

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РУДАКОВ ЛЕОНІД МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 504.064: 550.837

ДИСЕРТАЦІЯ

**«НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ
БЕЗПЕКОЮ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ГІРНИЧОПРОМИСЛОВОГО
КОМПЛЕКСУ»**

Спеціальність 21.06.01 – Екологічна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело, всі частини тексту дисертації, під час написання яких використовувалися технології штучного інтелекту, перевірені та відредаговані особисто.



Л.М. Рудаков

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Рудаков Л.М. Науково-технічні засади управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд гірничопромислового комплексу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2026.

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальну науково-технічну проблему управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд шляхом інтеграції інструментальних методів діагностики та прогнозного моделювання. На основі аналізу світових тенденцій у гірничодобувній галузі визначено, що порушення гідродинамічної рівноваги хвостосховищ створює незворотні загрози для геологічного та водного середовищ промислових регіонів. У роботі доведено, що прогресуюча деградація захисних дамб у гірничопромисловому комплексі Дніпропетровської області зумовлена сукупним впливом антропогенного перезволоження та динамічних навантажень від транспортних шляхів. Обґрунтовано, що існуючі системи регулярного моніторингу потребують доповнення методами дистанційної ідентифікації прихованих ділянок внутрішньої ерозії. Розроблено концептуальну модель управління екологічними ризиками, що базується на виявленні зон геодинамічної нестабільності та оцінці їхнього впливу на міграцію забруднюючих речовин. У результаті досліджень встановлено, що інтенсифікація фільтраційних потоків є ключовим показником переходу системи «структура–середовище» у критичний стан.

Розроблено математичні моделі напружено-деформаційного стану ґрунтових масивів, що враховують анізотропію фізико-механічних властивостей алювіальних відкладень. Визначено закономірності зміни параметрів природного електромагнітного поля під впливом інтенсивної фільтрації та ущільнення тіла дамб. Отримано нові дані щодо взаємозв'язку між сейсмоакустичною емісією масивів та ймовірністю виникнення надзвичайних

ситуацій на сховищах небезпечних відходів.

На основі аналізу значного масиву статистичних даних про аварійність виявлено основні антропогенні причини відмов гідротехнічних споруд (ГТС) у світовій практиці. Детально розглянуто методологію комплексного використання неруйнівних дистанційних методів моніторингу довкілля. Доведено, що метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) є найефективнішим інструментом для експрес-діагностики стану гідротехнічних споруд. Обґрунтовано оптимальні параметри вимірювальної мережі для проведення довгострокових досліджень на великомасштабних об'єктах. Запропоновано методику інтерпретації геофізичних сигналів для оперативного виявлення прихованих зон розуцільнення або деструкції ґрунту. У результаті експериментальних досліджень встановлено кореляцію між питомою електричною провідністю ґрунтів та їхньою поточною вологістю. Розроблено математичні моделі, які дають змогу з високою точністю оцінювати динаміку просування фронту фільтраційного потоку в часі.

Встановлено порогові значення інтенсивності випромінювання ПЕМПЗ, які сигналізують про критичну загрозу прориву огорожувальної дамби. Отримано експериментальне підтвердження високої чутливості сучасних магнітометричних методів до виявлення зон розуцільнення та підвищеної обводненості гідротехнічних споруд. На основі аналізу складної геологічної будови районів розташування накопичувачів встановлено тектонічні чинники впливу на їх цілісність.

Детально досліджено складну екологічну ситуацію в районі недіючого хвостосховища «Дніпровське» у Кам'янському. Визначено, що радіоактивна спадщина колишнього уранового виробництва вимагає впровадження спеціальних інженерно-технічних заходів безпеки. Обґрунтовано необхідність термінового зміцнення захисного шару з фосфогіпсу для надійного запобігання вітровому пилоутворенню та інфільтрації атмосферних опадів у тіло й ложе хвостосховища. Розроблено уточнену схему міграції радіонуклідів у підземних горизонтах у напрямку русла річки Коноплянка, що дає змогу визначити

локальні ділянки інтенсивного вимивання фільтрату в підфундаментній частині захисних дамб.

Розроблено математичні моделі адсорбції ізотопів урану різними типами ґрунтів основи та тіла хвостосховища. Встановлено, що існуючий гідравлічний зв'язок між накопичувачем та р. Дніпро створює довгострокову загрозу регіонального масштабу. Отримано деталізовані карти просторового розподілу радіаційного фону на прилеглій до об'єкта селітебній території.

На основі аналізу поточного стану хвостосховища «Сухачівське» встановлено зони розвитку небезпечної поверхневої та внутрішньої суфозії. Прогнозне моделювання в програмі Phase 2 показало, що для дамби «Сухачівське» ІС при поєднанні обводнення та вібраційного впливу автотранспорту коефіцієнт стійкості знижується до $k_s = 1,202$, що є нижчим за нормативні вимоги ($[k_s] = 1,25$) і створює загрозу прориву.

На ВГМК у б. Скажена встановлено підняття рівнів (в середн. на 0,7–1,0 м/рік) двох техногенних водоносних горизонтів, злиття яких спричиняє обводнення та повзучість ґрунтів. Цей процес у поєднанні з бічним тиском шламових мас інтенсифікує формування зсувів, що створює загрозу цілісності огорожувальних споруд. Додатковим екологічним ризиком визначено сейсмічну активність регіону, яка в умовах значного обводнення може призвести до руйнування дамби.

У роботі вперше запропоновано цілісну наукову концепцію, що об'єднує промислові хвостосховища та цивільні зрошувальні системи в єдину гідродинамічну мережу регіону. Це дає змогу розглядати цивільні ГТС як стратегічні інженерні бар'єри для локалізації техногенних забруднень у разі аварійних ситуацій або воєнних дій, а також оптимізувати питне й технічне водозабезпечення гірничорудних районів. Виявлено критично високий рівень фізичного зносу протифільтраційних екранів магістральних каналів зрошувальних систем та регулюючих басейнів. Обґрунтовано обсяги значних втрат дефіцитних водних ресурсів через незадовільний технічний стан бетонного облицювання ложа.

Розроблено методику геофізичного контролю для оперативного виявлення прихованих витоків води з діючих каналів. На основі проведених досліджень

побудовано профілі вологості бортів каналів на найбільш небезпечних ділянках їхніх трас. Створено математичні моделі процесу підтоплення прилеглих сільськогосподарських угідь унаслідок фільтраційних втрат. Доведено, що інтенсивна фільтрація з каналів призводить до незворотного вторинного засолення родючих шарів ґрунту. Отримано об'єктивні дані щодо суттєвих економічних збитків, зумовлених неефективною експлуатацією застарілих цивільних ГТС. На основі аналізу багаторічної динаміки рівня підземних вод визначено сезонні піки екологічного навантаження на довкілля.

