

УДК 550.24 + 504.058

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-5>

РОЛЬ ТЕКТОНІЧНОГО ЧИННИКА У ПІДВИЩЕННІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ХВОСТОСХОВИЩ

Орлінська Ольга Вікторівна,

доктор геологічних наук, професор,

професор кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3202-7577

Пікареня Дмитро Сергійович,

доктор геологічних наук, професор,

професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1405-7801

Рудаков Дмитро Вікторович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри гідрогеології та інженерної геології

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-7878-8692

Рудаков Леонід Миколайович,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,

декан факультету водогосподарської інженерії та екології

Дніпровського державного аграрно-економічного університету

ORCID ID: 0000-0001-7277-7220

Подопригора Павло Володимирович,

здобувач вищої освіти

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Протягом останніх трьох десятиліть у світі зростає занепокоєність щодо деградації навколишнього середовища, викликаного великомасштабним переміщенням небезпечних матеріалів унаслідок аварій на хвостосховищах. В Україні станом на 2020 р. налічується 465 хвостосховищ, що вміщують понад 6 млрд т відходів різних галузей промисловості. Зважаючи на глобальний характер проблеми та її актуальність для України, є потреба в системному розгляді всіх аспектів, пов'язаних зі створенням, експлуатацією, закриттям цих об'єктів та дотриманням сучасних вимог екологічної та промислової безпеки.

Причини аварій на хвостосховищах: переповнення проектної ємності; порушення стійкості схилу (дамби) і структурної цілісності елементів хвостосховища, насамперед дренажу або трубопроводів, які транспортують хвостові матеріали; землетруси та інші сейсмічні прояви; порушення або нестійкість основи хвостосховища; фільтрація через тіло дамби; ерозія поверхні та тіла дамби внаслідок несприятливих погодних умов; просадки внаслідок ведення гірничих робіт.

Особливо небезпечними є чинники, що призводять до порушення стійкості схилу (дамби) і структурної цілісності елементів хвостосховища радіоактивних відходів. Проведені дослідження геофізичними методами природного імпульсного електромагнітного поля Землі та вертикального електричного зондування на хвостосховищі радіоактивних відходів «Дніпровське» у м. Кам'янське дали змогу виділити зони обводнення і фільтрації в огорожувальній дамбі та тріщини в них. Ці зони та азимут простягання тріщин просторово співпадають із розломними структурами та їхніми азимутами простягання на картах новітньої геотектоніки району. Таким чином, визначено новий тектонічний чинник, що впливає на технічний стан хвостосховищ і цивільних гідротехнічних споруд (ГТС) за їх тривалої експлуатації: прояв прихованих зон тріщинуватості у дамбах хвостосховищ і цивільних ГТС підкоряється тенденціям сучасних тектонічних рухів, що за умови тривалої експлуатації таких споруд сприятиме виникненню ослаблених зон та спровокує розвиток небезпечних процесів, які призведуть до зниження надійності ГТС. Цей чинник треба врахо-

увати під час проєктування нових ГТС і візуального та інструментального обстеження хвостосховищ тривалої експлуатації.

Ключові слова: хвостосховище, аварії, огорожуючі греблі, тріщини, новітня тектоніка, безпечна експлуатація.

Orlinska Olga, Pikarenia Dmytro, Rudakov Dmytro, Rudakov Leonid, Podopryhora Pavlo. The role of tectonic factors in improving the environmental safety of tailings ponds

Over the past three decades, there has been growing concern worldwide about environmental degradation caused by the large-scale displacement of hazardous materials as a result of tailings pond accidents. As of 2020, there are 465 tailings ponds in Ukraine, containing over 6 billion tonnes of waste from various industries. Given the global nature of the problem and its relevance to Ukraine, there is a need for a systematic review of all aspects related to the creation, operation, closure of these facilities and compliance with modern environmental and industrial safety requirements.

Causes of tailings pond accidents: overfilling of the design capacity; violation of the stability of the slope (dam) and structural integrity of the tailings pond elements, primarily drainage or pipelines that transport tailings materials; earthquakes and other seismic events; violation or instability of the tailings storage facility foundation; filtration through the dam body; erosion of the surface and dam body due to adverse weather conditions; subsidence due to mining operations.

Particularly dangerous are factors that lead to a breach in the stability of the slope (dam) and the structural integrity of the radioactive waste tailings pond elements. Studies conducted using geophysical methods of the Earth's natural impulse electromagnetic field and vertical electrical sounding at the Dniprovskoe radioactive waste tailings pond in Kamyanske have identified areas of waterlogging and filtration in the containment dam and cracks in them. These zones and the azimuths of the cracks spatially coincide with the fault structures and their azimuths on the latest geotectonic maps of the area. Thus, a new tectonic factor has been identified that affects the technical condition of tailings ponds and civil hydrotechnical structures (HTS) during their long-term operation: the manifestation of hidden fracture zones in tailings dam embankments and civil HTS is subject to the trends of modern tectonic movements, which, under conditions of long-term operation of such structures, will contribute to the emergence of weakened zones and provoke the development of dangerous processes that will lead to a decrease in the reliability of HTS. This factor must be taken into account when designing new HTS and during visual and instrumental surveys of tailings dams in long-term operation.

