

УДК 621.31: 551.58

Віра Балабух¹, канд. геогр. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0003-3223-7531>
Олександр Тесленко^{2*}, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>
Олександр Матвійчук², канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0000-9004-0222>

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, просп. Науки, 37, Київ, 03028, Україна;

²Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: teslenko1961@gmail.com

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА КЛІМАТИЧНИХ ЗАГРОЗ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИКИ: ІНТЕГРАЛЬНІ ІНДЕКСИ КЛІМАТИЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Анотація. У статті представлено методологічні засади комплексної оцінки кліматичних загроз для енергетичного сектору відповідно до стандарту ISO 14091:2021 із застосуванням інтегральних індексів кліматичної небезпеки. Запропонований підхід передбачає ідентифікацію основних кліматичних загроз, визначення системи відповідних індикаторів, їх нормалізацію, застосування вагових коефіцієнтів значущості та подальшу агрегацію результатів у єдиний інтегральний показник. На прикладі атомної енергетики, що є базовим елементом енергосистеми України та одним із найбільш перспективних секторів її розвитку у післявоєнний період, здійснено оцінку рівня кліматичної небезпеки для періодів 2021–2040 рр. та 2041–2060 рр. для сценарію RTK8.5 (RCP8.5), який передбачає найвищі темпи зростання викидів парникових газів до 2100 року та, відповідно, найбільші зміни у кліматичній системі. Результати дослідження показали, що найбільш критичними кліматичними чинниками для атомних електростанцій України є підвищення середньої максимальної за літо температури повітря, збільшення кількості градусо-днів для систем охолодження, зростання тривалості бездощових періодів, посилення посушливості та зміна середньодобового річкового стоку влітку. Розраховані авторами інтегральні індекси кліматичної небезпеки свідчать, що за сценарієм RTK8.5 у коротко- та середньостроковій перспективі зміна клімату зумовлюватиме помірний рівень кліматичної небезпеки для атомної енергетики України із тенденцією до його зростання у майбутньому. У період 2041–2060 рр. цей показник може бути майже на 30 % вищим, ніж у 2021–2040 рр. Отримані результати узгоджуються з висновками МАГАТЕ (2018), згідно з якими вплив зміни клімату на атомну енергетику проявляється переважно через незначне зниження термічної ефективності енергоблоків, а також поступове підвищення температури й висихання водойм-охолоджувачів, що може обмежувати стабільність експлуатації енергогенеруючих потужностей енергетичних систем.

Ключові слова: енергетичний сектор, зміна клімату, сценарій RTK8.5, адаптація, кліматичні ризики, інтегральний індекс кліматичної небезпеки, атомна енергетика.

1. Вступ

Підвищення температури повітря, води та ґрунту, а також збільшення частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ (зміна характеру випадіння опадів, тривалі хвилі спеки, сильний вітер, посухи, лісові пожежі) створюють безпрецедентні виклики для функціонування та сталого розвитку енергетичних систем як у всьому світі, так і в Україні зокрема [1]. Ці кліматичні зміни безпосередньо впливають на надійність, ефективність і безпеку енергетичних систем, а також на здатність ефективно генерувати електроенергію з усіх типів джерел [1–3].

© Балабух В., Тесленко О., Матвійчук О., 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC0 1.0 Universal
<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0>

Зокрема, традиційна енергетика, що базується на теплових та атомних електростанціях, стикається з суттєвими проблемами, пов'язаними з підвищенням температури та зниженням доступності водних ресурсів.

Ці об'єкти критичної інфраструктури потребують великих обсягів води для охолодження реакторів та іншого технологічного обладнання.

У періоди аномальної спеки та посухи, коли рівень води у річках та водосховищах знижується, а її температура зростає, ефективність систем охолодження зменшується. Це може призводити до необхідності зниження потужності або навіть тимчасової зупинки енергоблоків для уникнення перегріву, що ставить під загрозу стабільність енергопостачання [2].

В Україні ці кліматичні виклики створюють подвійне навантаження на стійкість енергетичної інфраструктури, яка додатково зазнає руйнувань внаслідок воєнних дій [3]. У цих умовах особливої актуальності набуває потреба у своєчасній ідентифікації кліматичних загроз і розробленні механізмів адаптації енергетичного сектору до нових кліматичних реалій.

Оскільки на ефективність функціонування енергетики впливає сукупність кліматичних чинників, важливо оцінювати не лише окремі небезпеки, а й їхній інтегрований, синергетичний ефект. Цей підхід відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 14091:2021 “Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment”, який вимагає проводити оцінювання кліматичних ризиків на основі інтегрованої оцінки множинних небезпек, що враховує їхню інтенсивність, частоту, тривалість і просторову поширеність [4]. Подібний підхід також відображено у звітах Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC AR6, 2021–2023) [5, 6] та рекомендаціях Європейського агентства з навколишнього середовища (EEA, 2023) [7].

У цьому контексті ефективним інструментом є інтегральний індекс кліматичної небезпеки (Hasard Index). Він забезпечує кількісну оцінку сукупного впливу різних типів кліматичних загроз на територію або об'єкт. Його застосування дозволяє узагальнювати результати розрахунків кліматичних показників, порівнювати рівні небезпеки між регіонами та часовими періодами, визначати просторові зони підвищеного ризику й посилювати обґрунтованість управлінських рішень щодо планування адаптаційних заходів та забезпечення кліматичної стійкості відповідно до положень Паризької угоди [8].

2. Об'єкт, предмет та мета дослідження

Об'єктом дослідження виступає атомна енергетика, яка є основною складовою об'єднаної енергетичної системи України та належить до об'єктів критичної інфраструктури.

Предмет дослідження – інтегральні індекси кліматичної небезпеки та їх застосування для визначення рівня кліматичних ризиків стосовно енергетичних систем у коротко- та середньостроковій перспективі.

Метою дослідження є розроблення та апробація методологічного підходу до кількісної оцінки впливу кліматичних чинників на енергетичні системи, зокрема на атомну енергетику, з використанням інтегральних індексів кліматичної небезпеки.

