

## ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ГІДРОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ ВОДОЗБОРУ ТА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ ДНІПРОВСЬКОГО ХВОСТОСХОВИЩА

Леонід Рудаков

Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
49000, вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна  
канд. с.-г. наук, rudakov.l.m@dsau.dp.ua, orcid.org/0000-0001-7277-7220

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.38-52

**Анотація.** Наведено опис гідрографічної мережі на території хвостосховища «Дніпровське» (м. Кам'янське, Україна). Висвітлено зміни, що сталися за 150 річну історію на ділянці річки Дніпро між населеними пунктами Кам'янське і Таромське, де на сьогоднішній день у межиріччі Дніпра і Коноплянки на місці похованих річок (Хрещата, Жовтуха, Борзійка) зберігається 12 млн. т. радіоактивних відходів (РАВ). Для оцінки метеорологічних і кліматичних даних використано статистичні методи їх узагальнення та порівняння з даними Довідників по клімату. Встановлено, що за останні 17 років (2005 – 2021 рр.) спостережень середньорічна температура повітря в регіоні за даними опорних метеостанцій підвищилася щонайменше на 2°C. За цей же період збільшилося і випаровування з водної поверхні. Загальна кількість атмосферних опадів за рік у районі дослідження істотно не змінилася. При цьому відмічається нерівномірність і плямистість опадів та більш інтенсивний характер їх проходження (зливи). Добові суми атмосферних опадів по території Дніпропетровської області також мають велику варіативність, навіть для осінньо-зимового періоду, коли спостерігаються обложні опади, які охоплюють значні території. Спостережена особливість щодо відсутності взимку постійного снігового покриву за останні роки, сприяє збільшенню частоти циклів промерзання-відтавання, а влітку за рахунок збільшення інтенсивності і величини зливових дощів глибоке промочування, що негативно впливає на структуру і цільність покривних порід (фосфогіпсу) та захисних дамб хвостосховища РАВ. Інтенсифікація фільтраційних потоків крізь огорожувальні дамби та дно хвостосховища призводить до виносу радіоактивних речовин і підвищує екологічний ризик забруднення поверхневих і підземних вод. Оцінено ймовірні максимальні витрати і об'єми максимальних дощових паводкових вод для організованого їх відведення і недопущення фільтрації в ложе хвостосховища і подальшої міграції до русла річки Дніпро. Запропоновано влаштування протифільтраційного покриття та інженерно-технічних заходів задля поліпшення регулювання зволоженості цієї території та відведення надлишкової води повеней і паводків. Розроблені та обґрунтовані рекомендації з підвищення рівня екологічної безпеки хвостосховища.

**Ключові слова:** хвостосховище, радіоактивні відходи, екологічна безпека, гідрографічна мережа, зміна клімату.

### ВСТУП

Проблема накопичення значної кількості відходів гостро стоїть на сьогоднішній день. Так, згідно відкритих даних [1], станом на 2019 рік у світі загальний об'єм їх становив 55,83 млрд м<sup>3</sup>, а прогнозний показник у

2025 р. зросте до 69,38 млрд м<sup>3</sup>. Серед них особливої уваги потребують радіоактивні відходи (РАВ) та стічні води атомних електростанцій, які навіть за нормального сценарію експлуатації несуть радіаційну небезпеку для довкілля.

В Україні, за результатами інвентаризації хвостосховищ у 2016–2017 рр., проведеної в рамках проекту Федерального відомства Німеччини з охорони навколишнього середовища (UBA) на базі НТУ «Дніпровська політехніка» [2] обліковується 344 хвостосховища, де накопичилося понад 1,7 млрд т. відходів. Основним джерелом даних стали на той час відкриті реєстри місць видалення відходів в українських регіонах.

Згідно з уточненими даними [3], загальна кількість хвостосховищ в Україні становить 465. На сьогодні особливу загрозу для навколишнього середовища становлять хвостосховища, розташовані в зоні бойових дій на Донбасі [4].

Тривалий термін експлуатації накопичувачів відходів, антропогенні чинники і ризики аварій посилюються ще й природними факторами, основним із яких є зміна клімату. Глобальне потепління, що спостерігається в останні десятиліття, пов'язане зі змінами в компонентах гідрологічного циклу, таких як характер опадів, інтенсивності та екстремальності дощів, масштабне танення снігу і льоду, збільшення вмісту водяної пари в атмосфері, випаровування, зміни вмісту ґрунтових запасів вологи і річкового стоку [5-7].

Поряд із іншими врахування кліматичного чинника є важливим елементом при управлінні екологічною безпекою та гідрологічним режимом хвостосховищ та шламосховищ у майбутньому.

#### **Актуальність теми**

Проведення досліджень із визначення природних факторів, які можуть вивести зі стану рівноваги такий техногенний об'єкт, як хвостосховище РАВ, є важливим та актуальним для успішної розробки різних моделей управління для майбутньої рекультиватії, закриття та реабілітації багатьох радіаційно небезпечних об'єктів на території України.

#### **Мета досліджень**

Оцінка впливу змін кліматичних умов на гідрологічний режим та екологічну безпеку хвостосховища РАВ «Дніпровське» (м. Кам'янське, Україна). Для досягнення

мети необхідно: оцінити вплив змін клімату в досліджуваних умовах; дослідити гідрографічні і гідрогеологічні особливості території хвостосховища; оцінити ймовірнісні показники максимального стоку з поверхні хвостосховища для організованого відведення і уникнення фільтрації в його ложе. Новизна даної роботи полягає в дослідженні стоку нетипового водозбору (територія хвостосховища) для розробки і обґрунтування науково-практичних заходів з підвищення рівня його екологічної безпеки.

#### **Огляд літератури**

Всі компоненти гідрологічного циклу знають впливу природної мінливості, що ускладнює визначення довгострокових тенденцій. Крім того, спостерігається значний вплив на гідроекосистеми [8]. Існує також значна невизначеність у тенденціях гідрологічних змінних через регіональні особливості та неоднорідне покриття територій мережею метеостанцій та метеорологічних постів.

Останнім часом було проведено низку досліджень, спрямованих на виявлення тенденцій річкового стоку [9]. Деякі з них виявили стабільні тенденції в характеристиках річкового стоку, тоді як інші довели статистично значущі зв'язки між стоком і трендами зміни температури або кількості опадів. Але у багатьох випадках не вдалося встановити закономірності у швидкості течії та відокремити вплив змін, спричинених потеплінням клімату, від інших антропогенних впливів на річкові басейни. Методи, використані для виявлення залежностей, також вплинули на результати. Це пов'язано з використанням різних методів статистичних досліджень та різних підходів до встановлення меж тривалості природного та зміненого режимів стоку. Важливим обмеженням в аналізі трендів є відсутність послідовних та однорідних рядів річкового стоку. Існуючі ряди спостережень часто мають прогалини та відрізняються за тривалістю.

