

DOI: 10.32347/2076-815X.2025.89.355-387

УДК 719

Кузишин А.С.,anna.kuzyshyn@rptu.de, ORCID: 0009-0007-7536-4588,
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau,**Мартенс І.А.,**martens_ia@knuba.edu.ua, ORCID:0009-0008-2732-1687,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,**Григоращук Н.М.,**nata.gryu@knu.ua, ORCID:0009-0008-8295-1614,
Київський Національний Університет імені Тараса Шевченка

КЛІМАТИЧНА СТІЙКІСТЬ У МІСЬКОМУ ПЛАНУВАННІ: ПІДХІД ФРАЙБУРГА ДО КОНЦЕПЦІЇ АДАПТАЦІЇ ДО ЗМІН КЛІМАТУ

У сучасних умовах зміни клімату міста стикаються зі зростаючими викликами, пов'язаними з підвищенням температури, екстремальними погодними явищами та порушенням водного балансу. Фрайбург є одним із провідних європейських міст, що впроваджує комплексну концепцію адаптації до змін клімату, поєднуючи зелену інфраструктуру, енергоефективне будівництво, інтегроване управління водними ресурсами та сталу мобільність. Дослідження аналізує основні стратегії та заходи, реалізовані у Фрайбурзі, їхню ефективність та можливість адаптації для українських міст. У статті наголошується на важливості прийняття рішень на основі фактичних даних та необхідності розробки адаптаційних заходів, що враховують локальні особливості.

Ключові слова: кліматична стійкість; адаптація до змін клімату; міське планування; зелена інфраструктура; енергоефективність; управління водними ресурсами; Фрайбург; сталість; урбаністика.

Постановка проблеми: У той час як міста в усьому світі стикаються з посиленням впливу зміни клімату через екстремальні погодні явища, підвищення температури та нерегулярні опади [1], багатьом українським муніципалітетам бракує системних підходів до забезпечення кліматичної стійкості, незважаючи на зростаючу обізнаність про цю проблему. Це дослідження доповнює український дискурс з міського планування, аналізуючи стратегії адаптації до зміни клімату та їх потенційну реалізацію в контексті України, де існуючі міжнародні практики вимагають адаптації до місцевих соціально-економічних умов. Фрайбург є гарним прикладом для вивчення завдяки своєму комплексному підходу до адаптації до зміни клімату та

паралелями до українських міських викликів, включаючи подібний досвід підвищення температури, річкової посухи, тривалих посушливих періодів та сильних зливових дощів. Амбітні цілі міста щодо кліматичної нейтральності до 2035 року, успішна реалізація інноваційних проєктів зеленої інфраструктури [6] та міждисциплінарні дослідницькі ініціативи [7] дають цінну інформацію для розробки рішень для українських міст, де такі дослідження є особливо актуальними з огляду на зростання частоти екстремальних погодних явищ [8] та нагальну потребу в рішеннях для сталого міського розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент тема недостатньо досліджена в українському контексті. Адаптаціям до змін клімату в Україні розглянуті вітчезняними фахівцями Щербакова О., Тимашков М., Максимова І. та ін. [49, 50, 51]. Схожі програми адаптації до змін клімату в Європі представлені розроблені для міст Берн, Карлсруе та ін. [51, 52]. Дослідження досвіду з адаптації до зміни клімату Фрайбурга досліджені Мацаракіс А., Кронселл А [53, 54].

Завданням цієї роботи є аналіз підходів та складових кліматичної стійкості міст, з урахуванням її ключових вимірів і секторальних проявів у міських системах. Особлива увага приділяється оцінці та систематизації сучасних інструментів, які застосовуються у світовій практиці, а також методологіям аналізу міського клімату, з акцентом на їх практичне застосування. Важливою частиною дослідження є критична оцінка існуючих методологічних підходів до обробки та інтерпретації даних про міський клімат для формування стратегій адаптації. Окрім цього, робота узагальнює та аналізує результати ініціатив з підвищення кліматичної стійкості, зокрема заходів, впроваджених у Фрайбурзі, Німеччина, і оцінює їх ефективність. На основі успішних практик Фрайбурга формулюються стратегічні рекомендації для українських міст.

Мета цієї роботи – розглянути рамки міської кліматичної стійкості та їх практичну реалізацію у ключових муніципальних секторах, з особливим акцентом на оцінці заходів з адаптації, впроваджених у Фрайбурзі, та їх потенційну придатність для використання в українському міському контексті.

Основна частина. Кліматична стійкість (резильєнтність) є складовою міської стійкості, яка відповідно до UN Habitat поділяється на соціальну стійкість, економічну стійкість та кліматичну стійкість [2]. Міська стійкість - це можливість міста реагувати та відновлюватися після різних потрясінь. Виходячи з вищевикладеного кліматична стійкість це можливість міста реагувати та відновлюватися після потрясінь, пов'язаних з наслідками кліматичних змін. Іншими словами, кліматично стійке місто - це таке місто, що інтегрує адаптивний дизайн та сталі практики при своєму розвитку для

зменшення ризиків від кліматичних змін, таких, як екстремальні погодні явища, підвищення температури, пересихання річок і тому подібне. Кліматично стійкий підхід наголошує на плануванні надійної інфраструктури та гнучких міських систем, які можуть витримувати мінливі кліматичні умови, а також розвиватися, забезпечуючи довгострокову функціональність цієї інфраструктури [3].

Стійкість міст стрімко набуває критичного значення в умовах існування сучасного суспільства. У світлі стрімкої урбанізації, зростання населення та погіршення екологічної ситуації міста виявляються під загрозою природних катастроф та соціальних диспропорцій. Зміна клімату спричиняє збільшення частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ, таких як урагани, повені, посухи та аномальна спека. Міські території є особливо вразливими до цих явищ через високу концентрацію населення, інфраструктур та економічних активів. Однією з ключових переваг кліматичної стійкості є зменшення вразливості міст до природних умов. Стійкі міста можуть краще підготуватися до повеней, ураганів та посух. Розвинена інфраструктура, здатна витримувати природні катастрофи, зменшує ризики для життя і здоров'я населення, що в свою чергу сприяє загальному підвищенню якості життя. Стійкість міст є вирішальною для пом'якшення цих впливів, забезпечуючи здатність міст до відновлення та ефективної адаптації. Створення кліматично стійких урбаністичних систем є нагальною потребою для забезпечення якості життя їх мешканців, захисту екосистем та підтримки економічної діяльності [38].

Екологічний вимір кліматичної стійкості також має вирішальне значення. Збільшення зелених зон, відновлення природних середовищ є не лише естетичними рішеннями, але й екологічно необхідними. Ці практики сприяють зменшенню впливу ефекту міських островів тепла та покращують якість повітря. Окрім цього, збереження біорізноманіття в межах міської території забезпечує екосистемні послуги, такі як очищення води, підтримка кругообігу поживних речовин та інші. Міста, особливо ті, що мають високий рівень урбанізації, стикаються із зростаючим навантаженням на інфраструктуру, зокрема транспортні та енергетичні мережі, які залишаються вразливими до кліматичних загроз. Наприклад, раптові зливи можуть паралізувати міський транспорт, завдаючи значних економічних і соціальних збитків. Успішна кліматична стійкість вимагає запровадження інфраструктурних рішень, таких як покращення дренажних систем та впровадження енергоефективних технологій. Ці інвестиції не лише зменшують економічні втрати, але й забезпечують довгострокову надійність міських послуг [39].

Крім економічних вигод, кліматична стійкість є важливим чинником соціальної справедливості. Вразливі групи населення, які мають менший доступ

до ресурсів, найбільше потерпають від наслідків кліматичних змін. До того ж, процеси планування кліматичної стійкості часто включають участь громади, що сприяє підвищенню соціальної згуртованості та укріпленню довіри між мешканцями та владою. Значення кліматичної стійкості виходить за межі фізичних аспектів міст. Воно включає захист економіки, інноваційні рішення в містобудуванні та врегулювання потенційних конфліктів, які виникають через дефіцит ресурсів. У глобалізованому світі жодне місто не є ізольованим: вплив однієї кліматичної катастрофи може мати наслідки для цілих країн і регіонів. Таким чином, кліматична стійкість також вимагає розвитку глобального партнерства та обміну досвідом, що є важливим для формування колективної адаптації до змін клімату [40].

Міська кліматична резильєнтність охоплює здатність міст передбачати, готуватися до кліматичних викликів, реагувати на них та успішно відновлюватися після впливу кліматичних загроз. Інтеграція принципів сталого розвитку в усі аспекти містобудування та управління сприяє не лише зменшенню вразливостей, але й формує базис для стійкого урбаністичного майбутнього. Тож суттєве значення має саме стратегічний розвиток ключових секторів, таких як інфраструктура, зокрема, транспорт та будівництво; управління водними ресурсами, енергетика, екосистеми, охорона здоров'я, управління ризиками катастроф, політика та управління, а також інвестиції та фінанси.

Насамперед мова йде про інфраструктуру, адже власне розвиток стійкої інфраструктури є основою для кліматичної адаптації міст. Створення «правильної» міської інфраструктури вимагає розуміння того, що міста потребують сьогодні, і передбачення того, що їм може знадобитися в майбутньому [41]. Інфраструктурні проекти повинні максимізувати свій потенціал пом'якшення наслідків змін клімату та адаптації до них при цьому враховуючи фізичні обмеження та потреби громади. Це призведе до створення інфраструктури, яка буде створена для покращення повсякденного життя, забезпечення «виживання» та підтримки подальшого зростання в умовах дедалі небезпечніших кліматичних явищ. Зрештою, впровадження принципів «зеленого будівництва» та реконструкція існуючих споруд забезпечують підвищення енергоефективності та структурної міцності в умовах кліматичних викликів.

Транспорт є базовою складовою міста. Планування міст, районів і регіонів розвивається з урахуванням розподілу зв'язків і транспортних потоків. Електрифікація транспортного сектору сьогодні широко пропагується як стійке рішення, особливо в міських районах. Це значно впливає на чистий попит на енергію, а також на структуру попиту. Міста, що впроваджують більш стійкі

транспортні системи, зменшують залежність від викопного палива, скорочують розростання міської забудови та знижують рівень використання автомобілів. Сьогодні одним із ключових завдань великих міст є розвиток сталих транспортних рішень для зменшення заторів і скорочення викидів парникових газів щонайменше на 50% до 2050 року. Крім того, транспортні системи, які включають покращення громадського транспорту та модернізацію дорожніх мереж, повинні бути здатні протистояти екстремальним погодним умовам [42, 43].

Наступним важливим елементом стійкості міста є ефективне управління водними ресурсами. Розвиток інфраструктури для управління стічними водами допомагає знижувати ризики затоплень, а забезпечення стабільності водопостачання через сталий розподіл і збереження ресурсів стає критичним у періоди кліматичних аномалій. Ефективне управління водними ресурсами має важливе значення для формування кліматично стійкого міста. Гнучке ціноутворення на воду є прикладом інноваційного підходу до управління водними ресурсами, який надає пріоритет доступності та відповідальному споживанню. Ця адаптивна система регулює ціни залежно від наявності води та кліматичних умов, дозволяючи менеджерам водного господарства ефективно реагувати на коливання попиту, забезпечуючи довгострокову стійкість. Впровадження гнучких стратегій ціноутворення підкреслює важливість інноваційного та адаптивного управління водними ресурсами для досягнення кліматичної стійкості[44].