3. Вихідні положення та методологія

Загальна методологія розрахунку інтегрального індексу кліматичної небезпеки для енергетики передбачає кілька послідовних етапів [9].

Етап 1. Ідентифікація небезпек – виявлення ключових кліматичних небезпек для кожної складової енергетичного сектору та визначення індикаторів для кожної кліматичної небезпеки;

Етап 2. Визначення діапазону змін та очікуваних середніх значень кожного індикатора у коротко- (2021–2040 рр.) та середньостроковій (2041–2060 рр.) перспективі відносно сучасного кліматичного періоду (1991–2020 рр.) для сценарію РТК8.5;

Етап 3. Нормалізація середніх значень кожного індикатора.

Оскільки індикатори мають різні одиниці виміру та діапазони значень, їх необхідно привести до єдиної безрозмірної шкали (наприклад, від 0 до 1). Це дозволяє їх порівнювати та комбінувати. Для

цього доцільно застосувати метод нормалізації мінімально-максимального масштабування з використанням наступної формули (1):

$$N_i = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}), \quad (1)$$

де X_i – прогнозоване значення індикатора N_i ; X_{min} та X_{max} – мінімальне (5 перцентиль) та максимальне (95 перцентиль) значення цього індикатора за досліджуваний період відповідно.

Оскільки формулу (1) не можна застосовувати для нормалізації величин, які мають від’ємні значення, для таких величин, відповідно до рекомендацій [9], доцільно застосувати рейтингові значення за шкалою категорій від 1 до 5, де 1 відповідає оптимальному значенню, найближчому до норми, а 5 – критичному, найбільш віддаленому від норми. Рішення щодо присвоєння категорій таким індикаторам виносяться шляхом експертних обговорень і суджень, наприклад з використанням методу Делфі. Рекомендована шкала оцінювання за категоріями представлена у таблиці 1.

Таблиця 1. Категорії шкали оцінювання ризику

Значення індикатора	Рівень впливу	Бал
0,0 – 0,2	дуже низький	1
0,21 – 0,4	низький	2
0,41 – 0,6	помірний	3
0,61 – 0,8	високий	4
0,81 – 1,0	дуже високий	5

Етап 4. Визначення вагових коефіцієнтів значущості індикатора. Різні складові можуть мати різний ступінь впливу на конкретний енергетичний об’єкт або систему. Тому кожному індикатору може бути присвоєний ваговий коефіцієнт w_{hi} ($\sum_{i=1}^n w_{hi} = 1$). Він може базуватися на експертних оцінках (наприклад, за допомогою методу аналізу ієрархій – АНР), аналізі чутливості енергетичних об’єктів до даної небезпеки або припускатися рівними між собою, якщо немає достатніх підстав для диференціації.

Етап 5. Агрегація індикаторів – нормалізовані (та зважені, якщо використовувалися вагові коефіцієнти) індикатори окремої складової об’єднуються у єдиний індекс небезпеки шляхом додавання.

Оскільки на компоненти енергетичної системи діє комплекс кліматичних чинників, для оцінки ризиків доцільно визначати їхню агреговану, (інтегральну) дію, тобто оцінювати інтегральний індекс кліматичної небезпеки.

Загальний вигляд розрахункової формули інтегрального індексу кліматичної небезпеки [10, 11]:

$$HI = \sum_{i=1}^n w_{hi} \times N_i, \quad (2)$$

де: HI – інтегральний індекс кліматичної небезпеки; N_i – значення окремого i -го індикатора небезпеки (нормалізованого до масштабу 0-1); w_{hi} – ваговий коефіцієнт значущості i -го індикатора небезпеки: ($\sum_{i=1}^n w_{hi} = 1$); n – кількість індикаторів небезпеки.

Оцінка інтегрального індексу кліматичної небезпеки для сучасного кліматичного періоду (1991–2020 рр.) чи інших періодів за фактичними даними метеорологічних спостережень дозволяє проводити моніторинг кліматичних небезпек, визначати найбільш вразливі регіони та кліматичні індикатори, які становлять найбільшу загрозу. Використання для розрахунків прогностичних значень кліматичних індикаторів у коротко-, середньо- або довгостроковій перспективі дає можливість визначити, яким чином можуть змінитись кліматичні загрози для даного сектору в досліджуваному регіоні за різних кліматичних сценаріїв, та ранжирувати кліматичні індикатори за інтенсивністю впливу. Отримана інформація може слугувати обґрунтуванням визначення першочерговості адаптаційних заходів до зміни клімату енергетичного сектору [12].

Оцінку інтегрального індексу кліматичної небезпеки для атомної енергетики України проводили стосовно сценарію РТК8.5, який передбачає найбільшу кількість викидів парникових газів до 2100 р. і, відповідно, найбільші зміни у кліматичній системі. Сценарії РТК (репрезентативні траєкторії концентрацій, англ. The Representative Concentration Pathways – RCPs), представлені Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату у П'ятій оціночній доповіді (AR5) [13], моделюють різні шляхи ймовірного розвитку викидів парникових газів, їхніх концентрацій в атмосфері та змін у землекористуванні протягом поточного XXI століття. Кожен сценарій РТК визначає очікуваний обсяг додаткового радіаційного випромінювання до 2100 р. порівняно з доіндустріальною епохою (1750 р.), спричинений людською діяльністю: РТК2.6 – 2,6 Вт/м²; РТК4.5 – 4,5 Вт/м²; РТК6.0 – 6,0 Вт/м²; РТК8.5 – 8,5 Вт/м². Усі сценарії РТК передбачають, що концентрація вуглекислого газу (CO₂) в атмосфері до 2100 року буде вищою, ніж зараз, через тривале зростання викидів парникових газів протягом XXI століття. Ці моделі є результатом поєднання прогнозів з кліматичних моделей, атмосферної хімії та глобального вуглецевого циклу. Розрахунки РТК прогнозують такі сумарні еквівалентні концентрації CO_{2екв} до 2100 року (з урахуванням метану (CH₄) та закису азоту (N₂O)) [9]: РТК2.6 – 475 ppm; РТК4.5 – 630 ppm; РТК6.0 – 800 ppm; РТК8.5 – 1313 ppm.