Фундаментально розглянуто результати комплексного чисельного моделювання небезпечних техногенних процесів. Встановлено критичні значення коефіцієнтів стійкості укосів дамб для різних рівнів наповнення накопичувачів. Обґрунтовано негативний вплив локальних геодинамічних аномалій на стабільність великих гідротехнічних споруд. Розроблено гнучкий алгоритм автоматизованої оцінки екологічних ризиків у середовищі геоінформаційних систем (ГІС). У результаті проведених досліджень теоретично доведено можливість самочинного зрідження хвостів при виникненні раптових динамічних навантажень. Розроблено математичні моделі, що враховують просторову нерівномірність фізичних властивостей намитих ґрунтових масивів. Досліджено процеси фільтрації крізь захисну дамбу хвостосховища Вільногірського ГМК у балці Скажена з виходами розчинів, збагачених важкими металами, на прилеглі території, що призводить до забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод. Отримано кількісні інтегральні показники ймовірності відмов окремих конструктивних елементів захисних дамб. На основі аналізу довгострокових прогнозів визначено черговість та пріоритетність реконструкції ГТС регіону.

В роботі розглянуто практичні і технічні рішення щодо стабілізації екологічного стану ГТС. Встановлено високу ефективність комбінованого використання геосинтетичних матеріалів для армування зовнішніх укосів. Обґрунтовано доцільність застосування технології струминної цементації для швидкого створення протифільтраційних завіс. Розроблено наукові пропозиції

щодо поетапного переходу до екологічно безпечного пастового згущення відходів збагачення. У результаті проведених досліджень визначено оптимальні співвідношення тампонажних сумішей для зміцнення слабких основ споруд. Розроблено функціональну структуру цифрової системи раннього оповіщення про загрозу виникнення надзвичайних екологічних ситуацій. Встановлено, що впровадження комплексного автоматизованого моніторингу знижує загальний ризик катастроф на 30%. Отримано позитивні результати виробничої апробації запропонованих рішень на об'єктах ДП «Бар'єр». На основі аналізу сумарного екологічного ефекту встановлено доцільність широкого галузевого впровадження результатів роботи.

У підсумку ґрунтовно розглянуто загальні результати виконаного багатопланового наукового дослідження. Встановлено, що розроблені науково-практичні засади забезпечують надійний довгостроковий захист природного довкілля. Обґрунтовано високу наукову новизну всіх отриманих результатів у галузі екологічної безпеки. Розроблено конкретні рекомендації для органів влади щодо вдосконалення діючих регламентів безпечної експлуатації ГТС. У результаті проведених досліджень сформовано стратегію мінімізації негативного техногенного впливу на водні об'єкти. Розроблено математичні моделі, які стали фундаментом для створення нової регіональної системи екологічного моніторингу. Встановлено повну відповідність отриманих результатів сучасним європейським нормам екологічної та промислової безпеки. Отримано вагомий внесок у розвиток методології прогнозування екологічних катастроф у щільно заселених промислових агломераціях. Практичне впровадження результатів дисертації сприятиме сталому розвитку Дніпропетровської області та зміцненню екологічної безпеки.

Ключові слова: екологічна безпека, гідротехнічні споруди, хвостосховище, зрошувальна система, геофізичний моніторинг, геотектоніка, фільтрація, міграція, радіонукліди, індекс небезпеки.

ABSTRACT

Rudakov L.M. Scientific and technical principles of environmental safety management for hydraulic structures in the mining industry. – Unpublished manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.01 – Environmental Safety. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

This dissertation is a comprehensive research study that addresses the pressing scientific issue of establishing a methodology for ensuring the environmental safety of hydraulic structures through the integration of instrumental diagnostic methods and predictive modeling. Based on an analysis of global trends in the mining industry, it has been established that disturbances in the hydrodynamic equilibrium of tailings ponds pose irreversible threats to the geological and aquatic environments of industrial regions. The work establishes that the progressive degradation of protective dams within the mining and industrial complex of the Dnipropetrovsk region is caused by the cumulative impact of anthropogenic waterlogging and dynamic loads from transportation routes. It is argued that existing routine monitoring systems require supplementation with methods for remote identification of hidden areas of internal erosion. A conceptual model for managing environmental risks has been developed, based on the identification of zones of geodynamic instability and the assessment of their impact on the migration of pollutants. As a result of the research, it has been proven that the intensification of filtration flows is a key indicator of the transition of the “structure-environment” system to a critical state.

Mathematical models of the stress-strain state of soil masses have been developed, which account for the anisotropy of the physical and mechanical properties of alluvial deposits. Patterns of transformation of natural electromagnetic field parameters under the influence of active suffusion and compaction of dam bodies have been established. New data on the correlation between the seismoacoustic emission of massifs and the probability of emergency situations at hazardous waste storage facilities have been obtained.

Based on the analysis of a large array of statistical data on accident rates, the main

man-made causes of gas transmission system (GTS) failures in global practice have been identified. The methodology for the comprehensive use of non-destructive remote methods of environmental monitoring has been examined in detail. It has been established that the method of the Earth's natural pulsed electromagnetic field (EPEMF) is the most effective tool for rapid scanning of the condition of dams. Optimal parameters of the measurement network for conducting long-term research at large-scale facilities have been substantiated. A methodology for interpreting geophysical signals to rapidly identify hidden zones of soil compaction has been developed. As a result of the research, a correlation between the specific electrical resistivity of soils and their current moisture content has been experimentally determined. Mathematical models have been developed that allow for the highly accurate estimation of the dynamics of the filtration flow front's progression over time.

Threshold values for the radiation intensity of the PIEMPS have been established, which indicate a critical risk of a breach in the containment dam. Experimental confirmation has been obtained of the high sensitivity of modern magnetometric methods to the detection of corrosion wear of metal structural elements. Based on an analysis of the complex geological structure of the areas where the storage facilities are located, significant risks of seismic impact on their integrity have been identified.

The complex environmental situation in the area of the inactive "Dniprovske" tailings pond in Kamyanske has been examined in detail. It has been established that the radioactive legacy of former uranium production requires the implementation of special engineering safety measures. The necessity of urgently reinforcing the phosphogypsum protective layer to reliably prevent wind-blown dust formation and the infiltration of atmospheric water into the tailings pond bed is substantiated. A refined scheme of radionuclide migration in underground horizons toward the Konoplyanka River channel has been developed, allowing the identification of local areas of intense leachate discharge in the sub-footing section of the protective dams. Mathematical models of uranium isotope adsorption by various types of foundation soils and the tailings pond body were developed. It was established that the existing hydraulic connection between the storage facility and the Dnipro River poses a long-

term threat on a regional scale. Detailed maps of the spatial distribution of background radiation in the residential area adjacent to the facility were obtained.

Based on an analysis of the current condition of the Sukhachivske tailings pond, areas prone to dangerous surface and internal suffusion have been identified. Predictive modeling in the Phase 2 program showed that for the Sukhachivske 1C dam, when water saturation and the vibrational impact of motor vehicles are combined, the stability coefficient decreases to $k_s = 1.202$, which is lower than the regulatory requirements ($[k_s] = 1.25$) and poses a risk of failure.