Науковці часто досліджують кліматологічні процеси за допомогою моделі глобальної

циркуляції або гідрологічної моделі, які дозволяють спрогнозувати і сприяти ефективному управлінню водними ресурсами [10].

Очікувані навантаження від зміни клімату в найближчі десятиліття на думку [11] торкнуться багатьох секторів економіки України і потребуватимуть нових технічних і технологічних рішень для їх ефективного усунення або мінімізації ризиків.

Дослідження змін гідрологічного режиму річок України та їх водозборів під впливом глобального потепління висвітлені в роботах [12, 13]. Значний вплив на стік чинить також антропогенна діяльність в басейнах річок [14]. Багато уваги приділено удосконаленню системи технічної діагностики та екологічно безпечної експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд на річках [15].

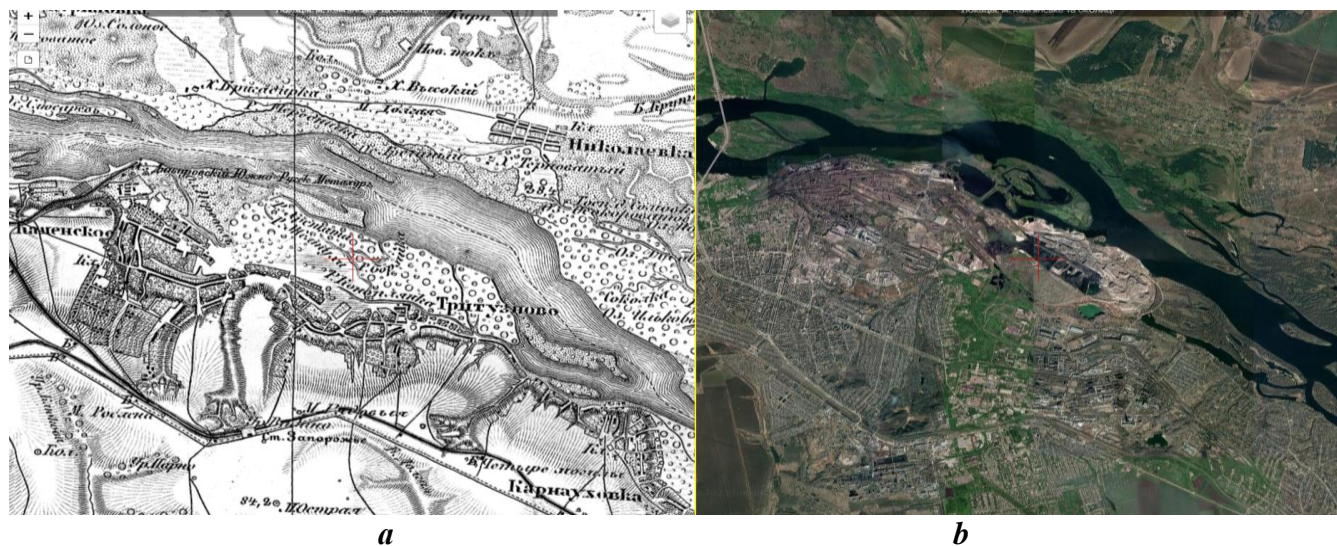
Дослідженнями [16] виявлено вплив хвостового господарства Іршанського ГЗК на гідродинамічний і гідрогеохімічний режими водоносних горизонтів на прилеглий території. Автори [17] використали питання практичної гідрогеології при проектуванні та управлінні хвостосховищами. Виходячи з цього, питання саме гідрологічних досліджень на накопичувачах відходів потребують поглибленого вивчення та подальшого розвитку.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

В гідрогеологічному відношенні територія хвостосховища улаштована на місці колишніх проток річки Дніпро. Дослідженнями [18] встановлено, що на цьому місці русло річки розділялось декількома протоками (рукавами), які пізніше були схороненні хвостосховищем. На картах трьохверстовках Шуберта на цьому місці були притоки р. Коноплянки і р. Дніпро. В будь-якому випадку описані гідрографічні умови вказують на значний вріз річкових долин, добру розробленість і дренажність порід підґрунтя. Це в кінцевому випадку підвищує ризик екологічної небезпеки внаслідок міграції ізотопів РАВ разом з ґрунтовою водою.

Відмітимо, що інженерний захист хвостосховища представлений лише захисними дамбами і покривним шаром фосфогіпсу. Спеціальними протифільтраційними засобами і пристроями хвостосховище не обладнано. Наявні захисні елементи за своїми фізико-механічними властивостями не задовольняють умовам безпеки відповідно до вимог сучасної нормативної бази щодо споруд такого типу.

Загальна проблема методології досліджень потребує постійного уточнення і оновлення через стрімкий розвиток наукових праць та інформації. Відстежити еволюційні процеси на місцевості зручно за картами трьохверстовками Шуберта (1875-1880 рр.), на момент побудови яких суттєвого антропогенного впливу на гідрографію не спостерігалось. Але зі зростанням виробництва збільшувалась кількість відходів, яка потребувала місця для їх відвантаження і зберігання. Мільйони тон промислових відходів розміщені в накопичувачах, відвалах підприємств і на міському звалищі. На сьогоднішній день ця карта у прив'язці на *OldMaps* [19] дає можливість порівняти ситуацію 150-річної давнини і сучасну (рис. 1). Ці дані свідчать, що гідрографія старого і сучасного Дніпра в історичній місцевості між населеними пунктами від Кам'янського до Таромського зазнала суттєвого антропогенного впливу з різних причин. У 1887 році бельгійські, польські, німецькі і французькі засновники Південно-Російського Дніпровського металургійного товариства розпочали будівництво найбільшого на той час металургійного заводу (тепер – «Камет-сталь»), а вже 2 березня 1889 року була введена в дію перша доменна піч. Упродовж 1920–1930-х років у місті було збудовано значну кількість потужних промислових підприємств, серед яких: вагонний цех металургійного заводу відокремленого у самостійне підприємство – вагонобудівний завод; введено в експлуатацію першу чергу Кам'янської державної районної електростанції; збудовано коксохімічний, цементний і азотно-



**Рис. 1.** Карта ділянки р. Дніпро між населеними пунктами Кам'янське і Таромське: **a** – трюхверстовка Шуберта 1875 р, **b** – сучасний стан 2021 р.

**Fig. 1.** Map of the Dnipro River section between Kamianske and Karnaukhivka: **a** – Schubert's three-vertex map of 1875, **b** – current state in 2021

туковий заводи. В 1939 році біля станції Баглій розпочато будівництво другого коксохімічного заводу.