Keywords: tailings dam, accidents, containment dams, cracks, modern tectonics, safe operation.

Протягом останніх трьох десятиліть у світі зростає занепокоєність щодо деградації навколишнього середовища, викликаного великомасштабним переміщенням небезпечних матеріалів унаслідок аварій на хвостосховищах, де зберігаються великі обсяги відпрацьованих відходів видобутку сировини. Ці відходи створюють серйозну загрозу для людей та навколишнього середовища, особливо якщо хвостосховища спроектовані, побудовані, експлуатуються та управляються неналежним чином.

Україна є наочним прикладом неналежного зберігання відпрацьованих відходів видобутку корисних копалин. Переважна більшість із понад 35 млрд т відходів видобутку в країні зберігається у застарілих або покинутих об'єктах, що не відповідають сучасним вимогам безпеки. Особливо небезпечними такі об'єкти стають у зоні бойових дій, у результаті яких активізується перенос шкідливих речовин у водному та повітряному середовищах [1].

Україна – європейський «лідер» за обсягом відходів. Станом на 2020 р. налічується 465 хвостосховищ, що вміщують понад 6 млрд т відходів різних галузей промисловості. Більшість об'єктів – старі споруди ще з часів СРСР. Багато з них недіючі (неактивні) і в дуже проблемному

стані. До неактивних належать законсервовані, покинуті та рекультивовані об'єкти. Зауважимо, що станом на 2000 р. переважну кількість виведених з експлуатації хвостосховищ ще не було рекультивовано [1].

У країні продовжується накопичення різних видів відходів. Більшість із них утворюється у промисловості та гірничій галузі, а також пов'язаних із ними розкривних породах, шламах, продуктах переробки мінеральної сировини, шлаках тощо. Близько 85 % усіх промислових відходів походить від первинного видобутку та циклів збагачення, що акумулюються у відвалах та хвостосховищах. Велика кількість цих сховищ, розташованих у Донецькому, Львівсько-Волинському вугільних басейнах, Криворізькому басейні залізної руди та інших регіонах, займає площу кілька десятків тисяч гектарів [1].

Зважаючи на глобальний характер проблеми та її актуальність для України, є потреба в системному розгляді всіх аспектів, пов'язаних зі створенням, експлуатацією, закриттям цих об'єктів та дотриманням сучасних вимог екологічної та промислової безпеки.

Аварії на діючих хвостосховищах можуть призвести до неконтрольованих розливів та викидів небезпечних хвостових матеріалів.



Рис. 1. Діаграма причин аварій на хвостосховищах [2]

Негативні наслідки таких інцидентів для населення та навколишнього середовища продемонстрували аварії у багатьох країнах, у тому числі й у країнах ЄС. Найбільш відомі аварії протягом останніх двох десятиліть трапилися на хвостосховищах у Байя Маре, Румунія (2000), Айка (Колонтар), Угорщина (2010), гірничій компанії «Талвіваара» у Фінляндії (2012), залізорудній шахті Жермано поблизу міста Маріана в штаті Мінас-Жераїс, південний схід Бразилії (2015), поблизу міста Ріддер, східний Казахстан (2016), біля залізорудної шахти Вале Коррего до Фейжао в штаті Мінас-Жерайс, Бразилія (2019) тощо.

За аналізом причин аварій на хвостосховищах, наведеним у [2], можна виділити у порядку зниження пріоритету такі (рис. 1):

1) переповнення проєктної ємності, яке часто трапляється внаслідок зливових дощів, ураганів, тайфунів, які є більш частими в тропічному та субтропічному кліматі;

2) порушення стійкості схилу (дамби), що може бути результатом як неправильного проєктування, так і змін у тілі дамбі після тривалої експлуатації;

3) порушення структурної цілісності елементів хвостосховища, насамперед дренажу або трубопроводів, які транспортують хвостові матеріали;

4) землетруси та інші сейсмічні прояви;

5) порушення або нестійкість основи хвостосховища;

6) фільтрація через тіло дамби чи вплив підземних вод;

7) ерозія поверхні та тіла дамби внаслідок дощів, сильних вітрів, морозів, інших несприятливих погодних умов;

8) просадки внаслідок ведення гірничих робіт.

До природних чинників належать сейсмічна активність (близько 17 % випадків), часткове переповнення внаслідок сильних дощів за умов недостатньої пропускної здатності дренажу (до 23 %), ерозія (близько 6 %). Переважно техногенними причинами є порушення стійкості схилу (21 %), порушення основи (понад 9 %), просідання внаслідок гірничих робіт (1 %).

Стосовно недіючих хвостосховищ можна виділити з переліку пункти 2, 4, 6. 7. Окрім четвертого пункту, усі інші яскраво представлені на хвостосховищі радіоактивних відходів «Дніпровське», розташованому в межах території м. Кам'янське (рис. 2).