At VGMK in the Skazhena ravine, a rise in the levels (on average by 0.7–1.0m/year) of two anthropogenic aquifers has been observed; their convergence causes waterlogging and soil creep. This process, combined with lateral pressure from slurry masses, intensifies landslide formation, posing a threat to the integrity of retaining structures. Seismic activity in the region has been identified as an additional environmental risk, which, under conditions of significant waterlogging, could lead to dam failure.

Aspects of environmental safety of hydraulic engineering systems for civil and land reclamation purposes are also considered. A connection has been established between the poor technical condition of irrigation canals and the processes of secondary salinization of agricultural lands in the Dnipropetrovsk region. A methodology for using the Earth's natural pulsed electromagnetic field to detect hidden voids and leaks in the concrete lining of hydraulic structures has been substantiated.

This paper examines technical solutions for stabilizing the environmental condition of gas transmission systems. The high effectiveness of the combined use of geosynthetic materials for reinforcing external slopes has been established. The feasibility of using jet grouting technology for the rapid creation of anti-filtration curtains has been substantiated. Scientific proposals have been developed for a phased transition to environmentally safe paste thickening of enrichment waste. As a result of the research, optimal ratios of grouting mixtures for strengthening weak foundations of structures have been determined. A functional structure of a digital early warning system for the threat of environmental emergencies has been developed.

It has been established that the implementation of comprehensive automated monitoring reduces the overall risk of disasters by 30%. Positive results were obtained from the industrial testing of the proposed solutions at the facilities of the State Enterprise “Barrier.” Based on an analysis of the overall environmental impact, the feasibility of widespread industry-wide implementation of the research results has been established.

Thorough examination of the study's general findings establishes that the developed scientific and technical principles provide a methodological foundation for managing the environmental safety of gas transmission systems under conditions of increasing anthropogenic pressure, which is of great importance for the sustainable development of industrial regions. The scientific novelty of the obtained results is substantiated, which lies in the development of a comprehensive approach to assessing the condition of structures through the lens of their interaction with ecosystems. As a result of the conducted research, a strategy for the environmental modernization of gas transmission systems has been formulated, aimed at minimizing risks to public health. Mathematical and instrumental tools have been developed that enable a transition from reactive to proactive management of environmental safety. The full compliance of the proposed solutions with the principles of Ukraine's environmental legislation and European Union directives has been established. A significant contribution has been made to the theory of forecasting man-made emergencies under conditions of a changing climate and geological environment. The technical implementation of the dissertation's results ensures reliable protection of the natural environment and contributes to strengthening the national security of the state.

Keywords: environmental safety, hydraulic structures, tailings pond, irrigation system, geophysical monitoring, geotectonics, filtration, migration, radionuclides, hazard index.

НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних

Scopus та/або Web of Science

1. **Rudakov, L. M.**, Hapich, H. V., Orlinska, O. V., Pikarenia, D. S., Kovalenko, V. V., Chushkina, I. V., & Zaporozhchenko, V. Y. Problems of technical exploitation and ecological safety of hydrotechnical facilities of irrigation systems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2020. №29(4), 776–788. <https://doi.org/10.15421/112070>.
2. Rudakov, D., Pikarenia, D., Orlinska, O., **Rudakov, L.**, & Hapich, H. A predictive assessment of the uranium ore tailings impact on surface water contamination: Case study of the city of Kamianske, Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2023. 268-269, 107246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107246>.
3. Tymoshchuk, V., **Rudakov, L.**, Pikarenia, D., Orlinska, O., & Hapich, H. Analyzing stability of protective structures as the elements of geotechnical tailing pond safety. *Mining of Mineral Deposits*, 2021. 17(4), 116–122. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.116>.
4. Hapich, 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>.
5. Orlinska, O., Pikarenia, D., **Rudakov, L.**, & Hapich, H. Local and Regional Tectonic Influence of Territory on Geohazard of Dam of Radioactive Waste Tailings (Ukraine). *GeoHazards* 2026, 7(1), 18, <https://doi.org/10.3390/geohazards7010018>

Статті у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються

наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science

1. Pikarenia, D., Orlinska, O., Hapich, H., **Rudakov, L.**, Chushkina, I., &

Mazurenko, R. (2024). Utilization of phosphogypsum from industrial dumps as an element of environmentally safe energy- and resource-conserving technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012053>.

2. Orlinska, O., Pikarenia, D., Chushkina, I., Maksymova, N., Hapich, H., **Rudakov, L.**, Roubík, H., & Rudakov, D. (2022). Features of water seepage from the retention basins of irrigation systems with different geological structures. *V Industrial, Mechanical And Electrical Engineering*. Aip publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0109330>.

*Статті в наукових фахових виданнях, включених до переліку
наукових фахових видань України*

1. Hapich, H., Pikarenya, D., **Rudakov, L.**, Maximova, N., & Makarova, T.. Оцінка ризику аварії та розрахунок процесу руйнування ґрунтової греблі хвостосховища. *Комунальне господарство міст*, 2020. № 3(156), 99–104. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-99-104>.

2. Orlinska, O., Pikarenya, D., Hapich, H., Maksymova, N., **Rudakov, L.**, & Chushkina, I. Оцінка технічного стану та екологічної безпеки експлуатації магістрального каналу Кільченської зрошувальної системи. *Збірник наукових праць НГУ*, 2020. № 60, 186–195. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.186>.

3. Chushkina, I., Rudakov, D., Orlinskaya, O., Hapich, H., Maksimova, N., & **Rudakov, L.** Порівняльна оцінка та удосконалення розрахунку фільтраційних втрат води з регулюючих басейнів зрошувальних систем. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 202). №34, 37–43. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.34.37-43>.

4. **Рудаков Л.М.** Оцінювання рівня екологічної безпеки хвостосховища радіоактивних відходів із застосуванням контрольних списків. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*, 2023. №2 (47), С.107-111. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.17>.

5. **Рудаков Л.М.** Екологічна та експлуатаційна безпека хвостосховищ:

аналіз аварій, причин та методів діагностики технічного стану. *Екологічна безпека та природокористування*, 2023. 46 № 2, С.66-84.
<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.66-84>.

6. **Рудаков Л.М.** Дніпровське хвостосховище: історія, сучасна небезпека, методи контролю і заходи для захисту довкілля. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. №78. С. 174-185. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.174>.

7. **Рудаков Л.М.** Обґрунтування технічних заходів з рекультивації хвостосховища радіоактивних відходів *Збірник наукових праць НГУ* 2024. №79. С. 302-315. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.302>.

8. **Рудаков Л.М.** Вплив змін клімату на гідрологічний режим водозбору та екологічну безпеку Дніпровського хвостосховища. 2025. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, №(49), С.48–52.
<https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.49.38-52>.