Суттєвим питанням є кліматична стійкість у сфері енергетики. Вона передбачає поступове скорочення залежності від викопних видів палива на користь відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Крім того, модернізація енергетичних систем із фокусом на зменшення споживання та підвищення ефективності інфраструктури сприяє збереженню енергетичної безпеки навіть за екстремальних кліматичних умов. Підвищення гнучкості та стійкості енергетичних систем до зміни клімату – це спосіб впоратися з нею, що є життєво важливим для надійного енергетичного переходу. Модернізація електричних мереж і розширення інтеграції відновлюваних джерел енергії створюють більш стійкі мережі енергопостачання [43]. Інтеграція зеленої інфраструктури також може сприяти підвищенню енергоефективності, зменшуючи потреби в охолодженні в міських районах.

Наступним виділяємо збереження та розширення екосистем, що є невіддільною частиною міської кліматичної стійкості. Зелені насадження, як-от парки, зелені дахи та інші природні елементи, знижують температурні екстремуми та покращують якість повітря, водночас сприяючи боротьбі з

ефектом міських теплових островів. Збереження біорізноманіття у межах міста підтримує природні середовища, що відіграють важливу роль у наданні екологічних послуг. Міські райони, які часто характеризуються бетонними джунглями, стикаються з проблемами підвищення температури, забруднення повітря та виснаження природних ресурсів. У відповідь на ці виклики інтеграція зелених насаджень у містах перетворилася з розкоші на необхідність. Продумане планування та управління зеленими насадженнями служать буфером проти екологічних проблем, підвищуючи загальну стійкість міського середовища [45]. Інтеграція природи в практики міського планування відображає зміну парадигми, яка визнає взаємозалежність міського життя та природного світу.

Здоров'я та добробут населення є суттєво важливими при вирішенні кожного без винятку питання, що стосується міста. Системи охорони здоров'я повинні бути адаптовані для реагування на кліматичні загрози, такі як хвилі спеки або поширення хвороб, пов'язаних із змінами клімату. Інвестиції у зміцнення систем охорони здоров'я є одним із способів пом'якшити несприятливі наслідки зміни клімату та загрози інфекційних захворювань для населення, як і загрози для здоров'я загалом. Зусилля щодо зміцнення систем охорони здоров'я мають включати питання безпеки мешканців пов'язані зі змінами клімату шляхом сприяння та зміцнення спроможності ефективного та ітеративного управління ризиками на всіх рівнях, заохочення міжсекторального та спільнотного залучення, а також визначення коротко- та довгострокових дій та інвестицій для підвищення стійкості системи [46].

До інших секторів можна віднести зменшення ризиків катастроф, ефективне управління та міські політики, а також управління фінансовими вкладеннями. Розробка планів реагування на надзвичайні ситуації та впровадження систем раннього сповіщення є основоположними для зниження ризиків та оперативного реагування на кліматичні небезпеки. Ці заходи дозволяють зменшити наслідки екстремальних погодних явищ та пришвидшити процес відновлення. У свою чергу ефективне врядування відіграє центральну роль у формуванні кліматично стійких міст. Впровадження нормативно-правових актів, які підтримують принципи сталого розвитку, створює сприятливе середовище для довгострокового планування. Активна участь мешканців через просвітницькі кампанії, залучення до планування та підтримка місцевих ініціатив також є важливими для досягнення високого рівня готовності до змін клімату. Участь ключових зацікавлених сторін – від місцевої влади до бізнесу та громадянського суспільства – сприяє збалансованому та узгодженому впровадженню адаптаційних рішень. Ну і без сумніву задля реалізації заходів зі стійкості необхідне адекватне фінансування. Створення

інноваційних фінансових інструментів, зокрема «зелених облігацій" або спеціальних кліматичних фондів, забезпечить сталість адаптаційних проєктів. Сприяння державно-приватному партнерству може також збільшити ресурси для впровадження кліматичних рішень [40].

Одним із позитивних прикладів європейських міст у сфері адаптації до змін клімату, що стало результатом як кліматичних викликів, так і соціально-демографічних змін, є місто Фрайбург, що розташоване у південно-західних передгір'ях Шварцвальду, на річці Драйзам. Стратегія адаптації до змін клімату міста була розроблена в рамках Кліматичної концепції адаптації («Klimaangepassungskonzept») [4], що офіційно була опублікована у березні 2019 року. Її розробка відбувалася на основі даних 2016 року у співпраці з міським департаментом планування, науковими установами та незалежними експертами у сфері кліматології та урбаністики. Серед них зокрема планувальне та інженерне бюро BerchtoldKrass space&options, яке спеціалізується на міському плануванні та екологічному проєктуванні, консалтингова компанія GEO-NET Umweltconsulting GmbH, що займається кліматичними моделями та аналізом вразливості, а також провідні фахівці: Dr.-Ing. Martin Berchtold, Dipl.-Ing. Philipp Krass, Dipl.-Ing. Poliksen Qorri Dragaj, M.Sc. Isabel Garcia Espino, M.Sc. Ananda-Michael Berger, Dipl.-Geogr. Peter Trute та M.Sc. Melanie Schneider. Координацію процесу здійснювало міське управління містобудування Фрайбурга за участі відповідальної особи Silke Schlegelmilch, що забезпечувало інтеграцію концепції у загальну політику міського розвитку.

Основною причиною розробки цього документа стали зростаючі температури та частіші періоди екстремальної спеки, що є особливо відчутним у Фрайбурзі через його географічне розташування. Як місто, розташоване у Верхньорейнській низовині, Фрайбург є одним із найтепліших регіонів Німеччини, а ефект «міського острова тепла» значно посилює проблему перегріву у літній період. Натомість одним із ключових соціально-демографічних чинників, що вплинув на необхідність адаптації, є старіння населення. У місті спостерігається значне зростання частки пенсіонерів, що зумовлено виходом на пенсію покоління «бебі-бумерів». Ця категорія населення є особливо вразливою до екстремальних температур, що створює додаткове навантаження на систему охорони здоров'я та соціальну інфраструктуру. З огляду на це, стратегія Фрайбурга спрямована не лише на пом'якшення кліматичних ризиків, а й на створення комфортного міського середовища, доступного для всіх, а зокрема людей старшого віку.

Вдалою практика Фрайбурга є тому, що наразі місто не просто реагує на нагальні кліматичні виклики, а прагне системно інтегрувати заходи адаптації у документацію з просторового планування. Метою стратегії є оптимізація

міського середовища шляхом зниження теплового навантаження, поліпшення циркуляції повітря, розвитку зелених насаджень та інтеграції водних елементів у міську інфраструктуру. Використання моделей міського клімату, дозволило проаналізувати уразливі райони та розробити стратегічні рішення, спрямовані на зменшення впливу спеки.

Аналіз концепції Фрайбурга дозволив виділити певну методологію. Розробка концепції з адаптації до зміни клімату, як і концепцій інтегрованого розвитку, відбувається за стандартною схемою. Процес починається зі збору та аналізу даних для виявлення вразливих місць у місті. На основі цих висновків пропонуються заходи для ефективного подолання та пом'якшення цих вразливостей на рівні міста.

Після завершення етапу аналізу починається етап планування. Цей процес переходить від загальних стратегій до конкретних дій. На загальноміському рівні встановлюються стратегічні цілі, які часто формулюються як широкі наміри, такі як «Розвиток кліматично оптимізованих міських і будівельних структур» або «Сприяння кліматично сприятливій інтеграції мобільності». Ці всеохоплюючі цілі потім розбиваються на підцілі, покликані спрямовувати зусилля на досягнення стратегічного бачення.

Після того, як на рівні міста визначено чітке бачення, акцент переноситься на розробку конкретних заходів, які мають бути реалізовані на рівні району. Ці дії покликані безпосередньо сприяти досягненню ширших цілей кліматичної стійкості. Концепція поєднує рішення мезорівня на рівні міста з рішеннями мікрорівня на рівні району, в результаті чого створюється комплексний план дій зі стійкості до зміни клімату.

Плани адаптації до зміни клімату суттєво відрізняються від концепцій інтегрованого розвитку розроблених в Німеччині, зокрема, підходом до збору та аналізу даних. Наріжним каменем планування адаптації до зміни клімату є використання міських кліматичних моделей. Наприклад, у Фрайбурзі основним інструментом є мезо-модель FITNAH. Ця модель обробляє вхідні просторові дані, такі як землекористування, висота будівель, поверхнева непроникність і топографія, щоб змодельювати міські вітрові потоки і температуру в поточних умовах і спрогнозувати ці параметри для різних сезонів і часу доби сьогодні і в майбутньому.

Ключовою перевагою цього підходу є можливість накладати результати кліматичної моделі на стандартні набори просторових даних для виявлення критичних зон, відомих як «гарячі точки». Наприклад, розглянемо район, де високі денні температури створюють дискомфорт, де проживає велика кількість людей похилого віку, а поруч знаходиться дитячий садок. Така місцевість

кваліфікується як «гаряча точка» через підвищену вразливість її мешканців до теплового стресу, що вимагає негайних заходів з адаптації.

Після виявлення «гарячих точок» вони ранжуються за рівнем вразливості, що дозволяє визначити пріоритетність втручань у конкретних міських просторах. Кожна «гаряча точка» проходить детальний секторальний аналіз, і для неї розробляються індивідуальні плани дій. Ці плани включають заходи у сфері розвитку міської забудови та дизайну відкритих просторів для пом'якшення теплового стресу та підвищення кліматичної стійкості у відповідних районах [4].

Одним із ключових напрямів Кліматичної концепції адаптації до змін клімату Фрайбурга є захист існуючих, а також створення нових зелених зон, що відіграють важливу роль у забезпеченні біокліматичного балансу. Зелені насадження, такі як парки, міські ліси та відкриті простори, допомагають зменшувати теплове навантаження та покращують якість життя мешканців. Увага зосереджена на проєктуванні зелених територій, які сприяють мікрокліматичному різноманіттю і забезпечують охолодження навіть під час тривалих періодів спеки. Особливу увагу було приділено створенню затінених рекреаційних зон, що є критично важливими для вразливих груп населення, таких як люди старшого віку та діти. Захист зелених коридорів, що забезпечують ефективну вентиляцію міської території, визнано одним із ключових завдань. Ліси, прилеглі до міста, визначені як джерела холодного повітря, яке спеціальні канали спрямовують у найщільніше забудовані райони, пом'якшуючи температурний стрес. Планування містить рекомендації щодо масового висадження дерев вздовж транспортних артерій для створення затінених зон та поліпшення якості повітря.

Додатковий пріоритет віддано управлінню водними ресурсами. У рамках концепції застосовуються технології розгерметизації поверхонь, що сприяють природній інфільтрації дощової води. Впровадження рухомих водних елементів, як-от фонтани та системи водного охолодження в громадських просторах, значно покращує мікроклімат та підвищує комфортність перебування у місті в літній період. Такий підхід дозволяє гармонійно інтегрувати водні об'єкти у міське середовище, посилюючи їх екологічний і соціальний вплив. Інфраструктурні заходи є важливим компонентом адаптаційної політики Фрайбурга.

Та зрештою, у сфері транспорту реалізуються заходи щодо розвитку сталої мобільності. Інфраструктура велосипедних доріжок і пішохідних маршрутів, які проходять через затінені зони, дозволяє скоротити викиди вуглецю, зменшити транспортний трафік і полегшити пересування в умовах

підвищених температур. Транспорт із низьким рівнем викидів також є ключовою складовою цієї політики, спрямованої на екологізацію мобільності.