Рис. 2. Сучасний стан хвостосховища «Дніпровське» за даними Інтернет-порталу Google Earth

Складування відходів переробки уранової сировини у хвостосховище проводилося з 1954 по 1968 р. способом гідронамиву. У результаті в ньому сьогодні заскладовано приблизно 12 млн т (5,8 млн м³) відходів переробки уранових руд. Абсолютна відмітка гребеня дамби до 1959 р. становила 57,45 м, потім після нарощування досягла 61,3–64,2 м. Висота дамб змінюється від 6,0 до 11,8 м, ширина по гребеню – 5–35 м, ширина по підставі – 80 м. Сьогодні східна і північно-східна ділянки захисної дамби хвостосховища протяжністю до 1 600 м засипані відходами коксохімічного виробництва потужністю 7–22 м.

Хвостосховище в 1976–1989 рр. перекрите шаром фосфогіпсу товщиною від 1 до 5 м поблизу дамб до 19 м у центральній і східній частинах чаші, який запобігає надходженню в атмосферну радіоактивних речовин за вітрового пиління [3].

Ерозію поверхні та тіла дамби хвостосховища внаслідок дощів, сильних вітрів, морозів, інших несприятливих погодних умов представлено на рис. 3.

Ерозії сприяли розчленований рельєф та нахил поверхні хвостосховища у південно-західному напрямку (рис. 3). На деяких ділянках за рахунок лінійної ерозії відбувається повний розмив фосфогіпсу, і на поверхню виходять відходи збагачення уранових руд, про що свідчить підвищений рівень радіації у цих місцях. Під час зливових дощів поверхневі води накопичуються у південно-західній частині дамби, обводнюючи її, чому додатково сприяла відсутність поверхневого дренажу на хвостосховищі.

У 2016, 2022, 2023 рр. проведено комплексні дослідження з визначення зон фільтрації

і надмірного обводнення на дамбі хвостосховища, причому в 2022 р. роботи виконувалися на всій дамбі, а в 2016 і 2023 рр. лише у південно-західній частині [3; 4]. До комплексу робіт у 2016 і 2022 рр. входили геофізичні електро-розвідувальні методи, вертикальне електричне зондування (ВЕЗ) природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) та радіаційна зйомка. Метод ПІЕМПЗ надає якісну інформацію, до якої належать локалізація ділянок зосередженої фільтрації, обводнення і розущільнення на ґрунтових дамбах, а тому його доцільно застосовувати в комплексі з кількісним методом ВЕЗ, що рекомендований у нормативних документах [5]. Метод ПІЕМПЗ надає можливість швидко та достовірно виявляти приховані дефекти в ґрунтових масивах, а ВЕЗ – глибину залягання та потужність водоносних лінз. Виділені зони фільтрації та обводнення частково завірялися бурінням. У 2023 р. використовувався лише метод ПІЕМПЗ для встановлення змін розмірів ділянок обводнення після зливових дощів у липні-серпні 2023 р. [4].

Ідея застосування методу ПІЕМПЗ із метою проведення даного дослідження така: імпульсне електромагнітне поле генерується у кристалічних породах Українського щита. Якщо на шляху його розповсюдження зустрічаються обводнені ділянки порід, то його рівень та кількість імпульсів мають зменшуватися. Те ж саме проявлятиметься у тріщинуватих породах, до яких можна віднести насипні техногенні ґрунти. Розрізнити зони обводнення та техногенні ґрунти можна за допомогою інших методів [6–8].

Дамба на хвостосховищі була умовно поділена на дві частини – північну і південну, які



Рис. 3. Прояви небезпечних інженерно-геологічних явищ (обвали, зсуви та розтріскування потужного шару фосфогіпсу) на північній дамбі хвостосховища «Дніпровське» [3]

мають різні будову, склад, функції та екологічну значущість. Якщо північна дамба відокремлює площу відводу хвостосховища від техногенних об'єктів інших підприємств, то південна дамба є опорною і захисною від відходів для прилеглих до хвостосховища територій. Це, передусім, стосується долини р. Коноплянка, куди можуть потрапляти фільтрати зі хвостосховища за неналежного технічного стану південної дамби, тому цій частині дамби було приділено найбільшу увагу під час досліджень. Тут польові роботи методом ПІЕМПЗ та радіаційна зйомка проводилися лише у профільно-площинному варіанті. Уздовж дамби закладалися чотири профілі з відстанню між ними 3 м, точки спостережень на них розташовувалися теж через 3 м, тобто по квадратній мережі. Така квадратна мережа є оптимальною для виконання будь-яких геофізичних робіт.

Для реєстрації сигналу ПІЕМПЗ застосовувався прилад «СІМЕІЗ» (мікропроцесорний індикатор електромагнітного поля – МІЕМП 14/4), який призначений для вивчення імпульсного електромагнітного поля природного і техногенного походження в лабораторних і польових умовах [3].

Прилад визначає кількість імпульсів ПІЕМПЗ за час вимірювання з відносною похибкою у межах ± 10 . Наявність чотирьох антенних гнізд

дає змогу проводити зйомку одночасно на трьох антенах; дві з них розташовані горизонтально (зазвичай у меридіональному та широтному напрямках), третя направлена вертикально вниз, четверта може бути використана в якості варіометра і фіксувати зміни електромагнітного поля у стаціонарній точці.