Хвостосховище «Дніпровське» активно експлуатувалося у 1954-68 рр., містить 12 млн. т. відходів – хвостів загальною активністю  $1,4 \cdot 10^{15}$  Бк. Площа сховища 730 тис. м<sup>2</sup> і розміщено поблизу р. Дніпро, належить до рівнинно-наливного типу. Захисні дамби споруджено із суглинисто-піщаних ґрунтів і відходів коксохімічного заводу, протифільтраційними елементами не обладнано. Поверхня хвостосховища покрита шаром фосфогіпсу потужністю від 0,5 до 13,5 м. На деяких ділянках хвостосховища розміщені відходи коксохімічного і металургійного виробництва. Потужність експозиційної дози гамма-випромінювання на поверхні хвостосховища становить до 60 мкР/год, щільність потоку радону – 1,3–2,58 Бк/м<sup>2</sup>·с [20].

На річкову систему крім промисловості вплинув і розвиток енергетики. Після створення в 1932 році греблі Дніпровської ГЕС біля м. Запоріжжя почало наповнюватись Дніпровське водосховище на р. Дніпро, води якого за рахунок підпору та виклинювання

досягли і частково затопили прибережні території та внесли зміни в гідрографію досліджуваної місцевості. Пізніше в післявоєнні часи промислова зона зростала і розбудовувалась, з 1948 по 1991 рр. переробляв уранові руди колишній Придніпровський хімічний завод (ПХЗ), який, напевно, створив найбільш негативний вплив на навколишнє середовище.

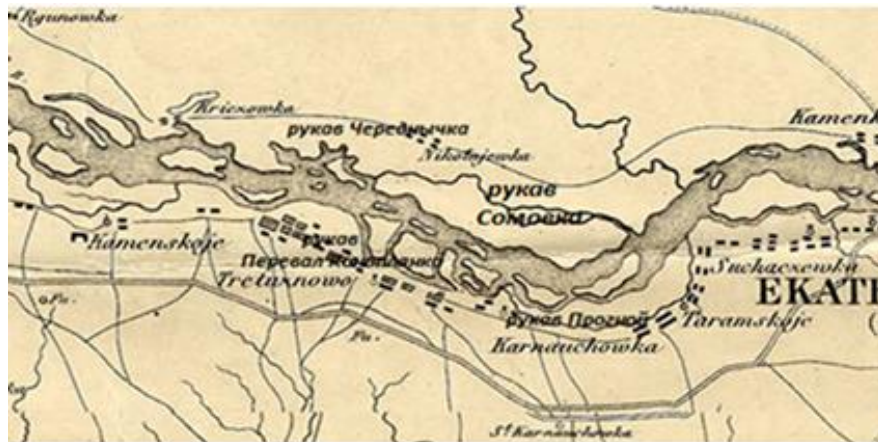
Аналізуючи багатий картографічний матеріал, Д. Яворницький у зазначеній місцевості назвав лише одну річку – праву притоку Дніпра – Тритузну [19]. На жаль, сьогодні немає надійних даних про те, де знаходилася ця річка, де її витік і де місце впадання її в Дніпро.

З вузькими дніпровськими рукавами (гілками річки за Д. Яворницьким) ситуація набагато простіша, оскільки ці географічні об'єкти показані на картах ХІХ століття. Рукави правого берега академік перелічив згори (за течією) донизу: «...Хрещата, Жовтуха, Борзійка і Коноплянка проти Гречаного острова та села Тритузного, Прогной проти острова Просереда та села Карнаухівки» [19].



Використовуючи методи порівняльного аналізу, виявлено, що на польській карті початку XIX століття, вочевидь запозиченій у Ф.Шуберта (рис. 2, а), що відображає стан ділянки Дніпра на початку XIX століття, всі перераховані гілки проточні й цілком обґрунтовано названі рукавами або на карті (див. рис. 2, а), або в описі [19]. Однак у середині XIX століття гідрографія Дніпра в районі Кам'янське-Таромське істотно змінюється. На карті

І. Стрельбицького, окрім Хрещатої, фактично немає жодної гілки: лівобережні Чередничка і Сомівка трансформувалися в затоки й озера. Правобережні Борзійка та Коноплянка перетворилися на затоки, Жовтуха – на заболочене озеро, а Прогной проти сіл Карнаухівки та Таромського як географічний об'єкт узагалі припинив існування (рис. 2, б).



а



б

**Рис. 2.** Карта ділянки р. Дніпро між населеними пунктами Кам'янське і Карнаухівка: *a* – польська карта початку XIX століття, *b* – карта І. Стрельбицького середини XIX століття  
**Fig. 2.** Map of the Dnipro River between Kamianske and Karnaukhivka: *a* – Polish map of the early nineteenth century, *b* – map by I. Strelbytskyi of the mid-nineteenth century

В даній місцевості оцінку змін клімату можливо виконати методами математичної статистики, при цьому необхідно мати достатньо тривалі репрезентативні статистичні ряди спостережень за основними метеорологічними показниками. Відомо, що при виборі місця розташування метеостанцій і організації їх роботи використовуються характерні (представницькі) умови для даної місцевості. Густота мережі станцій (шт./км<sup>2</sup>) значно різниться по території України від 0,15-0,19 (Рівненська; Вінницька) до 0,46, 0,70 і 0,80 (Львівська, Закарпатська і АР Крим). У Дніпропетровській області, де є 10 метеостанцій, цей показник становить 0,31, як і на більшій частині регіону (в межах 0,2-0,3), зона обслуговування кожної із них знаходиться в радіусі 20-30 км. Але, звичайно, при виборі місця розташування враховувався природний ландшафт, а не техногенний, і хвостосховища не існували в тому вигляді, в якому вони існують сьогодні. Тому, без влаштування поблизу або безпосередньо на хвостосховищі метеомайданчика, за існуючою мережею метеостанцій достатньо складно визначити та оцінити кількість опадів безпосередньо у хвостосховищах та навколо них.

При розрахунку дощових паводків використані емпіричні методи, які враховують закономірність, що максимальний стік зменшується зі збільшенням площі водозбору. Цей факт знайшов своє відображення в побудові редуційних рівнянь. Основні параметри таких рівнянь встановлюються на основі спостережень на ряді постів у різних районах [21]. Оскільки в штучному покриві хвостосховища відсутні ліси, болота та озера, то в даному випадку коефіцієнт редуції для стоку з водозбору дорівнює 1, тобто не враховується. Розрахункові витрати зливого стоку визначаються за різними формулами граничної інтенсивності стоку, залежно від розміру водозбору в різних природно-рельєфних зонах та наявності аналогів. Згідно [21] формула для визначення максимального стоку з малих водозборів при площах менше 50 км<sup>2</sup>

$$Q_{p\%} = H_{1\%} \varphi A_{1\%} \delta \lambda_{p\%} F, \quad (1)$$

де  $H_{1\%}$  – максимальний добовий шар опадів 1%-ої забезпеченості, який визначається за даними найближчих до водозбору метеостанцій;  $\varphi$  – збірний коефіцієнт стоку;  $A_{1\%}$  – максимальний модуль стоку 1%-ї забезпеченості, виражений в частках від добутку при  $\delta = 1$ ,  $\lambda_{p\%}$  – перехідний коефіцієнт від  $P = 1\%$  до іншої розрахункової забезпеченості.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Особливістю поверхні водозбору Дніпровського хвостосховища є його штучно сформований покрив із фосфогіпсу різного походження. Структура фосфогіпсу по площі не однорідна, ділянки не закріплені рослинністю піддаються вітровій і водній ерозії. Зміни клімату знижують стійкість, і, відповідно надійності конструкції як покривних порід (фосфогіпс) так і захисних дамб. В останні десятиріччя відсутність взимку постійного снігового покриву сприяє швидкому промерзанню і відтаванню його поверхні, а також відмічається збільшення кількості випадків зливових дощів, що сприяє порушенню зв'язків між окремими структурними частинками фосфогіпсу (рис. 3).