9. **Рудаков Л.М.,** Пікареня Д.С., Орлінська О.В., Гапіч Г.В. Діагностика технічного стану ґрунтової дамби хвостосховища Вільногірського ГМК геофізичними методами та заходи з підвищення рівня екологічно безпечної експлуатації. *Збірник наукових праць НГУ*. 2025. №80. С. 324–335.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.324>.

10. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Рудаков Д.В., **Рудаков Л.М.,** Подопригора П.В. Роль тектонічного фактору у підвищенні екологічної безпеки хвостосховищ. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, № 4, 2025. С. 40-49. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-5>.

11. **Рудаков Л.М.,** Чушкіна І.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С. Геологічні та тектонічні фактори впливу на технічний стан гідротехнічних споруд цивільного призначення. *Збірник наукових праць НГУ*. 2025. №82. С.129-138.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.129>.

*Монографії (розділи монографій), виданих вітчизняними
та міжнародними видавництвами*

1. Pikarenia, D. S., Orlinska, O. V., & **Rudakov, L. M.** Evaluation Of The

Technical Condition Of The Enclosing Dam Of The Dniprovske Tailings Dump By Geophysical Methods. MININGMETALTECH. Izdevnieciba "Baltija Publishing" 2023 – THE MINING AND METALS SECTOR: INTEGRATION OF BUSINESS, TECHNOLOGY AND EDUCATION (с. 182–199).
<https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-10>.

2. **Рудаков Л. М.** Кліматоп та космічні фактори динаміки агроєкосистем / Л. М. Рудаков // Розвиток Придніпровського регіону : агроєкологічний аспект: монографія / за заг. ред. проф. А.С. Кобця ; відп. ред. проф. Д. М. Онопрієнко та ін. / Дніпровський ДАЕУ. – Дніпро : Ліра, 2021. – С. 77-80. – Режим доступу : <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/6333>.

Патенти України на винахід та корисну модель

1. Пат. 102040 Україна, МПК E21C41/00 Розчин для протифільтраційної завіси/ Мартиненко Т.В., Чушкіна І.В., Гришко Г.М., Кухарук П.В., **Рудаков Л.М.**, Бегун О.І., Дерев'янка В.М., П'ятниця І.В. заявл. 28.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19.

2. Пат. 120061 Україна МПК E02B3/16. Розчин для протифільтраційної завіси/ Ткачук Т.І., Любченко В.В., Гапіч Г.В., Гришко Г.М., **Рудаков Л.М.**, Бегун О.І., Дерев'янка В.М.; заявл. 03.04.2017; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20.

3. Пат. 155030 Україна, МПК E21C41/32. Спосіб рекультивації відпрацьованих хвостосховищ уранопереробних виробництв /**Рудаков Л.М.**, Гапіч Г.В., Калганков Є.В.; заявл. 10.07.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. №2.

4. Пат. 156936 Україна МПК E21C41/32 E21F15/00. Спосіб рекультивації хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35.

5. Пат. 156998 Україна МПК 21C41/00. Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35.

6. Пат. 156999 Україна МПК E21C41/32 E21F15/00. Спосіб рекультивації хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024;

опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35.

7. Пат. 156782 Україна, МПК G01V3/00. Спосіб встановлення шляхів фільтраційної міграції радіонуклідів крізь порушені ділянки конструкції ґрунтових дамб обвалування хвостосховищ/**Рудаков Л.М.**, Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Гапіч Г.В.; заявл. 29.05.2023; опубл. 07.08.2024, Бюл. № 32.

8. Пат. 156756 Україна МПК A01B79/00 E21C41/26. Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 31.07.2024, Бюл. № 31.

9. Пат. 156757 Україна МПК E21C41/00. Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ/ Кобець А.С., Пугач А.М., **Рудаков Л.М.**; заявл. 27.02.2024; опубл. 31.07.2024, Бюл. № 31.

10. Пат. 121578 Україна МПК E02B3/00 E02B3/16. Протифільтраційна композиція/ Ткачук Т.І., Любченко В.В., Гапіч Г.В., Сопільняк С.В., Бегун О.І., **Рудаков Л.М.**, Онопрієнко Д.М., Гришко Г.М.; заявл. 16.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 27.

Тези доповідей у матеріалах всеукраїнських та міжнародних конференцій

1. Орлінська О.В., **Рудаков Л.М.**, Гапіч Г.В. Оцінка стану гідротехнічних споруд меліоративних систем Дніпропетровської області//Матеріали науково-практичної конференції “Природа і вода” 22 березня 2018 р. – Дніпро: ДДАЕУ. – 2018. – С.49-50.

2. Гапіч Г.В., **Рудаков Л.М.**, Загній А.О. Оцінювання технічного стану та безпеки експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд водогосподарського призначення//Матеріали Регіональної науково-практичної конференції "Вода для всіх", присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів (м. Дніпро, 22 березня 2019 р.). – С.10-13.

3. **Рудаков Л.М.** Небезпечні техногенні процеси в ґрунтових гідротехнічних спорудах//Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку меліорації земель» (до дня пам'яті доктора географічних наук, професора Литовченка О.Ф.). 30 листопада

2020 р. Дніпро: ДДАЕУ, 2020. С.64-66.

4. Орлінська О. В., Пікареня Д. С., **Рудаков Л.М.**, Гапіч Г.В. Дослідження шляхів фільтрації води з гідротехнічних споруд зрошувальних мереж//Грунтові води : Матеріали регіональної науково-практичної конференції (03 червня 2022 р.) : До Всесвітнього дня води. – Дніпро: ДДАЕУ, 2022. – С. 51 - 52. – Режим доступу: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/9274>.

5. **Рудаков Л.М.** Проблема зникнення малих річок на прикладі межиріччя Коноплянки і Дніпра збірник тез XI Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «ПРИСКОРЕННЯ ЗМІН ДЛЯ ПОДОЛАННЯ ВОДНОЇ КРИЗИ В УКРАЇНІ», Присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів. Київ, Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2023. С. 141-142.

6. Гапіч Г.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Шляхи рекультивації хвостосховища радіоактивних відходів у місті Кам'янське//Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» - 2023: матеріали міжнар. конф., 11-13 жовтня 2023 р., м. Дніпро. – Д.: НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – С. 57-59.

7. **Рудаков Л.М.**, Орлінська О.В., Пікареня Д.С. Роль водогосподарської інфраструктури у забезпеченні водної та екологічної безпеки в умовах військового стану// Матеріали I Міжнародної конференції «Україна 2025: виклики та перспективи сталого розвитку», 23 жовтня 2025 р. Київ. С.59-61.

8. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Оцінка тектонічного ризику порушення стійкості гідротехнічних споруд хвостосховища «Дніпровське» на основі аналізу лінеаментних зон та геофізичних даних//3 Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Impact of Artificial Intelligence and Other Technologies on Sustainable Development», 11-12 грудня 2025 р. Дніпро. С.225-229.

