

УДК 556:581, 582.2

## МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ РИЗИКІВ ВИСНАЖЕННЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН (НА ПРИКЛАДІ РІВНИННОЇ УКРАЇНИ)

Н. С. Лобода, Н. Д. Отченаш, М. О. Козлов

natalie.loboda@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, natalie.loboda@gmail.com

Актуальність роботи обумовлена необхідністю кількісної оцінки ризиків змін водних ресурсів, які відбуваються на початку XXI сторіччя внаслідок дії парникового ефекту та відповідних змін клімату. Автори використали ймовірнісний підхід для оцінки кліматичних ризиків, у якому застосовується добуток показника зменшення водних ресурсів на ймовірність настання цієї події. Зменшення водних ресурсів в результаті потепління характеризує їхнє «виснаження». У роботі використані результати розрахунків значень середнього багаторічного річного «кліматичного» стоку, визначеного за моделлю «клімат-стік» на основі метеорологічних даних осередненої модельної траєкторії проекту EURO-CORDEX для сценаріїв змін клімату RCP4.5 та RCP8.5. Розрахунковим є період 2021-2050 рр., базовим – період від початку спостережень до 1989р. Порівняння кліматичного розрахункового та базового стоку виконано по метеостанціях. Оцінкою змін, що відбулися, є відносне відхилення базових та розрахункових значень стоку. Ймовірність ступеня «виснаження» водних ресурсів визначалась як відношення кількості метеостанцій (вузлів сітки), де зміни досягали певних розмірів, до загального числа розглянутих станцій. Граничними показниками ступеня виснаження водних ресурсів слугували зміни, які перевищували 10% (статистично значущі зміни водних ресурсів), 50% (руйнування водних ресурсів), 70% (безповоротне руйнування водних ресурсів). Метою роботи є розроблення критеріїв для розрахунків кліматичних ризиків та установлення ризику формування напруженого, критичного та катастрофічного стану водних ресурсів на прикладі України. Детальний розгляд інтервалів змін водних ресурсів показав, що найбільший ризик їхнього виснаження у 2020-2050 рр. буде спостерігатися в інтервалі від -20 до -40% (напружений стан) за сценарієм RCP4.5 та від -30 до -60% (напружений стан) за сценарієм RCP8.5. Установлено, що кліматичні ризики руйнування та безповоротного руйнування водних ресурсів для території України на 2020-2050 рр. невеликі, що підтверджується малою ймовірністю їх появи. Проте значення ризиків зростають у 1,5 – 2,0 рази для сценарію RCP8.5 у порівнянні із сценарієм RCP4.5. Додатково було запропоновано для розрахунків кліматичних ризиків використовувати відносну площу підлеглої виснаженню території як непрямий показник збитків (чим більша площа, тим більші витрати на відтворення). Цей підхід дозволив зробити оцінки ризиків більш диференційованими. Розроблена методика оцінки кліматичних ризиків виснаження водних ресурсів в умовах глобального потепління може бути використана для різних моделей і країн.

**Ключові слова:** кліматичні ризики; модель «клімат-стік»; водні ресурси; кліматичні сценарії; ступінь виснаження водних ресурсів.

### 1 ВСТУП

В П'ятій доповіді Міжурядової групи з питань зміни клімату відзначається, що «забезпечення сталого розвитку ... є основою для кліматичної політики і наголошує на необхідності розгляду ризиків змін клімату» [1]. Оскільки кліматичний ризик у різних частинах Європи проявляється по-різному, регіональні оцінки були проведені для чотирьох субконтинентальних регіонів: північного, західного, центрально-східного і південного. Для центрально-східної Європи очікується зростання

температур повітря та тривалості посух. Можливі мега-посухи, що призводять до нестачі води та продовольства, руйнування критичної інфраструктури та загрози фінансовим ринкам та стабільності [2].

**Актуальність** дослідження обумовлена необхідністю визначення вразливості водних ресурсів України до змін клімату та оцінки їх можливого стану у майбутньому на базі використання кліматичних сценаріїв.

Проблема полягає у суттєвому зростанні температур повітря на території рівнинної України на фоні незначної зміни ресурсів зволоження, що призводить до зменшення стоку річок [3]. Таким чином виникає ризик виснаження водних ресурсів.

До основних завдань Стратегії України з “Екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року” віднесені “проведення секторальних досліджень з оцінки ризиків, уразливості та прогнозування зміни клімату у сферах управління водними ресурсами, збереження біорізноманіття, лісового фонду, енергетики, громадського здоров’я, сільського господарства та ґрунтів, транспорту та інфраструктури, туризму” [4]. Методики оцінки ризиків у сфері управління водними ресурсами складають недостатньо розвинуту частину гідрологічних досліджень.

*Метою роботи є розроблення критеріїв для розрахунків кліматичних ризиків та встановлення ризику формування напруженого, критичного та катастрофічного стану водних ресурсів.*

Об’єктом дослідження є негативний вплив змін клімату на водні ресурси.

Предметом дослідження є оцінка ризику виснаження водних ресурсів внаслідок можливих змін клімату.

**Опис об’єкту.** Рівнинна територія України включає до себе такі природні зони: лісову, лісостепову, степову, межі яких відповідають зоні надлишкового зволоження, достатнього зволоження та недостатнього зволоження, відповідно [5]. За ландшафтно-гідрологічним районуванням В.В. Гребіня виділені мішано-лісова волога; широко-листова волога, лісостепова недостатньо зволожена; степова посушлива зони [6]. Весь південь України займає степова зона. Аналіз розподілу коефіцієнту посушливості (відношення ресурсів зволоження до ресурсів тепла) показав, що на початку ХХІ сторіччя зона недостатнього зволоження України розширяється до півночі, обмежуючи площу зони достатнього зволоження. На початку ХХІ сторіччя на півдні України сформувалася напіваридна зона, якої наприкінці ХХ сторіччя ще не існувало. Подальше розширення напіваридної зони прогнозується до кінця сторіччя і, зокрема, для найближчого тридцятирічного періоду 2021-2050 рр. за сценаріями глобального потепління RCP4.5 та RCP8.5 [7]. Виявлено, що зростання посушливості клімату буде супроводжуватися зменшенням водних ресурсів. Для рівнинної

України це зменшення пов’язується із зниженням стоку весняного водопілля, що обумовлено зменшенням запасів води у сніговому покриві за рахунок зростання температур повітря взимку та перед початком весняного водопілля [8], [9]. Висновки, зроблені українськими вченими підтверджуються роботами інших науковців світу [10]. Виявлено, що на території Східної Європи, включаючи Україну, сформувалася загроза суттєвого зменшення водних ресурсів внаслідок глобального потепління.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Кліматичні ризики – це багатогранні, різноманітні короткострокові, середньо- та довгострокові наслідки кліматичних змін, що охоплюють їхній багатовимірний діапазон від місцевого до глобального. Ризики найчастіше визначаються за допомогою спеціально розроблених індексів. У випадку оцінки ризиків від впливу небезпечних кліматичних явищ в основі розрахунків таких індексів можуть бути покладені розміри площі, охопленої негативним явищем, тривалість негативного явища, ступінь агресивності негативного явища та інше. У “Методичних рекомендаціях для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату” наведені можливі показники-індикатори, які можна використовувати для оцінки кліматичних ризиків [11].

