

УДК 550.8: 622.8

Leonid Rudakov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Water Engineering
ORCID ID: 0000-0001-7277-7220 *e-mail*: rudakov.l.m@dsau.dp.ua

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

ENVIRONMENTAL AND OPERATIONAL SAFETY OF TAILING STORAGE FACILITIES: ANALYSIS OF ACCIDENTS, CAUSES AND TECHNICAL STATE DIAGNOSTIC METHODS

Abstract. *A number of high-profile industrial accidents occurred at sludge and tailings storage facilities in different countries of the world are considered. The problem of ecological and technogenic danger of operating such objects, which leads to significant casualties among the civilian population, serious economic losses and harms the surrounding natural environment, is illustrated. The main causes of emergency situations have been established and analysed, it will help to reduce the risk of accidents and to minimize negative environmental consequences for similar facilities in Ukraine. The retrospective review covers the period from 1960 to 2022. During this time, about 150 cases of soil dams' destruction in waste storage facilities were recorded. The different tendency in the frequency of accidents is noted. In particular, during the period from 1960 to 2009, there were 98 accidents with an average frequency of nearly two (1.98) per year. Over the last decade (2010-2020), the number of accidents reached 36 cases, and their frequency almost doubled to 3.6 accidents per year. Over the past two years, from the beginning of 2021 to December 2022, 10 accidents have already been registered. The vast majority of accidents during this period occurred in 34 countries of the world. The largest number of them was noted in the USA (22.4%), China (10.4%), Brazil (7.5%), Chile (6.7%), the Philippines (6.0%), Canada (5.2 %), Great Britain (4.5%) and other countries. Studies note jumps in the increase of accidents that have ten-year trends (1975, 1985, 1995, 2005). The general tendency of mass accidents since the beginning of 2015 is shown, which is substantiated by the expired terms of operation of many mining and ore enterprises (mines) and significant (exceeding normative) terms of operation of tailings storage facilities, which in some places were left without proper supervision and care. It was established that a violation of the dam slope stability (37%), an overflow of the designed capacity of the tailings storage facility (12%), seismic activity (11%), etc., are the main causes of accidents. A review of modern approaches to the management of dangerous anthropogenic objects and methods of diagnosing the technical condition of such structures was conducted. The use of a complex of organizational and technical solutions about the implementing the modern methods of assessment and control the technical condition of waste storage facilities at various levels of their operation and stages of the life cycle is proposed.*

Key words: *tailings storage facility; anthropogenic accident; soil dam; mining industry waste; diagnostics of technical condition.*

Л.М. Рудаков

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

ЕКОЛОГІЧНА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНА БЕЗПЕКА ХВОСТОСХОВИЩ: АНАЛІЗ АВАРІЙ, ПРИЧИН ТА МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

***Анотація.** Розглянуто ряд резонансних промислових аварій, які сталися на шламо- та хвостосховищах різних країн світу. Показано проблему екологічної і техногенної небезпеки експлуатації таких об'єктів, що призводить до значних жертв серед цивільного населення, серйозних економічних збитків і завдає шкоди навколишньому природному середовищу. Встановлено та проаналізовано основні причини виникнення аварійних ситуацій, що дозволить зменшити ризик виникнення аварій та мінімізувати негативні екологічні наслідки для аналогічних об'єктів на території України. Ретроспективний огляд охоплює період з 1960 по 2022 роки. За цей час зафіксовані близько 150 випадків руйнування ґрунтових дамб накопичувачів відходів. Відмічається різна тенденція виникнення частоти аварій. Зокрема, у період з 1960 по 2009 рік трапилось 98 аварій з частотою в середньому майже дві (1,98) на рік. За останнє десятиріччя (2010–2020 рр.) кількість аварій досягла 36 випадків, а їх частота збільшилась майже удвічі – до 3,6 аварій на рік. За останні два роки, з початку 2021 по грудень 2022 року, вже зареєстровано 10 аварій. Переважна більшість аварій за цей період сталися в 34 країнах світу. Найбільша їх кількість відмічена в США (22,4 %), Китаї (10,4%), Бразилії (7,5%), Чилі (6,7%), Філіппінах (6,0%), Канаді (5,2%), Великій Британії (4,5%) та інших країнах. Дослідженнями відмічаються сплески збільшення аварій, які мають десятирічні тренди (1975 р., 1985 р., 1995 р., 2005 р.). Показана загальна тенденція масових аварій з початку 2015 року, що обґрунтовується вичерпними термінами роботи багатьох гірничо-рудних підприємств (копалень) та значними (понад нормативними) термінами експлуатації хвостосховищ, які подекуди залишилися без належного нагляду і догляду. Встановлено, що основними причинами аварій є порушення стійкості схилу дамби (37%), переповерхнення проєктної ємності хвостосховища (12%), сейсмічні прояви (11%) тощо. Проведено огляд сучасних підходів до управління техногенно-небезпечними об'єктами та методів діагностики технічного стану таких споруд. Запропоновано використання комплексу організаційних та технічних рішень щодо використання сучасних методів оцінювання та контролю за технічним станом накопичувачів відходів на різних рівнях їх експлуатації та стадіях життєвого циклу.*

***Ключові слова:** хвостосховище; техногенна аварія; ґрунтова дамба; відходи гірничодобувної промисловості; діагностика технічного стану.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.66-84>

Вступ

Видобуток корисних копалин та виробнича діяльність підприємств теплоенергетики, металургійної, хімічної та інших галузей промисловості спричиняють формування значної кількості відходів. За даними [1] близько 160 тисяч га території України вкриті промисловими відходами. Щорічно в Україні утворюється близько 8 млн тонн золошлакових відходів, а їх зберігання супроводжується низкою вкрай негативних наслідків для довкілля

та здоров'я людини. Обсяги вже накопичених відходів сягають майже 300 млн тонн. В той же час в Україні близько 300 виведених з експлуатації і нерекультивованих кар'єрів, а також мільйони гектарів площ шламо- та хвостосховищ [2, 3].

Надзвичайні ситуації на хвостосховищах, які накопичують великі обсяги відходів гірничодобувної промисловості, можуть призводити до забруднення навколишнього природного середовища. Вони являють серйозну загрозу для людей та довкілля, особливо у разі неналежного проектування, поводження з хвостами або управління цим господарством.

На підставі добре задокументованих випадків аварій, з досвіду світової та вітчизняної експлуатації, можна проаналізувати основні причини і фактори їх виникнення. Це обґрунтовує актуальність та дозволяє проводити дослідження з пошуку організаційно-технічних заходів та розробки нових підходів для підвищення рівня екологічної безпеки хвостосховищ.

Постановка проблеми

Із 344 наявних в Україні хвостосховищ усі, майже без виключення, збудовані із ґрунтових матеріалів. Тривала експлуатація і не завжди належний контроль знижують рівень екологічної безпеки навіть законсервованих і виведених із експлуатації хвостосховищ. При цьому деякі з них просто безвідповідально кинуті і несуть не меншу загрозу, ніж діючі.

Техногенні аварії на хвостосховищах продовжують відбуватися як у країнах, що розвиваються, так і в розвинених, що вимагає удосконалення, розробки та застосування нових підходів і методів до управління такими техногенними об'єктами [4, 5]. Руйнування конструкцій та аварії, хоч і рідкісні, але продовжують відбуватися з частотою, що перевищує очікування суспільства [6–8].