Адаптаційні заходи у Фрайбурзі базуються на детальному кліматичному аналізі, який виявив найбільш вразливі зони, або зазначені вище «гарячі точки». Цей аналіз став основою для формування пакета стратегій і заходів, що реалізуються на різних рівнях. Він базувався на даних, отриманих із метеостанцій та супутникових спостережень, що забезпечило високу роздільну здатність моделювання. Цей підхід дозволив інтегрувати метеорологічні дані (температура, швидкість вітру, сонячне випромінювання) з інформацією про просторову структуру міста, зокрема щільність забудови, розподіл зелених зон та інші фактори, що впливають на теплообмін у місті [4]. Отримані дані дозволили розподілити територію міста на зони з різним рівнем теплового навантаження, що стало основою для розробки локалізованих заходів з адаптації. Зокрема, для найуразливіших зон передбачено впровадження спеціалізованих заходів, що сприяють зниженню теплового стресу та формуванню комфортних мікрокліматичних умов.

Однією з основних стратегій, сформованих після аналізу, є активне впровадження та захист зелених насаджень і відкритих просторів. Зелені коридори стали важливими елементами для вентиляції урбанізованих зон і пом'якшення теплового стресу, особливо в регіонах із високою щільністю населення. Одночасно з цим, у міському середовищі інтегрується водочутлива інфраструктура. Такий підхід сприяє природному охолодженню міських територій, підвищує їхню рекреаційну цінність і водночас зменшує ризики затоплень під час сильних дощів.

У транспортній сфері значний акцент зроблено на сталу мобільність. Створення велосипедних доріжок і перехід на електричний громадський транспорт є ключовими чинниками у зменшенні викидів та розвантаженні центральних районів міста. Екологічно стійкі транспортні зони сприяють зменшенню автотрафіку, тоді як спеціалізована інфраструктура для пішоходів і велосипедистів знижує тепловий стрес у густозаселених міських районах. Паралельно відбувається вдосконалення міської забудови через впровадження сучасних енергоефективних технологій. Врахування екологічних аспектів у проєктуванні будівель сприяє зменшенню споживання енергії та підтримці комфортного міського клімату.

Основним принципом стратегії є цілісний підхід до міського планування. Концепція адаптації включає широкий рамковий план дій, який охоплює загальноміський, системний і локальний рівні. Комплексний підхід, що поєднує стратегічні плани з точковими втручаннями, дозволяє ефективно використовувати як природні, так і технічні ресурси для сталого розвитку міста.

Така практика демонструє, що стратегія адаптації у Фрайбурзі є одним із прикладів системної відповіді на виклики, пов'язані зі змінами клімату, та створення сприятливого міського середовища в довгостроковій перспективі.

Фрайбург займає визначне місце серед європейських міських центрів, які сформулювали масштабні стратегії, спрямовані на розвиток зелених зон та відкритих просторів для пом'якшення наслідків зміни клімату. Основою цих ініціатив є інтеграція кліматичних аспектів у процеси міського планування, що дозволяє створювати біокліматичні зони для регулювання теплового стресу, поліпшення вентиляції та покращення екологічних умов. Проектування ефективної системи зелених зон ґрунтується на двох ключових принципах. Перший — це захист існуючих лісових масивів і парків, які є важливими джерелами прохолодного повітря. У цьому контексті прилеглі лісові території та річка Драйзам відіграють значну роль у забезпеченні природної вентиляції міських районів. Другий принцип — створення нових зелених зон і з'єднувальних коридорів, які формують мережу, що дозволяє потокам прохолодного повітря проникати в центральні райони міста, зокрема у «гарячі точки».

Ще одним важливим акцентом плану є забезпечення мікрокліматичних умов, які роблять життєве середовище комфортнішим для населення з різноманітною демографією, включаючи групи підвищеного ризику. Це досягається шляхом додавання малих відкритих просторів, які раніше не враховувалися в зеленій інфраструктурі. Наприклад, одним із проєктів, спрямованих на оптимізацію мікроклімату в рекреаційних зонах, є створення затінення шляхом висадження дерев, встановлення рухомих водних елементів і оптимізація пішохідних шляхів для покращення циркуляції повітря. Ефективність системи зеленої мережі значною мірою залежить від фізичної доступності для місцевого населення. Поліпшення транспортного доступу до рекреаційних зон шляхом подолання природних і штучних бар'єрів, таких як річки, залізничні колії та магістральні дороги, стало важливим стратегічним напрямом для Фрайбурга. Усунення зон із обмеженим доступом гарантує рівні можливості для всіх груп населення у використанні рекреаційних територій, що є ще одним виміром міської стійкості перед обличчям кліматичних змін.

У результаті мережа зелених зон та відкритих просторів Фрайбурга значно сприяє пом'якшенню наслідків зміни клімату, водночас покращуючи якість життя його мешканців. Такий підхід підкреслює необхідність інтегрованого управління, врахування місцевих умов і загальної доступності природних середовищ у межах міського простору.

Застосування будівельних конструкцій, матеріалів та технологій, оптимізованих з урахуванням кліматичних факторів, є стратегічним підходом у

політиці адаптації Фрайбурга, спрямованим на пом'якшення негативних наслідків зміни клімату та забезпечення підвищеного комфорту в міському середовищі. У цьому контексті велика увага приділяється правильному вибору матеріалів, оптимальній щільності забудови, інтеграції зелених елементів у архітектурні проекти та використанню новітніх архітектурних технік. Як зазначено в дослідженні, важливим компонентом є будівництво споруд із врахуванням теплового комфорту. Розгерметизація поверхонь і вибір матеріалів з високим альбедо дозволяють зменшити теплопоглинання конструкцій і нагрівання навколишніх повітряних мас [4]. Таким чином, світловідбиваючі покриття та матеріали з низькою теплопровідністю мають вирішальне значення для мінімізації ефекту міських теплових островів.

Одним із важливих завдань є включення зелених дахів і фасадів у проекти будівель, що не лише допомагає знижувати температуру, але також покращує якість повітря та підвищує естетичну цінність міста. Охолодження через зелені дахи та фасади є ефективним методом для зменшення теплового навантаження та забезпечення кліматичного комфорту. Крім того, затінення будівель за допомогою дерев і пергол забезпечує додатковий захист від перегріву влітку. Дуже важливою є й оптимізація орієнтації будівель на етапі планування. Як вказано у документі, орієнтація чутливих приміщень, таких як дитячі кімнати, на північ або схід значно знижує вплив прямих сонячних променів, що зменшує енергоспоживання для кондиціонування [4]. Це також включає створення зелених коридорів навколо будівель для кращої циркуляції прохолодного повітря.

Інтеграція цих стратегій сприятиме створенню міського середовища та конструкцій, які ефективно протидіють наслідкам зміни клімату, знижують енергоспоживання на охолодження, зменшують рівень забруднення та створюють комфортні умови життя для мешканців. Це свідчить про те, що сучасний підхід до кліматично адаптивного міського планування є одним із ключових елементів сталого розвитку.

Розглянемо наступний розділ концепції з адаптації до змін клімату, а саме мобільність. Щоб інтегрувати мобільність у дружній до клімату спосіб, стратегія Фрайбурга наголошує на трьох ключових цілях: зменшення викидів тепла від рухомих транспортних засобів, заохочення активної мобільності (пішохідного та немоторизованого транспорту) та організація стаціонарного транспорту у кліматично-розумний спосіб. Ці підцілі роблять значний внесок у зміцнення кліматичної стійкості в секторі мобільності. На додаток до цих стратегій, доцільно включити стійкість транспортної інфраструктури до кліматичних впливів як важливий компонент. Це включає в себе сприяння адаптивній інфраструктурі за допомогою природоорієнтованих рішень, таких

як інтеграція рослинності і стійких дренажних систем в дизайн міського транспорту. Підціль «організація стаціонарного транспорту з урахуванням кліматичних вимог» може здаватися складною, проте вона природно узгоджується із забезпеченням стійкості транспортної інфраструктури до кліматичних викликів, тому доцільно розглянути її заміну на більш широкую другу.

Фрайбург визначив низку конкретних рішень для досягнення своїх цілей у сфері мобільності. Зокрема, місто розвиває компакту інфраструктуру з низькою щільністю, що сприяє зменшенню транспортного навантаження. Важливим напрямом є збільшення зелених насаджень у транспортних зонах, зокрема впровадження зелених трамвайних колій. Для покращення умов пересування місто активно створює затінені пішохідні та велосипедні доріжки, а також озеленює і затінює автобусні зупинки та зони очікування. Аналогічний підхід застосовується і до автостоянок, де впроваджуються зелені насадження та тіньові конструкції. Окрім цього, у Фрайбурзі обмежують використання непроникних поверхонь у зелених зонах або замінюють їх кліматично сприятливими рішеннями, такими як підземні паркінги.

Спираючись на структуру Фрайбурга, варто продовжувати розширення заходів для підсилення кліматичної стійкості міст. Зокрема, управління автостоянками може включати не лише їх озеленення та затінення, а й перенесення у багатоповерхові або підземні приміщення, що дозволить звільнити вуличний та дворовий простір для кліматично адаптованих видів використання. Компактна інфраструктура мобільності може бути вдосконалена через розширення систем громадського транспорту та підвищення доступності соціальних і побутових послуг, офісів і культурних просторів у межах мікрорайонів, що сприятиме зменшенню потреби в тривалих поїздках на роботу. Додатково, розвиток мікромобільності, зокрема популяризація прокату електросамокатів і велосипедів, а також розбудова велоінфраструктури, може позитивно вплинути на рівень міської мобільності. Важливим аспектом є також удосконалення системи дренажу та фільтрації в транспортних зонах, що має критичне значення для адаптації до екстремальних погодних умов, хоча цей аспект частково вже розглядався, його детальний аналіз буде представлено в наступних розділах. Впроваджуючи ці заходи, наші міста можуть ще більше посилити кліматичну стійкість своїх систем мобільності, забезпечивши їхню сталість та адаптивність до майбутніх кліматичних викликів.

Концепція адаптації до зміни клімату у Фрайбурзі наголошує на двох ключових підходах до інтеграції води у міський простір: Водно-чутливий міський розвиток (Water Sensitive Urban Development, WSUD) та інтегроване стале управління стічними водами. WSUD інтегрує водні ресурси як

центральний елемент міської інфраструктури та екосистем, тоді як стале управління стічними водами зосереджується на ефективному та екологічно безпечному очищенні та повторному використанні водних ресурсів. Хоча ці цілі можуть спочатку здатися складними, їх реалізація стає зрозумілішою, якщо розглянути конкретні заходи, спрямовані на їх досягнення.

Фрайбург запропонував комплексний підхід до посилення водної інтеграції у міському середовищі. Одним із ключових рішень стало встановлення динамічних водних об'єктів у громадських місцях, які є інтерактивними та доступними для мешканців. Додатково впроваджуються комплексні системи управління водними ресурсами, що передбачають інфільтрацію, зберігання та повторне використання води, зменшуючи навантаження на дренажну інфраструктуру. Ще одним важливим напрямом є розробка концепцій інтегрованого зрошення зелених насаджень, що дозволяє підтримувати екологічний баланс та підвищувати стійкість міських екосистем до змін клімату.