Аналіз даних про опади з метеостанцій Дніпровського регіону за останні 17 років (2005-2021 рр.) показує, що кількість опадів 50 мм і більше спостерігалася від двох разів (метеостанції Кривий Ріг і Дніпро) до шести-семи разів (метеостанції Комісарівка, Синельникове і Чаплине) за спостережний період.

При аналізі просторового розподілу річних сум опадів по території Дніпропетровської області спостерігається закономірність: вони поступово зменшуються із заходу і північного заходу на південь і південний схід. Це пов'язано з циклонічною діяльністю і надходженням повітряних мас.

З метою детальнішої оцінки зміни погодних умов опрацьовані метеорологічні дані з метеостанцій Губиниха і Комісарівка, які знаходяться від хвостосховища в радіусі





*a*



*b*



*c*

**Рис. 3.** Фото поверхні Дніпровського хвостосховища: *a* – загальний вигляд; *b* – тріщини в покривних фосфогіпсах; *c* – руйнація структури фосфогіпсу

**Fig. 3.** Photo of the surface of the Dnipro tailings pond: *a* – general view; *b* – cracks in the covering phosphogypsum; *c* – destruction of the phosphogypsum structure

60-65 км. Спостереження на метеостанціях велись з інтервалами в 3 години (інтернет-ресурс *Rp5*), середньодобові значення температур обчислено шляхом знаходження середнього арифметичного, а суми атмосферних опадів шляхом додавання за добу (табл. 1).

Для порівняння отриманих кліматичних характеристик прийняті дані з Довідників по клімату, які отримані на середину-кінець 60-х років минулого сторіччя. Так, норма опадів для метеостанції Губиниха становить 565 мм, а для МС Комісарівка 492 мм. Що стосується термічного режиму повітря, то норма середньорічної температури повітря по метеостанціям відповідно – 7,5 і 7,8 °С. Дані табл. 1 свідчать про зростання середньорічної температури повітря за обраними метеостанціями на 2,0–2,3 °С.

Для оцінки просторового розподілу добових сум атмосферних опадів по території області виконано випадкову вибірку (по три за різні роки і сезони) за даними 6 метеостанцій Дніпропетровської області (табл.2).

Із аналізу даних табл. 2 можна виділити, що закономірність розподілу опадів за територією відсутня навіть для такого сезону як осінь, для якої характерні обложні, тривалі опади на великій території. При цьому різниця в кількості опадів достатньо суттєва, наприклад 18.10.2011 р. від 4,5 мм на МС Комісарівка до 27 мм на МС Чаплине, або 18.10.2013 р. від 5 мм на МС Чаплине до 25 мм біля МС Нікополь.

**Табл. 1.** Суми атмосферних опадів за рік і середньорічні значення температур повітря (на метеостанціях Губиниха і Комісарівка)

**Table 1.** Annual precipitation and average annual air temperature (at Gubynikha and Komisarivka weather stations)

| № з/п | Рік     | Опади, мм |             | Температура повітря, °С |             |
|-------|---------|-----------|-------------|-------------------------|-------------|
|       |         | Губиниха  | Комісарівка | Губиниха                | Комісарівка |
| 1     | 2005    | 563,6     | 453,8       | 9,4                     | 9,4         |
| 2     | 2006    | 503,5     | 380,2       | 8,6                     | 8,7         |
| 3     | 2007    | 546,2     | 473         | 10,3                    | 10,6        |
| 4     | 2008    | 481,6     | 592,5       | 9,5                     | 9,5         |
| 5     | 2009    | 624,3     | 456,4       | 9,6                     | 9,8         |
| 6     | 2010    | 662,4     | 657,9       | 10,2                    | 10,1        |
| 7     | 2011    | 381,2     | 441,1       | 8,7                     | 8,8         |
| 8     | 2012    | 529,4     | 480,9       | 10                      | 10          |
| 9     | 2013    | 422       | 463,7       | 10,1                    | 10,1        |
| 10    | 2014    | 459,9     | 486         | 9,7                     | 9,7         |
| 11    | 2015    | 631,1     | 686,9       | 10,2                    | 10,1        |
| 12    | 2016    | 763,9     | 737,1       | 9,5                     | 9,7         |
| 13    | 2017    | 567,5     | 710,9       | 10,1                    | 10          |
| 14    | 2018    | 778,7     | 1069        | 9,9                     | 9,8         |
| 15    | 2019    | 432,5     | 507,3       | 10,7                    | 10,5        |
| 16    | 2020    | 471,7     | 337,2       | 10,9                    | 11,1        |
| 17    | 2021    | 559       | 679         | 9,5                     | 9,5         |
|       | Середнє | 551,7     | 565,5       | 9,8                     | 9,8         |



**Табл. 2.** Суми добових значень атмосферних опадів, мм  
**Table 2.** Sums of daily precipitation values, mm

| Дата       | Метеостанція |             |              |         |            |          |
|------------|--------------|-------------|--------------|---------|------------|----------|
|            | Губиниха     | Комісарівка | Синельникове | Чаплине | Лошкарівка | Нікополь |
| Зима       |              |             |              |         |            |          |
| 08.01.2013 | 2,5          | 0,9         | 9,0          | 14,0    | 2,3        | 7,0      |
| 28.01.2014 | 3,8          | 18,0        | 14,0         | 19,0    | 10,0       | 6,0      |
| 17.01.2016 | 12,3         | 22,0        | 0            | 12,0    | 22,0       | 30,0     |
| Весна      |              |             |              |         |            |          |
| 09.03.2013 | 10,0         | 3,4         | 12,0         | 16,0    | 8,0        | 16,0     |
| 10.04.2014 | 19,0         | 12,0        | 9,0          | 9,8     | 7,0        | 2,0      |
| 18.04.2015 | 17,0         | 13,0        | 4,3          | 5,3     | 13,0       | 2,0      |
| Літо       |              |             |              |         |            |          |
| 04.07.2011 | 12,0         | 24,0        | 54,0         | 3,0     | 4,0        | 1,0      |
| 02.06.2012 | 8,0          | 22,0        | 6,0          | 7,0     | 10,0       | 10,8     |
| 04.07.2012 | 0,6          | 8,0         | 29,0         | 23,0    | 8,0        | 6,3      |
| Осінь      |              |             |              |         |            |          |
| 18.10.2011 | 10,7         | 4,5         | 9,0          | 27,0    | 7,0        | 8,0      |
| 18.10.2013 | 18,0         | 16,0        | 15,0         | 5,0     | 17,0       | 25,0     |
| 20.09.2016 | 6,0          | 0           | 18,0         | 3,0     | 0          | 18,0     |