Питання утилізації відходів, недопущення їх міграції в навколишнє середовище та забезпечення екологічної безпеки на сьогоднішній день є надзвичайно актуальним [9]. Ознайомлення, вивчення та глибокий аналіз причин виникнення аварійних ситуацій на тих підприємствах, які мають технічні чи конструктивні недоліки, зазнали руйнувань і т.д., дозволить зменшити кількість та попередити наслідки масштабних аварій і катастроф у майбутньому [10]. З усієї сукупності світового реєстру дамб [11], тільки за даними «уранового проекту», який є частиною Всесвітньої інформаційної служби з енергетики [12] і веде облік та охоплює наслідки впливу видобутку урану та виробництва ядерного палива на здоров'я оточуючих та навколишнє середовище з 1960 року, налічується близько 150 аварій.

Таким чином, метою роботи було встановлення та аналіз основних причин виникнення аварійних ситуацій і пошук оптимальних методів та підходів для екологічно безпечного управління такими спорудами на території України.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) дослідити та проаналізувати відомі аварії у світі за останні роки;
- 2) встановити основні причини виникнення аварій;
- 3) оцінити сучасні підходи та методи діагностики технічного стану, системи управління та забезпечення екологічної безпеки під час експлуатації, закриття та рекультивації накопичувачів промислових відходів.

Методика досліджень

При узагальненні кількості і частоти виникнення аварій використано статистичні та аналітичні методи оцінки з обробкою у табличних редакторах. Для графічної інтерпретації отриманих результатів застосовано сучасні програмні засоби. Використання аналітичного підходу дозволило виявити і згрупувати причини і наслідки надзвичайних подій.

Результати досліджень

Ретроспективний огляд охоплює період з 1960 по 2022 роки. За цей час зафіксовані близько 150 випадків руйнування ґрунтових дамб накопичувачів відходів (рис. 1).

Відмічається різна тенденція виникнення частоти аварій. Зокрема, у період з 1960 по 2009 рік трапилось 98 аварій з частотою в середньому майже дві (1,98) на рік. За останнє десятиріччя (2010–2020 рр.) кількість аварій досягла 36 випадків, а їх частота збільшилась майже удвічі – до 3,6 аварій на рік. За останні два роки, з початку 2021 по грудень 2022 року, вже зареєстровано 10 аварій. Дослідженнями відмічаються певні сплески збільшення аварій, які мають десятирічні тренди (1975 р., 1985 р., 1995 р., 2005 р.). Характерною є загальна тенденція масових аварій з початку 2015 року, що обґрунтовується вичерпними термінами роботи багатьох гірничо-рудних підприємств (копалень) та значними (понаднормативними) термінами експлуатації хвостосховищ, які подекуди залишилися без належного нагляду і догляду.

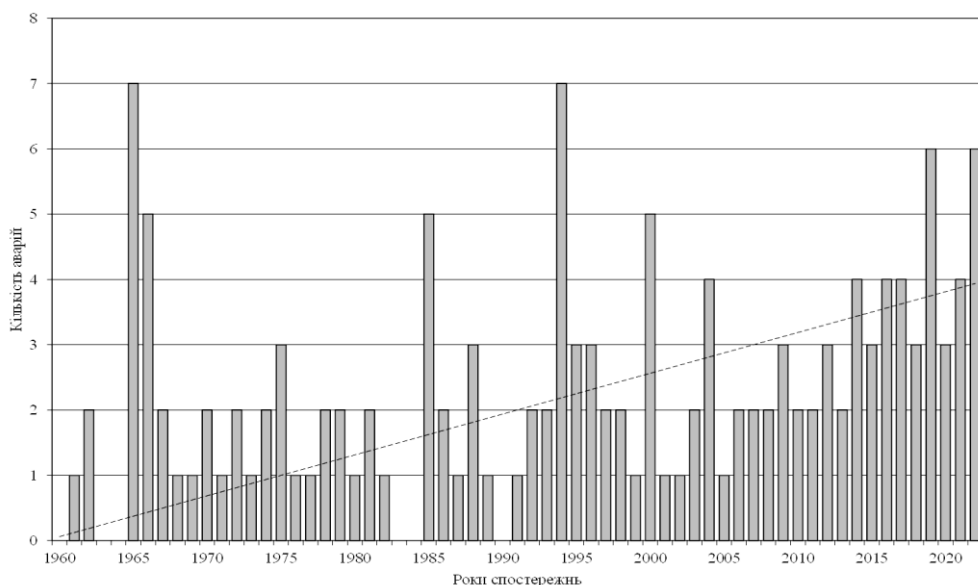


Рис. 1. Динаміка кількості та загальний тренд виникнення аварій на хвостосховищах за період з 1960 р. до 2022 р.

Щоб краще зрозуміти та виявити причини їх формування, проаналізуємо деякі з них, що за останні 10–20 років були найбільш резонансними, набули розголосу і завдали значної шкоди життю і здоров'ю людей та навколишньому

середовищу. Варто зазначити, що всі такі об'єкти закриті для оточуючих і до них немає вільного доступу, тому кількість аварій може бути значно більшою, а суспільство знає лише про ті, які завдали значної шкоди і приховати їх вже неможливо (табл. 1).

Таблиця 1. Огляд найбільш резонансних аварій за останні три десятиріччя

Об'єкт, населений пункт, країна, рік	Причина аварії	Об'єм хвостів та наслідки аварії (збитки)	Література
1	2	3	4
Хармоні, Мерріспрут, ПАР, 1994	прорив тіла греблі після сильного дощу	600 тис. м ³ хвостів видобутку золота пройшли 4 км вниз за течією, загинуло 17 осіб, значні збитки населеному пункту	[13, 14]
Ель-Порко, Болівія, 1996	прорив греблі	400 тис. т відходів цинку, свинцю і срібла протекли 300 км р.Пілкомайо	[15, 16]
Лос Фрайлес, Іспанія, 1998	обвалення греблі через порушення підвалин	4–5 млн м ³ токсичної води від виробництва цинку, свинцю, міді, срібла та шламу затопило тисячі гектарів сільськогосподарських угідь	[17]
Сурігао-дель-Норте, Філіппіни, 1999	викид хвостів із пошкодженої бетонної труби	700 тис. т ціаністих хвостів золота поховали 17 будинків під землею, 51 га рисової землі заболочено	[18]
Бая-Борша, Румунія, 2000	обвал дамби хвостосховища після сильного дощу	20 000 т хвостів, забруднених важкими металами (мідь, свинець, цинк), та 100 000 м ³ шламів забруднили струмок Васер, притоку річки Тиса	[19]
Рудник Айтік, Швеція, 2000	обвал дамби хвостосховища через фільтрацію	скид 2,5 млн м ³ рідини в сусідній відстійник, після цього викид 1,5 млн м ³ залишків шламу міді з відстійника	[20]
Інес, Кентуккі, США, 2000	обвалення дамби хвостосховища внаслідок порушення підземної копальні під накопичувачем шламу	950 тис. м ³ шламів кам'яновугільних відходів надійшли до гідрографічної мережі на відстань 120 км. Це призвело до загибелі риби в річці Біг-Сенді та деяких її притоках. Міста вздовж річки були змушені відключити забір питної води	[21]
Шахта Саса, Македонія, 2003	частковий обвал дамби в результаті руйнування дренажної системи	70 000 – 100 000 м ³ хвостів свинцю і цинку витекли на 12 кілометрів вниз за течією річки Камениця в озеро Каліманчі.	[22]
Мальвезі, Франція, 2004	прорив греблі після сильного дощу	викид 30 000 м ³ рідких уранових шламів призвів до підвищення концентрації нітратів до 170 мг/л у водопровідному каналі	[23]
Таоши, Китай, 2008	обвалення резервуару для відходів на незаконній шахті під час дощу	190 000 м ³ хвостів заліза спровокували зсув та хвилю висотою кілька метрів, яка поширилась на 2,5 км вниз за течією, засипавши базар та житлові будинки, 277 чоловік загинуло та 33 поранено	[24, 25]
Колонтар, Угорщина, 2010	обвалення греблі хвостосховища	700 000 м ³ рідкого червоного шламу виробництва бокситів затопило кілька населених пунктів, загинуло 10 осіб, постраждали 120 людей, затоплено 8 квадратних кілометрів угідь	[12]