Результатом застосування цього методу стало виділення у плані ділянок зменшення щільності потоку імпульсів ПІЕМПЗ, яке свідчить про обводнення дамби. У встановлених за даними ПІЕМПЗ зонах виконувалися точкові спостереження методом ВЕЗ для визначення глибини залягання і потужності водоносних ліній.

Обробка результатів досліджень здійснювалася шляхом складання для кожної ділянки карт щільності потоку імпульсів магнітного складника ПІЕМПЗ для кожної антени у програмному середовищі Surfer. Для побудови карт використано метод триангуляції з лінійною інтерполяцією за квадратною вузловою мережею.

В основу інтерпретації карт покладено відзначену вище особливість поля ПІЕМПЗ, а саме – зменшення щільності потоку імпульсів магнітного складника електромагнітного поля у ділянках, які розущільнені, тріщинуваті або обводнені. Додатково використовується вигляд рисунку поля ПІЕМПЗ. Так, для суцільних, монолітних порід та матеріалів характерне дуже

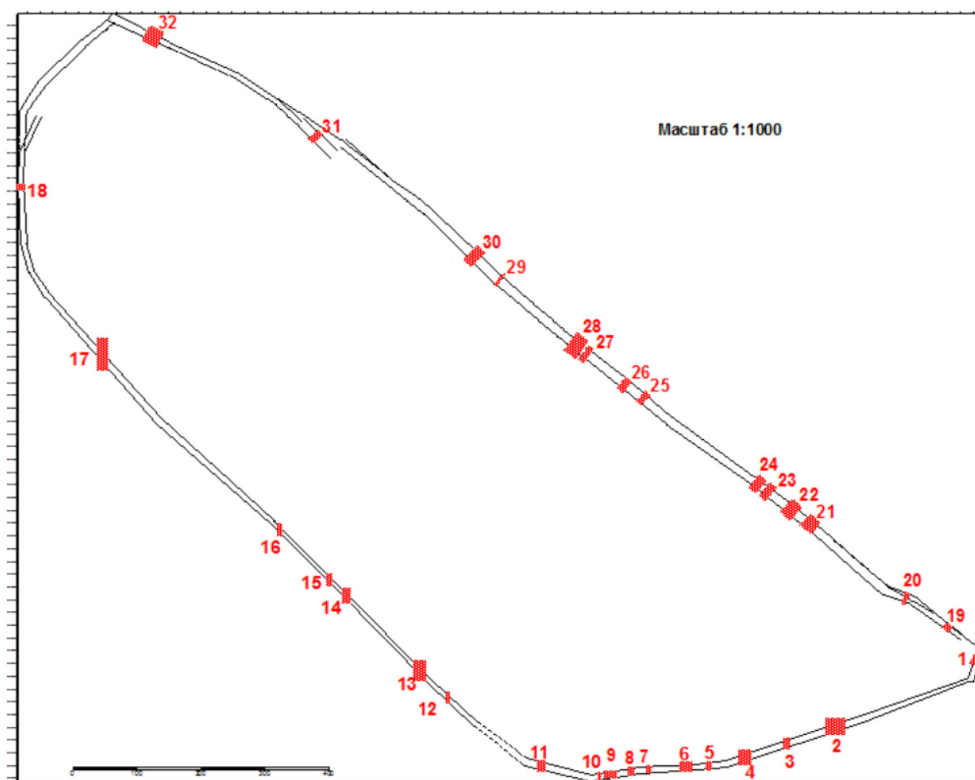
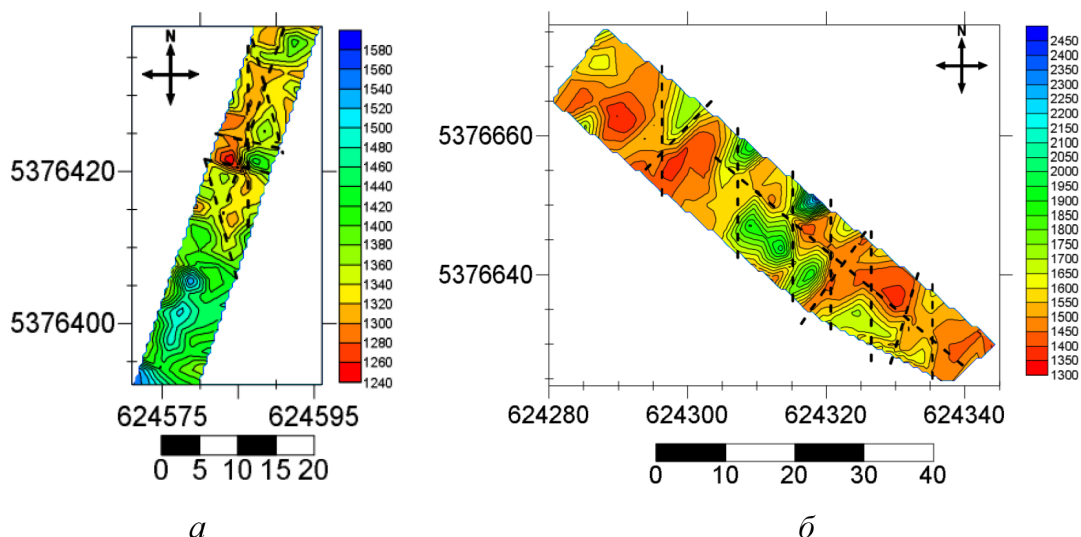