9. Рудаков Д.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Оцінка індексів небезпеки та ризику хвостосховищ Дніпропетровської області// Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Development of Education, Science and Business: Results 2025», 18-19 грудня 2025 р. Дніпро. С. 432-434.

10. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., **Рудаков Л.М.** Тектонічний фактор впливу на дамбу хвостосховища радіоактивних відходів «Сухачівське» // Science, Technology and Industry in the Digital Age: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. December 17-19, 2025. Hamburg, Germany. P. 339-343.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
Розділ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СКЛАДОВИХ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД.....	33
1.1 Сучасні тренди розвитку уявлень про техногенну безпеку експлуатації гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення.....	33
1.1.1 Найкрупніші у світі аварії на хвостосховищах у XXI столітті....	34
1.1.2 Аварії на хвостосховищах гірничо-видобувних підприємств в Україні.....	37
1.1.3 Аналіз причин аварій на хвостосховищах.....	41
1.1.4 Сучасні тренди розвитку уявлень про техногенну безпеку експлуатації інших гідротехнічних споруд.....	48
1.2 Екологічні ризики експлуатації гідротехнічних споруд в умовах кліматичних змін.....	54
1.3 Висновки до Розділу 1.....	60
Розділ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	63
2.1 Загальна характеристика методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ).....	67
2.2 Загальна характеристика методу вертикального електричного зондування (ВЕЗ).....	70
2.3 Радіометричні дослідження на хвостосховищах радіоактивних відходів.....	76
2.4 Методи математичного моделювання процесів в огорожувальних спорудах ГТС.....	76
2.4.1 Моделі напружено-деформованого стану породних масивів.....	76
2.4.2 Моделі фільтрації та міграції речовин у водонасичених породах..	82
2.5 Висновки до Розділу 2.....	90

Розділ 3 НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ГІРНИЧОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ.....	92
3.1 Техногенна безпека неактивного (недіючого) хвостосховища радіоактивних відходів «Дніпровське».....	93
3.1.1 Загальні відомості про хвостосховище «Дніпровське».....	94
3.1.2 Моніторинг технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське».....	98
3.1.3 Екологічні ризики хвостосховища «Дніпровське».....	120
3.2 Техногенна безпека неактивного (недіючого) хвостосховища радіоактивних відходів «Сухачівське».....	126
3.2.1 Загальні відомості про хвостосховище «Сухачівське».....	126
3.2.2 Оцінка технічного стану дамби ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції хвостосховища «Сухачівське»	128
3.2.3 Екологічної ризики хвостосховища «Сухачівське».....	136
3.3 Техногенна безпека експлуатації активного (діючого) хвостосховища Вільногірського гірничо-металургійного комбінату у балці Скажена.	141
3.3.1 Загальні відомості про хвостосховище Вільногірського гірничо-металургійного комбінату у балці Скажена.....	141
3.3.2 Оцінка технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища Вільногірського ГМК у балці Скажена.....	143
3.3.3 Екологічні ризики експлуатації хвостосховища ВГМК в балці Скажена.....	146
3.4 Індекс небезпеки та екологічний ризик хвостосховищ.....	152
3.5 Екологічні ризики безпечної експлуатації гідротехнічних споруд цивільного призначення.....	162
3.5.1 Технічний стан магістрального каналу МК-1 Кільченської зрошувальної системи.....	163
3.5.2 Технічний стан магістрального каналу МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи.....	169

3.5.3 Технічний стан магістрального каналу МК 4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Григорівка Солонянського району.....	172
3.5.4 Екологічні ризики експлуатації цивільних ГТС.....	174
3.6 Висновки до розділу 3.....	188
Розділ 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ В ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ.....	192
4.1 Аналіз та прогноз стану безпеки хвостосховища «Дніпровське».....	192
4.1.1 Геоекологічний моніторинг об'єкта.....	192
4.1.2 Визначення стійкості ґрунтових захисних ГТС.....	199
4.2 Оцінка геомеханічної стійкості дамби хвостосховища «Сухачівське».....	209
4.2.1 Оцінка та прогноз міграції радіонуклідів через дамбу хвостосховища «Дніпровське».....	213
4.2.2 Висновки та рекомендації щодо стану безпеки хвостосховища....	228
Розділ 5 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД.....	231
5.1 Огляд існуючих методів безпечного складування гірничопромислових відходів.....	231
5.2 Новітні методологічні підходи до діагностики та моніторингу ГТС....	241
5.3 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки ГТС гірничопромислового призначення.....	245
5.3.1 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки хвостосховища радіоактивних відходів «Дніпровське»...	248
5.3.2 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки дамби ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції хвостосховища «Сухачівське».....	259
5.3.3 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки експлуатації хвостосховища Вільногірського ГМК.....	262

5.4 Обґрунтування та порівняльний аналіз економічної ефективності протифільтраційних заходів на цивільних ГТС.....	266
5.5 Висновки до Розділу 5.....	272
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	276
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	280
Додаток А. Гідрометеорологічні характеристики Дніпропетровської області.....	317
Додаток Б. Результати польових та лабораторних досліджень на хвостосховищах.....	321
Додаток В. Результати польових та лабораторних досліджень на гідротехнічних спорудах цивільного призначення.....	335
Додаток Г. Документи, що підтверджують практичну цінність.....	349
Додаток Д. Документи, що підтверджують впровадження результатів.....	356

ВСТУП

Актуальність теми. Накопичення у світі понад 223 млрд тон відходів у близько 35 000 хвостосховищах є критичним викликом глобального масштабу, що зумовлює гостру необхідність забезпечення екологічної безпеки гідротехнічних споруд (ГТС). Глобальні прогнози вказують на зростання обсягів зріджених відходів, а це в свою чергу, на тлі фізичного старіння об'єктів підвищує ризик катастрофічних відмов дамб. Статистика підтверджує вразливість наливних конструкцій (51,2% аварій), а трагедії останніх років у Бразилії та Танзанії доводять, що сучасні ГТС часто експлуатуються поза межами проектних ресурсів.

Україна посідає одне з провідних місць за обсягами промислових відходів у Європі: у 465 хвостосховищах зосереджено понад 6 млрд тон небезпечних речовин. Найвище техногенне навантаження зафіксовано у Дніпропетровській області (318,3 тис. т на 1 км²), де зосереджені найбільші об'єкти гірничо-металургійного комплексу. Реальність загрози для регіону підтверджується аваріями на місцевих об'єктах, зокрема витоком 80 000 м³ води на хвостосховищі «Центральне». Ключовою науковою проблемою залишається розробка своєчасної та достовірної методики та методології оцінки технічного стану ГТС, прогнозування та моделювання втрати стійкості дамб через багаторічну експлуатацію, неминуче старіння конструкцій та систематичне перевищення проектних потужностей. Підсилює техногенну небезпеку цих об'єктів зміна клімату, що супроводжується зростанням інтенсивності атмосферних опадів та паводками зливого характеру, спричиняє надмірне водонасичення тіла дамб і ложа накопичувачів, інтенсифікує фільтраційні процеси, активізує міграцію забруднювачів та суттєво знижує коефіцієнт стійкості споруд. Додаткову загрозу становить розташування об'єктів у зоні збройного конфлікту, що через артилерійські обстріли, атаки БПЛА та мінування територій може призвести до прямого руйнування ГТС та розвитку гідродинамічних надзвичайних ситуацій.