Об'єкт, населений пункт, країна, рік	Причина аварії	Об'єм хвостів та наслідки аварії (збитки)	Література
1	2	3	4
Рудник Эль-Эрреро, Мексика, 2013	обвалення греблі хвостосховища	300 тис. м ³ відходів виробництва золота і срібла; четверо людей убито і одного поранено; річка Лос-Ремедіос в Дуранго, річка Сан-Лоренцо і водосховище Ель-Комедеро в Сіналоа забруднені, риба загинула в річці Лос-Ремедіос в 130 км нижче за течією	[26]
Шахта Столице, Сербія, 2014	обвалення греблі хвостосховища внаслідок зсуву, спровокованого сильним дощем	100 000 м ³ хвостового шламу сурми були скинуті в річку Костайник, забруднивши 27 км русла та 360 га сільськогосподарських угідь	[27]
Шахта Germano, Бразилія, 2015	обвалення дамби хвостосховища через недостатній дренаж, що призвело до розрідження хвостосховища після невеликого землетрусу	32 млн м ³ хвостів заліза затопило м. Бенту-Родрігес, зруйнували 158 будинків, 17 чоловік загинули і 2 зникли безвісти; хвости забруднили річки Північний Гуалаксо, Кармель і Ріо-Доче протяжністю 663 км, змили 15 км ² земель уздовж річок та відрізали мешканців від постачання питної води; збитки склали близько 6,7 млрд доларів США	[28, 29]
Мішор Ротем, Ізраїль, 2017	обвалення фосфогіпсової греблі	100 000 м ³ кислих токсичних стічних фосфатних вод хлинули висохлам руслом річки Ашалим і залишили слід екологічного руйнування довжиною понад 20 км	[12]
Брумадиньо, Бразилія, 2019	обвалення дамби хвостосховища	12 млн м ³ хвостів заліза спустошили наливну станцію рудника, його адміністративну частину та два менші відстійники; зруйновано міст залізничної гілки шахти та частину місцевої громади Віла Фертеко, поблизу м. Брумадиньо. В результаті 267 чоловік загинули, кілька зникли безвісти	[30]
Тіелі, Китай, 2020	порушення конструкції переливного колодезя дамби хвостосховища	2,53 млн м ³ води та хвостів молібдена досягнули річки Йідзімі через 3 км, що поставило під загрозу запаси питної води для 68 000 осіб у місті Тіелі; за кілька днів забруднення сягнуло 208 км вниз за течією	[31]
Улунди, ПАР, 2021	порушення конструкції шламової дамби	до навколишнього середовища потрапили 1 500 м ³ шламу антрацитового вугілля, що вміщують токсичні важкі метали і хімічні сполуки, включаючи ртуть, марганець, миш'як, мідь і свинець	[12]
Рудник Уільямсон, Танзанія, 2022	порушення конструкції дамби хвостосховища	12,8 млн м ³ води і хвостів алмазів сформували селеву хвилю шириною до 1 км, яка пройшла більше 8 км, охопила 5,09 км ² площі, пошкодила 13 будинків і с.-г. угіддя. Поранені 3 чол. і 115 жителів села Нгванхоло постраждали	[12]

Географія аварій на хвостосховищах досить різноманітна і охоплює держави Азії, Африки, Америки і Європи (рис. 2).

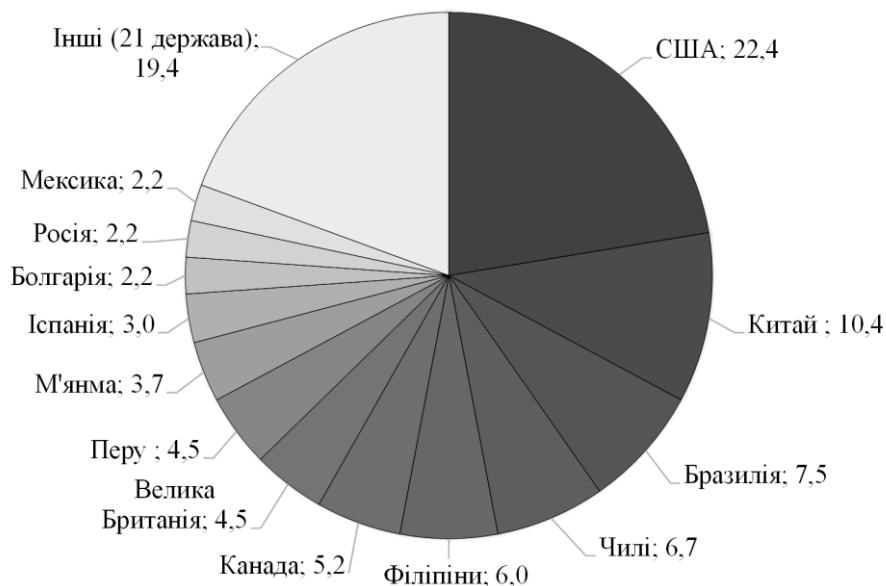


Рис. 2. Відсотковий розподіл аварій за період з 1960 р. до 2022 р.

Переважає більшість аварій за цей період сталися в 34 країнах світу. Найбільша їх кількість відмічена в США (22,4 %), Китаї (10,4%), Бразилії (7,5%), Чилі (6,7%), Філіппінах (6,0%), Канаді (5,2%), Великій Британії (4,5%) та інших країнах.

Аналіз основних причин виникнення аварій

Огляд світового досвіду та висновки експертів показали, що в ґрунтових греблях хвостосховищ отримали розвиток наступні небезпечні техногенні процеси: зсуви, суфозія, провальні явища та ін. [32–35]. Розподіл аварій за причинами їх виникнення наведено на рис. 3.

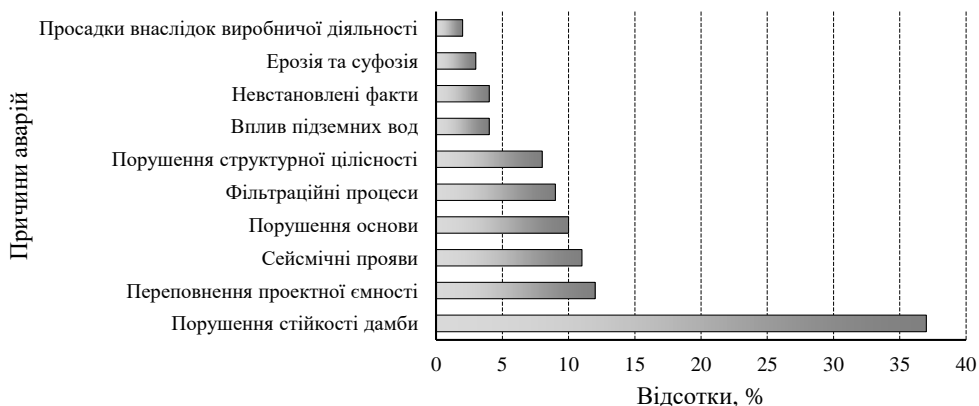


Рис. 3. Відсотковий розподіл основних причин виникнення аварій

Аналіз причин виникнення аварій на хвостосховищах вказує на комплексний техногенно-природний характер їх походження. Поруч з технічними, технологічними і конструктивними особливостями вагоме місце займають кліматичні і сейсмічні. Яскравим прикладом може бути землетрус, який відбувся в Турції і Сирії на початку лютого цього року та призвів до катастрофічних наслідків.