Оцінки ризику є підґрунтям для прийняття управлінських рішень при вирішенні питань збереження і відновлення природних ресурсів в умовах глобального потепління. Вони можуть надаватися у вигляді кількісних характеристик масштабів порушень, що відбулися [12]

Підчас розрахунків кліматичних ризиків використовують як метеорологічні дані кліматичних сценаріїв, так і дані минулих років [13]. Використання виявлених трендів дозволяє розширити набір можливих показників у розрахунках кліматичних ризиків.

Для оцінки кліматичного ризику формування нестачі водних ресурсів дуже часто вдаються до районування територій за тенденціями змін стоку. Особлива увага приділяється районам, де виявлені статистично значущі тенденції зменшення стоку річок. Розроблення та реалізація заходів по покращенню умов формування стоку може спиратися на аналіз відгуку природних систем на їх штучні зміни (наприклад, збільшення площ лісів на

водозборах річок [14] шляхом співставлення характеристик стоку минулого періоду та періоду після проведення відновних заходів.

Кількісним показником ризику може слугувати співвідношення оцінок наслідків змін клімату за різні періоди. Наприклад, у роботі [15] розглядається ризик виникнення хвороби Лайма при змінах кліматичних умов. Показник ризику оцінюється як логарифм відношення кількості хворих у сучасному періоді до відповідної характеристики у минулому. Роль кліматичних змін установлювалась шляхом пошуку кореляційних зв'язків між показником ризику та показниками змін клімату і ландшафту.

Підчас оцінки ризиків затоплення територій у період весняних водопіль або дощових паводків ймовірність ризиків затоплення може прийматися за даними про ймовірність появи максимуму дощового паводку чи весняного водопілля [16].

Термін кліматичний “ризик” часто використовується для позначення потенційно несприятливих наслідків зміни клімату та появи загрози для життя, засобів існування, здоров'я та добробуту людей, екосистем та видів, економічних, соціальних та культурних цінностей, послуг (включаючи екосистемні послуги) та інфраструктури. У роботі [17] розглядаються ризики виникнення озброєних конфліктів з метою можливого територіального перерозподілу води на Африканському континенті в умовах кліматичних змін. Предикторами прогностичної моделі в цій роботі слугували дані кліматичних сценаріїв RCP та три сценарії соціально-економічного розвитку SSP.

При визначенні кліматичних ризиків у сільському господарстві були залучені альтернативні вирішення (за принципом “так” або “ні”) на основі порівняння середнього багаторічного значення поточної характеристики із базовою (за минулий період). Показник ризику розраховується за кількістю порушень установленого порогу урожайності та якості пшениці [18].

Ризик також можна розглядати як можливість появи несприятливих наслідків того чи іншого виду антропогенного впливу, але дати настання та ступінь здійснення цих наслідків залишаються невизначеними [19]. Невизначеність розуміє під собою наявність декількох варіантів наслідків, які можуть виникнути в результаті реалізації події (у даному випадку змін клімату). Ризик може визначатися через ймовірність виникнення небезпечних

подій або тенденцій, помножену на кількісну оцінку наслідків, які б мали місце підчас реалізації очікуваної події [20]. Зокрема, такий підхід був успішно застосований автором при визначенні екологічних ризиків забруднення вод [21].

У даній роботі запропонована методика установлення кількісних оцінок кліматичного ризику виснаження водних ресурсів внаслідок глобального потепління з використанням ймовірнісного підходу.

### 3 ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ризик є кількісною характеристикою, яка описує несприятливу подію із використанням ймовірності її настання. Кількісний аналіз ризику передбачає визначення ймовірності настання ризикових подій і обсягу викликаного ними збитку або вигоди [1].

Кліматичний ризик можна представити як добуток від ймовірності появи небезпечного явища на пошкодження

$$R_{к.р.} = p(H.Я.) \cdot V, \quad (1)$$

де  $R_{к.р.}$  – кількісний показник кліматичного ризику;

$p(H.Я.)$  – ймовірність появи небезпечного явища;

$V$  – вразливість об'єкту.

Вразливість може розглядатись як функція або ступінь схильності об'єкту до сприйняття негативного впливу. У свою чергу, вразливість визначається як добуток від відсотку пошкоджень, пов'язаних із дією небезпечного явища, на збиток від цих пошкоджень

$$V = P \cdot N, \quad (2)$$

де  $P$  – відсоток пошкоджень;

$N$  – збиток від пошкоджень.

Економічний збиток визначається як

$$N = N_j F, \quad (3)$$

де  $N_j$  – грошовий вираз для збитків, які припадають на  $1 \text{ км}^2$  площі водозбору або на  $1 \text{ км}$  довжини річки;

$F$  – площа водозбору або довжина річки.

Під збитками від зменшення водних ресурсів слід розуміти витрати на відновлення водних ресурсів (ревіталізація річок, створення сховищ для збереження води, перекид стоку, будівництво очисних споруд та інше).

Якщо економічні витрати від пошкоджень не приймати до уваги, то розрахунки кліматичного ризику можна представити рівнянням виду

$$R_{к.р.} = p(H.Я.) \cdot П. \quad (4)$$

У даній роботі під “пошкодженням” слід розуміти виснаження водних ресурсів внаслідок потепління. Характеристикою водних ресурсів може слугувати середній багаторічний стік річок. “Небезпечне явище” розглядається як зменшення водних ресурсів різного ступеня (у відсотках по відношенню до базового періоду), що відбулося в результаті змін клімату.

Згідно із рекомендаціями ООН зменшення середньої багаторічної величини річного стоку на 10 % розглядається як статистично значуще виснаження водних ресурсів; зменшення на 50 % означає їх руйнування, а зменшення на 70 % має призвести до безповоротного руйнування водних ресурсів.