Ці дані ще раз підтверджують явище локалізованого та плямистого випадання грозових опадів з великою інтенсивністю незалежно від пори року, що призводить до ерозійних процесів в фосфогіпсах не тільки на поверхні хвостосховища, а і біля захисних дамб і в них самих.

Для оцінки характеристик стоку складові формули (1) прийняті наступним чином: площа поверхні хвостосховища та прилеглої території визначена за допомогою ресурсу *Google Earth Pro* і дорівнює 0,9462 км<sup>2</sup>.

Прийнятий максимальний добовий шар опадів в 50 мм, збірний коефіцієнт стоку II категорії штучно-насипаної поверхні при площі водозбору 0,1 – 1,0 км<sup>2</sup> прийнято рівним 0,7. Значення максимального модуля стоку 1%-ї забезпеченості  $A_{1\%} = 0,47 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ . Значення перехідних коефіцієнтів згідно нормативів прийняті для забезпеченості 5% рівним 0,42, а для 10% – 0,30 відповідно.

Результати розрахунків максимальних витрат з площі водозбору хвостосховища прийнятої забезпеченості зведені в табл. 3.

**Табл. 3.** Максимальні витрати заданої забезпеченості з площі водозбору хвостосховища  
**Table 3.** Maximum flows of a given supply from the tailings pond catchment area

| Забезпеченість, $P, \%$                                   | 1    | 5    | 10   |
|---|------|------|------|
| $\lambda_{p\%}$   | 1,00 | 0,42 | 0,30 |
| Максимальна витрата, $Q_{p\%}, \text{ м}^3/\text{с}$      | 15,6 | 6,54 | 4,67 |
| Модуль стоку, $q, \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ | 16,5 | 6,91 | 4,94 |

Для організованого відведення надлишкової води з поверхні хвостосховища запропоновано лотки – гідротехнічні споруди незамкнутого поперечного перерізу для безнапірного руху води. Вони можуть поставлятися в комплекті з чавунною решіткою і без неї.

Зовнішні розміри типового найбільшого лотка в мм: 510×380×1000 (висота, ширина, довжина); внутрішні відповідно: 440×300×1000. Внутрішній переріз відповідає класу DN 300 пропускна площа складає близько 0,132 м<sup>2</sup>.

Пропускна здатність водопровідних каналів або лотків визначається за допомогою формули Шезі. Вихідними даними для розрахунку є наступні параметри:

- форма поперечного перерізу русла лотка прийнята прямокутна;
- глибина води –  $h_{max} = 0,44$  м;
- поздовжній похил русла –  $I = 0,005$ .

При розрахунку гідравлічного радіуса використовується формула

$$R = w/x, \quad (2)$$

де  $R$  – гідравлічний радіус, м;  $w$  – площа живого перерізу потоку, м<sup>2</sup>;  $x$  – змочений периметр, м.

В нашому випадку  $R=0,132/1,18 = 0,112$  м.

Середня швидкість течії води (м/с) визначається із співвідношення

$$V = C\sqrt{R \cdot I}, \quad (3)$$

де  $C$  – коефіцієнт Шезі ( $C = 68,1$ );  $I$  – поздовжній похил русла.

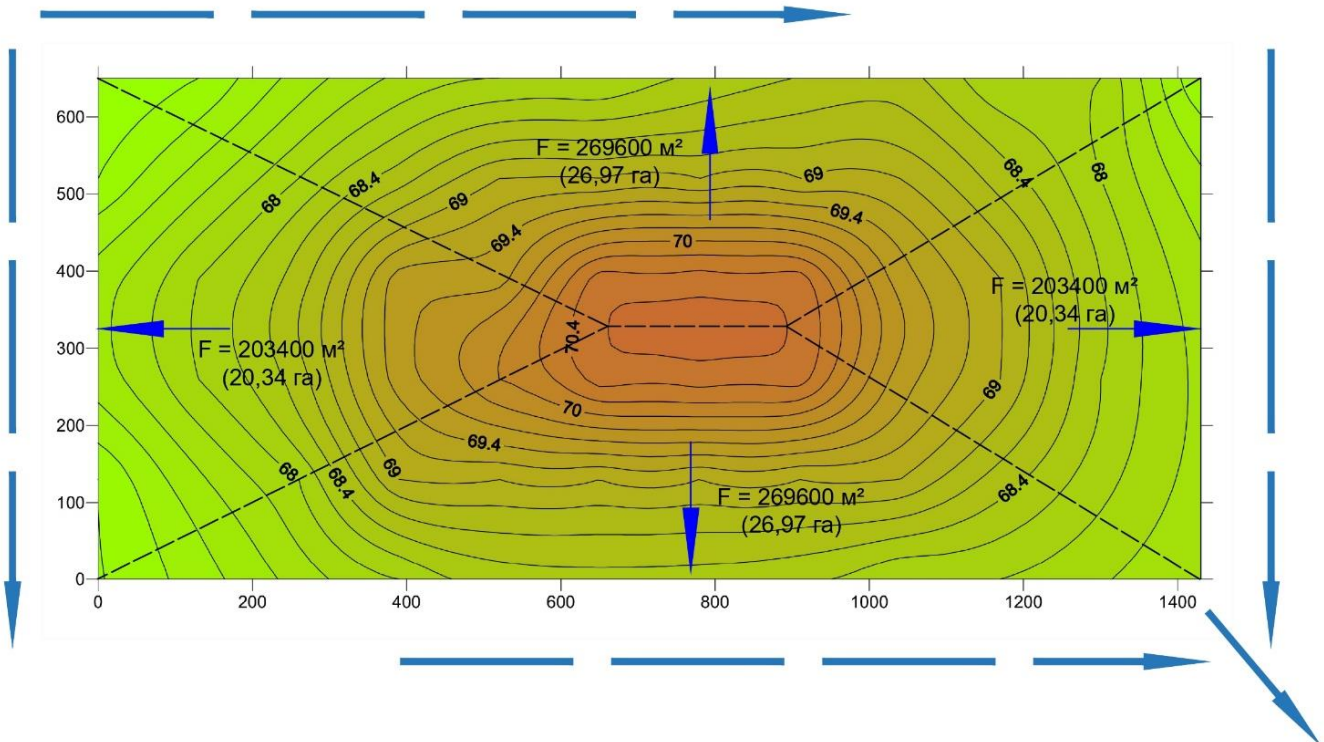
$$V = 68,1\sqrt{0,112 \cdot 0,005} = 1,61 \text{ м/с.}$$

Витрата води в каналі або лотці в м<sup>3</sup>/с визначається із співвідношення

$$Q = w \cdot V. \quad (4)$$

В даному випадку  $Q = 0,213$  м<sup>3</sup>/с.