За усіх сценаріїв РТК очікується підвищення глобальної середньої за рік температури повітря, інтенсивність якого зростатиме по мірі збільшення концентрації парникових газів. Так, за даними AR5 МГЕЗК[13], середні багаторічні значення глобальної приземної температури повітря у 2081–2100 рр. відносно 1986–2005 рр. можуть зрости від 0,3–1,7°C (РТК2.6), 1,1–2,6°C (РТК4.5) до 1,4–3,1°C (РТК6.0) та 2,6–4,8°C (РТК8.5). Ці сценарії є ключовим інструментом для розуміння потенційних кліматичних змін та розробки стратегій зі скорочення викидів парникових газів та адаптації до зміни клімату суспільства та енергетичного сектору зокрема.

Відповідно до представленої методики для атомної енергетики України були визначені кліматичні небезпеки та кліматичні індикатори за даними щоденних метеорологічних спостережень з 1991 по 2020 рр. Проекції зміни кліматичних індикаторів оцінювали за ансамблевими кліматичними даними проекту CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) для європейського домену «Europe/EUR» (EURO-CORDEX-11) [14, 15]. Використовували дані, представлені в інтерактивному кліматичному атласі Copernicus [16], який є веб-додатком, створеним Службою зміни клімату Copernicus (C3S) [17] у співпраці з Європейським центром середньотермінових прогнозів (ECMWF). Висока просторова роздільна здатність (~12.5 км) регіональних кліматичних моделей дає змогу краще враховувати регіональні кліматичні особливості території України. Водночас використання ансамблю регіональних кліматичних моделей CMIP5 [18] допомагає зменшити невизначеність отриманих результатів.

За даними інтерактивного кліматичного атласу Copernicus обчислено ймовірні зміни характеристик кліматичних індикаторів (медіани, 95 % та 5 % процентилів) в Україні у короткостроковій (2021–2040 рр.) та середньостроковій (2041–2060 рр.) перспективі відносно 1991–2020 рр. для сценарію РТК8.5. Обчислений за цими даними середній для України інтегральний індекс кліматичної небезпеки у 2021–2040 рр. та 2041–2060 рр. дозволив визначити ймовірну зміну кліматичної загрози та ранжирувати кліматичні індикатори за інтенсивністю впливу на атомну енергетику.

4. Результати дослідження

Паливно-енергетичний комплекс (ПЕК) як основне джерело парникових газів традиційно вважається галуззю з найбільш суттєвим впливом на зміну клімату. Але енергетика є й найбільш вразливою до зміни клімату внаслідок особливостей технологічного функціонування, що пов'язані з природно-кліматичними умовами та необхідністю суттєвої трансформації для забезпечення адаптації ПЕК [19].

Атомна електрична станція (АЕС) є найбільш надійним і захищеним об'єктом критичної інфраструктури. Але важливою є проблема безпечної експлуатації ядерних установок, на яку можуть впливати кліматичні чинники. Зокрема, в більшості глобальних та регіональних кліматичних

моделей, включаючи Україну, прогнозується зміна температури, кількості опадів, підвищення рівня моря і зростання повторюваності та інтенсивності екстремальних явищ погоди [20, 21]. Ці зміни вже вплинули на інфраструктуру атомної енергетики і на енергетичний сектор в цілому, і цей ефект тільки зростатиме – паралельно зі збільшенням викидів парникових газів [22].

Основними кліматичними загрозами, що можуть впливати на безпеку та ефективність роботи атомної енергетики, слід вважати екстремальну температуру повітря та екстремальні опади (рис. 1). Для оцінки цих кліматичних загроз використовували такі кліматичні індикатори: середню максимальну за літо температуру повітря, кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, кількість градусо-днів для системи охолодження, кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу, максимальну тривалість бездошового періоду за рік, обсяг середнього за літо середньодобового річкового стоку.

Під впливом зміни цих індикаторів безпосередньо перебувають такі об'єкти (технологічні системи) атомної електростанції, як система охолодження турбіни / генератора, система зберігання відпрацьованого ядерного палива, система контролю викидів. Основними факторами чутливості є ефективність роботи системи охолодження активної зони реактора та герметичної оболонки, радіаційна безпека, цілісність системи зберігання радіоактивних відходів (рис. 1).

Факторами перебування під дією (експозицією) є екологічна безпека функціонування виробництва та виробництво електроенергії (рис. 1): радіаційна безпека, цілісність системи зберігання радіоактивних відходів, ефективність системи охолодження активної зони реактора та герметичної оболонки, виробничі потужності АЕС.