Ці заходи були адаптовані до потреб Фрайбурга, однак існують додаткові стратегії, які можуть підвищити кліматичну стійкість міст у сфері управління водними ресурсами. Одним із таких рішень є ренатуралізація міських водойм, що передбачає відновлення природних водних шляхів у межах міських територій. Це сприяє зменшенню навантаження на дренажні системи, покращенню екологічного середовища, створенню нових рекреаційних просторів для мешканців і допомагає охолодженню міста в спекотні періоди. Ще одним ефективним підходом є інноваційне управління зливовими водами, прикладом чого може слугувати практика Копенгагена [5]. Там вулиці та площі спроектовані так, щоб під час сильних дощів виконувати роль тимчасових водних шляхів, спрямовуючи надлишок води до спеціально відведених місць або водосховищ, що дозволяє значно зменшити ризик міських повеней. Крім того, важливим елементом водної стратегії є використання проникних поверхонь у громадських місцях. Використання водопроникних матеріалів у міському просторі дає змогу зменшити поверхневий стік, знизити навантаження на дренажні системи та сприяти поповненню рівня ґрунтових вод, що є ключовим аспектом сталого водного балансу міста. Поєднуючи запропоновані Фрайбургом заходи з цими додатковими заходами, міські території можуть створити надійні та адаптивні системи управління водними ресурсами. Ці системи не лише підвищують стійкість до зміни клімату, але й покращують якість життя в містах та екологічну стійкість.

Моніторинг кліматичних змін у Фрайбурзі є важливим інструментом для адаптації міста до сучасних викликів. Місто протягом багатьох років активно займається адаптацією до змін клімату. Центральним елементом цих зусиль є

розробка та впровадження системи моніторингу клімату, яка відстежує наслідки змін клімату та оцінює ефективність адаптаційних заходів. У співпраці з Університетом Фрайбурга було створено специфічну систему індикаторів, яка дозволяє систематично спостерігати за кліматичними змінами та оцінювати вплив впроваджених стратегій адаптації. Ця система інтегрована в ІТ-інфраструктуру міста і використовується як важливий інструмент для прийняття майбутніх рішень, пов'язаних із кліматом.

Без сумніву основою всього є моніторинг, який починається з кліматичного аналізу для оцінки біокліматичного навантаження. Він враховує денні та нічні температури, моделює потоки холодного повітря та визначає так звані «гарячі точки» – зони у містах, де перегрів є найбільш інтенсивним. Використовуючи модель міського клімату FITNAH, «найвразливіші райони» визначаються за взаємопов'язаними критеріями, такими як щільність населення, наявність зелених зон та доступність прохолодних територій. Більше того, Фрайбург створив цілісні системи для моніторингу регіональних кліматичних змін і їх впливу на різні демографічні групи. Адже аналіз вразливостей дозволяє визначити райони, які найбільше потребують втручання, на основі просторових та соціальних характеристик. Запропонований підхід дозволяє інтегрувати кілька масштабів дослідження у кліматичний моніторинг — від широкомасштабного аналізу міста до дослідження окремих локальних зон. Результати моделювання використовуються як основа для процесу ухвалення рішень, спрямованих на зменшення теплового стресу та посилення стійкості до змін клімату.

Оцінка заходів з адаптації до зміни клімату вимагає систематичного аналізу їхнього впливу на різні сектори міста. Далі розглядаються п'ять репрезентативних заходів, обраних зі стратегії адаптації до зміни клімату Фрайбурга, які охоплюють ключові сфери міста: зелені та відкриті простори, міську структуру, будівлі, мобільність та управління водними ресурсами. Аналізуючи по одному заходу з кожного сектору, цей розділ має на меті забезпечити комплексне розуміння конкретних змін і впливів, які може спричинити реалізація цих заходів. Такий сфокусований підхід дозволяє детально вивчити як прямі, так і непрямі наслідки, пропонуючи розуміння взаємозв'язків між різними міськими системами в рамках зусиль з адаптації до зміни клімату.

Один із заходів є захист і створення повітряних коридорів. Міські повітряні коридори - це стратегічні просторові шляхи, призначені для сприяння природній циркуляції повітря та терморегуляції в міському середовищі. Ці канали слугують дихальними системами для міст, забезпечуючи рух повітряних мас для зменшення ефекту островів тепла, покращення загальної якості повітря

та створення більш комфортного мікроклімату [9]. Розміщуючи будівлі, проектуючи зелені насадження та враховуючи топографічні особливості, містобудівники можуть створювати природні вентиляційні мережі, які допомагають охолоджувати міські райони в спекотні періоди, розсіювати забруднювачі та зменшувати накопичення застійного повітря, що затримує тепло. Ці коридори функціонують як легені міста, дозволяючи прохолодному повітрю з навколишніх зелених насаджень, водойм або менш забудованих районів проникати через місто, замінюючи тепле, забруднене повітря і забезпечуючи природні механізми охолодження. На практиці це може включати вирівнювання вулиць, створення проміжків між будівлями, збереження шляхів вітру та інтеграцію рослинності для спрямування і посилення руху повітря, що в кінцевому підсумку сприяє створенню більш легких для дихання, термічно комфортних та кліматично стійких міських ландшафтів.

Аналіз реалізації повітряних коридорів свідчить про складний і часом суперечливий вплив на міський клімат та якість повітря. Моделювання показує, що взаємопов'язані системи повітряних коридорів можуть досягти значного зниження температури на 3-5°C у літні місяці і приблизно на 1°C у зимові періоди [10]. Однак взаємозв'язок між повітряними коридорами та якістю повітря створює несподівані виклики. Хоча теоретична база припускає, що вітрові потоки з приміських районів повинні покращувати якість міського повітря за рахунок притоку свіжого повітря, емпіричні дослідження в Шанхаї показали, що вентиляційні коридори насправді можуть підвищувати концентрацію забруднення повітря, зокрема, рівень PM_{2,5} [11]. Це очевидне протиріччя можна вирішити шляхом інтеграції зелених насаджень у мережу коридорів, як показало дослідження «Ліси вітрових коридорів» [12], яке вказує на те, що рослинність ефективно знижує концентрацію твердих частинок у повітрі.

Окрім прямого кліматичного впливу, повітряні коридори створюють значні вторинні ефекти на міський розвиток і вартість нерухомості. Нерухомість, прилегла до цих вентиляційних зон, часто зростає в ціні завдяки покращенню мікроклімату. Однак реалізація проекту стикається з істотними проблемами, включаючи суворі вимоги до зонування, які обмежують гнучкість розвитку, і потенційно значні муніципальні витрати, пов'язані зі структурними змінами в існуючій міській структурі, такими як знесення будівель та реконфігурація вулиць.

Заходом, що має допомогти досягнути кліматичної адаптації міської структури є оптимізація виходу на відкриті простори. На увазі мається створення саме такої забудови, що допомагає легше повітрю заходити в

прилягаючі квартали від об'єктів, що створюють холодне повітря, як і головні повітряні коридори так і менші парки, сквери і зелені насадження. Головним є пропозиція відмовитись від заблокованих закритих кварталів, в середину яких набагато важче потрапити потокам повітря, а також від густих груп озеленення, що можуть також уповільнюють вітряні потоки від охолодження територій.

Кількісні відмінності у охолодженні та вентиляції між заблокованими та відкритими будівлями можна проаналізувати через різні фактори, зокрема динаміку повітряного потоку, теплові характеристики та енергоспоживання. Відкриті будівлі, які характеризуються просторовою конфігурацією та інтеграцією з навколишнім середовищем, зазвичай демонструють кращі можливості охолодження та вентиляції порівняно з заблокованими будівлями, які мають більш компактну структуру та нижчу проникність.

Відкриті будівлі сприяють покращеному руху повітря завдяки своєму дизайну, який забезпечує кращу природну вентиляцію. Дослідження показують, що будівлі, спроектовані з відкритими просторами та меншим співвідношенням висоти до ширини (H/W), можуть значно покращувати циркуляцію повітря, що призводить до зниження внутрішньої температури та підвищення теплового комфорту [13]. Наприклад, дослідження показало, що відкриті будівлі можуть досягати природного рівня вентиляції, який на 30% вищий, ніж у заблокованих будівлях, що призводить до зменшення навантаження на охолодження приблизно на 15% [14]. Відкрита забудова, що використовують природну вентиляцію та пасивні методи охолодження, можуть зменшити навантаження на охолодження до 70% [14]. Наприклад, пасивні методи охолодження, такі як наскрізна вентиляція, можуть знижувати температуру всередині приміщень у середньому на 3–5°C у порівнянні з заблокованими будівлями, які часто мають вищі теплові навантаження через обмежений повітрообмін [15]. Крім того, енергоспоживання, пов'язане з роботою систем охолодження у відкритих будівлях, загалом є нижчим. Порівняльний аналіз показав, що відкриті будівлі споживають приблизно на 25% менше енергії для охолодження, ніж заблоковані будівлі, насамперед завдяки покращеній вентиляції та зниженій залежності від систем кондиціонування [16]. Будівлі, розташовані поблизу парків або водойм, можуть зменшувати попит на охолодження до 13,9% порівняно з тими, що розташовані в щільно забудованих районах [17]. Натомість заблоковані будівлі часто мають недостатню кількість зелених зон, що може посилювати ефект міського теплового острова та збільшувати енергоспоживання для охолодження [16].

Реалізація відкритої забудови вимагає ретельного розгляду конкуруючих принципів міського дизайну. Хоча посилена циркуляція повітря має вирішальне значення для адаптації до зміни клімату, надмірна відкритість може поставити

під загрозу інші важливі міські якості. Традиційна квартальна забудова має очевидні переваги: чітке розмежування між громадськими та приватними територіями, оптимальна щільність забудови при меншій висоті будівель та захист від надмірного впливу вітру в холодні пори року [18]. Виклик полягає в досягненні напіввідкритих конфігурацій, які збалансовують кілька цілей: достатню вентиляцію і доступ до сонця, оптимальну щільність житла і збереження чітко визначених громадських просторів. Такий збалансований підхід гарантує, що заходи з адаптації до зміни клімату посилюють, а не послаблюють фундаментальні якості, які роблять міські простори придатними для життя і функціональними.

Щоб адаптувати окремі будівлі для змін клімату одні із заходів є зелені дахи. Зелені дахи - це широко розповсюджений захід адаптації міського клімату, який перетворює звичайні поверхні дахів на живі рослинні системи. Цей захід передбачає створення рослинних угруповань на дахах будівель, створюючи додаткову екологічну інфраструктуру, яка виконує кілька екологічних функцій: покращує інфільтрацію води, знижує температуру навколишнього повітря та зменшує тепловтрати у верхніх поверхах будівель. Незважаючи на те, що ці заходи вже давно стали популярними серед містобудівників, критична оцінка їхньої ефективності та впливу має важливе значення для їхнього впровадження на основі фактичних даних.

Ефективність зеленого даху можна оцінити за кількома екологічними параметрами: енергоефективність, покращення якості повітря та управління зливовими водами. З точки зору енергоспоживання, симуляційні дослідження, проведені в Торонто, демонструють, що зелені дахи можуть зменшити потребу в охолодженні будівлі на 6%, а в опаленні - на 10% [19]. Однак ці переваги в першу чергу стосуються верхніх поверхів у багатоповерхових будівлях, і дослідження показують, що світловідбиваючі поверхні дахів досягають вищих енергетичних показників економії енергії, а саме 11-27% в охолодженні будівлі за менших витрат [24].

Покращення якості повітря піддається кількісній оцінці, але є скромним. Дослідження показують, що зелений дах площею 93 м² може щорічно видаляти приблизно 18 кг твердих частинок, що еквівалентно викидам від 15 легкових автомобілів під час нормальної експлуатації за рік [20, 21]. Більш значний вплив спостерігається в управлінні зливовими водами. Демонстраційний проект у Портленді задокументував майже 70% скорочення стоку за допомогою 10-сантиметрового шару ґрунту [22], причому ефективність зростає з часом через дозрівання рослинності. Ці докази спонукали Портленд включити зелені дахи у свої вимоги до управління зливовими водами для нових проектів розвитку [23]. Ще одним підтвердженням є дослідження, проведені в Північній Кароліні, де

зелені дахи зменшили піковий стік дощових вод на понад 75% і сприяли випаровуванню понад 60% від загальної кількості опадів [25].

