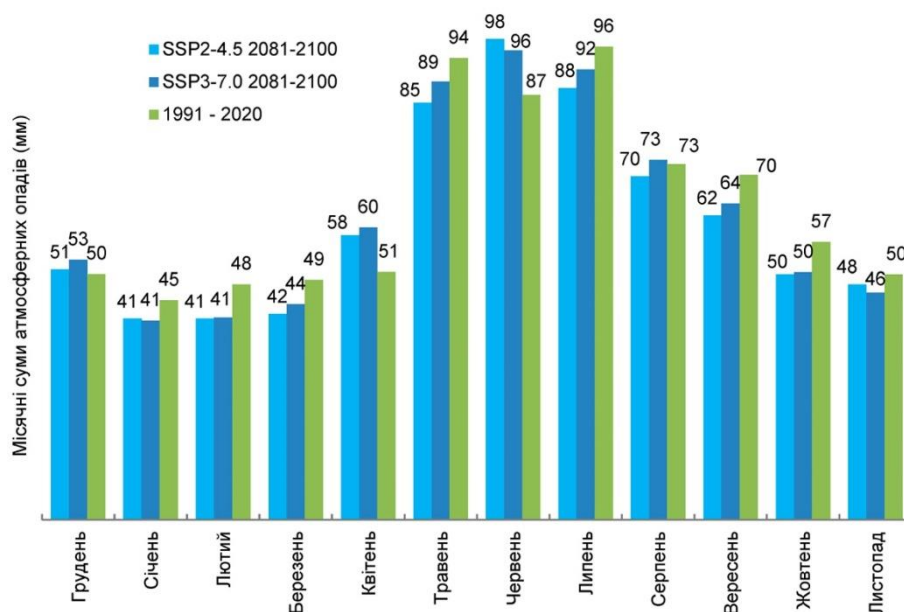


Рис. 14. Проекції середньомісячних сум атмосферних опадів (мм).

Fig. 14. Projections of average monthly precipitation (mm).

Звернемо увагу на суттєві розбіжності у виводах окремих кліматичних моделей, які лише зростають для віддалених часових горизонтів. Наприклад, для найближчого майбутнього (2021–2040) модель MIROC-ES2L за сценарієм SSP2-4.5 передбачила для Львова середньорічну температуру повітря 9,8 °C. Водночас для цього ж періоду модель IPSL-CM6A-LR за “песимістичним” сценарієм SSP3-7.0 розраховала середньорічну температуру лише у 9,2 °C. У кінці століття (2081–2100) за сценарієм SSP2-4.5 згідно з моделлю CNRM-ESM2-1 середньорічна температура підніметься до 11,2 °C, а модель IPSL-CM6A-LR за сценарієм SSP3-7.0 визначила середньорічну температуру аж у 13,7 °C. Діапазон передбачуваних річних сум опадів до кінця століття коливається від 696 мм (модель IPSL-CM6A-LR) до 791 мм (модель MIROC-ES2L). Це свідчить про значну невизначеність майбутніх кліматичних проєкцій.

Висновки. Клімат Львова теплішав протягом останніх 60 років – середньорічна температура повітря за цей час суттєво зросла – на 1,1 °C. Так само суттєво зросли усі середньомісячні температури, особливо січня, лютого, липня і серпня – на понад 1,5 °C. Водночас абсолютні мінімуми температури не продемонстрували суттєвого підвищення – так само, як і кількість опадів. Найвірогідніше, темпи зростання температури повітря збережуться і прискоряться протягом наступних 80 років – середньорічна температура може зрости ще на понад 3 °C. Водночас кількість опадів незначно скоротиться у середньорічному вимірі, але може зрости інтенсивність екстремальних погодних явищ – і буревіїв та зливових опадів, і посушливих періодів.