Рис. 4. Схема розташування ділянок обводнення та фільтрації (червоні кольори) та їх номери в греблі хвостосховища «Дніпровське» [3]



**Рис. 5. Приклад виділення тріщин (чорний пунктир) на карті щільності потоку імпульсів магнітного складника ПІЕМПЗ ділянок 1 (а) та 21 (б) (див. рис. 4).
Кольорові шкали характеризують щільність потоку імпульсів магнітного складника ПІЕМПЗ, імп./0,5 с**

диференційоване поле з великою кількістю ізо-
ліній та великим розмахом (амплітудою) зна-
чень. Для тріщинуватих ділянок рисунок поля
більш витриманий, але також диференційо-
ваний, хоча у меншому ступені. Обводнені ж
ділянки мають спокійний, «розмитий» рисунок
поля з невеликою кількістю ізоліній, значення
яких знаходяться на низьких рівнях.

На обводнених ділянках, установлених за
даними зйомки ПІЕМПЗ 2022 р. (рис. 4), вико-
ристовуючи відомі ознаки розривних порушень

у геофізичних полях, виділялися зони тріщи-
нуватості та визначалися їхні азимуты простя-
гання, приклад виділення тріщин наведено на
рис. 5. Установлено, що найбільша кількість трі-
щин виділяється на ділянках обводнення 1, 3,
5, 6, 9, 10, 12, 18, 19–22, 24–25 (рис. 4). Просто-
рові характеристики систем тріщин наведено
в табл. 1 у вигляді азимутів простягання, а візу-
альне їх розповсюдження – на стовпчастій діа-
грамі (рис. 6). Аналіз діаграми дає змогу виді-
лити домінуючі азимуты простягання тріщин,

Таблиця 1

Азимуты простягання тріщин на обводнених ділянках дамби хвостосховища «Дніпровське»

Номер групи тріщин	Інтервал азимутів простягання, град.	Кількість тріщин відповідного азимуту	Відносна частота зустрічі, %
1	0–9	46	26,59
2	10–19	5	2,89
3	20–29	6	3,47
4	30–39	17	9,83
5	40–49	15	8,67
6	50–59	9	5,20
7	60–69	1	0,58
8	70–79	8	4,62
9	80–90	14	8,09
10	270–279	2	1,16
11	280–289	0	0
12	290–299	1	0,58
13	300–309	10	5,78
14	310–319	12	6,94
15	320–329	5	2,89
16	330–339	5	2,89
17	340–349	16	9,25
18	350–360	1	0,58
Разом		173	100

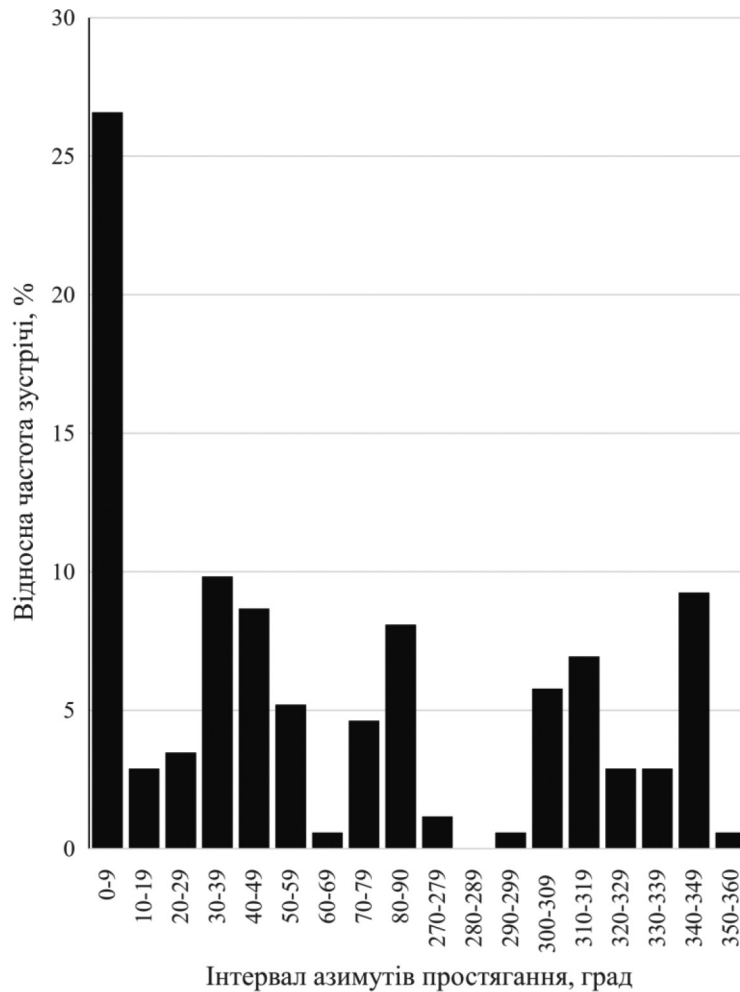


Рис. 6. Діаграма тріщинуватості дамби хвостосховища «Дніпровське»

що визначені в зонах обводнення і фільтрації хвостосховища.