Незважаючи на ці задокументовані переваги, економічні міркування створюють значні проблеми. Зелені дахи вимагають значних початкових інвестицій (приблизно 250 євро за квадратний метр) і постійних витрат на обслуговування [26]. Їхній вплив на пом'якшення наслідків зміни клімату є найбільш вираженим при масштабному впровадженні завдяки кумулятивному зменшенню міських теплових островів [27]. Таке співвідношення витрат і вигод свідчить про те, що альтернативні рішення можуть досягти порівнянних екологічних переваг більш економічно.

Одним із важливих заходів для підвищення комфорту міського середовища та зменшення теплового навантаження є створення затінених просторів уздовж пішохідних і велосипедних маршрутів. Затінення пішохідної та велосипедної інфраструктури являє собою подвійний адаптаційний захід, який поєднує модифікацію мікроклімату з покращенням міської мобільності. Таке втручання може бути досягнуте як за допомогою природних (крони дерев), так і конструктивних (навіси) рішень затінення, причому рослинність пропонує додаткові переваги завдяки процесам випаровування вологи. Хоча основною метою є зниження температури вздовж коридорів руху, цей захід одночасно вирішує питання доступності та комфорту користувачів, потенційно впливаючи на зміну видів транспорту в міських транспортних схемах шляхом створення більш комфортного в тепловому відношенні та естетично приємного середовища для пересування.

Ефективність мереж затінення пішохідних і велосипедних доріжок проявляється через численні вимірювані впливи на міське середовище. Дослідження мікроклімату в Тайвані демонструють значне зниження температури під кронами дерев: температура повітря на 0,64-2,52°C нижча, ніж на незатінених ділянках, а різниця температур на поверхні ґрунту сягає 8,07°C [28]. Ще більш драматичні ефекти спостерігаються в температурі поверхні дорожнього покриття, де затінені ділянки можуть бути на 5-15°C холоднішими, ніж відкриті поверхні [29].

Таке зниження температури корелює зі змінами поведінки в моделях міської мобільності. Дослідження Сонга вказує на те, що збільшення озеленення і затінення вулиць позитивно корелює з вищими рівнями фізичної активності, особливо серед людей похилого віку, оскільки затінене середовище сприймається як більш привабливе і комфортне для прогулянок пішки і їзди на велосипеді [30]. Цей взаємозв'язок поширюється і на економічні вигоди, як це було продемонстровано в центрі Сеула, де зручне для пішоходів, добре затінене

середовище не тільки підвищило фізичну і соціальну активність, а й збільшило залучення клієнтів до місцевого бізнесу [31].

Наслідки затінення вулиць для громадського здоров'я є особливо важливими в контексті зміни клімату. Спека у Ванкувері у 2021 році стала яскравим доказом цього взаємозв'язку: вищі показники смертності спостерігалися в районах, що характеризуються щільною забудовою та обмеженою кількістю зелених насаджень [32]. Це розуміння підвищило важливість забезпечення затінення як критично важливого фактору.

Однак існують проблеми з реалізацією, особливо в обмеженому міському просторі. Фізичні обмеження вузьких вулиць можуть обмежити можливості для розміщення дерев, а в деяких випадках рослинність може затінювати фасади будівель, що потенційно може погіршити архітектурну естетику. Хоча кількісні кореляції між збільшенням затінення і впровадженням немоторизованого транспорту ще належить встановити, сукупні дані свідчать про значні переваги в різних міських системах.

Ефективне управління зливовими водами є ключовим елементом кліматичної стійкості міст, і його можна досягти через впровадження сучасних дренажних рішень, таких як інфільтрація, зберігання та повторне використання води. Інфільтраційні системи - це стійкі дренажні рішення, які дозволяють зливовим водам природним чином просочуватися в землю, а не перевантажувати традиційні каналізаційні системи. Ці системи, які включають інфільтраційні жолоби, траншейні системи, глибокі грядки і траншеї для дерев, працюють шляхом збору дощової води і поверхневого стоку в спеціально спроектованих конструкціях, заповнених проникними матеріалами, такими як гравій або щебінь. Коли вода протікає через ці системи, вона поступово просочується в навколишній ґрунт, допомагаючи поповнити запаси ґрунтових вод, зменшити ризики повеней і відфільтрувати забруднюючі речовини через природні ґрунтові процеси. Такий підхід не лише допомагає керувати міськими водними потоками, але й підтримує місцеві екосистеми, зменшує навантаження на муніципальну дренажну інфраструктуру та може сприяти озелененню міст у поєднанні з рослинністю, як у випадку з траншеями для дерев, де система одночасно забезпечує управління зливовими водами та підтримує ріст міських дерев.

Впровадження концепцій дренажу демонструє вимірні переваги за багатьма екологічними та економічними параметрами. Дослідження інфільтраційних систем свідчать про значний потенціал управління зливовими водами: п'ять інфільтраційних дренажів на гектар можуть зменшити стік на 23,32% [33]. Ще більш вражаючі результати були задокументовані в Сан-Карлос, Бразилія, де інфільтраційні траншеї в поєднанні з трав'яним покривом

запобігли до 95% зливових стоків, зберігаючи при цьому відносно низький вуглецевий слід - 0,13 кг CO₂ екв/м³ інфільтрованих зливових вод і коефіцієнт екологічної ефективності - 0,35 кг CO₂ екв/\$ [34].

Окрім управління водними ресурсами, ці системи сприяють регулюванню міської температури. Дослідження Ванга та ін. демонструє, що системи біоретенції можуть знизити місцеву температуру на 2,5-5°C у пікові літні періоди завдяки комбінованому впливу процесу рослинного випаровування, тіні та утриманню вологи в біоретенційних середовищах [35]. Покращення якості води є не менш важливим, як задокументовано Натараджаном і Девісом, які виявили, що інфільтраційні басейни можуть досягти до 90% зменшення загальної кількості зважених речовин, знижуючи концентрацію з 200 мг/л до 20 мг/л, поряд із суттєвим зниженням рівня металів і хлоридів [36].

Економічні вигоди є особливо переконливими, про що свідчить План управління зливовими водами Копенгагена. Впровадження альтернативних рішень, включаючи зелену інфраструктуру та інфільтраційні системи, за прогнозами, зменшить втрати на 1,5 мільярда євро протягом століття порівняно зі звичайними системами водовідведення [5]. Це свідчить про те, що хоча ці системи потребують початкових інвестицій, вони пропонують значні довгострокові фінансові переваги завдяки зменшенню збитків від повеней та витрат на утримання інфраструктури.

Аналіз п'яти основних заходів з адаптації до зміни клімату у міському середовищі демонструє, що кожне рішення має свої переваги та обмеження. При цьому важливо розуміти, що ефективність конкретного заходу значною мірою залежить від локального контексту, включаючи кліматичні умови, міську морфологію, економічні можливості та соціальні потреби конкретного міста.

Успішна адаптація міст до кліматичних змін вимагає комплексного підходу, який поєднує різні заходи та стратегії. Жодне окреме рішення не може повністю вирішити всі виклики, пов'язані зі зміною клімату. Натомість, найкращих результатів можна досягти через синергію різних заходів, які доповнюють один одного та створюють багатшарову систему захисту від кліматичних впливів.

Критично важливим є те, що впровадження будь-яких адаптаційних заходів повинно базуватися на ретельному аналізі їх екологічної та економічної доцільності для конкретної території. Пряме копіювання успішних рішень з інших міст без врахування місцевої специфіки може призвести до неефективного використання ресурсів та навіть негативних наслідків. Кожне місто повинно розробити власну стратегію адаптації, яка враховує його унікальні характеристики та потреби, спираючись на наукові дослідження та емпіричні дані.

Концепція адаптації до зміни клімату, розроблена для Фрайбурга, являє собою комплексну систему, що охоплює чотири основні сфери міського просторового розвитку: відкриті простори, забудовані території, мобільність та управління водними ресурсами. Хоча ці стратегічні напрямки демонструють універсальну застосовність, їх впровадження в українських містах вимагає ретельного врахування місцевих умов і можливостей.

Можливість перенесення конкретних заходів у різні міські ландшафти України суттєво відрізняється. Такі міста, як Ужгород, Львів та Чернівці, що характеризуються близькістю до гірських районів та помірно-континентальним кліматом з теплим літом і м'якою зимою, мають певну екологічну схожість з Фрайбургом. Однак реалізація заходів з адаптації вимагає більшого, ніж просто екологічні паралелі. Кожне втручання має бути ретельно оцінене в рамках місцевих муніципальних можливостей, доступності ресурсів та існуючої інфраструктури.

Вирішальне значення для успішної адаптації має розробка стратегій впровадження, що ґрунтуються на фактичних даних. Замість того, щоб переймати найкращі міжнародні практики лише на основі їхньої естетичної привабливості чи сучасної популярності, українські містобудівники і архітектори повинні обґрунтовувати свої адаптаційні рішення на надійних місцевих даних та систематичному аналізі. Такий підхід передбачає проведення комплексної оцінки поточних умов та вразливостей міста, що дозволить визначити ключові ризики та проблемні зони. Важливим етапом є також аналіз муніципальних ресурсів і спроможностей для впровадження адаптаційних заходів, що дасть змогу оцінити реалістичність їх реалізації. Далі необхідно інтегрувати ці заходи в існуючі структури міського розвитку, забезпечуючи їх узгодженість із загальною стратегією міста. Завершальним етапом є розробка ефективних систем моніторингу, які дадуть змогу оцінювати результативність впроваджених рішень і коригувати їх за потреби.

Хоча окремі рішення з концепції Фрайбурга можуть виявитися життєздатними ізольовано, оптимальних результатів можна досягти шляхом розробки інтегрованих систем адаптації, пристосованих до конкретних міських умов. Такі системи повинні включати механізми безперервного моніторингу та зберігати достатню гнучкість, щоб реагувати на нові виклики та мінливі умови.

Проблемним аспектом сучасного містобудування в Україні є недостатня увага до стадії передпроектного аналізу. Часто рішення приймаються експертним методом, базуючись переважно на суб'єктивних оцінках, або під впливом зацікавлених сторін - міської влади, великих забудовників чи представників державних органів. Такий підхід призводить до того, що проектні рішення не враховують повною мірою локальний контекст, потреби

громади та екологічні особливості території. Натомість, ефективна адаптація міст до кліматичних змін вимагає переходу до науково обґрунтованого підходу, що базується на детальному аналізі місцевих умов. Це включає вивчення мікрокліматичних особливостей, оцінку існуючої забудови, дослідження потреб місцевої громади та моделювання потенційних наслідків впровадження різних адаптаційних заходів. Лише такий комплексний аналітичний підхід може забезпечити прийняття ефективних рішень, які будуть дійсно корисними для конкретного міста чи території.

Стратегії адаптації до змін клімату в Україні та Німеччині представляють різні методології, обумовлені специфікою викликів, з якими стикаються відповідні регіони та міські території. Адаптація до змін клімату є вагомим компонентом міської політики в обох випадках, однак підходи до її реалізації суттєво відрізняються через значні розбіжності в рівнях інтеграції, управлінських стратегіях та методологічних підходах до оцінки кліматичних ризиків. Українські адаптаційні плани, зокрема той, що розроблений для міста Запоріжжя [47], роблять більший акцент на макрорівневих стратегіях та відповідності міжнародним зобов'язанням, таким як Паризька угода. Натомість у Фрайбурзі заходи адаптації інтегруються безпосередньо в просторове планування та орієнтуються на локальні особливості міського середовища. Оцінка вразливості в Україні базується на загальних кліматичних сценаріях RCP 4.5 та RCP 8.5 [48], що дозволяє робити довгострокові прогнози змін температури та рівня опадів.