Приймаємо, що задовільний стан водних ресурсів зберігається, коли їхнє зниження менше або дорівнює 10 %. Перехід у зону ризику спостерігається, коли зниження водних ресурсів перебільшує 10 %, але менше або дорівнює 50 %. У цьому випадку виникає “напружена” ситуація, при якій рівень життя населення через зменшення запасів води порушується незначно. У цьому випадку за рахунок проведення природоохоронних заходів водні ресурси досить легко відновити. Критична ситуація виникає, коли зменшення водних ресурсів за рахунок змін клімату перевищує 50 %, але менше або дорівнює 70 %. У таких випадках відбувається руйнування водних ресурсів. Для їх відновлення вже недостатньо дотримуватися лише природоохоронних заходів. Стає необхідним зменшення антропогенного навантаження як за рахунок зниження викидів промислових газів у атмосферу, так і шляхом обмеження масштабів водогосподарської діяльності (а саме, зменшення об’ємів вилучення вод поверхневих водотоків на зрошення, заповнення штучних водойм та інше). Наприклад, на території південної України в умовах глобального потепління посилюються наслідки розбудови великої кількості штучних водойм, головним чином, через зростання випаровування з водної поверхні. Випаровування з водної поверхні перевищує опади, які випадають на цю поверхню. Зростання температур повітря та їх перехід у область додатних значень взимку призводить до зменшення запасів води у сніговому покриві і відповідного зниження стоку за період весняного водопілля. Зростання

температур повітря теплого періоду обумовлює зростання випаровування з поверхні суші і водної поверхні. Такі наслідки потепління призвели до зменшення припливу прісних вод від малих та середніх річок північно-західного Причорномор’я, що у свою чергу викликало обміління та поступове висихання Причорноморських лиманів [22], [23] і зростання солоності їх вод [24]. Близькі за змістом висновки зроблені польськими авторами [25], які підкреслюють особливо негативні наслідки зростання температур повітря та випаровуваності на фізико-хімічний режим малих водних об’єктів.

Виснаження водних ресурсів більш ніж на 70 % викликає їх незворотне руйнування і створює катастрофічну ситуацію в регіоні або у цілій країні. У такій ситуації втрачаються унікальні природні об’єкти та генофонд біоти, а також погіршується здоров’я населення [26].

Оцінка водних ресурсів рівнинної України виконувалась на базі моделі «клімат – стік», основні теоретичні положення якої представлені у роботах [27]-[29].

Модель базується на сумісному використанні водного та теплового балансу водозборів і надає можливість оцінювати водні ресурси за метеорологічними даними про опади та температури повітря. Середній багаторічний стік, розрахований за цією моделлю, отримав назву кліматичного. Розрахунки кліматичного стоку за даними метеорологічних спостережень виконувались за метеорологічними даними метеостанцій, а при оцінках водних ресурсів за кліматичними сценаріями – за відповідними даними у вузлах координатної сітки. Особливість побудови карт ізоліній кліматичного річного стоку полягає у тому, що кожне розраховане значення відноситься до метеостанції, а не до центру тяжіння водозбору і є характеристикою місцевих водних ресурсів. Результати розрахунків кліматичного стоку узагальнювалися у виді карт ізоліній середніх багаторічних значень кліматичного стоку та його змін при порівнянні із базовим періодом. Середнє багаторічне значення кліматичного стоку з водозбору має визначатися як середня зважена по частинних площах водозбору, що містяться між ізолініями. Порівняння норм річного кліматичного стоку із фактичними даними, виконані для водозборів річок з усталеним підземним живленням у різних географічних зонах України, показали їх відповідність одне одному [27]. Норма річного кліматичного стоку є тотожною нормі

зонального природного річного стоку. Природний стік є стоком у непорушених водогосподарською діяльністю умовах. Точність визначення норми річного кліматичного стоку за картою ізоліній, побудованій на основі метеорологічних даних, становить  $\pm 10\%$ .

У даній роботі при оцінках кліматичних ризиків були використані результати оцінки можливих змін водних ресурсів України у період 2021-2050рр.), опубліковані в [1] та [6]. До розрахунків були залучені дані 125 метеорологічних станцій (середні багаторічні річні та місячні опади та температури повітря за період з початку спостережень до 1989р.) та прогнозні значення метеорологічних характеристик у вузлах сітки, осереднені за ансамблем 14 модельних симуляцій змін клімату відповідно до сценарію RCP4.5 та RCP8.5 в межах проекту EURO-CORDEX [30]. Застосування осереднених по ансамблю даних зумовлено припущенням, що у “осередненій траєкторії” систематичні похибки, властиві окремим моделям, при осередненні компенсуються [31].

#### 4 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для оцінки кліматичних ризиків виснаження водних ресурсів авторами запропонований такий підхід. Пошкодження  $\Pi$  з формул (1) та (4) задавалось як певна ступінь зменшення водних ресурсів (10%, 50%, 70%). Емпірична ймовірність цієї події установлювалася як відношення кількості метеостанцій (вузлів сітки)  $n$ , коли спостерігалось перевищення заданого критичного значення до загальної кількості випадків  $N$  (загальне число метеостанцій або вузлів сітки), тобто обчислювалася відносна частота події

$$p = n/N, \quad (5)$$

звідки

$$R' = p\Pi, \quad (6)$$

де  $R'$  – ймовірнісна оцінка ризику виснаження водних ресурсів або коефіцієнт ризику;  $p$  – емпірична ймовірність появи пошкодження  $\Pi$  (наприклад, зменшення середньої багаторічної величини річного стоку на 50%);  $n$  – кількість метеостанцій, на яких спостерігалася ця подія. Пошкодження  $\Pi$  з формули (1) у подальшому розглядається як характеристика виснаження водних ресурсів.

Для сценарію RCP4.5 установлено, що найбільш ймовірним у період 2021-2050 рр. буде

зменшення водних ресурсів в інтервалі від 10 % і більше. Середній розмір виснаження водних ресурсів в інтервалі від 10 до 100 % становитиме 45 % (табл.1). Цій ситуації відповідає найбільше значення кліматичного ризику  $R' = 29,7$ . Ризики руйнування водних ресурсів та незворотного руйнування оцінюються показником  $R'$ , який дорівнює 7,50 і 1,70, відповідно. Як видно з таблиці 1, емпірична ймовірність появи цих подій ( $p$ ) є невеликою і становить 0,10 та 0,02 відповідно. За сценарієм RCP8.5, згідно із яким заходи по упередженню забруднення атмосфери парниковими газами не будуть реалізовані в найближчі десятиріччя, кліматичні ризики збільшуються (табл.2). Перспектива зменшення водних ресурсів у інтервалі 10-100 % стає майже достовірною подією у сценарії RCP8.5, оскільки ймовірність такого зменшення наближається до 1 ( $p=0,98$ ). Ймовірності руйнування водних ресурсів більше ніж на 50 % та незворотного руйнування (більше ніж на 70 %) в сценаріях RCP8.5 також зростають. За сценарієм RCP8.5 значення кліматичних ризиків зростають у 1,5 рази при порівнянні із результатами, отриманими за сценарієм RCP4.5.