При організованому відведенні паводкової води з поверхні хвостосховища вся територія розділена на сектори (рис. 4).



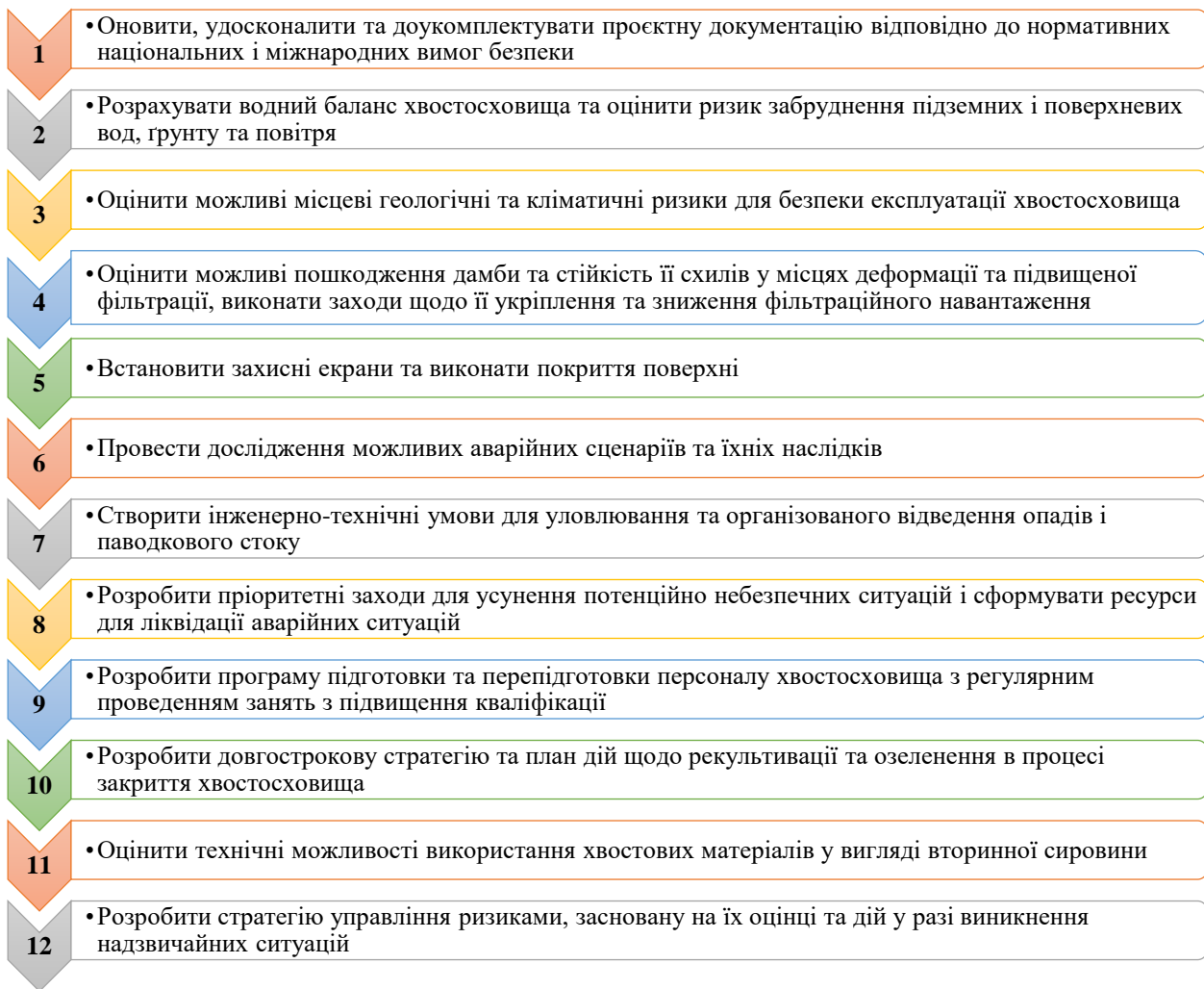
**Рис. 4.** Схематична модель розподілу площ хвостосховища на сектори

**Fig. 4.** Schematic model of the tailing dump area distribution into sectors

Результати гідравлічного розрахунку лотка вказують на те, що пропускна здатність його недостатня для відведення максимальних витрат заданої забезпеченості. Але при цьому слід врахувати, що, по-перше, максимальні витрати обчислені на всю площу хвостосховища, а водозбір розділений на чотири сектори, що зменшить надходження води до лотка. По-друге, частина стоку буде акумульована в захисній товщі хвостосховища і стікатиме не відразу а з певним відтермінуванням. По-третє, по довжині розміри лотків

можна збільшувати від витоків, а пригирлові ділянки можна виконати за індивідуальним проектом.

З урахуванням попередньо виконаної оцінки стану хвостосховища з використанням методу *Контрольного списку* [22] та результатів гідрологічних досліджень, для підвищення рівня екологічної безпеки при обслуговуванні і рекультивації даного об'єкту, запропонований та обґрунтований перелік організаційно-технічних заходів (рис.5).



**Рис. 5.** Стратегічний план заходів по підвищенню рівня екологічної безпеки хвостосховища РАВ «Дніпровське»

**Fig. 5.** Strategic plan of measures to improve the environmental safety of the Dneprovske radioactive waste storage facility



Реалізація розглянутого підходу до оцінювання рівня антропогенних та природних елементів впливу на безпеку хвостосховища дозволить у майбутньому розробляти ефективні рішення щодо підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації, рекультивації і реабілітації таких споруд.

## ВИСНОВКИ

Результати дослідження засвідчили значний вплив змін кліматичних умов на гідрологічний режим водозбору території Дніпровського хвостосховища. Аналіз картографічного матеріалу більш ніж за півторасторічний період виявив суттєві зміни антропогенного та природного характеру як у гідрографічній мережі так, і гідрологічному режимі досліджуваної території.

Ознаки глобального потепління в досліджуваних умовах відмічені в підвищенні середньорічної температури повітря за період 2005–2021 рр. більш ніж на 2<sup>0</sup>С в порівнянні з кліматичними нормами минулого сторіччя. Поряд з цим виявлені значні зміни в режимі випадіння атмосферних опадів, що проявляються в збільшенні частоти зливових дощів з великим шаром і високою інтенсивністю та практичною відсутністю постійного снігового покриву в зимовий період.