В умовах підвищеної температури повітря, яка викликати інтенсивнішу евапотранспірацію, посиляться дефіцит вологи у повітрі та ґрунті, а також зменшиться дебіт водотоків і джерел, особливо в літній час. Це призведе до підвищення концентрації забруднюючих

речовин у поверхневих і ґрунтових водах. Посилюватиметься водний стрес організмів, зокрема рослин. На цьому фоні зростатиме кліматрегулювальна роль лісових та болотних екологічних комплексів. Зміна клімату також сприятиме поширенню інвазійних видів, зокрема нових. Енергозатрати на обігрів будівель протягом зими будуть зменшуватися, а на охолодження протягом літа – зростатимуть. Присадибні ділянки, парки, інші озеленені площі та вулиці потребуватимуть частішого поливу в літні місяці. Інтенсивність міського острова тепла зростатиме, а отже, і концентрація забруднювальних речовин у приземному шарі повітря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Клімат Львова / за ред. В. М. Бабіченка, Ф. В. Зузука. Луцьк, 1998. 188 с.
2. Кліматичні умови та ресурси / за ред. Л. Г. Руденка. Київ : ДНВП “Картографія”, 2007. С. 164–174.
3. Шубер П. М. Клімат. *Львівська область: природні умови та ресурси* / за ред. М. М. Назарука. Львів : Вид-во Старого Лева, 2018. С. 157–188.
4. Boucher O., Servonnat J., Albright A.L., et al. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. Vol. 12. № 7. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>.
5. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9. № 5. P. 1937–1958. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
6. Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017. Vol. 37. № 12. P. 4302–4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
7. Grafakos S., Viero G., Reckien D., et al. Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 121. № 109623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109623>.
8. Hajima T., Watanabe M., Yamamoto A., et al. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*. 2020. Vol. 13. № 5. P. 2197–2244. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>.
9. IPCC. Annex III: Glossary Cambridge: In *Climate Change 2013: The Physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013. P. 1447–1465.
10. IPCC. Climate Change 2021: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2022.
11. Jentsch A., Kreyling J., Beierkuhnlein C. A new generation of climate-change experiments: events, not trends. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007. Vol. 5. № 7. P. 365–374. DOI: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[365:ANGOCE\]2.0.CO](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[365:ANGOCE]2.0.CO).
12. Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J., et al. Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*. 2020. Vol. 45. P. 411–444. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>.

13. Oliver J. E., Hidore J. J. *Climatology: An atmospheric science*. Prentice Hall, 2002. 456 p.
14. O'Neill B. C., Tebaldi C., Vuuren D. P. van, et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9. № 9. P. 3461–3482. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
15. Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007. Vol. 11. № 5. P. 1633–1644. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
16. Santamouris M. *Energy and climate in the urban built environment*. London : Routledge, 2013. 411 p.
17. Séférian R., Nabat P., Michou M., et al. Evaluation of CNRM Earth system model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019. Vol. 11. № 12. P. 4182–4227. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019MS001791>.
18. UAadapt: Платформа з адаптації громад до змін клімату. Кліматичні цілі Львова: гайд для обраних до міської ради. URL: <https://climateadapt.enefcities.org.ua/klimatychni-czili-lvova-gajd-dlya-obranyh-do-miskoyi-rady-avt-kol-m-ryabyka-a-zozulya-t-rad-lviv-plato-2020-44-s/>
19. United Nations COP26: Together for our planet. United Nations. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/cop26>.

REFERENCES

1. Babichenko, V. M., & Zuzuk, F. V. (eds.). (1998). *Klimat Lvova*. Lutsk.
2. Rudenko, L. H. (eds.). (2007). *Klimatychni umovy ta resursy. Natsionalnyi atlas Ukrainy*. Kyiv : DNVF “Kartohrafiia”, 164–174.
3. Shuber, P. (2018). *Klimat. Lvivska oblast: Pryrodni umovy ta resursy*. Lviv : Vyd-vo Staroho Leva, 157–188.
4. Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., et al. (2020). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7). DOI: <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>.
5. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
6. Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
7. Grafakos, S., Viero, G., Reckien, D., et al. (2020). Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109623>.
8. Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., et al. (2020). Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*, 13(5), 2197–2244. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>.
9. IPCC. (2013). Annex III: Glossary. In *Climate Change 2013: The Physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1447–1465.