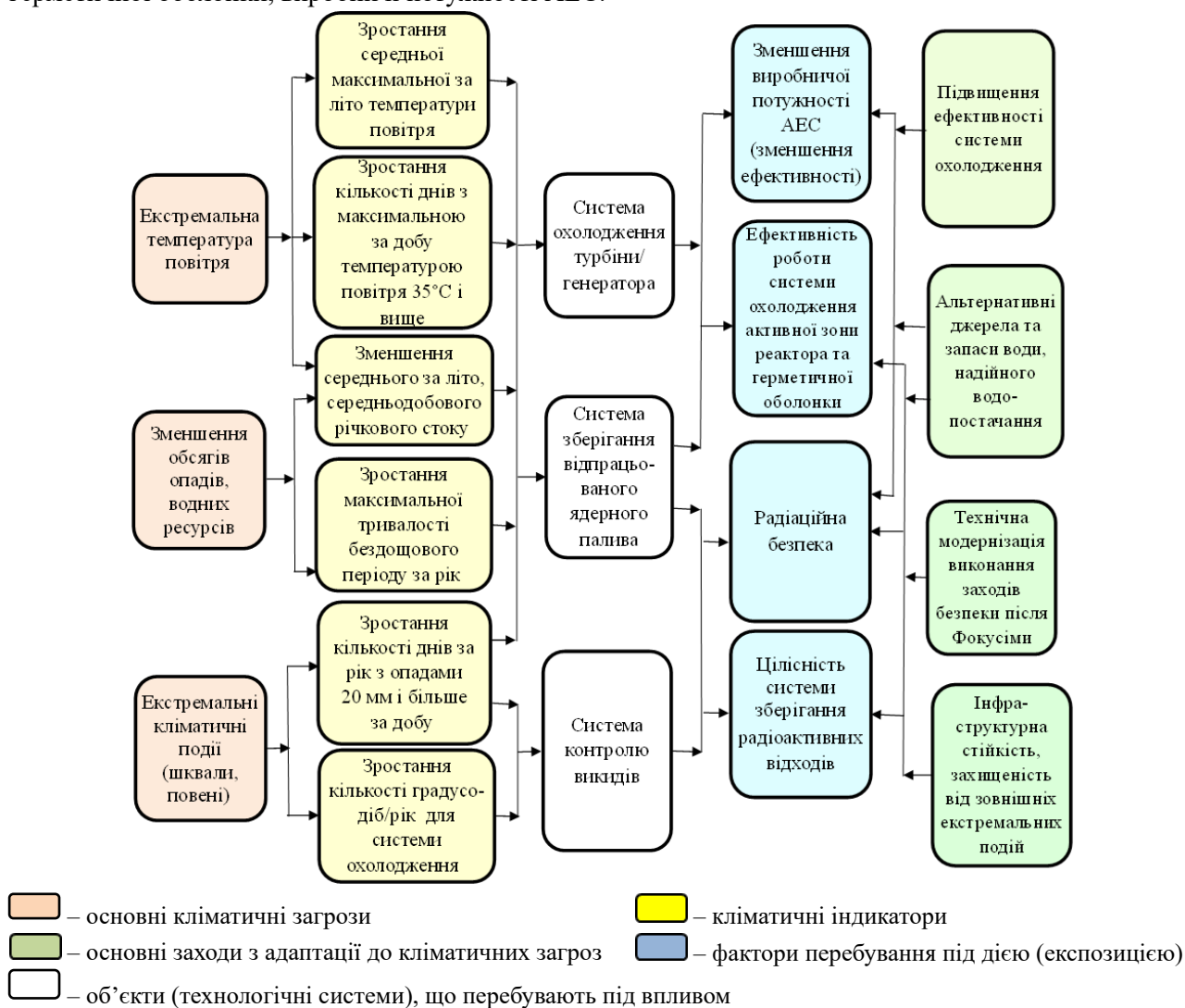


Рис. 1. Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу в атомній енергетиці

Аналіз кліматичних індикаторів, що впливають на АЕС, показав, що за сценарієм РТК8.5 в Україні ймовірно подальше підвищення середньої за літо максимальної температури повітря, яке до середини століття посилиться. Збільшиться і розмах між максимальними і мінімальними значеннями індикатора, про що свідчить зміна значення його 5 % і 95 % процентилів (табл. 2). Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище також зростатиме. Підвищення температури повітря зумовить зростання кількості градусо-днів для системи охолодження, що суттєво впливатиме на ефективність роботи АЕС.

Від’ємні значення індексу опадів – евапотранспірації (SPEI-6) у сучасний період вказують на дефіцит вологи в Україні, на те, що випаровування та транспірація води з екосистем відбуваються інтенсивніше, ніж надходження опадів. До середини століття зростання температури повітря супроводжуватиметься значними коливаннями зволоженості території України: від посушливості до надмірної зволоженості. Про це свідчить зниження значень 5 % процентилу SPEI-6 та зростання значень 95 % процентилу (табл. 2). Такі ж тенденції будуть характерні для максимальної тривалості бездошового періоду за рік та середньодобового річкового стоку за літо (табл. 2).

Таблиця 2. Середні багаторічні фактичні та прогнозовані значення кліматичних індикаторів, які впливають на інфраструктуру атомної енергетики України, та їхні ймовірні зміни у коротко- та середньостроковій перспективі (сценарій РТК8.5)

Показник	Значення у 1991-2020 рр.	Ймовірна зміна середніх багаторічних значень					
		2021–2040 рр.			2041–2060 рр.		
		Медіана	5 %*	95 %*	Медіана	5 %*	95 %*
Середня максимальна за літо температура повітря, °C	25,1	0,8	0,1	1,8	1,7	0,7	2,8
Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, доба	1,0	1,9	0,8	5,0	4,0	1,1	10,0
Кількість градусо-днів для системи охолодження, градусо-днів/рік	147,0	39,3	11,11	82,0	82,3	28,8	49,6
Максимальна тривалість бездошового періоду за рік, дні	28,9	0,5	-2,0	3,5	1,	-2,7	5,1
Стандартизований індекс опадів – евапотранспірації (SPEI-6) за 6 місяців, бал	-0,3	-0,0	-0,4	0,2	-0,1	-0,5	0,3
Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	0,3	11,6 %	-19,0	44,8	16,1 %	-26,2	45,3

*5 % – 5 процентиль, 95 % – 95 процентиль

Результати оцінки внеску індикаторів кліматичної небезпеки в інтегральний індекс кліматичної небезпеки для атомної енергетики у короткостроковій (2021–2040 рр.) та середньостроковій (2041–2060 рр.) перспективі за реалізації сценарію РТК8.5 представлено у табл. 3.

Аналіз внеску індикаторів кліматичної небезпеки в інтегральний індекс кліматичної небезпеки *НІК* у 2021–2040 рр. показав, що найбільш небезпечними для атомної енергетики в короткостроковій перспективі є підвищення середньої максимальної за літо температури повітря та збільшення максимальної тривалості бездошового періоду. Ці явища кліматичної небезпеки сприяють зростанню посушливості, зменшенню доступності води на охолодження та підвищенню її температури, зростанню пожежної небезпеки і можуть не лише зменшити виробництво електроенергії через зниження ефективності охолодження реакторів, а й спричинити їхню зупинку.