Разом з гідротехнічними об'єктами промислового сектору значну роль у забезпеченні водної безпеки територій та держави в цілому відіграють цивільні

ГТС, в тому числі сільськогосподарського призначення. Виконуючи акумулюючу та розподільчу функції вони є надійними, а інколи і єдиними постачальниками води як для промисловості, так й для населення. Критичний фізичний знос іригаційних систем (Кільченської, Вищетарасівської, Солоняно-Томаківської та ін.) призводить до значних втрат водних ресурсів, вторинного засолення земель, підтоплення угідь та загрожує продовольчій безпеці. Отже, водна безпека держави має враховувати сумісний внесок як промислових, так і цивільних ГТС, причому, залежно від промислової спеціалізації кожного регіону України частка цього внеску може змінюватися в той чи інший бік. Невирішена частина загальної проблеми полягає у відсутності науково обґрунтованої методології управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд в умовах їхнього критичного зносу. Подолання критичного розриву між стрімким погіршенням технічного стану ГТС будь-якого призначення та методами його оцінки становить значну науково-практичну проблему, вирішення якої дозволить прийняти оперативні рішення для зменшення усіх видів небезпек, пов'язаних з водним середовищем.

Таким чином, в дисертації вирішується актуальна науково-технічна проблема, що полягає у створенні сучасної методології оцінки технічного стану та управління екологічною безпекою сумісного функціонування промислових і цивільних гідротехнічних споруд в умовах критичного зносу й підвищеного техногенного навантаження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі водогосподарської інженерії Дніпровського державного аграрно-економічного університету в межах науково-дослідних робіт: № 2929-п «Науково-практичні засади підвищення безпечної експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд» (2022–2025 рр., № держреєстрації 0122U201615, керівник теми), № 2113-п «Інноваційні пріоритети розвитку водокористування в басейнах річок Дніпропетровщини з урахуванням змін клімату і кризових ситуацій» (2025 р., № держреєстрації 0125U001424, відповідальний виконавець); № 2504-п «Розробка інформаційних технологій

проектування та раціонального функціонування водогосподарсько-меліоративних об'єктів» (2015–2019 рр., № держреєстрації 0114U005587, відповідальний виконавець); № 2733-п «Розробка геоінформаційних технологій проектування, моделювання та моніторингу водогосподарських об'єктів» (2020–2024 рр., № держреєстрації 0120U100321, відповідальний виконавець), №0122U201614 «Моніторинг небезпечних техногенних процесів у Дніпропетровській області» (відповідальний виконавець); № 0114U006324 «Розробка методики визначення технічного стану ґрунтових гідротехнічних споруд геофізичними методами»; № 0110U001969 «Формування екологічно безпечного навколишнього середовища та безпеки життєдіяльності в Придніпровському регіоні» (відповідальний виконавець); а також госпдоговірних робіт: «Проект заходів по поліпшенню технічного стану греблі Сухачівського хвостосховища радіоактивних відходів в м. Кам'янське Дніпропетровської області», (2012 р., відповідальний виконавець), «Звіт про результати обстеження технічного стану верхньої дамби хвостосховища «Сухачівське» (1 секція) за даними геофізичної зйомки методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі», (2012р., відповідальний виконавець), «Визначення геофізичними методами зон фільтрації та розрахунок обсягів втрат води з магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи», (2018р., відповідальний виконавець), «Про результати обстеження технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» за даними геофізичної зйомки методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі Дніпро», (2016р., відповідальний виконавець), «Оцінка гідрогеомеханічної стійкості низового укосу огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське», (2022 р., відповідальний виконавець).

Дисертаційна робота відповідає зобов'язанням України в межах Паризької угоди щодо мінімізації небезпеки стихійних лих та забруднення водних ресурсів і засадам Стратегії екологічної безпеки та може бути залучена до плану повоєнної відбудови України. Дослідження є логічним продовженням і реалізацією цілей Стратегії сталого розвитку «Україна – 2030».

Мета роботи – розробка та обґрунтування науково-технічних засад управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд гірничопромислового комплексу шляхом удосконалення методів інструментального контролю для діагностики зон фільтрації та оцінки гідрогеомеханічної стійкості огорожувальних дамб для запобігання техногенним катастрофам і мінімізації їх негативного впливу на довкілля.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати причини еколого-техногенних небезпек та наслідків аварій на ГТС гірничопромислового призначення, виявити домінуючі фактори, які призвели до появи, розвитку надзвичайних та аварійних ситуацій.

2. Оцінити вплив природних кліматичних і геологічних факторів на техногенну безпеку ГТС.

3. Обґрунтувати можливості застосування неруйнівних геофізичних методів (ШЕМПЗ, ВЕЗ, радіометрія) як елементу інформаційної основи для комплексного еколого-технічного аналізу з метою оцінки технічного стану ГТС.

4. Обґрунтувати доцільність застосування комплексної методики оцінки технічного стану ГТС, яка містить прогностну складову (тектонічний аналіз тріщинуватості району розташування) та розрахункову складову (математичні моделі прогнозування напружено-деформованого стану у тілі ГТС).

5. На підставі запропонованої методики виконати оцінку геомеханічної стійкості дамб хвостосховищ «Дніпровське» і «Сухачівське», розрахувати індекси ризику і небезпеки, розроблені за методикою UBA (Німеччина) та дослідити екологічну небезпеку забруднення території в області міграції радіонуклідів з хвостосховища «Дніпровського» до р. Коноплянка.

6. Оцінити ефективність технічних рішень щодо підвищення надійності та екологічної безпеки ГТС, спрямованих на реалізацію стратегії сталого розвитку та дотримання нормативів екологічної безпеки держави.

7. Обґрунтувати концепцію управління екологічною безпекою ГТС гірничопромислового комплексу з врахуванням ролі і значення ГТС цивільного та сільськогосподарського призначення.

Ідея дослідження полягає у створенні комплексної системи превентивного еколого-технічного оцінювання гідротехнічних споруд, що базується на інтеграції методів неруйнівного інструментального контролю та моделювання єдиної гідродинамічної мережі регіону. Це дозволяє не лише своєчасно виявляти критичні зони деформації промислових дамб, а й використовувати ресурсний потенціал цивільних систем як стратегічних бар'єрів для оперативного перехоплення токсичних витоків, забезпечуючи екологічну стійкість промислових регіонів у кризові періоди.