У таблицях 3 та 4 наведені більш детальні оцінки  $R'$  по інтервалах, межі яких відповідають інтервалам між ізолініями на картах змін водних ресурсів [6]. З цих таблиць видно, що найбільший ризик виснаження водних ресурсів припадає на інтервали від -20 до -40 % для сценарію RCP4.5 та на інтервали від -30 до -60 % для сценарію RCP8.5. В чотири рази у порівнянні із сценарієм RCP4.5 зростає коефіцієнт ризику виснаження водних ресурсів у інтервалі змін стоку від - 50 до -60 %. Сумарний коефіцієнт ризику попадання в інтервал змін від -40 до -60 % становить 3,65 для сценарію RCP4.5 та 21, 2 для сценарію RCP8.5, що свідчить про зростання загрози формування критичного стану водних ресурсів рівнинної України у випадку розвитку наслідків глобального потепління за сценарієм RCP8.5.

З метою урахування збитків підчас розрахунків кліматичних ризиків авторами роботи запропоновано використовувати відносну площу території, яка підпадає під значущий вплив змін клімату. Чим більша територія підлягає негативним змінам водних ресурсів, тим більший буде збиток. Розглянемо карти ізоліній змін кліматичного стоку у період 2021-2050рр. у маловодні роки. До маловодних років віднесені роки 75% забезпеченості річного стоку та 95% забезпеченості річного стоку. Рік

забезпеченістю 75% відноситься до маловодного, а рік забезпеченістю 95% - до дуже маловодного.

**Таблиця 1** – Оцінка кліматичного ризику зменшення місцевих водних ресурсів України для періоду 2021-2055 рр за сценарієм RCP4.5

**Table 1** – Assessment of the climatic risk of the reduction of local water resources of Ukraine for the period 2021-2055 according to the RCP4.5 scenario

Відносна частота появи небезпечного явища, $p$	Небезпечне явище (зменшення водних ресурсів в результаті зміни клімату), %	Середній розмір виснаження водних ресурсів у межах досліджуваного інтервалу, %	Коефіцієнт кліматичного ризику, $R'$
0,66	Більше 10%	45	<b>29,7</b>
0,10	Більше 50%	75	7,50
0,02	Більше 70%	85	1,70

**Таблиця 2** – Оцінка кліматичного ризику зменшення місцевих водних ресурсів України для періоду 2021–2050 рр за сценарієм RCP8.5

**Table 2** – Assessment of the climate risk of the reduction of local water resources of Ukraine for the period 2021–2050 according to the RCP8.5 scenario

Відносна частота появи небезпечного явища, $p$	Небезпечне явище (зменшення) водних ресурсів в результаті зміни клімату, %	Середній розмір виснаження водних ресурсів у межах досліджуваного інтервалу, %	Коефіцієнт кліматичного ризику, $R'$
0,98	Більше 10%	45	<b>43,2</b>
0,22	Більше 50%	75	16,5
0,03	Більше 70%	85	2,55

**Таблиця 3** – Оцінка кліматичного ризику зменшення місцевих водних ресурсів України по інтервалах для періоду 2021-2050 рр. за сценарієм RCP4.5

**Table 3** – Assessment of the climate risk of local water resources reduction by intervals in Ukraine for the period 2021-2050 according to the RCP4.5 scenario

Відносна частота події, $p$	Інтервали зменшення водних ресурсів в результаті зміни клімату, %	Виснаження водних ресурсів у межах інтервалу, %	Коефіцієнт кліматичного ризику, $R'$
0,34	Від 0 до -10	5	1,70
0,20	Від -10 до -20	15	3,00
0,21	Від -20 до -30	25	<b>5,25</b>
0,13	Від -30 до -40	35	<b>4,55</b>
0,02	Від -40 до -50	45	0,90
0,05	Від -50 до -60	55	2,75
0,03	Від -60 до -70	65	1,95
0,02	Від -70 до -100	85	1,70



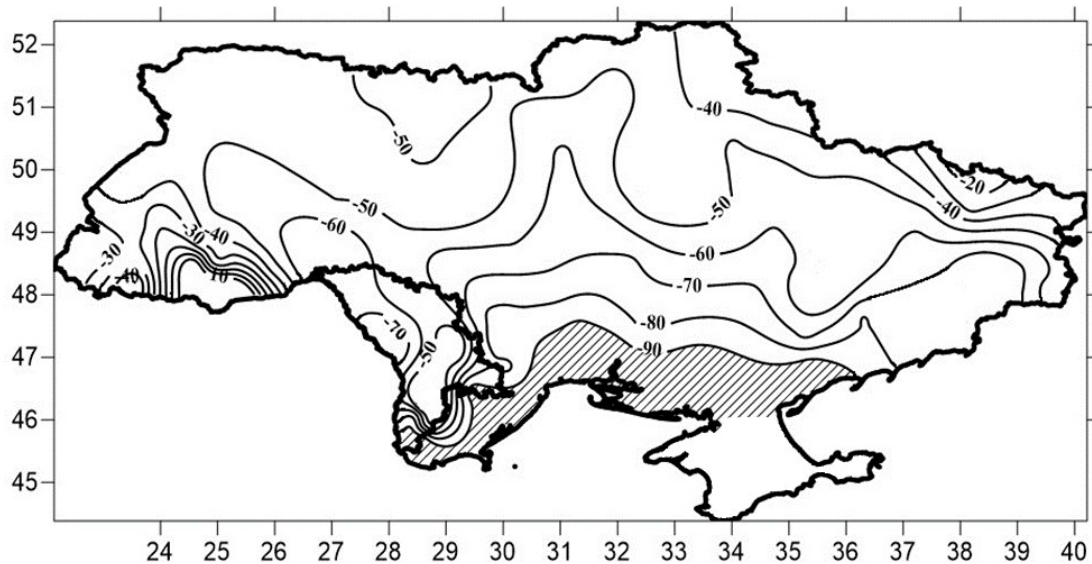
**Таблиця 4** – Оцінка кліматичного ризику зменшення місцевих водних ресурсів України по інтервалах для періоду 2021-2050 рр. за сценарієм RCP8.5

**Table 4** – Assessment of the climate risk of local water resources reduction by intervals in Ukraine for the period 2021-2050 according to the RCP8.5 scenario

Відносна частота події, $p$	Інтервали зменшення водних ресурсів в результаті зміни клімату, %	Виснаження водних ресурсів у межах інтервалу, %	Коефіцієнт кліматичного ризику, $R'$
0,02	Від 0 до -10	5	0,10
0,08	Від -10 до -20	15	1,20
0,11	Від -20 до -30	25	2,75
0,28	Від -30 до -40	35	<b>9,80</b>
0,29	Від -40 до -50	45	<b>13,0</b>
0,15	Від -50 до -60	55	<b>8,25</b>
0,04	Від -60 до -70	65	2,60
0,03	Від -70 до -100	85	2,55