Таблиця 3. Оцінка внеску індикаторів кліматичної небезпеки в інтегральний індекс кліматичної небезпеки для атомної енергетики у короткостроковій (2021–2040 рр.) та середньостроковій (2041–2060 рр.) перспективі. Сценарій РТК8.5

№ п/ п	Індикатор небезпеки $H^a i$	Вплив	2021–2040 рр.			2041–2060 рр.		
			$H^k i *$	$w^{k_{hi}} *$	$H^k i \times w^{k_{hi}}$	$H^c i *$	$w^{c_{hi}} *$	$H^c i \times w^{c_{hi}}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °С	Підвищення температури води зменшення ефективності охолодження турбіни / генератора	0,50	0,2	0,1	0,69	0,2	0,094
2	Кількість градусо-днів для системи охолодження, градусо-днів/рік	Збільшення навантаження у період максимального підвищення температури повітря, перегрів обладнання, скорочення ремонтного періоду	0,12	0,1	0,012	0,37	0,1	0,057
3	Максимальна тривалість бездошового періоду за рік, дні	Зростання посушливості, зменшення води на охолодження та підвищення її температури, зменшення ефективності охолодження	0,36	0,25	0,09	0,35	0,25	0,12
4	Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, дні	Можливе зростання температур води понад допустимі межі, зниження ефективності роботи системи охолодження активної зони реактора та герметичної оболонки	0,14	0,1	0,014	0,46	0,2	0,064
5	Стандартизований індекс опадів (SPI-6) за 6 місяців	Дефіцит води на охолодження	0,43	0,2	0,086	0,67	0,25	0,17
6	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	Зменшення рівня води в річках, перегрів охолоджуючої води	0,3	0,1	0,03	0,37	0,15	0,05
Інтегральні індекси кліматичної небезпеки (H^k (короткостроковий), H^c (середньостроковий))					0,41			0,54

$H^a i$ – індикатор кліматичної небезпеки для атомної енергетики; $H^k i$ нормалізоване значення індикатора небезпеки у короткостроковій перспективі, $H^c i$ – у середньостроковій перспективі; $w^{k_{hi}} *$ – ваговий коефіцієнт індикатора небезпеки у 2021–2040 рр., $w^{c_{hi}} *$ – у 2041–2060 рр.; $H^k i \times w^{k_{hi}}$ – внесок індикатора в інтегральний індекс кліматичної небезпеки у 2021–2040 рр., $H^c i \times w^{c_{hi}}$ – у 2041–2060 рр.

–*за експертною оцінкою авторів.

Отримане значення інтегрального індексу кліматичної небезпеки ($H^k = 0,41$) свідчить, що у короткостроковій перспективі за реалізації сценарію РТК8.5 атомна енергетика України *матиме помірний рівень кліматичної небезпеки* до зміни клімату і визначатиметься:

- зростанням середньої максимальної температури повітря за літо на 0,8°C, збільшенням її 95 % процентилю на 1,8°C;
- збільшенням кількості спекотних днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище у середньому на 2 дні, а її 95 % процентилю на 5 днів;
- зростанням інтенсивності опадів, зокрема збільшенням кількості опадів до 20 мм за добу і більше на 22,5 %, збільшенням їхнього 95 % процентилю на 42 %;

- збільшенням тривалості бездощового періоду на 0,5–3,5 днів; як наслідок, він може у середньому тривати більше місяця;
- збільшення середньої за добу величини річкового стоку влітку на 11,6 %. При цьому величина 95 % процентилю може зрости майже на 45 %, що свідчить про зростання загрози паводків, а зменшення 5 % процентилю на 19 % – про посилення гідрологічної посухи відповідно.

Аналіз оцінки внеску інтегрованого індексу кліматичної небезпеки для атомної енергетики, зумовленої зміною клімату, у середньостроковій перспективі (табл. 3) показав, що в середині століття (2041–2060 рр.) за реалізації сценарію РТК8.5 інтегральний індекс кліматичної небезпеки для атомної енергетики України зросте майже на 30 % порівняно з 2021–2040 рр., з 0,41 до 0,54, проте все ще матиме помірний рівень кліматичної небезпеки (табл. 1).

Зазначений висновок корелюється з висновком МАГАТЕ (2018)[23], згідно з якими вплив зміни клімату на атомну енергетику зводиться до невеликої втрати термічної ефективності, а також до нагрівання і висихання водойм-охолоджувачів. Втім, у галузі дедалі більшої популярності набирають альтернативні варіанти охолодження. На АЕС Пало-Верде в Аризоні, найбільшій електрогенеруючій станції у США, для охолодження використовуються перероблені стічні муніципальні води [23].

Підвищення рівня кліматичної небезпеки до середини століття буде зумовлено насамперед збільшенням внеску в інтегральний індекс кліматичної небезпеки кліматичних індикаторів, пов'язаних із підвищенням температури повітря, насамперед кількості градусо-днів для системи охолодження та кількості днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище. Їхній внесок зросте, відповідно, на 375 % і 357 %. (табл. 4).

Підвищення температури повітря та збільшення кількості спекотних днів сприятимуть зростанню випаровуваності, внесок якої в індекс небезпеки може зрости на 98 %. Посилять кліматичну небезпеку і зменшення річкового стоку влітку та збільшення максимальної тривалості бездощового періоду. При значному зростанні внеску повторюваності кількості днів з екстремальною температурою повітря, внесок середньої максимальної за літо температури повітря ймовірно зменшиться (табл. 4).