Основний акцент у стратегії для міста Запоріжжя робиться на секторальний підхід, який включає такі сфери, як енергетика, водні ресурси та критична інфраструктура. Водночас у Фрайбурзі застосовується методологія, що дає змогу детальніше визначати зони локального теплового стресу, оцінювати ефективність природної вентиляції та виявляти території, які потребують заходів з пом'якшення кліматичних ризиків. Відмінності простежуються і в характері адаптаційних заходів. Українські адаптаційні плани роблять наголос на масштабні інфраструктурні покращення, зокрема модернізацію енергетичних систем, покращення управління водопостачанням та розширення зелених зон.

Німецький підхід, представлений адаптаційною стратегією Фрайбурга, передбачає інтеграцію заходів безпосередньо в міську архітектуру та природне середовище. Зелені дахи, вертикальне озеленення, водопроникні поверхні та просторові рішення є ключовими методами зменшення кліматичних ризиків. На відміну від макромасштабного підходу України, Фрайбург застосовує мікрорівневі рішення, які орієнтовані на конкретні міські райони та допомагають мінімізувати прояви локальних кліматичних загроз.

Важливим аспектом є механізми управління та залучення громади. В Україні процес прийняття рішень зосереджується переважно на державних та муніципальних структурах, а участь громадськості є обмеженою. Основний наголос робиться на координації між різними рівнями влади та відповідності адаптаційних стратегій міжнародним вимогам. Фрайбургський підхід, навпаки, ґрунтується на активному залученні місцевих мешканців та приватного сектору. Громадські консультації, фінансові стимули для екологічно ефективного будівництва та співпраця з місцевими підприємствами є важливими складовими реалізації адаптаційних заходів.

Ще однією ключовою відмінністю є процес моніторингу та оновлення стратегій. Українські плани мають чітко регламентовану структуру, яка спрямована на відповідність міжнародним вимогам щодо звітності, однак часто їм бракує гнучкості для швидкого реагування на нові виклики. Фрайбург, на відміну від цього, впровадив концепцію «дихаючого плану», яка дозволяє періодично переглядати заходи адаптації та коригувати їх відповідно до змін кліматичних умов. Це забезпечує високу адаптивність міської політики та сприяє швидкій інтеграції нових наукових даних та технологічних рішень.

Таким чином, українські заходи адаптації є більш стратегічними та секторально орієнтованими, тоді як у Фрайбурзі вони інтегруються на локальному рівні міського планування. Україна зосереджує основні зусилля на великомасштабних інфраструктурних проєктах та регуляторних механізмах, тоді як у Німеччині ефективність досягається завдяки впровадженню кліматично адаптивних рішень у міську забудову, транспортні системи та природні території. Поєднання цих двох підходів могло б значно підвищити ефективність адаптаційної політики українських міст, забезпечуючи точнішу оцінку місцевих умов, більшу гнучкість у плануванні та активніше залучення громадськості до ухвалення рішень.

Висновок. Дослідження показало, що інтеграція кліматичної стійкості у міське планування є необхідною умовою для забезпечення стійкого розвитку міст, особливо в умовах зростаючих викликів, пов'язаних зі зміною клімату. Аналіз досвіду Фрайбурга продемонстрував ефективність комплексного підходу до адаптації міських систем, включаючи впровадження зеленої інфраструктури, оптимізацію забудови, удосконалення транспортної та водної політики. Важливо, що підходи до адаптації базувалися на кліматичному моніторингу та просторовому аналізі, що дозволило сформувати цілеспрямовані рішення для конкретних міських районів.

Оцінка ефективності заходів у Фрайбурзі підтвердила їх позитивний вплив на зниження теплового навантаження, покращення якості повітря, управління зливовими водами. Водночас досвід Фрайбурга підкреслює

важливість гнучкого підходу до адаптації, оскільки успішне застосування конкретних заходів значною мірою залежить від місцевого контексту, доступності ресурсів та міської морфології.

Перспективи впровадження цих стратегій в українських містах вимагають врахування місцевих соціально-економічних і кліматичних особливостей. Ефективна адаптація можлива лише за умови комплексного планування, науково обґрунтованого підходу та залучення всіх зацікавлених сторін – міської влади, експертів та громади. Використання напрацювань Фрайбурга може стати важливим орієнтиром для розробки муніципальних стратегій кліматичної адаптації, що забезпечить довготривалу життєздатність українських міст.

Література:

1. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation / ред.: С. В. Field та ін. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. URL: <https://doi.org/10.1017/cbo9781139177245> (дата звернення: 11.03.2025).
2. UN Habitat. Resilient City. City Resilience Global Programme. Urban Resilience Hub. [Електронний ресурс] URL: <https://urbanresiliencehub.org/wp-content/uploads/2022/12/Resilient-city.pdf> (дата звернення: 05.02.2025).
3. UN Habitat. Climate resilience. city resilience global programme. Urban Resilience Hub. [Електронний ресурс] URL: <https://urbanresiliencehub.org/wp-content/uploads/2022/12/4-CLIMATE-RESILIENCE.pdf> (дата звернення: 05.02.2025).
4. Berchtoldkrass Space&Options. Klimaanpassungskonzept Ein Entwicklungskonzept für das Handlungsfeld „Hitze“. 2019. 208 с. URL: https://www.freiburg.de/pb/site/Freiburg/get/params_E-2038560454/2071141/20201013_KLAK_Bericht-digital.pdf (дата звернення: 07.11.2024).
5. The City of Copenhagen. Cloudburst management plan. 2012. 28 с. URL: https://interlace-hub.com/sites/default/files/cph_-_cloudburst_management_plan.pdf (дата звернення: 19.01.2025).
6. Horn M.W.W. Digitalisation and sustainability: The Freiburg example. Open Access Government. [Електронний ресурс] URL: <https://www.openaccessgovernment.org/digitalisation-and-sustainability-the-freiburg-example/181410/> (дата звернення: 19.01.2025).
7. Universität Freiburg. Global change – geography. Geographie - Nahtstelle zwischen Mensch und Natur – Geographie. [Електронний ресурс] URL: <https://www.geographie.uni-freiburg.de/en/research-interests/research-interests-glc> (дата звернення: 05.02.2025).
8. Extreme Weather Events in Ukraine: Occurrence and Changes / V. Balabukh та ін. Extreme Weather. 2018. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77306>
9. He B.-J., Ding L., Prasad D. Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. Sustainable cities and society. 2019. Т. 47. С. 101472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101472> (дата звернення: 05.02.2025).
10. Haas M. 'Ventilation corridors' funnel cool mountain air into steamy stuttgart. Reasons to be Cheerful. [Електронний ресурс] URL: <https://reasonstobecheerful.world/stuttgart-ventilation-corridors-green-cool-air/> (дата звернення: 05.02.2025).

11. Quantifying the impact of urban ventilation corridors on thermal environment in Chinese megacities / A. Guo та ін. *Ecological indicators*. 2023. Т. 156. С. 111072. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111072> (дата звернення: 05.02.2025).
12. Modeling the impacts of city-scale “ventilation corridor” plans on human exposure to intra-urban PM2.5 concentrations / C. Liu та ін. *Atmosphere*. 2021. Т. 12, № 10. С. 1269. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12101269> (дата звернення: 05.02.2025).
13. Planning strategies of wind corridor forests utilizing the properties of cold air / U.-J. Sung та ін. *Land*. 2021. Т. 10, № 6. С. 607. URL: <https://doi.org/10.3390/land10060607> (дата звернення: 05.02.2025).
14. Toren B.I., Sharmin T. Comparison of building energy performance in three urban sites using field measurements and modelling in Kayseri, Turkiye. *Journal of physics: conference series*. 2023. Т. 2600, № 3. С. 032007. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/3/032007> (дата звернення: 05.02.2025).
15. Olewi M.Q., Sulaiman M.K.A.M., Mohamed M.F. Passive Cooling Strategies in the hot climate: a review study. *ARID international journal for science and technology*. 2023. С. 76–106. URL: <https://doi.org/10.36772/arid.ajst.2023.6115> (дата звернення: 05.02.2025).
16. Passive cooling techniques for ventilation: an updated review / D. Al-Shamkhee та ін. *Renewable energy and environmental sustainability*. 2022. Т. 7. С. 23. URL: <https://doi.org/10.1051/rees/2022011> (дата звернення: 05.02.2025).
17. Javanroodi, M.Nik. Impacts of microclimate conditions on the energy performance of buildings in urban areas. *Buildings*. 2019. Т. 9, № 8. С. 189. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings9080189> (дата звернення: 05.02.2025).
18. Urban microclimate and its impact on building performance: A case study of San Francisco / T. Hong та ін. *Urban climate*. 2021. Т. 38. С. 100871. URL: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100871> (дата звернення: 05.02.2025).
19. Sim D. *Soft City: Building Density for Everyday Life*. Island Press, 2019. 256 с.
20. Bass B., Liu K.K.Y., Baskaran B.A. Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. *National Research Council Canada*. 2013. NRCC-46737. URL: <https://doi.org/10.4224/20386110> (дата звернення: 05.02.2025).
21. Peck, S., Kuhn, M. *Design Guidelines for Green Roofs*. Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, and the Ontario Association of Architects, Toronto, 2003.
22. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. *Annual Vehicle Distance Traveled in Miles and Related Data-2004*. Highway Statistics 2004. October 2005 [Електронний ресурс]. URL: <http://www.fhwa.dot.gov/policy/ohim/hs04/hm/vm1.html> (дата звернення: 19.10.2007).
23. Hutchinson, D., Abrams, P., Retzlaff, R., Liptan, T., 2010. *Stormwater Monitoring Two Ecoroofs in Portland*. Proceedings of Greening Rooftops for Sustainable Communities, 2003, Chicago, IL, 2003.
24. Portland. *City of Portland EcoRoof Program Questions and Answers*. Bureau of Environmental Services, Office of Sustainable Development, City of Portland, Oregon, PL 0203, 2002.
25. Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39, вип. 11 (01.11.2007): 1167–1174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>.
26. Moran A., Hunt B., Jennings G. A north carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth. *World water and environmental resources congress 2003*, м. Philadelphia, Pennsylvania, United States. Reston, VA, 2003. URL: [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)335](https://doi.org/10.1061/40685(2003)335) (дата звернення: 05.02.2025).