10. IPCC. (2022). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
11. Jentsch, A., Kreyling, J., & Beierkuhnlein, C. (2007). A new generation of climate-change experiments: Events, not trends. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 365–374. DOI: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[365:ANGOCE\]2.0.CO](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[365:ANGOCE]2.0.CO).
12. Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., & Voogt, J. (2020). Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411–444. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>.
13. Oliver, J. E., & Hidore, J. J. (2002). *Climatology: An atmospheric science*. Prentice Hall.
14. O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., et al. (2016). The Scenario Model Inter-comparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
15. Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
16. Santamouris, M. (2013). *Energy and climate in the urban built environment*. Routledge.
17. Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., et al. (2019). Evaluation of CNRM Earth system model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), 4182–4227. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019MS001791>.
18. UAdapt: Platforma z adaptatsii hromad do zmin klimatu. Klimatychni tsili Lvova: haid dlia obranykh do miskoi rady. (2022, October 20). URL: <https://climateadapt.enefcities.org.ua/klimatychni-czili-lvova-gajd-dlya-obranyh-do-miskoyi-rady-avt-kol-m-ryabyka-a-zozulya-t-rad-lviv-plato-2020-44-s/>
19. United Nations. (2023). *COP26: Together for our planet*. United Nations. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/cop26>.

Стаття: надійшла до редакції 01.06.2024
доопрацьована 22.09.2024
прийнята до друку 14.10.2024

LVIV CITY CLIMATE CHANGE: RETROSPECTIVE AND PROSPECTIVE CHARACTERISTICS

Ivan Kruhlov, Anatoliy Smaliychuk, Pavlo Shuber, Kateryna Kinash

Ivan Franko National University of Lviv,
41, P. Doroshenko Str., Lviv, Ukraine, 79007
e-mail: ivan.kruhlov@lnu.edu.ua, anatoliy.smaliychuk@lnu.edu.ua,
pavlo.shuber@lnu.edu.ua, kateryna.kinash@lnu.edu.ua

Adaptation of urban landscapes to climate change is one of key scientific and political priorities. Climate change information is important for Lviv Urban Municipality, which aims reaching climatic neutrality by 2030. Thus, the goal of this study was to characterize Lviv climate change during the past decades as well as to describe possible future climate change trajectories till the end of the 21st century.

Data of Lviv Aviation Weather Station were used to retrospectively compare average and extremal monthly air temperature values and precipitation mean monthly values during two climatic periods – 1961–1990 and 1991–2020. We also used regionally-adjusted outputs of three CMIP6 climatic models to project average monthly air temperature and precipitation change according to two scenarios – SSP2-4.5 and SSP3-7.0 – for three future periods: 2021–2040, 2041–2060, and 2081–2100.

At present (1991–2020), Lviv climate is characterized by an average annual air temperature of $+8,3^{\circ}\text{C}$ and an average annual precipitation of 769 mm. In comparison to the previous climatic period (1961–1990), the average annual air temperature has increased by $1,1^{\circ}\text{C}$, and all months have become warmer from $0,4^{\circ}\text{C}$ (October) to $2,0^{\circ}\text{C}$ (January). The average annual precipitation has increased by 39 mm, and the difference by months vary from -11 mm (June) to +18 mm (May). The absolute maximum air temperature change varied from $-1,4^{\circ}\text{C}$ (March) to $+4,2^{\circ}\text{C}$ (September and October). The absolute minimum air temperature change demonstrated larger magnitude – from $-5,5^{\circ}\text{C}$ (October) to $+5,0^{\circ}\text{C}$ (September and October).

Both future climate change scenarios envisage further and faster, in comparison with the period of 1961–2020, increase of air temperature. The average annual air temperature may rise by $1,2$ – $1,3^{\circ}\text{C}$ during the next two decades and by $3,1^{\circ}\text{C}$ (SSP2-4.5) or even $4,5^{\circ}\text{C}$ (SSP3-7.0) by the end of the century. The largest average air temperature increase is expected for winter months – by $1,9$ – $5,5^{\circ}\text{C}$ till the end of the century. The smallest increase of air temperature will be observed in June and July – by $0,6$ – $4,0^{\circ}\text{C}$. The climatic projections foresee a negligible decrease of the annual precipitation, but a small rise of precipitation in April, June, and July. Future climate change may cause significant modification of urban landscape-ecological conditions.

Keywords: Lviv, climate change, retrospective analysis, future climate change scenarios, thermal regime, precipitation regime.