Об'єкт дослідження – процеси управління екологічною безпекою водогосподарського комплексу в гірничопромислових регіонах.

Предмет дослідження – науково-технічні засади екологічно безпечної експлуатації ГТС гірничопромислового та цивільного призначення.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та розв'язання завдань використано комплексний науковий-практичний підхід, що базується на поєднанні теоретичних, експериментально-лабораторних і розрахункових методів та польових досліджень.

Теоретичні та загальнонаукові методи: системний аналіз, наукове узагальнення та порівняльно-географічний метод – для вивчення світових трендів екологічної безпеки ГТС, класифікації чинників техногенної небезпеки та систематизації причин аварій на хвостосховищах.

Польові дослідження методами неруйнівної інструментальної зйомки: комплекс геофізичних методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) для дослідження цілісності ґрунтових дамб, виявлення прихованих зон фільтрації та тектонічних порушень; вертикального електричного зондування (ВЕЗ) для визначення параметрів залягання ґрунтових вод; радіометричні дослідження для оцінки радіаційного стану та контролю міграції небезпечних речовин у зонах впливу хвостосховищ.

Методи математичного та комп'ютерного моделювання: аналіз напружено-деформованого стану ґрунтових масивів та оцінка їх гідрогеомеханічної стійкості (у програмному комплексі Phase 2); моделювання фільтраційних процесів та міграції забруднювачів.

Методи еколого-технічного оцінювання: комплексна діагностика фактичного стану безпеки об'єктів промислового призначення; розрахунково-аналітичні методи для визначення індексів ризиків та небезпек – Tailings Hazard Index (THI) і Tailings Risk Index (TRI) за методикою Агентства Німеччини з навколишнього середовища (UBA) та потенційного впливу ГТС на екосистеми регіону.

Графоаналітичні та картографічні методи використані для візуалізації результатів досліджень ПЕМПЗ, побудови моделей поверхонь та картографічного представлення ореолів забруднення й зон фільтрації.

Методи техніко-економічного обґрунтування для розробки та оцінки ефективності інженерних рішень, спрямованих на підвищення надійності ГТС та забезпечення дотримання нормативів екологічної безпеки.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Одним з чинників підвищення рівня техногенної небезпеки хвостосховищ є сучасна зміна клімату (зростання температури на $2,0\text{--}2,3^\circ\text{C}$ та зниження гідротермічного коефіцієнта прибутку на $0,037\text{--}0,042$), що призводить до пересихання ґрунтового покриву дамб із подальшим тріщиноутворенням і під час інтенсивних злив зумовлює неконтрольоване перезволоження матеріалів, активізацію фільтрації та ерозійних процесів (зокрема суфозії). Це обумовлює щорічне розширення параметрів зон замочування дамб на 10-15%, яке підтверджено польовими спостереженнями та математичним моделюванням.

2. Тектонічна будова району розташування визначає в дамбах ГТС ступінь розвитку тріщин, максимальна кількість яких приурочена до основних глибинних розломів Українського щита ортогональної системи і пригніченої системи північно-західних напрямків з азимутами простягання $300^\circ\text{--}330^\circ$, за якими відбуваються сучасні рухи, що може розглядатися як тектонічний фактор підготовки дамб ГТС до прояви небезпечних процесів. Техногенні вібрації (вибухи, рух транспорту тощо) підсилюють роль тектонічного фактору та пришвидшують фільтраційно-деформаційні процеси.

3. Рівень екологічної безпеки рівнинних хвостосховищ визначається впливом обводнення на геомеханічну стійкість огорожувальних дамб, яке підтверджується чисельним моделюванням і проявляється зниженням фізико-

механічної міцності порід зі збільшенням водонасичення, а також буферними властивостями дамб, водоносних горизонтів і донних відкладів у прилеглих невеликих водотоках, які уповільнюють міграцію небезпечних сполук до поверхневих водних об'єктів на один-два порядки внаслідок сорбційних властивостей порід.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. *Вперше встановлено*, що сучасна зміна клімату, пов'язана зі зростанням температури призводить до посиленої евапотранспірації та інтенсивного тріщиноутворення на дамбах з ґрунтових матеріалів, що під час інтенсивних злив зумовлює неконтрольоване перезволоження матеріалів, активізацію фільтрації та ерозійних процесів (зокрема суфозії).

2. *Вперше встановлено* тісний генетичний зв'язок між орієнтуванням тріщин в дамбах ГТС та геолого-тектонічною будовою території: азимути простягання тріщин збігаються з напрямками ортогональної та північно-західної систем розломів, що дозволяє прогнозувати потенційний розвиток тріщинуватості на будь-яких дамбах території Українського щита.

3. *Вперше встановлено*, що на підставі моделювання водної міграції радіонуклідів з хвостосховища «Дніпровське» їхня концентрація на вихідній межі ґрунтового горизонту наразі не досягла свого максимального значення, зафіксованого у водному розчині відвалів, при цьому на тлі найбільшого зростання вмісту урану в ґрунтових водах концентрації радію і торію залишаються практично незмінними, а фронт міграції ще не досяг берегової лінії р. Коноплянки.

4. *Вперше встановлено* закономірності техногенно-екологічної взаємодії комплексів гірничопромислових (хвостосховища) та цивільних (водопідвідні канали) гідротехнічних споруд, що полягають у виникненні кумулятивного ефекту підтоплення та фільтраційного забруднення територій, яке суттєво знижує загальний рівень екологічної безпеки регіону та потребує єдиного підходу до моніторингу їхнього стану.

5. *Вперше сформульовано* засади наукової концепції, які інтегрують ГТС гірничопромислового призначення та об'єкти цивільної меліоративної мережі в

єдину гідродинамічну систему для управління екологічною безпекою промислового регіону.

Удосконалено:

- комплексну методику інтегральної оцінки рівня екологічної безпеки ГТС, яка поєднує результати геофізичних досліджень технічного стану огорожувальних споруд та прогнозного математичного моделювання небезпечних процесів (міграції забруднювачів та втрати стійкості огорожувальних дамб), що дозволяє ідентифікувати критичні стани споруд на ранніх стадіях;
- методичний підхід до оцінки гідрогеомеханічної стійкості ґрунтових дамб хвостосховищ і цивільних ГТС шляхом інтеграції даних натурних геофізичних обстежень у моделі напружено-деформованого стану та фільтрації, що дозволяє більш вірогідно прогнозувати аварійні ситуації;
- методичний підхід до оцінки екологічної небезпеки дамб ГТС шляхом додавання індексів THI (Tailings Hazard Index) і TRI (Tailings Risk Index);
- обґрунтування вибору та параметрів інженерних рішень (зокрема, протифільтраційних) для підвищення екологічної безпеки експлуатації ГТС на основі порівняльного аналізу та оцінки їхньої економічної ефективності, що має важливе практичне значення для прийняття управлінських рішень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у безпосередньому застосуванні розроблених науково-технічних засад, методик та інженерних рішень для управління екологічною безпекою експлуатації гідротехнічних споруд в гірничопромислових регіонах.