Таблиця 4. Зміна внеску індикаторів небезпеки в інтегральний індекс кліматичної небезпеки для атомної енергетики у 2041–2060 рр. відносно 2021–2040 рр. (сценарій РТК8.5)

№ п/п	Індикатор небезпеки H^a_i	Зміна внеску індикатора небезпеки в інтегральний індекс кліматичної небезпеки у 2041–2060 рр. відносно 2021–2040 рр.
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	-6,0
2	Кількість градусо-днів для системи охолодження, градусо-днів/рік	375,0
3	Максимальна тривалість бездощового періоду за рік, дні	33,3
4	Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, дні	357,1
5	Стандартизований індекс опадів – евапотранспірації (SPEI-6) за 6 місяців	97,7
6	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	66,7

До середини століття в Україні за реалізації сценарію РТК8.5 спостерігатиметься підвищення середньої максимальної температури повітря за літо на 1,2°C, її медіани на 1,7°C, а її значення 95 процентилю на 2,8°C; збільшення кількості спекотних днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище у середньому на 4 дні, значення 95 % процентилю на 10 днів. Такі зміни зумовлять збільшення середньої за сезон кількості градусо-днів для системи охолодження на 82,3°C, а її значення 95 % процентилю на 49,6°C. Тобто в окремі роки протягом 2041–2060 рр. кількість градусо-днів для системи охолодження може бути на понад 50 % вищою за сучасну кліматичну норму.

Тривалість бездощового періоду ймовірно збільшиться на 1,0-5,0 днів і триватиме в середньому більше місяця. Очікується збільшення середньої за добу величини річкового стоку влітку на 16,1 %.

При цьому величина 95 % процентилу може зрости майже на 45,3 %, що свідчить про зростання загрози паводків, а зменшення 5 % процентилу на 26,2 % – про посилення гідрологічної посухи, тобто в середньостроковій перспективі в Україні збільшиться як ймовірність паводків, так і посух, що може становити загрозу для атомної енергетики [24].

Щоб запобігти подальшим ризикам, основними факторами здатності до адаптації атомної енергетики слід вважати: підвищення температурної стійкості, зокрема ефективності систем охолодження; збільшення гідрологічної і радіаційної безпеки, чому сприяють зменшення виробничої потужності, своєчасне застосування плану подолання надзвичайних ситуацій [25], впровадження дублюючих каналів передачі даних, застосування віддаленого моніторингу в разі надзвичайної ситуації; інфраструктурна стійкість та технічна модернізація, гнучкість енергосистеми [26], зокрема її здатність до інтеграції з іншими джерелами енергії [27].

В сценаріях, розроблених Інститутом загальної енергетики НАН України щодо прогнозування споживання електроенергії в Україні у воєнний та післявоєнний період [28], передбачено впровадження високоманеврових потужностей газотурбінних і газопоршневих установок для часткової заміни пошкоджених вугільних ТЕС з метою підвищення гнучкості енергосистеми. Аналіз результатів розрахунків показав необхідність побудови нових потужностей АЕС [29] і високоманеврових газових ТЕС та ТЕЦ разом з одночасним відновленням пошкоджених гідроелектростанцій та окремих блоків вугільних ТЕС [30].

5. Висновки

Отримані результати досліджень підтверджують необхідність інтеграції кліматичних ризиків у стратегії розвитку енергетичного сектору України. Для підвищення стійкості атомної енергетики до кліматичних змін пріоритетними напрямками є адаптаційне вдосконалення систем охолодження, підвищення гідрологічної та радіаційної безпеки, модернізація інфраструктури, гнучкість та стійкість енергосистеми.

Внесок авторів. Концептуалізація, обговорення результатів та висновки – В. Балабух, О. Тесленко, О. Матвійчук; вихідні положення та методологія – В. Балабух; обчислення ймовірних змін кліматичних індексів – В. Балабух; обґрунтування засад комплексної оцінки кліматичних загроз для енергетичного сектору – В. Балабух, О. Тесленко; визначення вагових коефіцієнтів кліматичних індикаторів та їхня агрегація в єдиний інтегральний індекс кліматичної небезпеки – О. Тесленко, О. Матвійчук; оцінка рівня кліматичної небезпеки атомної енергетики – О. Матвійчук.

The study has been supported within the OSCE SPU project “Environmental Monitoring of the War Against Ukraine and Recovery Strategy” (ППУ ОБСЄ “Екологічний моніторинг наслідків війни проти України та стратегія відновлення”). The views, opinions, conclusions and other information expressed in this document are not given nor necessarily endorsed by the Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE).

Посилання

1. Вплив зміни клімату в Україні. Source: Met Office © Crown Copyright, 2021. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/2_Vplyv-zminy-klimatu-v-Ukrayini.pdf (дата звернення: 01.09.2025).
2. Борисяк О. Розбудова кліматичної політики на енергетичному ринку: передумови, виклики і переваги. *Економічний аналіз*. 2022. Том 32. № 2. С. 22–32. <https://doi.org/10.35774/econa2022.02.022>
3. Іванюта С. Вплив російської збройної агресії на зміну клімату. Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2023-01/climate-change-01022023.pdf> (дата звернення: 10.09.2025).
4. ISO 14091:2021. Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. International Organization for Standardization, Geneva, 2021.
5. IPCC. Summary for Policymakers. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 3–33).

- Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
6. IPCC. Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1–34). IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
 7. European Environment Agency (EEA). European Climate Risk Assessment, 2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. 486 p. <https://doi.org/10.2800/8671471>
 8. Паризька угода. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text (дата звернення: 09.10.2025).
 9. Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату: наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 03.06.2023 р. № 386. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text> (дата звернення: 05.09.2025).
 10. IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf (Last accessed: 05.09.2025).
 11. NEC/UNDP. Climate Change Vulnerability Analyses and Mapping for NAP Formulation Process in Bhutan. NAP Readiness Project, Thimphu 2022. URL: <https://www.undp.org/bhutan/publications/climate-change-vulnerability-analyses-and-mapping-national-adaptation-plan-nap-formulation-process-bhutan> (Last accessed: 05.09.2025).
 12. Балабух В., Тесленко О., Матвійчук О. Огляд політики та поточних ініціатив Європейського Союзу щодо адаптації енергетичного сектору до зміни клімату. *Системні дослідження в енергетиці*. 2025. № 3(83). С. 92–108. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.092>
 13. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (Last accessed 10.09.2025).
 14. Guttler I. CORDEX simulation (evaluation) on 12.5 km grid over Europe based on RegCM4-2 (v1: MIT convection scheme) forced by ERA-Interim (EUR-11i). World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. 2021. <https://doi.org/10.26050/WDCC/CXEU1iDHR4>
 15. Diez-Sierra J., Iturbide M. et al. The Worldwide C3S CORDEX Grand Ensemble: A Major Contribution to Assess Regional Climate Change in the IPCC AR6 Atlas. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2022. Vol. 103. Iss. 12. P. E2804–E2826. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0111.1>
 16. Copernicus Interactive Climate Atlas. URL: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-interactive-climate-atlas-guide-powerful-new-c3s-tool> (Last accessed: 10.09.2025).
 17. European State of the Climate 2023. Copernicus Climate Change Service (C3S). URL: <https://climate.copernicus.eu> (Last accessed: 10.09.2025).
 18. CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/cmip5-coupled-model-intercomparison-project-1> (Last accessed: 10.09.2025).
 19. Іванюта С.П., Коломієць О.О., Малиновська О.А., Якушенко Л.М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь. За ред. С.П. Іванюти. Київ: НІСД, 2020. 110 с. ISBN 966-554-344-2
 20. Балабух В.О., Малицька Л.В. Оцінювання сучасних змін термічного режиму України. *Геоінформатика*. 2017. № 4(64). С. 34–49. URL: <https://www.geology.com.ua/UK/7176-2/> (дата звернення: 05.09.2025).
 21. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Шедеменко І.П. Зміни поля опадів в Україні у XXI ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*. 2017. № 4(64). С. 62–74. URL: <https://www.geology.com.ua/UK/7195-2/> (дата звернення: 05.09.2025).
 22. Adaptation the Energy Sector to Climate Change. URL: https://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1847_web.pdf (Last accessed: 15.09.2025).
 23. International Atomic Energy Agency. Climate change and nuclear power 2018. Vienna, 2018. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CCNAP-2018_web.pdf (Last accessed: 15.09.2025).
 24. Осипов В.В., Осадча Н.М., Осадчий В.І. Кліматичні зміни та водні ресурси басейну Десни до середини XXI століття». *Доповіді Національної академії наук України*. 2021. № 2. С. 71–82. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/180407> (дата звернення: 15.09.2025).
 25. Балабух В., Тесленко О., Матвійчук О. Щодо методичних положень з оптимізації заходів з адаптації енергетики до зміни клімату. *Системні дослідження в енергетиці*. 2025. № 4(84). С. 108–122. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.04.108>
 26. Нечаєва Т., Бабак В. Оцінка структурних змін енергосистеми України в умовах декарбонізації. *Системні дослідження в енергетиці*. 2025. № 3(83). С. 4–16. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.004>
 27. Ленчевський Є., Годун О. Розроблення методики управління режимом навантаження об'єднаної енергосистеми України за умови використання нових принципів регулювання генеруючими потужностями атомних, сонячних і вітрових електростанцій. *Системні дослідження в енергетиці*. 2022. № 2(71). С. 22–30. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.022>
 28. Майстренко Н. Прогнозування споживання електроенергії в Україні у воєнний та післявоєнний період. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. № 2а(78). С. 21–22. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02a>

29. Нечаєва Т., Лещенко І. Перспективи впровадження малих модульних реакторів в енергосистемі України. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 3(74). С. 39–49. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.039>
30. Щербина Є. Моделювання сценаріїв розвитку структури генеруючих потужностей об'єднаної енергосистеми України у період повоєнного відновлення. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. № 2а(78). С. 13–15. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02a>

References

1. *The Impact of Climate Change in Ukraine*. (2021). Source: Met Office © Crown Copyright. Retrieved September 1, 2025, from https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/2_Vplyv-zminy-klimatu-v-Ukrayini.pdf [in Ukrainian].
2. Borysiak, O. (2022). Climate policy development in the energy market: prerequisites, challenges and advantages. *Economic Analysis*, 32(2), 22–32 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35774/econa2022.02.022>
3. Ivaniuta, S. The Impact of Russian Armed Aggression on Climate Change. National Institute for Strategic Studies. Retrieved September 10, 2025, from <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2023-01/climate-change-01022023.pdf> [in Ukrainian].
4. ISO 14091:2021. (2021). Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. International Organization for Standardization, Geneva.
5. IPCC. (2022). *Summary for Policymakers. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3–33). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
6. IPCC. (2023). *Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–34). IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
7. European Environment Agency (EEA). (2024). *European Climate Risk Assessment*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/8671471>
8. *The Paris Agreement*. Official web portal of the Parliament of Ukraine. Retrieved September 9, 2025, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text [in Ukrainian].
9. Methodological recommendations for assessing risks and vulnerability of socio-economic sectors and natural components to climate change. Approved the order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated 03.06.2023 No. 386. Retrieved September 5, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text> [in Ukrainian].
10. IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved September 5, 2025, from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf
11. NEC/UNDP. (2022). *Climate Change Vulnerability Analyses and Mapping for NAP Formulation Process in Bhutan*. NAP Readiness Project, Thimphu. Retrieved September 5, 2025, from <https://www.undp.org/bhutan/publications/climate-change-vulnerability-analyses-and-mapping-national-adaptation-plan-nap-formulation-process-bhutan>
12. Balabukh, V., Teslenko, O., & Matviychuk, O. (2025). Overview of European union policies and current initiatives on energy sector adaptation to climate change. *System Research in Energy*, 3(83), 92–108 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.092>
13. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Retrieved September 10, 2025, from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
14. Gütler, I. (2021). CORDEX simulation (evaluation) on 12.5 km grid over Europe based on RegCM4-2 (v1: MIT convection scheme) forced by ERA-Interim (EUR-11i). World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. <https://doi.org/10.26050/WDCC/CXEU1iDHR4>
15. Diez-Sierra, J., Iturbide, M., Gutiérrez, J. M., Fernández, J., Milovac, J., Cofiño, A. S., Cimadevilla, E., Nikulin, G., Levavasseur, G., Kjellström, E., Bülow, K., Horányi, A., Brookshaw, A., García-Díez, M., Pérez, A., Baño-Medina, J., Ahrens, B., Alias, A., Ashfaq, M., ... Zittis, G. (2022). The worldwide C3S CORDEX grand ensemble: A major contribution to assess regional climate change in the IPCC AR6 Atlas. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(12), E2804–E2826. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0111.1>
16. Copernicus Interactive Climate Atlas. Retrieved September 10, 2025, from <https://climate.copernicus.eu/copernicus-interactive-climate-atlas-guide-powerful-new-c3s-tool>
17. *European State of the Climate 2023*. Copernicus Climate Change Service (C3S). Retrieved September 10, 2025, from <https://climate.copernicus.eu>
18. CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. Retrieved September 10, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/cmip5-coupled-model-intercomparison-project-1>