В перспективі для прийняття подальших конструктивних рішень з рекультивації, недопущення фільтрації в ложе хвостосховища та організованого відведення надлишкової води з поверхні хвостосховища оцінено показники максимального стоку різної забезпеченості та запропоновано план заходів з підвищенню рівня екологічної безпеки хвостосховища.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Global Tailings Portal.** URL : <https://tail-ing.grida.no/map/data/>
2. **Rudakov D., Nikolaieva I.** Raising Knowledge among Students and Teachers on Tailings Safety and its Legislative Review in Ukraine. Umweltbundesamt, UBA, 2017. 64 p. URL : [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04\\_texte\\_34-2018\\_tailings\\_safety\\_ukraine.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_texte_34-2018_tailings_safety_ukraine.pdf)

[weltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04\\_texte\\_34-2018\\_tailings\\_safety\\_ukraine.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_texte_34-2018_tailings_safety_ukraine.pdf)

3. **Ніколаєва І., Ленько Г., Лободзінський О.** Хвостосховища Донбасу. Київ, 2019. 52 с. URL : <https://www.osce.org/files/f/documents/b/b/456847.pdf>
4. **Листопад О.** Смертельні озера Донбасу: отруєння загрожує навіть Азовському морю // GreenPost media, 05.03.2020. URL : <https://greenpost.ua/news/smertelni-ozera-donbasu-i2462>
5. **Chushkina I., Napich H., Matukhno O., Pavlychenko A., Kovalenko V., Sherstiuk Y.** Loss of small rivers across the steppe: climate change or the hand of man? Case study of the Chaplynka river / / International Journal of Environmental Studies, 2024. 81(1). P. 260-274. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314853>
6. **Snizhko S., Bertola M., Ovcharuk V., Shevchenko O., Didovets I., Blöschl G.** Climate impact on flood changes – an Austrian-Ukrainian comparison // Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2023, 71(3), P. 271–282. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0017> (date of access: 26.03.2025).
7. **Didovets I., Lobanova A., Bronstert A., Snizhko S., Maule C., Krysanova V.** Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Three Representative Ukrainian Catchments Using Eco-Hydrological Modelling // Water, 2017, 9(3), 204. <https://doi.org/10.3390/w9030204> (date of access: 26.03.2025).
8. **Afanasyev S. O.** Impact of War on Hydroecosystems of Ukraine: Conclusion of the First Year of the Full-Scale Invasion of Russia (a Review) // Hydrobiological Journal, 2023, 59(4), P. 3–16. <https://doi.org/10.1615/hydrobj.v59.i4.10>
9. **Zaghloul M. S., Ghaderpour E., Dastour H., Farjad B., Gupta A., Eum H., Achari G., Hassan Q. K.** Long Term Trend Analysis of River Flow and Climate in Northern Canada // Hydrology, 2022, 9(1), P. 197. <https://doi.org/10.3390/hydrology9110197>
10. **Belvederesi C., Zaghloul M. S., Achari G., Gupta A., Hassan Q. K.** Modelling river flow in cold and ungauged regions: a review of the purposes, methods, and challenges // Environmental Reviews, 2022, 30(1), 159–173. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0043>
11. **Romashchenko M., Faybishenko B., Onopriienko D., Napich H., Novitskyi R., Dent D., Saidak**

**R., Usatyi S., Roubik H.** Prospects for restoration of Ukraine's irrigation system // *Water International*, 2025, P. 1–17. <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>

12. **Вишневський В. І., Куций А. В.** Багаторічні зміни водного режиму річок України / В. І. Вишневський, А. В. Куций. Київ: Наукова думка, 2022. 269 с.

13. **Вишневський В. І., Куций А. В.** Надзвичайні ситуації в Україні / В. І. Вишневський, А. В. Куций. Київ: Ніка-Центр, 2024. 288 с.

14. **Andreev V., Napich H., Kovalenko V.** Impact of economic activity on geocological transformation of the basin of the Zhovtenka River (Ukraine) // *Journal of Geology, Geography and Geocology*, 2021, 30(1), 3–12. <https://doi.org/10.15421/112101>

15. **Napich H., Pikarenia D., Orlinska O., Kovalenko V., Rudakov L., Chushkina I., Maksymova N., Makarova T., Katsevych V.** Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 2(10 (116)), 18–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167>

16. **Тимошук В. І., Загриценко А. М., Шерстюк С. А., Чушкіна І. В., Деревягіна Н. І.** Прогноз гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів підземних вод в умовах проєктованого будівництва та експлуатації хвостосховища // *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2023. № 4. С. 208–216. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.26>

17. **Fortuna J., Waterhouse J., Chapman P., Gowan M.** Applying Practical Hydrogeology to Tailings Storage Facility Design and Management // *Mine Water and the Environment*, 2021, 40(1), 50–62. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00739-x> (date of access: 26.03.2025).

18. **Яворницький Д. І.** Вольності запорозьких козаків. Санкт-Петербург, 1898. 405 с.

19. OldMaps.com.ua. Електронний ресурс. URL : <https://oldmaps.dp.ua/kamianske/?left-map=1875#14/48.5127/34.6769>

20. **Uranium** sorption from radioactive waste of uranium ore processing at Pridneprovsk Chemical Plant // *Geo-Technical Mechanics*. 2021. 157. P. 212–222. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.157.212> (date of access: 27.03.2025).

21. **Литовченко О. Ф.** Інженерна гідрологія та регулювання стоку. Київ: Вища школа. 1999. 360 с.

22. **Рудаков Л. М.** Оцінювання рівня екологічної безпеки хвостосховища радіоактивних відходів із застосуванням контрольних списків // *Екологічні науки*, 2 (47), С. 107–111. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.17>

## REFERENCES

1. **Global Tailings Portal.** <https://tail-ing.grida.no/map/data/>

2. **Rudakov, D., & Nikolaieva, I. (2017).** *Raising Knowledge among Students and Teachers on Tailings Safety and its Legislative Review in Ukraine.* Retrieved from [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04\\_texte\\_34-2018\\_tailings\\_safety\\_ukraine.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_texte_34-2018_tailings_safety_ukraine.pdf)

3. **Nikolaeva, I., Lenko, G., & Lobodzinsky, O. (2019).** Tailings reservoirs of Donbas. Kyiv. Retrieved from <https://www.osce.org/files/f/documents/b/b/456847.pdf> [in Ukrainian].

4. **Lystopad, O. (2020).** Deadly lakes of Donbas: poisoning threatens even the Sea of Azov. GreenPost media. Retrieved from <https://greenpost.ua/news/smertelni-ozera-donbasu-i2462> [in Ukrainian].