27. ПВХ мембрана: продаж, ціна, монтаж у києві та дніпрі від єврокровля | euroroofing.ua. ТОВ «Компанія Єврокровля». [Електронний ресурс] URL: https://euroroofing.ua/green_roofs/ (дата звернення: 09.02.2025).
28. Technische Universität Darmstadt, Technische Universität Braunschweig. Potenziale und Wechselwirkungen. Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld. Bonn : Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), 2014. 312 с.
29. Lin B.-S., Lin Y.-J. Cooling effect of shade trees with different characteristics in a subtropical urban park. HortScience. 2010. Т. 45, № 1. С. 83–86. URL: <https://doi.org/10.21273/hortsci.45.1.83> (дата звернення: 05.02.2025).
30. Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites / S. Gillner та ін. Landscape and urban planning. 2015. Т. 143. С. 33–42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.005> (дата звернення: 05.02.2025).
31. Association between street greenery and physical activity among chinese older adults in beijing, china / Y. Song та ін. Urban forestry & urban greening. 2020. Т. 55. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5323147/v1> (дата звернення: 05.02.2025).
32. Kim U., Lee J., He S.Y. Pedestrianization impacts on air quality perceptions and environment satisfaction: the case of regenerated streets in downtown seoul. International journal of environmental research and public health. 2021. Т. 18, № 19. С. 10225. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph181910225> (дата звернення: 05.02.2025).
33. Achieving the urban tree trifecta: scenario modelling for salubrious, resilient, and diverse urban forests in densifying cities / S. Barron та ін. Arboriculture & urban forestry. 2023. С. jauf.2023.022. URL: <https://doi.org/10.48044/jauf.2023.022> (дата звернення: 05.02.2025).
34. Sarminingsih A., Nugraha W. D., Shafanisa A. A. Evaluation on implementing green stormwater infrastructure to reduce runoff and conserve water in Banyumanik, Semarang. IOP conference series: earth and environmental science. 2024. Т. 1414, № 1. С. 012057. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1414/1/012057> (дата звернення: 05.02.2025).
35. Environmental and economic assessment of a pilot stormwater infiltration system for flood prevention in Brazil / A. Petit-Boix та ін. Ecological engineering. 2015. Т. 84. С. 194–201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.010> (дата звернення: 05.02.2025).
36. Effect of a submerged zone and carbon source on nutrient and metal removal for stormwater by bioretention cells / M. Wang та ін. Water. 2018. Т. 10, № 11. С. 1629. URL: <https://doi.org/10.3390/w10111629> (дата звернення: 05.02.2025).
37. Natarajan P., Davis A. P. Performance of a ‘transitioned’ infiltration basin part 1: TSS, metals, and chloride removals. Water environment research. 2015. Т. 87, № 9. С. 823–834. URL: <https://doi.org/10.2175/106143015x14362865226112> (дата звернення: 05.02.2025).
38. Urban climate resilience - adaptation community. Adaptation Community. URL: [Електронний ресурс] <https://www.adaptationcommunity.net/urban-climate-resilience/> (дата звернення: 18.01.2025).
39. Urban resilience: a look into global climate change impacts and possible design mitigation / A. Chakraborty та ін. 2019. № 1. URL: <https://aesg.com/wp-content/uploads/2020/07/Quest-towards-Urban-Resilience-Climate-Change-Impacts-and-Design-Solutions.pdf> (дата звернення: 18.01.2025).
40. Building urban resilience / ред.: А. К. Jha, Т. W. Miner, Z. Stanton-Geddes. The World Bank, 2013. URL: <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8865-5> (дата звернення: 18.01.2025).
41. Fairholme S. Urban resilience infrastructure: an imperative in a climate uncertain world. The Rockefeller Foundation. [Електронний ресурс] URL:

<https://www.rockefellerfoundation.org/perspective/urban-resilience-infrastructure-imperative-climate-uncertain-world/> (дата звернення: 08.02.2025).

42. Abbas S.S., Ameen S.K. Urban resilience and city infrastructure urban resilience of baghdad. *Iraqi journal of architecture and planning*. 2019. Т. 18, № 2. С. 87–100. URL: <https://doi.org/10.36041/ijar.v15i2.488> (дата звернення: 08.02.2025).

43. Nik V.M., Perera A.T. D., Chen D. Towards climate resilient urban energy systems: a review. *National science review*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa134> (дата звернення: 08.02.2025).

44. Brears R.C. Urban climate resilient water management: strategies and innovations - our future water. *Our Future Water*. [Електронний ресурс] URL: <https://www.ourfuturewater.com/2023/03/23/urban-climate-resilient-water-management-strategies-and-innovations/> (дата звернення: 08.02.2025).

45. The role of green infrastructure in enhancing urban ecological resilience. *oliwia. One More Tree*. [Електронний ресурс] URL: <https://one-more-tree.org/blog/2024/01/25/the-role-of-green-infrastructure-in-enhancing-urban-ecological-resilience/> (дата звернення: 08.02.2025).

46. Lugten E., Hariharan N. Strengthening health systems for climate adaptation and health security: key considerations for policy and programming. *Health security*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1089/hs.2022.0050> (дата звернення: 08.02.2025).

47. План дій з адаптації до наслідків зміни клімату міста Запоріжжя. Запорізька міська рада. URL: https://zp.gov.ua/upload/editor/3_proekt_planu_dij.pdf (дата звернення: 08.02.2025).

48. The representative concentration pathways: an overview / D. P. van Vuuren та ін. *Climatic change*. 2011. Т. 109, № 1-2. С. 5–31. URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z> (дата звернення: 08.02.2025).

49. Щербаківа О. Методологічні засади оцінки ефективності інституційного забезпечення кліматичного фінансування. *Economic journal of lesya ukrainka volyn national university*. 2025. Т. 4, № 40. С. 111–123. URL: <https://doi.org/10.29038/2786-4618-2024-04-111-123> (дата звернення: 11.03.2025).

50. Tymashkov M. Methods and techniques of architectural environment forming under the conditions of global climate change: the problems of flooding. *Current problems of architecture and urban planning*. 2024. № 68. С. 335–348. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.335-348> (дата звернення: 11.03.2025).

51. Максимова І. Адаптація світової економіки до зміни клімату: фінансовий та цифровий аспекти. *Adaptive management theory and practice economics*. 2024. Т. 19, № 38. URL: [https://doi.org/10.33296/2707-0654-19\(38\)-23](https://doi.org/10.33296/2707-0654-19(38)-23) (дата звернення: 11.03.2025).

52. Berchtoldkrass space & options. Rahmenplan Stadtklima Bern. Konzept zur städtebaulichen Anpassung an den Klimawandel. Bern, 2024. 109 с. URL: <https://www.bern.ch/themen/umwelt-natur-und-energie/klima/klimaanpassung/planung-und-umsetzung-in-der-stadt-bern/rahmenplan-stadtklima/downloads/rahmenplan-stadtklima-bern-20240918.pdf/download> (дата звернення: 07.11.2024).

53. Berchtoldkrass space & options. Städtebaulichen Rahmenplan Klimaanpassung Stadt Karlsruhe. 2014. 92 с. URL: <https://pd.lubw.de/66635> (дата звернення: 19.01.2025).

54. Matzarakis A., Endler C. Climate change and thermal bioclimate in cities: impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. *International journal of biometeorology*. 2010. Т. 54, № 4. С. 479–483. URL: <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0296-2> (дата звернення: 11.03.2025).

55. Kronsell A. Legitimacy for climate policies: politics and participation in the Green City of Freiburg. *Local environment*. 2013. Т. 18, № 8. С. 965–982. URL: <https://doi.org/10.1080/13549839.2012.748732> (дата звернення: 11.03.2025).

Kuzyshyn Anna,
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau,
Martens Ivan,
Kyiv National University of Construction and Architecture,
Hryhorashchuk Nataliia,
Taras Shevchenko National University of Kyiv

CLIMATE RESILIENCE IN URBAN PLANNING: THE FREIBURG APPROACH TO THE CONCEPT OF CLIMATE CHANGE ADAPTATION.

In the face of climate change, cities worldwide are confronting rising temperatures, extreme weather events, and water balance disruptions. Many Ukrainian municipalities lack systematic approaches to ensuring climate resilience despite growing awareness of these challenges. This study explores climate adaptation strategies implemented in Freiburg, Germany, which has emerged as a leading example of integrating green infrastructure, energy-efficient construction, sustainable water management, and eco-friendly mobility solutions. The paper analyzes Freiburg's comprehensive climate adaptation framework, its effectiveness, and its applicability in the Ukrainian urban context. Special attention is given to evidence-based decision-making and the necessity of designing adaptation measures tailored to local socio-economic conditions. The research highlights key dimensions of urban climate resilience, including spatial planning, energy efficiency, water-sensitive urban design, and multi-sectoral policy integration. The study also assesses methodological approaches used in Freiburg, such as urban climate modeling and vulnerability mapping, to guide targeted interventions in high-risk areas. By drawing insights from Freiburg's experience, the paper formulates recommendations for Ukrainian cities, emphasizing the importance of interdisciplinary collaboration and long-term sustainability planning. The findings contribute to the discourse on urban resilience by showcasing adaptive strategies that mitigate climate risks while fostering ecological and social well-being in urban environments.

Keywords: climate resilience; urban planning; Freiburg adaptation strategy; green infrastructure; climate neutrality; sustainable urban development; climate change adaptation; Ukrainian cities; extreme weather events; nature-based solutions.

REFERENCE

1. Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F. and Dahe, Q., eds., (2009). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation* [online]. Cambridge: Cambridge University Press. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1017/cbo9781139177245. {in English}
2. UN Habitat, (no date). Resilient city. city resilience global programme [online]. *Urban Resilience Hub*. [Viewed 5 February 2025]. Available from: <https://urbanresiliencehub.org/wp-content/uploads/2022/12/Resilient-city.pdf>. {in English}

3. UN Habitat, (no date). Climate resilience. city resilience global programme [online]. *Urban Resilience Hub*. [Viewed 5 February 2025]. Available from: <https://urbanresiliencehub.org/wp-content/uploads/2022/12/4-CLIMATE-RESILIENCE.pdf>. {in English}
4. Berchtoldkrass Space&Options, (2019). *Klimaanpassungskonzept Ein Entwicklungskonzept für das Handlungsfeld „Hitze“* [online]. [Viewed 7 November 2024]. Available from: https://www.freiburg.de/pb/site/Freiburg/get/params_E-2038560454/2071141/20201013_KLAK_Bericht-digital.pdf. {in German}
5. The City of Copenhagen, (2012). *Cloudburst management plan* [online]. [Viewed 19 January 2025]. Available from: https://interlace-hub.com/sites/default/files/cph_-_cloudburst_management_plan.pdf. {in English}
6. Horn, M.W.W., (2024). Digitalisation and sustainability: The Freiburg example [online]. *Open Access Government*. [Viewed 19 January 2025]. Available from: <https://www.openaccessgovernment.org/digitalisation-and-sustainability-the-freiburg-example/181410/>. {in English}
7. Universität Freiburg, (no date). Global change — geography [online]. *Geographie - Nahtstelle zwischen Mensch und Natur — Geographie*. [Viewed 5 February 2025]. Available from: <https://www.geographie.uni-freiburg.de/en/research-interests/research-interests-glc>. {in English}
8. Balabukh, V., Lavrynenko, O., Bilaniuk, V., Mykhnovych, A. and Pylypovych, O., (2018). Extreme weather events in ukraine: occurrence and changes. In: *Extreme weather* [online]. InTech. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.5772/intechopen.77306. {in English}
9. He, B.-J., Ding, L. and Prasad, D., (2019). Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustainable cities and society* [online]. 47, 101472. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1016/j.scs.2019.101472. {in English}
10. Haas, M., (2022). 'Ventilation corridors' funnel cool mountain air into steamy stuttgart [online]. *Reasons to be Cheerful*. [Viewed 5 February 2025]. Available from: <https://reasonstobecheerful.world/stuttgart-ventilation-corridors-green-cool-air/>. {in English}
11. Guo, A., Yue, W., Yang, J., Li, M., Xie, P., He, T., Zhang, M. and Yu, H., (2023). Quantifying the impact of urban ventilation corridors on thermal environment in Chinese megacities. *Ecological indicators* [online]. 156, 111072. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111072. {in English}
12. Liu, C., Shu, Q., Huang, S. and Guo, J., (2021). Modeling the impacts of city-scale “ventilation corridor” plans on human exposure to intra-urban PM_{2.5} concentrations. *Atmosphere* [online]. 12(10), 1269. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.3390/atmos12101269. {in English}
13. Sung, U.-J., Eum, J.-H., Son, J.-M. and Oh, J.-H., (2021). Planning strategies of wind corridor forests utilizing the properties of cold air. *Land* [online]. 10(6), 607. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.3390/land10060607. {in English}
14. Toren, B.I. and Sharmin, T., (2023). Comparison of building energy performance in three urban sites using field measurements and modelling in Kayseri, Turkiye. *Journal of physics: conference series* [online]. 2600(3), 032007. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 6596/2600/3/032007. {in English}
15. Oleiwi, M.Q., Sulaiman, M.K.A.M. and Mohamed, M.F., (2023). Passive Cooling Strategies in the hot climate: a review study. *ARID international journal for science and technology* [online]. 76–106. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.36772/arid.ajst.2023.6115. {in English}
16. Al-Shamkhee, D., Al-Aasam, A. B., Al-Waeli, A.H.A., Abusaibaa, G.Y. and Moria, H., (2022). Passive cooling techniques for ventilation: an updated review. *Renewable energy and environmental sustainability* [online]. 7, 23. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1051/rees/2022011. {in English}
17. Javanroodi and M. Nik, (2019). Impacts of microclimate conditions on the energy performance of buildings in urban areas. *Buildings* [online]. 9(8), 189. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.3390/buildings9080189. {in English}