В результаті узагальнення встановлено, що основними причинами аварій є порушення стійкості схилу дамби (37%), переповнення проектної ємності хвостосховища (12%), сейсмічні прояви (11%) тощо.

Доволі часто причинами аварій були порушення основи і структурної цілісності тіла дамби та фільтраційні прояви. Однією із причин утворення провалів в ґрунтових греблях є розвиток суфозійних явищ і процесів. При цьому слід розрізняти механічну і хімічну суфозію гірських порід, що складають тіло ґрунтових гребель. Під механічною суфозією розуміють розпушування порід (найчастіше пісків), навіть таких, що не містять розчинних речовин, і винесення дрібних часток із них струменями води, яка фільтрується. Під хімічною суфозією слід розуміти вилуговування і винесення з порід струменями води, яка фільтрується, водорозчинних солей (гіпсу, кам'яної солі і т.д.).

Під час інженерно-геологічної оцінки можливості виникнення й розвитку суфозійних явищ і утворення пустот в ґрунтових дамбах розглядаються і вивчаються, в першу чергу, чинники, представлені на схемі (рис. 4).



Рис. 4. Інженерно-геологічна оцінка можливості виникнення й розвитку суфозійних явищ і утворення пустот в ґрунтових греблях

Огляд сучасних методів діагностики технічного стану споруд

З метою забезпечення безпеки споруд необхідно розробити та забезпечити виконання заходів діагностичного, технічного, організаційного, правового, економічного та іншого характеру, спрямованих на попередження виникнення аварійних ситуацій та ліквідацію чи обмеження масштабів аварії [36, 37].

Пошуку надійного захисту і діагностики стану в різних державах приділяють багато уваги. Так, в роботі канадських вчених [38] автори пропонують комплексний підхід та диверсифіковані технології для інтегрованої системи спостереження в реальному часі для вирішення питання стійкості гребель, безпеки робітників та населення, охорони навколишнього середовища з використанням контрольно-вимірювальної апаратури.

На підставі багаторічного аналізу, що включає майже 100-річний спільний досвід провідних інженерів-геотехніків США і світу, було видано «Довідник по стійкості і стабілізації схилу». Друге видання охоплює довідникову інформацію, теорію, аналітичні методи, підходи до проектування і будівництва, а також приклади для практичного використання при повному проектуванні стійкості схилів [39].

В Туреччині для підвищення ємності хвостосховища проводяться дослідження геотехнічної характеристики і стійкості низового схилу дамби геомеханічними лабораторними випробуваннями у поєднанні з використанням емпіричних методів для визначення механічних властивостей матеріалу поточної дамби, хвостосховища та матеріалу кам'яної накидки, яка буде використовуватися для кріплення греблі [40].

У роботі польських вчених [41] представлені широкі можливості, що надаються глобальним моніторингом у справі ефективного запобігання аваріям на хвостосховищах з використанням контрольно-вимірювальних систем. Особлива увага звертається на потенціал використання різноспрямованого моніторингу, у тому числі технічного та екологічного моніторингу, на прикладі однієї з найбільших у світі гідротехнічних споруд – Сховища хвостів Железний Міст (TSF). Аналіз даних моніторингу дозволяє вживати превентивних заходів проти помилок у будівництві гребель об'єктів, які можуть мати руйнівні наслідки для життя людини та навколишнього середовища. Моніторинг навколишнього середовища найчастіше включає гідрологічний та хімічний моніторинг основних компонентів навколишнього середовища, таких як ґрунти, повітря, підземні та поверхневі води, а в рамках технічного моніторингу виконуються такі вимірювання: деформація ґрунту, викликана будівництвом, значення напруги, значення порового тиску води у хвостосховищах, зусилля та зміщення (вертикальні або горизонтальні зміщення, повороти та деформації форми). Щоб забезпечити достовірну інтерпретацію одержаних результатів, була запроваджена інтегрована база даних ГІС, в якій зберігаються всі дані вимірювань, зібрані за допомогою системи моніторингу.

На особливу увагу заслуговують нові досягнення в галузі супутникового моніторингу хвостосховища. Супутниковий моніторинг Пеньяскіто TSF (Мексика) є прикладом такого використання. З 2013 року в Пеньяскіто (Мексика) здійснюється супутниковий моніторинг, який включає щотижневі супутникові знімки середньої роздільної здатності та щомісячні супутникові знімки високої роздільної здатності та топографічні карти [42].

Як зазначають вчені з Австралії і Фінляндії [43], моніторинг геотехнічної стабільності хвостосховища в режимі реального часу дозволяє краще охарактеризувати потенційні внутрішні деформації, підйом рівня ґрунтових вод у хвостосховищах, а також аномальне просочування. Такий моніторинг дозволяє операторам хвостосховища вживати можливих заходів для пом'якшення наслідків або навіть запобігти збоям.

На переконання вчених з Канади [44] багатообіцяючими є неінвазивні методи моніторингу, такі як покадрова електрична томографія питомого опору (TL-ERT), оскільки вона надає великомасштабну інформацію про надра, яка доповнює наземні спостереження (перехід, аерофотограмметрія або дистанційне зондування) і традиційні інструменти моніторингу.

Дослідники з Канади і Австралії [45] на дамбі хвостосховища в північній частині Канади об'єднали інтерферометрію навколишнього шуму з кількісною моделлю напруги для відстеження змін швидкості поперечної хвилі (Vs). Зміни сейсмічних швидкостей менше 1% сильно корелюють з коливаннями рівня води у сусідньому хвостосховищі. Модель стресу, відкалібрована з використанням записів на рівні ставка і профілів Vs, отриманих в ході випробувань на проникнення конуса, демонструє, що зміни сейсмічної швидкості, отримані за допомогою інтерферометрії навколишнього шуму, являють собою переважно зміни Vs. Крім того, ця модель обмежує зміни Vs глибиною ~16 м, що відповідає неуцільненим хвостам під греблею. Оскільки Vs використовується для оцінки здатності ґрунтів до розрідження, цей метод дає важливі переваги для розуміння змін у роботі греблі з часом.

Китайські вчені [46, 47] зазначають, що поле фільтрації греблі хвостосховища тісно пов'язане зі станом безпеки. Оперативна оцінка безпеки поля фільтрації на основі даних моніторингу має велике значення для забезпечення безпечної експлуатації хвостосховища. Через складний вплив факторів поля фільтрації дамби хвостосховища традиційний метод ідентифікації аномалій, заснований на регресійній моделі, не працює через його низьку точність підбору. Таким чином, новий метод ідентифікації аномалій для моніторингу даних заснований на покращеній хмарній моделі та моделі нейронної мережі радіальної базової функції, яка може точно ідентифікувати дані аномалії та розрізнити відгук кількості навколишнього середовища. На основі взаємозв'язку між полем просочування та стійкістю укусу побудовано сурогатну модель між глибиною лінії насичення та коефіцієнтом безпеки стійкості укусу, а також запропоновано метод оцінки безпеки поля просочування в реальному часі.