5. **Chushkina, I., Napich, H., Matukhno, O., Pavlychenko, A., Kovalenko, V., & Sherstiuk, Y. (2024).** Loss of small rivers across the steppe: climate change or the hand of man? Case study of the Chaplynka river. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1). 260–274. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314853>

6. **Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Didovets, I., & Blöschl, G. (2023).** Climate impact on flood changes – an Austrian-Ukrainian comparison. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(3), 271–282. <https://doi.org/10.2478/joh-2023-0017> (date of access: 26.03.2025).

7. **Didovets, I., Lobanova, A., Bronstert, A., Snizhko, S., Maule, C., & Krysanova, V. (2017).** Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Three Representative Ukrainian Catchments Using Eco-Hydrological Modelling. *Water*, 9(3), 204. <https://doi.org/10.3390/w9030204> (date of access: 26.03.2025).

8. **Afanasyev, S. O. (2023).** Impact of War on Hydroecosystems of Ukraine: Conclusion of the First Year of the Full-Scale Invasion of Russia (a Review). *Hydrobiological Journal*, 59(4), 3–16. <https://doi.org/10.1615/hydrobj.v59.i4.10>

9. **Zaghloul, M. S., Ghaderpour, E., Dastour, H., Farjad, B., Gupta, A., Eum, H., Achari, G., & Hassan, Q. K. (2022).** Long Term Trend Analysis of River Flow and Climate in Northern Canada. *Hydrology*, 9(11), 197. <https://doi.org/10.3390/hydrology9110197>
  10. **Belvederesi, C., Zaghloul, M. S., Achari, G., Gupta, A., & Hassan, Q. K. (2022).** Modelling river flow in cold and ungauged regions: a review of the purposes, methods, and challenges. *Environmental Reviews*, 30(1), 159–173. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0043>
  11. **Romashchenko, M., Faybishenko, B., Onopriienko, D., Hapich, H., Novitskyi, R., Dent, D., Saidak, R., Usatyi, S., & Roubik, H. (2025).** Prospects for restoration of Ukraine’s irrigation system. *Water International*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>
  12. **Vyshnevskyi, V. I., & Kutsyi, A. V. (2022).** *Long-term changes in the water regime of rivers of Ukraine* Kyiv: Naukova Dumka, 2022. 269 p. [in Ukrainian].
  13. **Vyshnevskyi, V.I., & Kutsyi, A. V. (2024).** *Emergency situations in Ukraine*. Kyiv: Nika-Centre, 2024. 288 c. [in Ukrainian].
  14. **Andreev, V., Hapich, H., & Kovalenko, V. (2021).** Impact of economic activity on geoecological transformation of the basin of the Zhovtenka River (Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(1), 3–12. <https://doi.org/10.15421/112101>
  15. **Hapich, H., Pikarenia, D., Orlinska, O., Kovalenko, V., Rudakov, L., Chushkina, I., Maksymova, N., Makarova, T., & Katsevych, V. (2022).** Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (116)), 18–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167>
  16. **Tymoshchuk, V. I., Zagritsenko, A. M., Sherstyuk, Ye. A., Chushkina, I. V., & Derevyagina, N. I. (2023).** Forecasting of hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of underground waters in the conditions of the projected construction and operation of the tailings storage facility. *Tavriyskyi naukovi vestnik. Series: Technical sciences*. 4. 208-216. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.26> [in Ukrainian].
  17. **Fortuna, J., Waterhouse, J., Chapman, P., & Gowan, M. (2021).** Applying Practical Hydrogeology to Tailings Storage Facility Design and Management. *Mine Water and the Environment*, 40(1), 50-62. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00739-x> (date of access: 26.03.2025).
  18. **Yavornitsky, D. I. (1898).** *Liberties of the Zaporozhian Cossacks*. St. Petersburg, 1898. [in Ukrainian].
  19. **OldMaps.com.ua.** Retrieved from <https://oldmaps.dp.ua/kamianske/?left-map=1875#14/48.5127/34.6769>
  20. **Uranium sorption from radioactive waste of uranium ore processing at Pridneprovsk Chemical Plant (2021).** *Geo-Technical Mechanics*. 157. 212–222. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.157.212> (date of access: 27.03.2025).
  21. **Lytovchenko, O. F. (1999).** *Engineering hydrology and flow regulation*. Kyiv: Higher school. [in Ukrainian].
  22. **Rudakov, L. M. (2023).** Assessment of the level of environmental safety of a radioactive waste tailing pond using checklists. *Ecological Sciences*, 2(47), 107-111. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.17> [in Ukrainian].
- Подяки.** Автор вдячний ДП «Бар’єр» за можливість доступу до сайту та роботи зі звітами про попередні дослідження.
- Конфлікт інтересів.**  
Немає



## **Impact of climate change on the hydrological regime of the catchment and environmental safety of the Dnipro tailings dump**

*Leonid Rudakov*

**Abstract.** The article describes the hydrographic network on the territory of the Dniprovskе tailings dump (Kamianske, Ukraine). The article highlights the changes that have occurred over the 150-year history of the Dnipro River section between the settlements of Kamianske and Taromske, where 12 million tonnes of radioactive waste (RW) are currently stored in the Dnipro and Konoplyanka rivers at the site of buried rivers (Khreshchatka, Zhovtukha, Borziyka). To assess meteorological and climatic data, statistical methods of their generalization and comparison with the data of the Climate Reference Books were used. It has been established that over the past 17 years (2005-2021) of observations, the average annual air temperature in the region, according to the data of reference weather stations, has increased by at least 20°C. Over the same period, evaporation from the water surface has also increased. The total amount of precipitation per year in the study area has not changed significantly. At the same time, uneven and spotty precipitation and a more intense nature of precipitation (showers) are noted. The daily amount of precipitation in the Dnipro region is also highly variable, even for the autumn-winter period, when there is a siege precipitation covering large areas. The observed peculiarity of the absence of permanent snow cover in winter in recent years contributes to an increase in the frequency of freeze-thaw cycles, and in summer, due to an increase in the intensity and magnitude of storm rains, deep soaking, which negatively affects the structure and integrity of the cover rocks (phosphogypsum) and protective dams of the radioactive waste tailing pond. Intensification of filtration flows through the containment dams and the tailing pit bottom leads to the removal of radioactive substances and increases the environmental risk of surface and groundwater contamination. Probable maximum flow rates and volumes of maximum rain floodwaters were estimated for their organized removal and prevention of filtration into the tailing pit and subsequent migration to the Dnipro River bed. It is proposed to install an impervious cover and engineering measures to improve the regulation of humidity in this area and drain excess water from floods and floods. Recommendations to improve the environmental safety of the tailings dump were developed and substantiated.

**Key words:** tailing pond, radioactive waste, environmental safety, hydrographic network, climate change.

*Стаття надійшла до редакції 19.03.2025*