19. Ivaniuta, S.P., Kolomiets, O.O., Malinovska, O.A., & Yakushenko, L.M. (2020). *Climate change: consequences and adaptation measures* [analytical report]. In S.P. Ivaniuta (Ed.). Kyiv: NISD. ISBN 966-554-344-2
20. Balabukh, V.O., & Malytska, L.V. (2017). Assessment of modern changes in the thermal regime of Ukraine. *Geoinformatics*, 4(64), 34–49. Retrieved September 10, 2025, from <https://www.geology.com.ua/UK/7176-2/> [in Ukrainian].
21. Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Hnatiuk, N.V., Shpytal, T.M., & Shedemenko, I.P. (2017). Changes in the precipitation field in Ukraine in the 21st century according to the data of the ensemble of regional climate models. *Geoinformatics*, 4(64), 62–74. Retrieved September 5, 2025, from <https://www.geology.com.ua/UK/7195-2/> [in Ukrainian].
22. Adaptation the Energy Sector to Climate Change. Retrieved September 15, 2025, from https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1847_web.pdf
23. International Atomic Energy Agency. (2018). *Climate change and nuclear power 2018*. Austria, Vienna. Retrieved September 15, 2025, from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CCNAP-2018_web.pdf
24. Osypov, V.V., Osadcha, N.M., & Osadchy, V.I. (2021). Climate change and water resources of the Desna river basin till the middle of the XXI century. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 71–82. Retrieved September 15, 2025, from <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/180407> [in Ukrainian].
25. Balabukh, V., Teslenko, O., & Matviychuk, O. (2025). On methodological provisions on optimization of measures on adaptation of Ukraine's energy sector to climate change. *System Research in Energy*, 4(84), 108–122 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.04.108>
26. Nechaieva, T., & Babak, V. 2025. Assessment of structural changes in the energy system of Ukraine under decarbonization conditions. *System Research in Energy*, 3(83), 4–16 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.004>
27. Lenchevskiy, Ye., & Godun, O. (2022). Development of a methodology for controlling the load regime of the unified energy system of Ukraine using new principles for regulating the generating capacities of nuclear, solar and wind power plants. *System Research in Energy*, 2(71), 22–30 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.022>
28. Maistrenko, N. (2024). Forecasting electricity consumption in Ukraine in the war and post-war period. *System Research in Energy*, 2a(78), 21–22 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02a>
29. Nechaieva, T., & Leshchenko, I. (2023). Prospects of implementation of small modular reactors in the power system of Ukraine. *System Research in Energy*, 3(74), 39–49 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.039>
30. Shcherbyna, Ye. (2024). Modeling scenarios for the development of the structure of generating capacities of the unified power system of Ukraine in the period post-war recovery. *System Research in Energy*, 2a(78), 13–15. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02a>

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF CLIMATE THREATS TO ENERGY: INTEGRATED CLIMATE HAZARD INDICES

Vira Balabukh¹, PhD (Geogr.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3223-7531>

Oleksandr Teslenko^{2*}, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

Oleksandr Matviychuk², PhD (Engin.), <https://orcid.org/0009-0000-9004-0222>

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, 37, Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine;

²General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: teslenko1961@gmail.com

Abstract. *The article presents the methodological principles for a comprehensive assessment of climate threats to the energy sector in accordance with the ISO 14091:2021 standard using integrated climate hazard indices. The proposed approach involves identifying the main climate threats, defining a system of relevant indicators, normalizing them, applying significance weights, and further aggregating the results into a single integrated indicator. Using the example of nuclear power, which is a basic element of Ukraine's energy system and one of the most promising sectors of its development in the post-war period, an assessment of the level of climate hazard for the periods 2021–2040 and 2041–2060 was carried out for the RCP 8.5 scenario, which assumes the highest growth rates of greenhouse gas emissions by 2100 and, accordingly, the greatest changes in the climate system. The results of the study showed that the most critical climatic factors for Ukrainian nuclear power plants are an increase in the average maximum air temperature in summer, an increase in the number of degree days for cooling systems, an increase in the*

duration of rainless periods, increased aridity, and a change in the average daily river flow in summer. The integral climate hazard indices calculated by the authors indicate that according to the RCP 8.5 scenario, climate change will cause a moderate level of climate hazard for the nuclear power industry of Ukraine in the short and medium term, with a tendency for it to increase in the future. In the period 2041–2060, this indicator may be almost 30 % higher than in 2021–2040. The results obtained are consistent with the conclusions of the IAEA (2018), according to which the impact of climate change on nuclear power is manifested mainly through a slight decrease in the thermal efficiency of power units, as well as a gradual increase in temperature and drying of cooling water reservoirs, which may limit the stability of the operation of energy generating capacities of energy systems.

Keywords: energy sector, climate change, RCP 8.5 scenario, adaptation, climate risks, integrated climate hazard index, nuclear power.

Дата першого надходження статті до журналу: 17.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.01.2026

Дата публікації (оприлюднення): 09.03.2026