Індійські вчені [48] звертають увагу на те, що моніторинг конструкцій відіграє життєво важливу роль, щоб мати заздалегідь певний прогноз структурних ушкоджень, які можуть бути спричинені зміною навколишнього середовища. Моніторинг стану конструкцій (SHM) має вирішальне значення при визначенні очікуваного терміну служби цивільних споруд. Удосконалення різних датчиків та систем збору даних (DAQ) дозволило більш точно прогнозувати термін служби будівельних конструкцій, що піддаються впливу статичних та динамічних умов навантаження. Отже, SHM є важливою областю досліджень для розуміння стану та терміну служби таких споруд, як греблі.

В Україні для вирішення цієї проблеми запропоновані комплексний метод оцінки індексу потенційної небезпеки впливу промислових хвостосховищ на

навколишнє середовище, метод контрольних списків, що дозволяє використання автоматизованих алгоритмів вибору природоохоронних заходів в залежності від значення оцінки відповідності вимогам безпеки об'єкта аудиту, та екологічний експрес аудит для комплексного оцінювання впливу потенційно небезпечних об'єктів з наявністю хвостосховищ на екологічну безпеку навколишнього середовища [49–51].

Крім цього, детальніше вирішити завдання діагностики технічного стану споруд дозволяють польові роботи із застосуванням комплексу геофізичних методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) та вертикального електричного зондування (ВЕЗ), які широко використовуються на практиці [52–59].

Навіть детальний аналіз інженерно-геологічних умов не в змозі надати точну і об'єктивну оцінку стану досліджуваного об'єкта. Тому пропонується вагому увагу приділити таким заходам, як обстеження, паспортизація, надання превентивних рекомендацій і постійний контроль за станом об'єкта.

Для попередження суфозії виконуються такі заходи:

- 1) запобігання надходженню і пересуванню води в породах: регулюється поверхневий стік, перехват підземних вод дренажними пристроями;
- 2) захист глинистих порід від вивітрювання шляхом влаштування захисних покриттів з піску, перем'ятої глини;
- 3) влаштування поверхневих дренажів (для відведення підземних вод і попередження вимивання часток);
- 4) зменшення швидкості руху підземних вод шляхом зміни конструкції споруди. Наприклад, під греблями влаштовують глиняні понури, які подовжують шлях фільтрації і знижують градієнти напору.

Висновки

1. Огляд і аналіз техногенних катастроф вказує на миттєвість їх виникнення, складність і неможливість спрогнозувати і попередити майбутню аварію, людина залишається спостерігачем і констататором фактів.
2. Аналіз причин виникнення аварій на хвостосховищах вказує на комплексний техногенно-природний характер їх походження, раптовість та низьку можливість попередження.
3. Через вичерпні терміни експлуатації, недостатність технічних наглядів і доглядів, експлуатація хвостосховищ потребує більш уважного і ретельного ставлення та розробки дієвих заходів, таких як обстеження, паспортизація, надання превентивних рекомендацій і постійний контроль за технічним станом об'єкта.
4. В якості надійного захисту і діагностики, з урахуванням кращих світових та вітчизняних практик, може слугувати комплексний підхід із застосуванням організаційно-технічних методів і підходів щодо забезпечення екологічної безпеки та надійної роботи споруд.
5. Ознаки потенційних аварій зустрічаються у різних поєднаннях, але бути виявленими шляхом простого обстеження і візуального огляду не можуть. Значну їх частину можливо виявити та спрогнозувати потенційні зміни стану споруди тільки шляхом використання контрольної-вимірної апаратури та геофізичних методів дослідження інженерно-геологічних процесів, що відбуваються в ґрунтових огорожувальних дамбах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Як вирішити проблему утилізації відходів. (n.d.). [web log]. <https://biz.nv.ua/ukr/experts/jak-virishiti-problemu-utilizatsiji-vidhodiv-2178636.html>
2. Четверик, М., Бубнова, О., & Левченко, К. (2021). Зменшення техногенного навантаження на довкілля шляхом реструктуризації комплексів «ТЕС - вугільні шахти - шламосховища» в «енерго-опріснювальні-продовольчі корпорації». *SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS VOLUME 1*. <https://doi.org/10.36074/logos-26.02.2021.v1.54>
3. Chetverik, M., Bubnova, O., Babii, K., Shevchenko, O., Moldabaev, S. (2018). Review of geomechanical problems of accumulation and reduction of mining industry wasters, and ways of their solution. *Mining of Mineral Deposits*, (12 (4)), 63-72.
4. Hapich, H., Pikarenua, D., Rudakov, L., Maximova, N., & Makarova, T. (2020). Assessment of the accident risk and calculation of the failure processes in terms of the Earth Dike of a tailing dam. *Municipal Economy of Cities*, 3(156), 99–104. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-99-104>
5. Hapich, H. (2019). Assessing level of environmental and operational safety of low-pressure hydroengineering structures. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 4, 46–52. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.4.46-52>
6. International Commission on Large Dams (ICOLD), United Nations Environment Programme (UNEP), “*Tailings dams risk of dangerous occurrences – Lessons learnt from practical experiences*” (Bulletin 121, ICOLD, 2001).
7. Hirschberg S, Spiekerman G, Dones R. (1998). *Severe Accidents in the Energy Sector. Switzerland*. 469 pp. ISSN 1019-0643.
8. Williams, D.J. (2021). Lessons from tailings dam failures – where to go from here? *Minerals*, 11(8), 853. <https://doi.org/10.3390/min11080853>
9. Rudakov, L.M., & Hapich, H.V. (2019). Modern State, dynamics of changes and prospects for the development of hydrotechnical reclamations in Dnipropetrovsk Region. *Міжвідомчий Тематичний Науковий Збірник "Меліорація і Водне Господарство"*, (1), 54–60. <https://doi.org/10.31073/mivg201901-161>
10. Hapich, H.V. (2013). Assessment of the technical condition of earth dams as an element of the environmental monitoring system of territories. *Collection works of National Mining University*, 42, 168-173. <https://core.ac.uk/download/pdf/168413168.pdf>
11. World Register of Dams. ICOLD CIGB. (n.d.). Retrieved February 22, 2023, from https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/world_register_of_dams.asp
12. WISE (World Information Service on Energy): Chronology of major tailings dam failure, 2020. Available at: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
13. Papageorgiou, G., Fourie, A.B., & Blight, G.E. (2021). Static liquefaction of Merriespruit Gold Tailings. *Geotechnics for Developing Africa*, 61–72. <https://doi.org/10.1201/9781003211174-9>
14. Dam breach modeling. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*, 161–221. <https://doi.org/10.1002/9781118558522.ch8>
15. Olalla, C., & Cuéllar, V. (2001). Failure mechanism of the Aznalcóllar Dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 51(5), 399–406. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.5.399>
16. Penman, A.D. (2003). Discussion: Failure mechanism of the aznalcóllar dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 53(5), 521–522. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.5.521>
17. Maglambayan, V.B., Montes, S., Hipol, K., Mamitag, M., Pineda, R.P., Rodolfo, R., Oliveros, N., & Sy, A. (2005). Carlin-type gold prospects in Surigao del Norte, Mindanao Island, Philippines: Their geology and mineralization potential. *Resource Geology*, 55(3), 145–154. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2005.tb00237.x>
18. Macklin, M.G., Brewer, P.A., Balteanu, D., Coulthard, T.J., Driga, B., Howard, A.J., & Zaharia, S. (2003). The long term fate and environmental significance of Contaminant Metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramureş County,