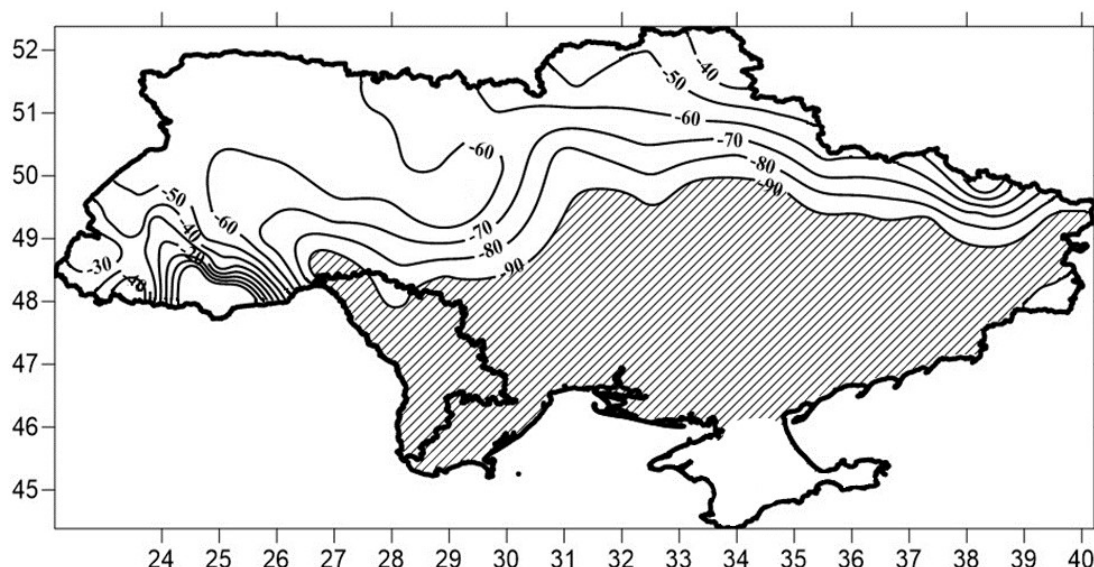
На рисунках 1 та 2 штриховкою виділені площі, де зменшення річного стоку згідно із даними сценарію RCP8.5 буде перевищувати 90%, що свідчить про припинення місцевого стоку з території.

Порівняльний аналіз представлених рисунків дозволив зробити висновок, що ці площі суттєво зростають при переході від маловодного року до дуже маловодного.



**Рис. 1** – Зменшення річного стоку маловодних років забезпеченістю 75% за період 2021-2050 рр. у порівнянні із базовими даними згідно із осередненою моделлю сценарію RCP8.5

**Fig. 1** – Reduction of annual runoff in low-water years (75% certainty) for the period 2021-2050 compared to the baseline according to the averaged model of the RCP8.5 scenario



**Рис. 2** – Зменшення річного стоку маловодних років забезпеченістю 95% за період 2021-2050 рр. у порівнянні із базовими даними за сценарієм RCP8.5

**Fig. 2** – Reduction of annual runoff in low-water years (95% certainty) for the period 2021-2050 compared to the baseline according to the averaged model of the RCP8.5 scenario

Розглянемо, як зміниться коефіцієнт ризику при непряму урахуванні збитків через площу припинення місцевого стоку, яка підлягає кліматичним змінам. У такому випадку можна використати рівняння виду (1), та оцінити вразливість (див. рівняння 2), яка буде визначатись наступним чином

$$V = \Pi \cdot f, \quad (7)$$

де  $\Pi$  – відсоток виснаження (пошкодження) стоку;

$f$  – показник збитку від виснаження стоку у вигляді площі припинення місцевого стоку у долях від площі водозбору.

Коефіцієнт ризику, розрахований за (1), позначимо як  $R''$ .

Результати розрахунків показали, що додаткове використання відносної площі  $f$  посилює диференціацію між коефіцієнтами ризику: при розрахунках  $R''$  значення коефіцієнту ризику для дуже маловодного року в 14 разів перевищувало відповідне значення для маловодного (табл. 5).

**Таблиця 5** – Оцінка кліматичного ризику припинення місцевого стоку річок у маловодні роки для періоду 2021-2050 рр. за сценарієм RCP8.5

**Table 5** – Assessment of the climatic risk of the cessation of local river flow in low-water years for the period 2021-2050 according to the RCP8.5 scenario

Забезпеченість водності року	$p$	Виснаження річного стоку маловодних років, %	Коефіцієнт кліматичного ризику, $R'$	Відносна площа, підлегла впливу	Вразливість $V = \Pi \cdot f$	Коефіцієнт кліматичного ризику, $R''$
Маловодний рік $P=75\%$	0,15	90	13,5	0,09	8,1	1,21
Дуже маловодний рік $P=95\%$	0,40	90	36,0	0,48	43,2	17,3



## 5 ВИСНОВКИ

У роботі запропонована методика оцінки кліматичних ризиків виснаження водних ресурсів в результаті змін глобального та регіонального клімату.

Методика передбачає використання кількісних оцінок можливих змін водних ресурсів, отриманих в результаті математичного моделювання характеристик стоку за метеорологічними даними,

Ризик виснаження водних ресурсів пропонується розраховувати як середнє зважене по ймовірності зменшення водних ресурсів, що відбулося внаслідок потепління. Оскільки розрахунки стоку за кліматичними сценаріями надавалися по метеорологічним станціям, то шукана ймовірність визначалась як відношення кількості станцій (вузлів розрахункової сітки) із заданим масштабом виснаження водних ресурсів до загальної кількості розглянутих станцій (вузлів).

Інтервали можливого виснаження водних ресурсів задавалися за рекомендаціями ООН, згідно з якими їх зменшення водних ресурсів більше ніж на 10% указує на їхні статистично значущі зміни; зменшення більш ніж на 50% означає руйнування водних ресурсів; зменшення водних ресурсів більш ніж на 70% призводить до безповоротного руйнування водних ресурсів, що відповідає їх катастрофічному стану.

Виявлено, що за сценарієм RCP8.5 з ймовірністю  $p=0,98$  зміни водних ресурсів рівнинної України у 2021-2050 рр. будуть статистично значущими (перевищуватимуть 10%). Значення показника кліматичного ризику для цієї події є найбільшим ( $R'=43,2$ ). Ймовірність виснаження водних ресурсів на 50% і вище є значно меншою ( $p=0,22$ ), і відповідно зменшується показник ризику ( $R'=16,5$ ). Найменшим є показник ризику виснаження водних ресурсів на 70% і вище ( $R'=2,55$ ) при  $p=0,03$ .