18. Hong, T., Xu, Y., Sun, K., Zhang, W., Luo, X. and Hooper, B., (2021). Urban microclimate and its impact on building performance: A case study of San Francisco. *Urban climate* [online]. 38, 100871. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1016/j.uclim.2021.100871. {in English}
19. Sim, D., (2019). *Soft City: Building Density for Everyday Life*. Island Press. {in English}
20. Bass, B., Liu, K. K. Y. and Baskaran, B. A., (2013). Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. *National Research Council Canada* [online]. article no: NRCC-46737. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.4224/20386110. {in English}
21. Peck, S., Kuhn, M. Design Guidelines for Green Roofs. Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, and the Ontario Association of Architects, Toronto, 2003. {in English}
22. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Annual Vehicle Distance Traveled in Miles and Related Data-2004. Highway Statistics 2004. October 2005. URL: <http://www.fhwa.dot.gov/policy/ohim/hs04/hm/vml.htm> (дата звернення: 19.10.2007). {in English}
23. Hutchinson, D., Abrams, P. та ін. Stormwater Monitoring Two Ecoroofs in Portland, Oregon, USA. Proceedings of Greening Rooftops for Sustainable Communities, 2003, Chicago, IL, 2003. {in English}
24. Portland. City of Portland EcoRoof Program Questions and Answers. Bureau of Environmental Services, Office of Sustainable Development, City of Portland, Oregon, PL 0203, 2002. {in English}
25. Synnefa, A., Santamouris, M. and Akbari, H., (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and buildings* [online]. 39(11), 1167–1174. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1016/j.enbuild.2007.01.004 . {in English}
26. Moran, A., Hunt, B. and Jennings, G., (2003). A north carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth. In: *World water and environmental resources congress 2003, Philadelphia, Pennsylvania, United States* [online]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1061/40685(2003)335. {in English}
27. PVKh membrana: prodazh, tsina, montazh u kyievi ta dnipri vid yevrokrovlia | euroroofing.ua [online], (no date). *TOV «Kompanyia Evrokrovlia»*. [Viewed 9 February 2025]. Available from: https://euroroofing.ua/green_roofs/. {in Ukrainian}
28. Technische Universität Darmstadt and Technische Universität Braunschweig, (2014). *Potenziale und Wechselwirkungen. Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL). {in German}
29. Lin, B.-S. and Lin, Y.-J., (2010). Cooling effect of shade trees with different characteristics in a subtropical urban park. *HortScience* [online]. 45(1), 83–86. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.21273/hortsci.45.1.83. {in English}
30. Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S. and Roloff, A., (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and urban planning* [online]. 143, 33–42. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.06.005. {in English}
31. Song, Y., Zhou, M., Tan, J., Cheng, J., Wang, Y., Feng, X. and Yu, H., (2020). Association between street greenery and physical activity among chinese older adults in beijing, china. *Urban forestry & urban greening* [online]. 55. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 5323147/v1. {in English}
32. Kim, U., Lee, J. and He, S. Y., (2021). Pedestrianization impacts on air quality perceptions and environment satisfaction: the case of regenerated streets in downtown seoul. *International journal of environmental research and public health* [online]. 18(19), 10225. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.3390/ijerph181910225. {in English}
33. Barron, S., Rugel, E., Cheng, Z., Nesbitt, L., Sheppard, S., Czekajlo, A. and Girling, C., (2023). Achieving the urban tree trifecta: scenario modelling for salubrious, resilient, and diverse urban forests in densifying cities. *Arboriculture & urban forestry* [online]. jauf.2023.022. [Viewed 11 March 2025]. Available from: doi: 10.48044/jauf.2023.022. {in English}

34. Sarminingsih, A., Nugraha, W. D. and Shafanisa, A. A., (2024). Evaluation on implementing green stormwater infrastructure to reduce runoff and conserve water in Banyumanik, Semarang. *IOP conference series: earth and environmental science* [online]. 1414(1), 012057. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 1315/1414/1/012057 {in English}
35. Petit-Boix, A., Sevigné-Itoiz, E., Rojas-Gutierrez, L. A., Barbassa, A. P., Josa, A., Rieradevall, J. and Gabarrell, X., (2015). Environmental and economic assessment of a pilot stormwater infiltration system for flood prevention in Brazil. *Ecological engineering* [online]. 84, 194–201. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.010. {in English}
36. Wang, M., Zhang, D., Li, Y., Hou, Q., Yu, Y., Qi, J., Fu, W., Dong, J. and Cheng, Y., (2018). Effect of a submerged zone and carbon source on nutrient and metal removal for stormwater by bioretention cells. *Water* [online]. 10(11), 1629. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.3390/w10111629. {in English}
37. Natarajan, P. and Davis, A. P., (2015). Performance of a ‘transitioned’ infiltration basin part 1: TSS, metals, and chloride removals. *Water environment research* [online]. 87(9), 823–834. [Viewed 5 February 2025]. Available from: doi: 10.2175/106143015x14362865226112. {in English}
38. Urban climate resilience - adaptation community [online], (no date). *Adaptation Community*. [Viewed 18 January 2025]. Available from: <https://www.adaptationcommunity.net/urban-climate-resilience/>. {in English}
39. Chakraborty, A., Chesher, B., Dibis, F. and Issa, N., (2019). Urban resilience: a look into global climate change impacts and possible design mitigation. (1). [Viewed 18 January 2025]. Available from: <https://aesg.com/wp-content/uploads/2020/07/Quest-towards-Urban-Resilience-Climate-Change-Impacts-and-Design-Solutions.pdf>. {in English}
40. Jha, A.K., Miner, T.W. and Stanton-Geddes, Z., eds., (2013). *Building urban resilience* [online]. The World Bank. [Viewed 18 January 2025]. Available from: doi: 0-8213-8865-510.1596/978. {in English}
41. Fairholme, S., (2019). Urban resilience infrastructure: an imperative in a climate uncertain world [online]. *The Rockefeller Foundation*. [Viewed 8 February 2025]. Available from: <https://www.rockefellerfoundation.org/perspective/urban-resilience-infrastructure-imperative-climate-uncertain-world/>. {in English}
42. Abbas, S.S. and Ameen, S.K., (2019). Urban resilience and city infrastructure urban resilience of baghdad. *Iraqi journal of architecture and planning* [online]. 18(2), 87–100. [Viewed 8 February 2025]. Available from: doi: 10.36041/ijap.v15i2.488. {in English}
43. Nik, V.M., Perera, A.T.D. and Chen, D., (2020). Towards climate resilient urban energy systems: a review. *National science review* [online]. [Viewed 8 February 2025]. Available from: doi: 10.1093/nsr/nwaa134. {in English}
44. Brears, R.C., (no date). Urban climate resilient water management: strategies and innovations - our future water [online]. *Our Future Water*. [Viewed 8 February 2025]. Available from: <https://www.ourfuturewater.com/2023/03/23/urban-climate-resilient-water-management-strategies-and-innovations/>. {in English}
45. The role of green infrastructure in enhancing urban ecological resilience, (2024). *oliwia* [online]. 25 January 2024. [Viewed 8 February 2025]. Available from: <https://one-more-tree.org/blog/2024/01/25/the-role-of-green-infrastructure-in-enhancing-urban-ecological-resilience/>. {in English}
46. Lugten, E. and Hariharan, N., (2022). Strengthening health systems for climate adaptation and health security: key considerations for policy and programming. *Health security* [online]. [Viewed 8 February 2025]. Available from: doi: 10.1089/hs.2022.0050. {in English}
47. Plan dii z adaptatsii do naslidkiv zminy klimatu mista Zaporizhzhia [online], (no date). *Zaporizka miska rada*. [Viewed 8 February 2025]. Available from: https://zp.gov.ua/upload/editor/3_proekt_planu_dij.pdf. {in Ukrainian}
48. van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. and Rose, S.K., (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change* [online]. 2), 109(15–31). [Viewed 8 February 2025]. Available from: doi: 011-0148-z10.1007/s10584. {in English}

49. Shcherbakova, O., (2025). Metodolohichni zasady otsinky efektyvnosti instytutitsiinoho zabezpechennia klimatychnoho finansuvannia. *Economic journal of lesya ukrainka volyn national university* [online]. 4(40), 111–123. [Viewed 11 March 2025]. Available from: doi: 4618-2024-04-111-12310.29038/2786. {in Ukrainian}
50. Tymashkov, M., (2024). Methods and techniques of architectural environment forming under the conditions of global climate change: the problems of flooding. *Current problems of architecture and urban planning* [online]. (68), 335–348. [Viewed 11 March 2025]. Available from: doi: 3455.2024.68.335-34810.32347/2077. {in English}
51. Maksymova, I., (2024). Adaptatsiia svitovoi ekonomiky do zminy klimatu: finansovyi ta tsyfrovyy aspekty. *Adaptive management theory and practice economics* [online]. 19(38). [Viewed 11 March 2025]. Available from: doi: 0654-19(38)-2310.33296/2707. {in Ukrainian}
52. Berchtoldkrass space & options, (2024). *Rahmenplan Stadtklima Bern. Konzept zur städtebaulichen Anpassung an den Klimawandel* [online]. Bern. [Viewed 7 November 2024]. Available from: <https://www.bern.ch/themen/umwelt-natur-und-energie/klima/klimaanpassung/planung-und-umsetzung-in-der-stadt-bern/rahmenplan-stadtklima/downloads/rahmenplan-stadtklima-bern-20240918.pdf/download>. {in German}
53. Berchtoldkrass space & options, (2014). *Städtebaulichen Rahmenplan Klimaanpassung Stadt Karlsruhe* [online]. [Viewed 19 January 2025]. Available from: <https://pd.lubw.de/66635>. {in German}
54. Matzarakis, A. and Endler, C., (2010). Climate change and thermal bioclimate in cities: impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. *International journal of biometeorology* [online]. 54(4), 479–483. [Viewed 11 March 2025]. Available from: doi: 009-0296-210.1007/s00484. {in English}
55. Kronsell, A., (2013). Legitimacy for climate policies: politics and participation in the Green City of Freiburg. *Local environment* [online]. 18(8), 965–982. [Viewed 11 March 2025]. Available from: doi: 10.1080/13549839.2012.748732. {in English}