- upper Tisa Basin, Romania. *Applied Geochemistry*, 18(2), 241–257. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(02\)00123-3](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(02)00123-3)
19. Sammelin (Kontturi), M., Wanhainen, C., & Martinsson, O. (2011). Gold mineralogy at the Aitik Cu–Au–Ag Deposit, Gällivare area, northern Sweden. *GFF*, 133(1-2), 19–30. <https://doi.org/10.1080/11035897.2010.551542>
20. Wang, G., Tian, S., Hu, B., Xu, Z., Chen, J., & Kong, X. (2019). Evolution pattern of tailings flow from dam failure and the buffering effect of debris blocking dams. *Water*, 11(11), 2388. <https://doi.org/10.3390/w11112388>
21. Mijalkovski, S., Despodov, Z., Mirakovski, D., Hadzi-Nikolova, M., & Mitic, S. (2015). Determination and monitoring of ore recovery and dilution coefficients in Sasa lead and zinc mine - M. Kamenica, R. Macedonia. *Podzemni Radovi*, (26), 1–8. <https://doi.org/10.5937/podrad1526001m>
22. Bykov, A.A., Travin, S.O., Gromov, O.B., & Mikheev, P.I. (2014). Modeling of uranium oxides hydrofluorination process with Areva firm technology (Malvési, France). *Procedia Chemistry*, 11, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.11.002>
23. Williams, D. (2008). The influence of climate on seepage from mine waste storages during deposition and post-closure. *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*. https://doi.org/10.36487/acg_repo/852_42
24. Wei Z., Yin G., Wang J.G., Wan L., Li G. (2013). Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures. *Waste Management & Research*. 31(1), 106-112. doi:10.1177/0734242X12462281
25. Winkler, D., Bidló, A., Bolodár-Varga, B., Erdő, Á., & Horváth, A. (2018). Long-term ecological effects of the red mud disaster in Hungary: Regeneration of red mud flooded areas in a contaminated industrial region. *Science of The Total Environment*, 644, 1292–1303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.059>
26. Randelović, D., Mutić, J., Marjanović, P., Đorđević, T., & Kašanin-Grubin, M. (2019). Geochemical distribution of selected elements in flotation tailings and soils/sediments from the dam spill at the abandoned antimony mine stolice, Serbia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(6), 6253–6268. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07348-4>
27. Mura, J., Gama, F., Paradella, W., Negrão, P., Carneiro, S., de Oliveira, C., & Brandão, W. (2018). Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in germano iron mining area after the collapse of the Tailings Dam of Fundão (Mariana-mg, Brazil) using DInSAR techniques with TerraSAR-X Data. *Remote Sensing*, 10(10), 1507. <https://doi.org/10.3390/rs10101507>
28. Agurto-Detzel, H., Bianchi, M., Assumpção, M., Schimmel, M., Collaço, B., Ciardelli, C., Barbosa, J.R., & Calhau, J. (2016). The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4929–4936. <https://doi.org/10.1002/2016gl069257>
29. Santamarina J.C., Torres-Cruz L.A., Bachus R.C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364(6440), 526-528, DOI: 10.1126/science.aax1927.
30. Yuan, Y., Gao, R., Liang, Q., Song, L., Huang, J., Lang, N., & Zhou, J. (2020). A foodborne bongkrelic acid poisoning incident – Heilongjiang Province, 2020. *China CDC Weekly*, 2(51), 975–978. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2020.264>
31. Adeyinka, G.C., Bakare, B.F., & Iwarere, S.A. (2021). Evaluation and risk assessment of heavy metals in surface water collected along the Isipingo River, KwaZulu-Natal, South Africa. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1947265>
32. Azam S., Li Q. (2010). Tailings dam failures: A review of the last one hundred years, *Geotech*. 28, 50-53.
33. Penman A., Tedd P. (2015). Tailings dam incidents and new methods. <https://doi.org/10.1680/riacw.31395.0037>
34. Oboni F., Oboni C. (2020). Two Recent Catastrophic Tailings Dams Accidents. Tailings Dam Management for the Twenty-First Century. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19447-5_2

35. Chen C. (2022). Hazards identification and characterisation of the tailings storage facility dam failure and engineering applications. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 36(6), 399-418. DOI: 10.1080/17480930.2022.2051136
36. ДБН В.1.1-24:2009 Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проектування. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2009 р.
37. ДБН В.2.4-5:2012 Хвостосховища і шламонакопичувачі. Частина I Проектування; Частина II Будівництво. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012 р.
38. Hui S. R., Charlebois L., Sun C. (2017). Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 55(3), 221-229. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0186>
39. Abramson, L.W. (2002). *Slope stability and stabilization methods, 2nd ed.* Wiley.
40. Ozcan, N.T., Ulusay, R., & Isik, N.S. (2012). A study on geotechnical characterization and stability of downstream slope of a tailings dam to improve its storage capacity (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 69(6), 1871–1890. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2016-1>
41. Stefaniak K., Wróżyńska M. (2018). On possibilities of using global monitoring in effective prevention of tailings storage facilities failures. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 5280-5297. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0995-x>
42. Schmidt B, Malgesini M, Turner J, Reinson J (2016) Monitoring of a large tailings storage facility. <http://www.photosat.ca/pdf/Golder-satellite-monitoring-large-tailings-storage-facility-oct2015.pdf>
43. Clarkson, L., Williams, D., & Seppälä, J. (2020). Real-time monitoring of tailings dams. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 15(2), 113–127. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1740280>
44. Dimech, A., Cheng, L. Z., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Meldrum, P., Mary, B., Fabien-Ouellet, G., & Isabelle, A. (2022). A review on applications of time-lapse electrical resistivity tomography over the last 30 years : Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699–1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>
45. Ouellet, S., Dettmer, J., Olivier, G., de Wit, T., & Lato, M. (2022). Advanced Tailings Dam Performance Monitoring with seismic noise and stress models. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1647118/v1>
46. Li S.M., Yuan L.W., Yang H., An H.M., Wang G.J. (2020). Tailings dam safety monitoring and early warning based on spatial evolution process of mud-sand flow. *Safety Sci.* 124, 104579. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104579>
47. Dong, K., Yang, D., Yan, J., Sheng, J., Mi, Z., Lu, X., & Peng, X. (2022). Anomaly identification of monitoring data and safety evaluation method of tailings dam. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1016458>
48. Sivasuriyan, A., Vijayan, D.S., Munusami, R., & Devarajan, P. (2021). Health Assessment of dams under various environmental conditions using structural health monitoring techniques: A state-of-art review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86180–86191. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16749-3>
49. Shmatkov G.G. Environmental Problems in Ukraine and Human Factors / G.G. Shmatkov, A.F. Oksamitny, I.A. Nikolaieva // Correlation Between Human Factors and the Prevention of Disasters / edited by David L. Barry, Wilhelm G. Coldewey, Dieter W.G. Reimer, Dmytro V. Rudakov. – Amsterdam : IOS Press, 2012. – (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics ; Vol. 94). – P. 218–223.
50. Rudakov D.A. Checklist method as a tool to improve public safety in TMF affected areas / D. Rudakov, I. Nikolaieva // Engaging the public to fight the consequences of terrorism and disasters / edited by I. Apostol, J. Mamasakhlisi, D. Subotta, D. W.G. Reimer. – Amsterdam : IOS Press, 2015. – (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics ; Vol. 120). – P. 139–147.