Найбільш ярко проявлені меридіональна система тріщин з азимутом простягання $0-10^{\circ} (\pm 5^{\circ})$ та перпендикулярна до неї широтна $80-90^{\circ} (\pm 5^{\circ})$, при цьому перша домінуюча. Друга за розповсюдженістю – діагональна система з азимутами простягання $40-50^{\circ}$ та $310-320^{\circ} (\pm 5^{\circ})$. Третя система за відносною частотою зустрічі також діагональна з азимутами простягання $30-40^{\circ}$ та $300-310^{\circ} (\pm 5^{\circ})$. Окремо виділяється група тріщин із напрямками простягання $340-350^{\circ} (\pm 5^{\circ})$.

Установлені особливості показують, що повинен бути деякий фактор, за рахунок якого формуються певні системи або напрямки тріщин.

Розкрити цей фактор допомагають дослідження, результати яких наведено в роботах [9; 10]. Автори побудували карту активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур та сумарних амплітуд вертикальних рухів земної поверхні у четвертинному періоді масштабу 1:25000 для району розташування хвостосховищ радіоактивних відходів Дніпродзержинського промислового вузла (рис. 7).

У межах Усієї досліджуваної території виявлено лінеamenti (зони активних на новітньому етапі розвитку розломів): регіональні, показані на рис. 7 червоним кольором, і локальні, показані темно-сірим кольором, які утворюють дві домінуючі системи, представлені прямолінійними сполученими і взаємно перпендикулярними лінеаментними зонами домінуючих напрямків (0° та $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$, $40-45^{\circ}$ та $310-315^{\circ}$), одну проміжну ($25-30^{\circ}$ та $295-300^{\circ}$) та два пригнічених напрямки ($15-20^{\circ}$ та $345-350^{\circ}$), що мають лише по одній лінеаментній зоні [9; 10]. Саме вони, на думку авторів, є найбільш небезпечними ділянками, де відбувається активний водообмін між поверхневими і підземними водами, а зони поглинання поверхневих вод розміщуються в місцях сполучення таких лінеаментних зон [9].

Хвостосховище «Дніпровське» розташоване у вузлі перетину трьох регіональних лінеаментних зон – субмеридіональної, північно-східної з азимутами простягання $40-45^{\circ}$ та $310-315^{\circ}$ і північно-західної з азимутом простягання $295-300^{\circ}$. Окрім того, на захід від хвостосховища