Згідно із запропонованою методикою встановлено, що кліматичні ризики руйнування та безповоротного руйнування водних ресурсів для рівнинної території України на 2021-2050 рр. невеликі, що забезпечується малою ймовірністю їх появи. Проте значення ризиків зростають у 1,5 – 2,0 рази для сценарію RCP8.5 у порівнянні із сценарієм RCP4.5.

Установлено, що на найближчий тридцятирічний період (2021-2050 рр.) емпірична ймовірність  $p$  задовільного стану (зменшення до

10%) водних ресурсів буде дорівнювати 34% для сценарію RCP4.5 та лише 2% для сценарію RCP8.5. Емпірична ймовірність  $p$  появи напруженого стану водних ресурсів (їх зменшення від 10% до 50%) буде становити 56% для сценарію RCP4.5 та 76% для сценарію RCP8.5. Емпірична ймовірність  $p$  виникнення критичного стану водних ресурсів (їх зменшення від 50% до 70%) досягне 8% для сценарію RCP4.5 та 19% для сценарію RCP8.5. Емпірична ймовірність  $p$  появи катастрофічного стану водних ресурсів (їх зміни більше ніж на 70%) будуть дорівнювати 5% для сценарію RCP4.5 та 7% для сценарію RCP8.5.

Найбільші коефіцієнти ризику  $R'$  виснаження водних ресурсів будуть можливі в інтервалах змін від -20 до -30% ( $R'=5,25$ ) та від -30 до -40% ( $R'=4,55$ ) для сценарію RCP4.5. Для сценарію RCP8.5 найбільш високі значення коефіцієнтів ризику виявлені в інтервалах від -30 до -40% ( $R'=9,80$ ); від -40 до -50% ( $R'=13,0$ ); від -50 до -60% ( $R'=8,25$ ). В сценарії RCP8.5 порівняно високою ймовірністю та коефіцієнтом ризику  $R'$  характеризується інтервал змін від -50 до -60%, що свідчить про можливість переходу водних ресурсів у критичний стан.

Запропоновано введення у формулу розрахунків коефіцієнту кліматичного ризику показника  $f$  (доля площі, яка підлягає змінам у заданих масштабах, від площі загальної території, що розглядається). Відносна площа  $f$  є непрямым показником економічних збитків. Застосування показника  $f$  покращує диференціацію кількісних оцінок кліматичного ризику. Особливо чутливими до введення показника  $f$  є оцінки ризиків припинення місцевого стоку річок у маловодні роки, оскільки на півдні України такі площі суттєво поширюються з півдня до півночі за рахунок впливу потепління.

Установлено, що наслідки змін клімату у вигляді припинення місцевого стоку з територій більш вагомі підчас використання сценарію RCP8.5. У дуже маловодні роки емпірична ймовірність припинення місцевого стоку на півдні України досягає 40%.

Запропонований підхід до оцінки кліматичних ризиків виснаження водних ресурсів був реалізований на прикладі України з використанням результатів моделювання водних ресурсів за моделлю «клімат-стік». Проте, він може рекомендований для застосування для усіх країн, для яких надаються прогнози просторового розподілу змін водних ресурсів в результаті глобального потепління.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: колективна монографія / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового; Одеський державний екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2018. 548 с. ISBN 9786177711222.
- European climate risk assessment. Executive summary. European Environment Agency, 2024. 37 p.
- Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеса: ТЕС, 2015. 520 с.
- Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2021 р. №1363-р). URL: [Про схвалення Стратегії еколо... | від 20.10.2021 № 1363-р \(rada.gov.ua\)](https://rada.gov.ua) (дата звернення 21.01.2024).
- Швебе Г. І., Ігошин М. І. Каталог річок і водойм України: навчально-довідковий посібник. Одеса: «Астропринт», 2003. 389 с.
- Гребінь В. В. Сучасний водний режим України (ландшафтно-гідрологічний аналіз): монографія. Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.
- Лобода Н. С., Козлов М. О. Оцінка водних ресурсів річок України за середніми статистичними моделями траєкторій змін клімату RCP4.5 та RCP8.5 у період 2021- 2050 роки. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. №25. С. 93-104. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09>
- Valeriya Ovcharuk, Eugene Gopchenko. Engineer Substantiation Of Estimated Characteristics Of Maximum Rivers' Runoff During Floods Under Climate Change. *Ecological Significance of River Ecosystems Challenges and Management Strategies* / Edited by Sugghosh Madhav, Shyam Kanhaiya, Arun Srivastav, Virendra Singh and Pardeep Singh. Elsevier, 2022. Pp. 351-382. <https://www.elsevier.com/books/ecological-significance-of-river-ecosystems/madhav/978-0-323-85045-2>
- Melnic V. S., Loboda N. S. Trends in monthly, seasonal and annual fluctuations in flood peaks for upper Dniester River. *Meteorology, Hydrology and Water Management*. 2020. Vol. 8 (2). Pp. 28-36. <https://doi.org/10.26491/mhwm/126705>
- Changing climate both increases and decreases European river floods / Blöschl G. et al. *Nature*. 2019. 573(7772). Pp. 108-111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/06/386nd1.pdf> (дата звернення 01.02.2024 р)
- Risk Assessment of Rainwater Overflow from Lake Warouwaye in the Case of a Ten-Year Rainfall in Yeumbeul North / Sondo B. et al. *Open Journal of Modern Hydrology*. Senegal. 2021. 11. Pp. 39-53. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2021.113003>
- Spatial and temporal variability and risk assessment of regional climate change in northern China: a case study in Shandong Province / Hongli Li. et all. *Natural Hazards*. 2022. 111. Pp. 2749–2786. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05156-z>
- Potential risk to water resources under eco-restoration policy and global change in the Tibetan Plateau / Yang Xiao et.al. *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16 (9). Lett. 16 094004
- Effect of Land-Use Change on the Changes in Human Lyme Risk in the United States / Yuying Ma et. al. *Sustainability*. 2022. 14. 5802. <https://doi.org/10.3390/su14105802>
- Martyniuk M. O., Ovcharuk V. A. Identification of areas with potential significant flood risk using specialized software in the Vistula river basin within Ukraine. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2023. Vol. 24(1). Pp. 94-100. <https://doi.org/10.31577/ahs-2023-0024.01.001>
- Projecting armed conflict risk in Africa towards 2050 along the SSP-RCP scenarios: a machine learning approach / Jannis M Hoch et.al. *Environ. 2021. Res. Lett.* 16 124068 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3db2>
- Risk assessment of possible impacts of climate change and irrigation on wheat yield and quality with a modified CERES-Wheat model / Jianchao Liu et.al. *Journal of Water and Climate Change*. 2021. 12(6). Pp. 2444–2459. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.248>
- The Adaptation Principles: 6 Ways to Build Resilience to Climate Change. URL: <https://www.chinawaterrisk.org/opinions/the-adaptation-principles-6-ways-to-build-resilience-to-climate-change/> (дата звернення: 15.11.2020)
- Шурда К. Э. Ресурсы и антиресурсы погодноклиматического фактора (экономико-экологический аспект): монография / Институт проблем рынка и экономико-экологических исследований НАН Украины. Одесса, 2012. 314 с.
- Loboda N., Daus M. Development of a method of assessment of ecological risk of surface water pollution by nitrogen compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol.5 №10 (113): Ecology, Pp.15-25. ISSN 1729-3774. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243058>
- Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050 / Loboda N. S., Tuchkovenko Y. S., Kozlov M. O., Katynska I. V. *Journal of Geology, Geograph. Geoecology*. 2021. 30 (2). Pp. 315–325. <https://doi.org/10.15421/112128>.
- Tuchkovenko Y., Khokhlov V., Loboda N. Climate change impact on the freshwater balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. *Journal of Water and Climate Change*. 2023. Vol. 14(7). Pp. 2416-2431. <https://iwaponline.com/jwcc/article/doi/10.2166/wcc.2023.109/95706/Climate-change-impact-on-the-freshwater-balance-of> (дата звернення: 04.03.2024)
- Лобода Н. С., Гриб О. М. Гідроекологічні проблеми Куяльницького лиману та шляхи їх вирішення. *Гідробіологічний журнал*. 2017. 53 (4). С. 95-104
- Monika Okoniewska, Danuta Szumi. Changes in Potential Evaporation in the Years 1952–2018 in North-Western Poland in Terms of the Impact of Climatic Changes on Hydrological and Hydrochemical Conditions. *nskWater* 2020. 12. 877. <https://doi.org/10.3390/w12030877>