51. Николаева И.А. Контрольный список как инструмент повышения экологической безопасности хвостохранилищ / И.А. Николаева, Д.В. Рудаков // Форум гірників-2014: матеріали міжнар. конф., 1-4 жовтня 2014 р. – Дніпропетровськ : ЛізуновПрес, 2014. – Т. 1. – С. 190–198.
52. Bogoslovsky V.A., Ogilvy A.A. (1970). Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. *Geophysical Prospecting*. 18(1), 758-773. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1970.tb02141.x>
53. Kim Jung-Ho, Yi Myeong-Jong, Song Yoonho, Seol Soon Jee, Kim Ki-Seog. (2020). Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 12(2), 221-235. <https://doi.org/10.2113/JEEG12.2.221>
54. Lai Sin-Long, Lee Der-Her, Wu Jian-Hong, Dong Yan-Min. (2014). Detecting the cracks and seepage line associated with an earthquake in an earth dam using the nondestructive testing technologies. *Journal of the Chinese Institute of Engineer*. 37(4), 428-437. <https://doi.org/10.1080/02533839.2013.799949>
55. Sung-Ho Song, Yoonho Song, Byung-Doo Kwon. (2005). Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam. *Exploration Geophysics*. 36, 92-96. <https://doi.org/10.1071/EG05092>
56. Rudakov, L.M., Hapich, H.V., Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Kovalenko, V.V., Chushkina, I.V., & Zaporozhchenko, V.Y. (2020). Problems of technical exploitation and ecological safety of hydrotechnical facilities of Irrigation Systems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 776–788. <https://doi.org/10.15421/112070>
57. 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>
58. Orlinska, O., Pikarenia, D., Chushkina, I., Maksymova, N., Hapich, H., Rudakov, L., Roubik, H., & Rudakov, D. (2022). Features of water seepage from the retention basins of irrigation systems with different geological structures. *Industrial, Mechanical And Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1063/5.0109330>
59. Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Maximova, N.M., Gapich, G.V., Ischenko, V.M. (2012). Evaluation of strength properties of soil dams by method of natural pulse electromagnetic field of the Earth. *Coll. works of National Mining University*, 37, 17-23.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 13.06.2023

REFERENCES

1. Yak vyrishyty problemu utylizatsiyi vidkhodiv. (n.d.). [web log]. Retrieved from <https://biz.nv.ua/ukr/experts/jak-virishiti-problemu-utilizatsiji-vidkhodiv-2178636.html> [in Ukrainian].
2. Chetverik, M., Bubnova, O., & Levchenko, K. (2021). Reduction of man-made load on the environment by restructuring the "TPP - coal mines - sludge storage" complexes into "energy-desalination-food corporations". *SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS VOLUME 1* [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36074/logos-26.02.2021.v1.54>
3. Chetverik, M., Bubnova, O., Babii, K., Shevchenko, O., & Moldabaev, S. (2018). Review of geomechanical problems of accumulation and reduction of mining industry wasters, and ways of their solution. *Mining of Mineral Deposits*, (12 (4)), 63-72.
4. Hapich, H., Pikarenia, D., Rudakov, L., Maximova, N., & Makarova, T. (2020). Assessment of the accident risk and calculation of the failure processes in terms of the Earth

- Dike of a tailing dam. *Municipal Economy of Cities*, 3(156), 99–104. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-99-104>
5. Hapich, H. (2019). Assessing level of environmental and operational safety of low-pressure hydroengineering structures. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 4, 46–52. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.4.46-52>
6. International Commission on Large Dams (ICOLD), United Nations Environment Programme (UNEP), “*Tailings dams risk of dangerous occurrences – Lessons learnt from practical experiences*” (Bulletin 121, ICOLD, 2001).
7. Hirschberg, S., Spiekerman, G., & Dones, R. (1998). Severe Accidents in the Energy Sector. Switzerland. 469 pp. ISSN 1019-0643.
8. Williams, D.J. (2021). Lessons from tailings dam failures – where to go from here? *Minerals*, 11(8), 853. <https://doi.org/10.3390/min11080853>
9. Rudakov, L.M., & Hapich, H.V. (2019). Modern State, dynamics of changes and prospects for the development of hydrotechnical reclamations in Dnipropetrovsk Region. *Mizhvidomchyy Tematychnyy Naukovyy Zbirnyk "Melioratsiya i Vodne Hospodarstvo"*, (1), 54–60. <https://doi.org/10.31073/mivg201901-161>
10. Hapich, H.V. (2013). Assessment of the technical condition of earth dams as an element of the environmental monitoring system of territories. *Collection works of National Mining University*, 42, 168-173. <https://core.ac.uk/download/pdf/168413168.pdf>
11. World Register of Dams. ICOLD CIGB. (n.d.). Retrieved February 22, 2023, from https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/world_register_of_dams.asp
12. WISE (World Information Service on Energy): Chronology of major tailings dam failure, 2020. Retrieved from <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
13. Papageorgiou, G., Fourie, A.B., & Blight, G.E. (2021). Static liquefaction of Merriespruit Gold Tailings. *Geotechnics for Developing Africa*, 61–72. <https://doi.org/10.1201/9781003211174-9>
14. Dam breach modeling. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*, 161–221. <https://doi.org/10.1002/9781118558522.ch8>
15. Olalla, C., & Cuéllar, V. (2001). Failure mechanism of the Aznalcóllar Dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 51(5), 399–406. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.5.399>
16. Penman, A.D. (2003). Discussion: Failure mechanism of the aznalcóllar dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 53(5), 521–522. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.5.521>
17. Maglambayan, V.B., Montes, S., Hipol, K., Mamitag, M., Pineda, R.P., Rodolfo, R., Oliveros, N., & Sy, A. (2005). Carlin-type gold prospects in Surigao del Norte, Mindanao Island, Philippines: Their geology and mineralization potential. *Resource Geology*, 55(3), 145–154. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2005.tb00237.x>
18. Macklin, M.G., Brewer, P.A., Balteanu, D., Coulthard, T.J., Driga, B., Howard, A.J., & Zaharia, S. (2003). The long term fate and environmental significance of Contaminant Metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramureş County, upper Tisa Basin, Romania. *Applied Geochemistry*, 18(2), 241–257. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(02\)00123-3](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(02)00123-3)
19. Sammelin (Kontturi), M., Wanhainen, C., & Martinsson, O. (2011). Gold mineralogy at the Aitik Cu–Au–Ag Deposit, Gällivare area, northern Sweden. *GFF*, 133(1-2), 19–30. <https://doi.org/10.1080/11035897.2010.551542>
20. Wang, G., Tian, S., Hu, B., Xu, Z., Chen, J., & Kong, X. (2019). Evolution pattern of tailings flow from dam failure and the buffering effect of debris blocking dams. *Water*, 11(11), 2388. <https://doi.org/10.3390/w11112388>
21. Mijalkovski, S., Despodov, Z., Mirakovski, D., Hadzi-Nikolova, M., & Mitic, S. (2015). Determination and monitoring of ore recovery and dilution coefficients in Sasa lead and zinc mine - M. Kamenica, R. Macedonia. *Podzemni Radovi*, (26), 1–8. <https://doi.org/10.5937/podrad1526001m>
22. Bykov, A.A., Travin, S.O., Gromov, O.B., & Mikheev, P.I. (2014). Modeling of uranium oxides hydrofluorination process with Areva firm technology (Malvési, France). *Procedia Chemistry*, 11, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.11.002>