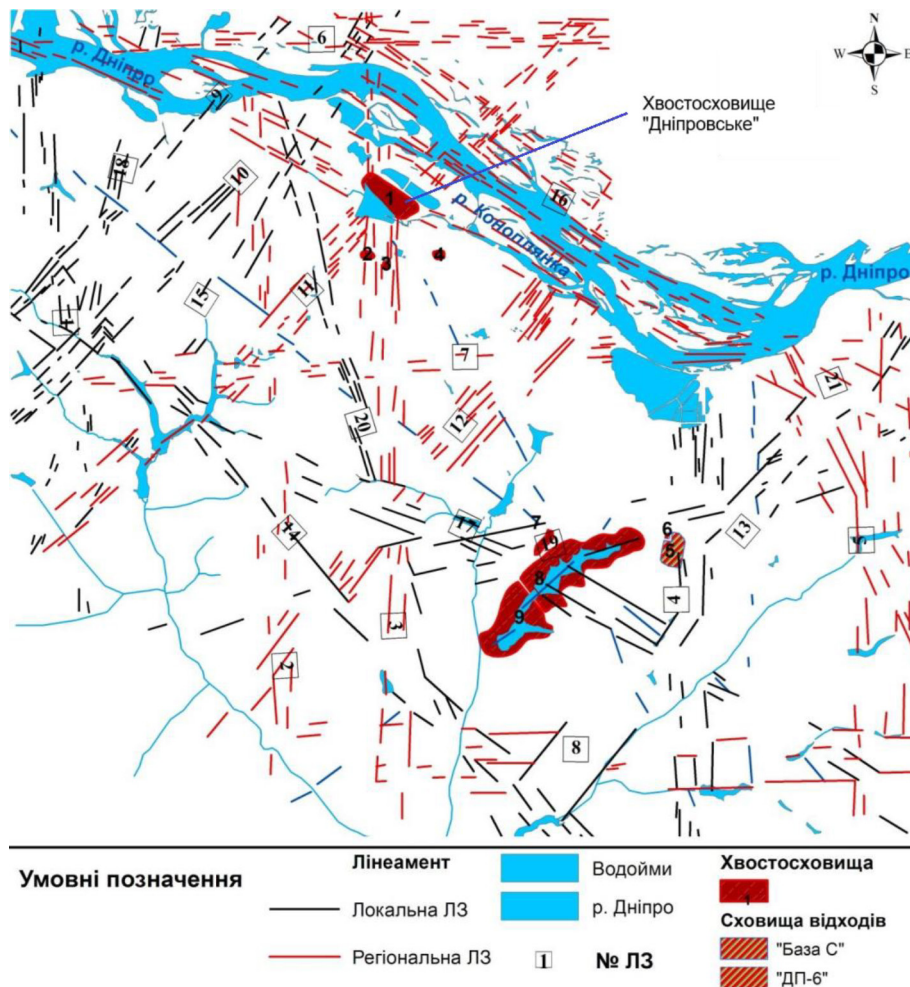


Рис. 7. Карта активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур у межах території розташування хвостосховищ уранового виробництва колишнього ВО «ПХЗ» [10]

розташована локальна лінеаментна зона з напрямком простягання 340–350°.

Сумісний аналіз карти активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур (рис. 7) та діаграми, наведеної на рис. 6, показує добру збіжність азимутів простягання лінеаментних структур і тріщин у зонах обводнення та фільтрації, установлених за геофізичними даними. Це може свідчити про приуроченість розвитку зон обводнення і фільтрації за рахунок формування тріщин, просторово приурочених до лінеаментних зон.

За даними Л. С. Галецького та ін. [11], зони лінеаментів корелюються з характером поля сучасних рухів та дуже добре співпадають із розподілом ділянок аномальних градієнтів швидкостей сучасних рухів. Сітка трансрегіональних зон лінеаментів контролює у регіональному плані розвиток екзогенних геологічних процесів та зумовлює ступінь ураженості території за сукупністю їх виявлення.

У характері сучасних вертикальних рухів спостерігається активізація північно-східних

рухів, які виражені більш різко, ніж поздовжні. У районі, який розглядається, вертикальні рухи становили +4 мм/рік.

Ураховуючи проведені дослідження, можна виділити тектонічний чинник розвитку ділянок тріщинуватості, обводнення і фільтрації на дамбах хвостосховищ, що пов'язаний із сучасними рухами по лінеаментних зонах. Їх просторова приуроченість до розломних структур Українського щита свідчить про успадкованість розвитку тектонічних структур, а також про вплив на сучасні техногенні екзогенні процеси.

Такий зв'язок сучасної тектоніки та процесів розуцільнення дамб хвостосховищ із виникненням небезпечних зон тріщинуватості та проникності дає змогу провести діагностику ризиків порушення стійкості гідротехнічних споруд залежно від їх розташування на території. Дійсно, якщо хвостосховище розташоване у вузлі перетину регіональних або локальних розломів земної кори, то ймовірність виникнення та розвитку небезпечних процесів, що

знижують безпеку хвостосховища, зростає. Причому це стосується не лише власне огорожуваних дамб, а й, що суттєво, ложа хвостосховища. Якщо технічний стан дамб можна моніторити та вживати заходів щодо забезпечення їх стійкості, то дно хвостосховища може зазнавати порушень гідроізоляції з виток

рідких відходів у підстилаючі ґрунти та водонесні горизонти. Тому для хвостосховищ, які розташовані в такій структурно-тектонічній позиції, необхідно оцінювати не лише стан дамб, а й навколишню територію, особливо якщо у хвостосховищі зберігаються небезпечні відходи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2021. 514 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>
2. Рудаков Д. В. Безпека хвостосховищ : конспект лекцій. Дніпро : НТУ «ДП», 2024. 93 с.
3. Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Рудаков Л. М. Оцінка технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» геофізичними методами / MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education : Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2023. С. 182–198. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-10>
4. Пікареня Д. С., Орлінська О. В. Зіставлення результатів досліджень методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі. *Науковий журнал «Метінвест політехніки». Серія «Технічні науки»*. 2025. № 3. С. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-4>
5. Інженерні вишукування для будівництва. ДБН А.2.1-1-2008. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. 74 с.
6. Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Рудаков Л. М., Гапич Г. В. Досвід застосування геофізичних методів для оцінки технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища. *Науковий журнал «Метінвест політехніки»*. 2024. № 1. С. 82 –89. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-12>
7. Чушкіна І. В., Максимова Н. М., Орлінська О. В., Пікареня Д. С., Гапич Г. В. Економічна ефективність застосування геофізичних методів під час діагностики технічного стану регулюючого басейну. *Збірник наукових праць НГУ*. 2021. № 66. С. 267–281. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.267>
8. Napich H., Orlinska O., Pikarenia D., Chushkina I., Pavlychenko A. & Roubik H. Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. № 2. Р. 154–160. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/154>
9. Верховцев В. Г., Лисиченко Г. В., Юськів Ю. В. Оцінка безпеки за неотектонічними критеріями району розташування хвостосховищ радіоактивних відходів Дніпродзержинського промислового вузла. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*. 2009. № 17. С. 98–108. URL: <https://journals.igns.kyiv.ua/index.php/geotech/article/view/311/286>
10. Юськів Ю. В. Екологічний стан хвостосховищ уранового виробництва Дніпродзержинського промислового вузла у зв'язку із впливом новітньої тектоніки : дис. ... канд. геол. наук : 21.06.01. Київ, 2014. 155 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0414U005791>
11. Геологія і корисні копалини України. Масштаб 1:5000 000. Атлас / гол. ред. Л.С. Галецький. Київ : Національна академія наук України, 2001. 35 с.