26. Evaluation of the state of industrial water bioresources in fish areas of Ukraine / Burhaz M. I et.al. *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*. 2021. 4 (3). Pp. 68-75. ISSN 2617-6149
  27. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния: монография. Одесса: Экология, 2005. 208 с.
  28. Водні ресурси та гідроекологічний стан Тилігульського лиману: монографія / за ред. Ю. С. Тучковенко, Н. С. Лободи. Одеса: ТЕС, 2014. 276 с.
  29. Водний режим та гідроекологічні характеристики Куяльницького лиману / за ред. Лободи Н. С., Гопченка Є. Д. Одеса : ТЕС, 2016. 332 с.
  30. Giorgy F., Jones C., Ghassem R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*. 2009. 58 (3). Pp. 175-183.
  31. Valeriy Khokhlov, Yurii Tuchkovenko, Nataliia Loboda. Selection of representative near-future climate simulations by minimizing bias in average monthly temperature and precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3156731/v1>
- REFERENCES**
1. Stepanenko, S.M. & Pol'ovyy, A.M. (2018). *Klimatychni ryzyky funkcionuvannia haluzei ekonomiky Ukrainy v umovakh zminy klimatu [Climate risks to the functioning of economic sectors in Ukraine amid climate change]*. Odessa: TES Publ. ISBN: 9786177711222. (in Ukr.)
  2. *European climate risk assessment*. Executive summary. European Environment Agency, 2024, 37 pp.
  3. Stepanenko, S.M. & Pol'ovyy, A.M. (eds). (2015). *Klimatychni zminy ta yikh vplyv na sfery ekonomiky Ukrainy [Climate change and its impact on the sectors of Ukraine's economy]*. Odessa. (in Ukr.).
  4. *Stratehiya ekolohichnoyi bezpeky ta adaptatsiyi do zminy klimatu na period do 2030 roku (rozporядzhennia Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 20 zhovtnya 2021 r. №1363-r) [Strategy of environmental security and adaptation to climate change for the period until 2030 (the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 20, 2021 No. 1363-p)]*. Available at: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-p#Text><https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-p#D1%80> (Accessed: 21.01.2024)
  5. Shvebs, H.I., Ilohshyn, M.I. (2003). *Kataloh richok i vodoim Ukrainy [Catalog of rivers and reservoirs of Ukraine]*. Odessa: Astroprint. (in Ukr.)
  6. Grebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrayiny (landshaftno-hidrolohichniy analiz) [The modern water conditions of Ukrainian rivers (landscapehydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
  7. Loboda, N.S. & Kozlov, M.O. (2020). [Assessment of water resources of rivers of Ukraine according to average statistical models of climate change trajectories RCP4.5 and RCP8.5 in the period 2021-2050]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 25, pp.93- 104. (in Ukr). <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09>
  8. Ovcharuk, V. & Gopchenko, E. (2022). Engineer substantiation of estimated characteristics of maximum rivers runoff during floods under climate change. In: Madhav, S. et. al (ed.). *Ecological Significance of River Ecosystems*. Elsevier, chapter 18, pp. 351-382. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00018-2>
  9. Melnic, V.S. & Loboda, N.S. (2020). Trends in monthly, seasonal and annual fluctuations in flood peaks for upper Dniester River. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, 8(2), pp. 28-36. <https://doi.org/10.26491/mhwm/126705>
  10. Blöschl, G. et al. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), pp. 108-111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
  11. *Metodychni rekomendatsiyi dlya zdiysnennya otsinky ryzykiv ta vrazlyvosti sotsial'no-ekonomichnykh sektoriv ta pryrodnykh skladovyykh do zminy klimatu [Methodological recommendations for assessing the risks and vulnerability of socio-economic sectors and natural components to climate change]*. Available at: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/06/386nd1.pdf> (Accessed: 01.02.2024). (in Ukr.)
  12. Sondo, B. et al (2021) Risk Assessment of Rainwater Overflow from Lake Warouwaye in the Case of a Ten-Year Rainfall in Yeumbeul North, Senegal. *Open Journal of Modern Hydrology*, 11, pp. 39-53. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2021.113003>
  13. Hongli, Li. et all. (2022). Spatial and temporal variability and risk assessment of regional climate change in northern China: a case study in Shandong Province. *Natural Hazards*, 111, pp. 2749–2786 <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05156-z>
  14. Yang Xiao et.al. (2021). Potential risk to water resources under eco-restoration policy and global change in the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 16(9), Lett. 16 094004.
  15. Yuying Ma et al. (2022). Effect of Land-Use Change on the Changes in Human Lyme Risk in the United States. *Sustainability*, 14, 5802. <https://doi.org/10.3390/su14105802>
  16. Martyniuk, M.O. & Ovcharuk, V.A. (2023). Identification of areas with potential significant flood risk using specialized software in the Vistula river basin within Ukraine. *Acta Hydrologica Slovaca*, 24(1), pp. 94-100. <https://doi.org/10.31577/ahs-2023-0024.01.001>
  17. Jannis, M Hoch et.al. (2021). Projecting armed conflict risk in Africa towards 2050 along the SSP-RCP scenarios: a machine learning approach. *Environ. Res. Lett.*, 16, 124068. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3db2>
  18. Jianchao, Liu et.al. (2021). Risk assessment of possible impacts of climate change and irrigation on wheat yield and quality with a modified CERES-Wheat model. *Journal of Water and Climate Change*, 12(6), pp. 2444–2459. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.248>
  19. *The Adaptation Principles: 6 Ways to Build Resilience to Climate Change*. URL: <https://www.chinawaterrisk.org/opinions/the-adaptation-principles-6-ways-to-build-resilience-to-climate-change/> (Accessed: 15.11.2020)
  20. Shurda, K.E. (2012). *Resursy i antiresursy pogodno-klimaticheskogo faktora (ekonomiko-ekologicheskij aspekt)*