23. Williams, D. (2008). The influence of climate on seepage from mine waste storages during deposition and post-closure. In *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*. https://doi.org/10.36487/acg_repo/852_42
24. Wei Z., Yin G., Wang J.G., Wan L., & Li G. (2013). Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures. *Waste Management & Research*, 31(1), 106-112. doi:10.1177/0734242X12462281
25. Winkler, D., Bidló, A., Bolodár-Varga, B., Erdő, Á., & Horváth, A. (2018). Long-term ecological effects of the red mud disaster in Hungary: Regeneration of red mud flooded areas in a contaminated industrial region. *Science of The Total Environment*, 644, 1292–1303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.059>
26. Randelović, D., Mutić, J., Marjanović, P., Dorđević, T., & Kašanin-Grubin, M. (2019). Geochemical distribution of selected elements in flotation tailings and soils/sediments from the dam spill at the abandoned antimony mine stolice, Serbia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(6), 6253–6268. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07348-4>
27. Mura, J., Gama, F., Paradella, W., Negrão, P., Carneiro, S., de Oliveira, C., & Brandão, W. (2018). Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in germano iron mining area after the collapse of the Tailings Dam of Fundão (Mariana-mg, Brazil) using DInSAR techniques with TerraSAR-X Data. *Remote Sensing*, 10(10), 1507. <https://doi.org/10.3390/rs10101507>
28. Agurto-Detzel, H., Bianchi, M., Assumpção, M., Schimmel, M., Collaço, B., Ciardelli, C., Barbosa, J. R., & Calhau, J. (2016). The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4929–4936. <https://doi.org/10.1002/2016gl069257>
29. Santamarina J.C., Torres-Cruz L.A., & Bachus R.C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364(6440), 526-528. <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>
30. Yuan, Y., Gao, R., Liang, Q., Song, L., Huang, J., Lang, N., & Zhou, J. (2020). A foodborne bongkrekic acid poisoning incident – Heilongjiang Province, 2020. *China CDC Weekly*, 2(51), 975–978. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2020.264>
31. Adeyinka, G.C., Bakare, B.F., & Iwarere, S.A. (2021). Evaluation and risk assessment of heavy metals in surface water collected along the Isipingo River, KwaZulu-Natal, South Africa. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1947265>
32. Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: A review of the last one hundred years, *Geotech.*, 28, 50-53.
33. Penman, A., & Tedd, P. (2015). Tailings dam incidents and new methods. <https://doi.org/10.1680/riacw.31395.0037>
34. Oboni, F., & Oboni, C. (2020). Two Recent Catastrophic Tailings Dams Accidents. Tailings Dam Management for the Twenty-First Century. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19447-5_2
35. Chen, C. (2022). Hazards identification and characterisation of the tailings storage facility dam failure and engineering applications. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 36(6), 399-418. <https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2051136>
36. DBN V.1.1-24:2009. Protection against dangerous geological processes. The main design provisions. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2009.
37. DBN V.2.4-5:2012. Tailings storage facility and sludge accumulators. Part I Design; Part II Construction. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2012.
38. Hui, S. R., Charlebois, L., & Sun, C. (2017). Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(3), 221-229. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0186>
39. Abramson, L.W. (2002). *Slope stability and stabilization methods*, 2nd ed. Wiley.

40. Ozcan, N.T., Ulusay, R., & Isik, N.S. (2012). A study on geotechnical characterization and stability of downstream slope of a tailings dam to improve its storage capacity (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 69(6), 1871–1890. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2016-1>
41. Stefaniak, K., & Wróżyńska, M. (2018). On possibilities of using global monitoring in effective prevention of tailings storage facilities failures. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 5280–5297. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0995-x>
42. Schmidt, B., Malgesini, M., Turner, J., & Reinson, J. (2016). Monitoring of a large tailings storage facility. Retrieved from <http://www.photosat.ca/pdf/Golder-satellite-monitoring-large-tailings-storage-facility-oct2015.pdf>
43. Clarkson, L., Williams, D., & Seppälä, J. (2020). Real-time monitoring of tailings dams. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 15(2), 113–127. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1740280>
44. Dimech, A., Cheng, L. Z., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Meldrum, P., Mary, B., Fabien-Ouellet, G., & Isabelle, A. (2022). A review on applications of time-lapse electrical resistivity tomography over the last 30 years: Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699–1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>
45. Ouellet, S., Dettmer, J., Olivier, G., de Wit, T., & Lato, M. (2022). Advanced Tailings Dam Performance Monitoring with seismic noise and stress models. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1647118/v1>
46. Li, S.M., Yuan, L.W., Yang, H., An, H.M., & Wang, G.J. (2020). Tailings dam safety monitoring and early warning based on spatial evolution process of mud-sand flow. *Safety Sci.*, 124, 104579. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104579>
47. Dong, K., Yang, D., Yan, J., Sheng, J., Mi, Z., Lu, X., & Peng, X. (2022). Anomaly identification of monitoring data and safety evaluation method of tailings dam. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1016458>
48. Sivasuriyan, A., Vijayan, D. S., Munusami, R., & Devarajan, P. (2021). Health Assessment of dams under various environmental conditions using structural health monitoring techniques: A state-of-art review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86180–86191. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16749-3>
49. Shmatkov, G.G., Oksamitny, A.F., Nikolaieva, I.A. (2012). Environmental Problems in Ukraine and Human Factors. In *Correlation Between Human Factors and the Prevention of Disasters* (eds. David L. Barry, Wilhelm G. Coldewey, Dieter W.G. Reimer, Dmytro V. Rudakov). (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics; Vol. 94, pp. 218–223). Amsterdam: IOS Press.
50. Rudakov, D.A., Nikolaieva, I.A. (2015). Checklist method as a tool to improve public safety in TMF affected areas. In *Engaging the public to fight the consequences of terrorism and disasters* (eds. I. Apostol, J. Mamasakhlisi, D. Subotta, D. W.G. Reimer). (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics; Vol. 120, pp. 139–147). Amsterdam : IOS Press.
51. Nikolaeva, I.A., & Rudakov, D.V. (2014). Checklist as a tool to improve the environmental safety of tailings storage facility. In *Forum of miners-2014: materials of the international conf.* (Vol. 1, pp. 190–198). Dnipropetrovsk: LizunovPres.
52. Bogoslovsky, V.A., Ogilvy, A.A. (1970). Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. *Geophysical Prospecting*, 18(1), 758–773. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1970.tb02141.x>
53. Kim Jung-Ho, Yi Myeong-Jong, Song Yoonho, Seol Soon Jee, Kim Ki-Seog. (2020). Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12(2), 221–235. <https://doi.org/10.2113/JEEG12.2.221>
54. Lai Sin-Long, Lee Der-Her, Wu Jian-Hong, Dong Yan-Min. (2014). Detecting the cracks and seepage line associated with an earthquake in an earth dam using the nondestructive testing technologies. *Journal of the Chinese Institute of Engineer*, 37(4), 428–437. <https://doi.org/10.1080/02533839.2013.799949>

55. Sung-Ho Song, Yoonho Song, Byung-Doo Kwon. (2005). Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam. *Exploration Geophysics*, 36, 92-96. <https://doi.org/10.1071/EG05092>
56. Rudakov, L.M., Hapich, H.V., Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Kovalenko, V.V., Chushkina, I.V., & Zaporozhchenko, V.Y. (2020). Problems of technical exploitation and ecological safety of hydrotechnical facilities of Irrigation Systems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 776–788. <https://doi.org/10.15421/112070>
57. 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>
58. Orlinska, O., Pikarenia, D., Chushkina, I., Maksymova, N., Hapich, H., Rudakov, L., Roubik, H., & Rudakov, D. (2022). Features of water seepage from the retention basins of irrigation systems with different geological structures. *Industrial, Mechanical And Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1063/5.0109330>
59. Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Maximova, N.M., Hapich, G.V., Ischenko, V.M. (2012). Evaluation of strength properties of soil dams by method of natural pulse electromagnetic field of the Earth. *Coll. works of National Mining University*, 37, 17-23.

The article was received 03.03.2023 and was accepted after revision 13.06.2023

Рудаков Леонід Миколайович

кандидат с.-г. наук, доцент, Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Адреса робоча: вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49600

ORCID ID: 0000-0001-7277-7220 **e-mail:** rudakov.l.m@dsau.dp.ua