REFERENCES:

1. *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukraini u 2021 rotsi* [National Report on the State of the Environment in Ukraine in 2021]. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, 2021. [in Ukrainian]. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>
2. Rudakov, D. V. (2024). *Bezpeka khvostoskhovyshch : Konspekt leksi* [Tailings pond safety : Lecture notes]. Dnipro : NTU “DP”, 2024. [in Ukrainian].
3. Pikarenia, D. S., Orlinska, O. V., & Rudakov, L. M. (2023). Otsinka tekhnichnoho stanu ohorodzhualnoi damby khvostoskhovyshcha “Dniprovsk” heofizychnymy metodamy [Evaluation of the technical condition of the enclosing dam of the Dniprovsk tailings dump using geophysical methods]. MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education : Scientific monograph. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023, 182–198. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-10> [in Ukrainian].
4. Pikarenia, D. S., & Orlinska, O. V. (2025). Zistavlennia rezultativ doslidzen metodom pryrodnoho impulsnoho elektromagnitnoho polia Zemli [Comparison of research results using the natural pulsed electromagnetic field of the Earth method]. *Naukovyi zhurnal Metinvest Politekhniky – Scientific journal of Metinvest Polytechnic*, № 3, 34–41. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-4> [in Ukrainian].

5. Inzhenerni vyshukuvannia dlia budivnytstva. DBN A.2.1-1-2008 [Engineering surveys for construction. DBN A.2.1-1-2008.]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy – Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2008. [in Ukrainian].
6. Pikarenia, D. S., Orlinska, O. V., Rudakov, L. M., & Hapich, H. V. (2024). Dosvid zastosuvannia heofizychnykh metodiv dlia otsinky tekhnichnoho stanu ohorodzhuvalnoi damby khvostoskhovyshcha [Experience in applying geophysical methods to assess the technical condition of the tailings dam]. *Naukovyi zhurnal Metinvest Politekhniky – Scientific journal of Metinvest Polytechnic*, № 1, 82–89. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-12> [in Ukrainian].
7. Chushkina, I. V., Maksymova, N. M., Orlinska, O. V., Pikarenia, D. S. & Hapich, H. V. (2021). Ekonomichna efektyvnist zastosuvannia heofizychnykh metodiv pid chas diahnostryky tekhnichnoho stanu rehuliuuchoho baseinu [Economic efficiency of using geophysical methods in diagnosing the technical condition of a regulating reservoir]. *Zb. nauk. prats NHU – Collection of scientific papers of the National Mining University*, № 66, 267–281. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.267> [in Ukrainian].
8. Hapich, H., Orlinska, O., Pikarenia, D., Chushkina, I., Pavlychenko, A., & Roubík, H. (2023). Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – Scientific Bulletin of the National Mining University*, № 2, 154–160. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/154> [in Ukrainian].
9. Vierkhovtsev, V. H., Lysychnenko, H. V., & Yuskiv, Yu. V. (2009). Otsinka bezpeky za neotektonichnymy kryteriiamy raionu roztashuvannia khvostoskhovyshch radioaktyvnykh vidkhodiv Dniprodzerzhynskoho promyslovoho vuzla [Safety assessment based on neotectonic criteria for the location of radioactive waste tailings ponds in the Dniprodzerzhynsk industrial hub]. *Zb. Nauk. prats In-tu heokhimii navkolyshnoho seredovyscha – Collection of scientific papers of the Institute of Environmental Geochemistry*, № 17, 98–108. Retrieved from <https://journals.igns.kyiv.ua/index.php/geotech/article/view/311/286> in Ukrainian].
10. Yuskiv, Yu. V. (2014). Ekolohichniy stan khvostoskhovyshch uranovoho vyrobnytstva Dneprodzerzhynskoho promyslovoho vuzla v zviazku z vplyvom novitnoi tektoniky [Ecological state of uranium production tailings ponds in the Dniprodzerzhynsk industrial hub in connection with the influence of recent tectonics] : dys. ... kand. heol. nauk – dissertation... candidate of geological sciences: 21.06.01. [in Ukrainian]. Retrieved from <https://uacademic.info/ua/document/0414U005791>
11. Heolohiia i korysni kopalyny Ukrainy. Masshtab 1:5000 000. Atlas (2001). [Geology and Mineral Resources of Ukraine. Scale 1:5000 000. Atlas] / Hol. red. L. S. Haletskyi – Ed. by L. S. Galetsky. Kyiv : Natsionalna akademiia nauk Ukrainy – National Academy of Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].