- [Resources and anti-resources of the weather-climatic factor (economic-ecological aspect)]. Institute of Market Problems and Economic-Ecological Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. Odessa (in Russ.)
21. Loboda, N. & Daus, M. (2021). Development of a method of assessment of ecological risk of surface water pollution by nitrogen compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol.5, №10(113): Ecology, pp. 15-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243058>
  22. Loboda, N.S., Tuchkovenko, Y.S., Kozlov, M.O. & Katynska, I.V. (2021). [Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050]. *Zhurnal heolohiia, heohrafiia, heoekolohiia [Journal of Geology, Geograph. Geoecology]*, 30 (2), pp. 315–325. <https://doi.org/10.15421/112128>
  23. Tuchkovenko, Y., Khokhlov, V. & Loboda, N. (2023). Climate change impact on the freshwater balance of quasiclosed lagoons in the North-Western Black Sea coast. *Journal of Water and Climate Change*, vol. 14(7), pp. 2416-2431.
  24. Loboda, N.S. & Gryb, O.M. (2017). Hydroecological Problems of the Kuyalnyk Liman and Ways of Their Solution. *Hydrobiological Journal*, 53(6), pp. 87-95. <http://www.dl.begellhouse.com/journals/38cb2223012b73f2, 0631386b38d70fec, 26684a4766c364cb.html>
  25. Monika Okoniewska & Danuta Szumi. (2020). Changes in Potential Evaporation in the Years 1952–2018 in North-Western Poland in Terms of the Impact of Climatic Changes on Hydrological and Hydrochemical Conditions. *nskWater*, 12, 877.
  26. Burhaz, M.I et.al. (2021). Evaluation of the state of industrial water bioresources in fish areas of Ukraine. *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*, 4 (3), pp. 68-75. ISSN 2617-6149
  27. Loboda, N.S. (2005). *Raschety i obobshcheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviyakh antropogennogo vliyaniya. [Calculations and generalizations of the characteristics of the annual runoff of rivers in Ukraine under the conditions of anthropogenic influence]*. Odessa: Ekologiya. (in Russ.)
  28. Tuchkovenko, Yu.S. & Loboda, N.S. (eds). (2014). *Vodni resursy ta hidroekolohichni stan Tylihul'skoho lymanu [Water resources and hydroecological conditions of the Tylihul'skiy Liman Lagoon]*. OSENU. Odesa: TES Publ. (in Ukr.)
  29. Loboda, N.S. & Gopchenko, E.D. (eds). (2016). *Vodnyy rezhym ta hidroekolohichni kharakterystyky Kuyal'nyts'koho lymanu [Water regime and hydroecological characteristics of Kuyal'nitskiy Liman]*. OSENU. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)
  30. Giorgy, F., Jones, C. & Ghassem, R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58 (3), pp. 175-183.
  31. Valeriy Khokhlov, Yurii Tuchkovenko & Nataliia Loboda (2023). Selection of representative near-future climate simulations by minimizing bias in average monthly temperature and precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3156731/v1>

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE RISKS OF WATER RESOURCES DEPLETION IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE (USING PLAIN TERRITORIES OF UKRAINE AS AN EXAMPLE)

N. S. Loboda, N. D. Otchenash, M. O. Kozlov

Odessa State Environmental University,  
15 Lvivska Street, 65016, Odessa, Ukraine,  
[natalie.loboda@gmail.com](mailto:natalie.loboda@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>

The relevance of the work is determined by the necessity of quantitative assessment of the risks of water resources changes occurring in the early 21st century due to the greenhouse effect and corresponding climate changes. To evaluate climate risks the authors used a probabilistic approach which involves multiplying the indicator of water resource reduction by the probability of such event occurrence. Reduction of water resources caused by warming characterizes their "depletion". The study utilized the results of calculations of the average long-term annual "climate" runoff, determined through the "climate-runoff" model based on meteorological data of the averaged model trajectory of the EURO-CORDEX project for the climate change scenarios RCP4.5 and RCP8.5. The calculation period extends from 2021 to 2050, while the baseline period continues from the beginning of observations until 1989. The comparison of the calculated climatic runoff and the baseline runoff was performed across meteorological stations. The assessment of the changes was carried out by calculating the relative deviation between the baseline and calculated runoff values. The probability of the "depletion" stage for water resources was determined as the ratio of the number of meteorological stations (grid nodes) where changes reached certain

magnitudes to the total number of stations considered. The threshold indicators for the degree of depletion of water resources included changes exceeding 10% (statistically significant changes in water resources), 50% (water resources destruction), and 70% (irreversible destruction of water resources). The objective of the study consists in developing criteria for calculating climate risks and establishing the risks of formation of a tense, critical, and catastrophic state of water resources, taking Ukraine as an example. A detailed examination of the intervals of changes in water resources showed that the highest risk of their depletion over the period from 2020 to 2050 will be observed in the range from -20 to -40% (tense state) for the RCP4.5 scenario and from -30 to -60% (tense state) for the RCP8.5 scenario. It was established that the climate risks of depletion and irreversible depletion of water resources for the territory of Ukraine from 2020 to 2050 remain quite small, which is confirmed by the low probability of their occurrence. However, the risk values increase by 1.5 to 2.0 times for the RCP8.5 scenario compared to the RCP4.5 scenario. Additionally, for calculating the climate risks, it was proposed to use a relative area subject to depletion as an indirect indicator of losses (a larger area implies higher costs of restoration). This approach allowed for having more differentiated risk assessments. The developed methodology for assessing the climate risks of water resources depletion in the context of global warming can be applied for various models and countries.

**Keywords:** climate risks; climate-runoff model; water resources; climate scenarios; water resources depletion degree.

*Подання до редакції : 10. 03. 2024*

*Надходження остаточної версії : 01. 04. 2024*

*Публікація статті : 25. 04. 2024*