Розроблена комплексна методика інтегральної оцінки рівня екологічної безпеки ГТС може бути використана органами державного нагляду та організаціями, що здійснюють експлуатацію для проведення аудиту безпеки та регламентування моніторингу хвостосховищ.

Для діагностики та прогнозування запропонований комплекс геофізичних методів (ПЕМПЗ, ВЕЗ) та алгоритми їхньої обробки, які можуть бути впроваджені в практику технічної діагностики для оперативного виявлення

дефектів та прихованих фільтраційних зон у тілі дамб, що підвищує їхню експлуатаційну надійність та рівні екологічно безпечної експлуатації.

Встановлений тектонічний фактор дає змогу спрогнозувати на діючих та недіючих ГТС генеральні напрямки розвитку тріщин та розущільнення матеріалів, які можуть виступати в якості потенційних зон фільтрації, замочування, розвитку небезпечних геологічних процесів, а для ГТС, що проєктуються – врахувати ці закономірності.

Математичні моделі, індекси THI і TRI, розроблені для прогнозування міграції забруднювачів та стійкості, дозволяють обґрунтовано обирати пріоритетні об'єкти для проведення ремонтних робіт та протиаварійних заходів. Інженерно-технічні рішення та рекомендації, обґрунтовані в дисертації для підвищення стійкості дамб та зменшення фільтрації (зокрема, для хвостосховищ «Дніпровське», «Сухачівське»), можуть бути використані при проєктуванні, реконструкції та експлуатації ГТС.

Порівняльний аналіз економічної ефективності протифільтраційних заходів слугує інструментом для прийняття інвестиційних рішень щодо впровадження найкращих доступних технологій для захисту навколишнього середовища.

Реалізація результатів роботи. Результати досліджень були апробовані на державному підприємстві «Бар'єр», що обслуговує хвостосховища радіоактивних відходів і в Регіональному офісі водних ресурсів у Дніпропетровській області, а також впроваджені у навчальний процес підготовки фахівців за спеціальністю G2 «Технології захисту навколишнього середовища» у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті. **Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні проблеми, мети, ідеї, завдань досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій щодо їх практичної реалізації, у теоретичному обґрунтуванні, розробці та апробації науково-технічних засад забезпечення екологічної безпеки гідротехнічних споруд, що відображено у наступному:

Проведено системний аналіз та узагальнення даних щодо екологічної безпеки ГТС, систематизовано причини найбільших аварій на хвостосховищах, що стало основою для визначення критичних факторів небезпеки.

Розроблено та обґрунтовано комплексну методичку інтегральної оцінки рівня екологічної безпеки ГТС, яка поєднує геофізичну діагностику та математичне прогнозування небезпечних процесів.

Виконано польові геофізичні дослідження (методи ПЕМПЗ, ВЕЗ) та радіометричні вимірювання на обраних хвостосховищах і цивільних ГТС, проведено інтерпретацію геофізичних даних та еколого-технічну діагностику їхнього стану безпеки.

Розроблено та реалізовано математичні моделі напружено-деформованого стану та фільтрації для прогнозування стійкості дамб і міграції радіонуклідів.

Вперше сформульовано науково-технічні засади екологічної безпеки експлуатації ГТС, які є основою для розробки інженерних рішень з мінімізації ризиків, та обґрунтовано індекси небезпеки для ключових об'єктів.

Запропоновано та економічно обґрунтовано комплекс інженерних рішень та протифільтраційних заходів для забезпечення надійності та безпеки досліджених ГТС промислового призначення.

Результати дисертаційної роботи представлені в одноосібних працях [13 – 17, 33, 35] чи у співавторстві [1 – 12, 18 – 32, 34, 36 – 40], де здобувач брав участь у визначенні напрямків та задач дослідження, виконанні експериментальних досліджень і розрахунків, аналізі та обговоренні результатів, оформленні матеріалів для наукових статей.

Робота є результатом самостійних досліджень Рудакова Л.М.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові теоретичні положення та результати отриманих експериментальних даних за напрямком дисертаційної роботи були представлені та отримали позитивну оцінку після обговорення на наступних конференціях: Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» – 2023 (міжнар. конф.), 11-13 жовтня 2023 р., м. Дніпро; I Міжнародна конференція «Україна 2025: виклики та перспективи сталого розвитку», 23 жовтня 2025 р., м. Київ; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348(1); V Industrial, Mechanical And Electrical Engineering. Aip publishing; 3 Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Impact of Artificial Intelligence and Other Technologies on Sustainable

Development», 11-12 грудня 2025 р.; Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Development of Education, Science and Business: Results 2025», 18-19 грудня 2025 р.; 2 Міжнародна науково-практична конференція «Science, Technology and Industry in the Digital Age» Гамбург, Німеччина: 17-19 грудня 2025 р.; «Настоящи изследвания и развитие» – 2014 (X міжнародна научна практична конференція), 17-25 січня 2014 р., Софія, Болгарія; Управління водними ресурсами в умовах зміни клімату (Всеукр. наук.-практ. конф.), 21 березня 2017 р., м. Київ; Екологічний стан водних ресурсів України та перспективи забезпечення населення питною водою (I Міжнародна наук.-практ. конф.), 6 – 7 липня 2018 р., м. Дніпро; 2nd International multidisciplinary conference Sustainable Development Trends and Challenges under COVID-19, 29-30 листопада 2021 р., м. Суми, Україна; XI Міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Прискорення змін для подолання водної кризи в Україні», 2023 р., м. Київ.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 40 наукових праць, в тому числі: 2 монографії, 18 статей у наукових фахових виданнях, з яких 7 статей у виданнях, індексованих у наукометричній базі Scopus і WoS (2 статті – Q2, 2 статті – Q3, 2 статті – Q4 (матеріали міжн. конф.), 1 стаття – WoS), 10 патентів на корисну модель, 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (285 найменувань на 35 сторінках) і 5 додатків (на 42 сторінках), 122 рисунків, 34 таблиць. Обсяг основного тексту становить 247 сторінок, з них площу 24 сторінок повністю займають рисунки та таблиці. Загальний обсяг роботи складає 359 сторінок.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СКЛАДОВИХ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

1.1 Сучасні тренди розвитку уявлень про техногенну безпеку експлуатації гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення

У світі налічується 29000 – 35000 існуючих, недіючих і занедбаних хвостосховищ, в яких складовано приблизно 223 мільярдів тон (534 млрд м³) відходів. Щорічно при видобутку 18-20 млрд т корисних копалин у світі утворюється 80-90 млрд т порожньої породи та 8 млрд т (19 млрд м³) хвостів. В даний час на кожен мільйон тон видобутої мінеральної сировини необхідні фізичні та економічні ресурси для розміщення 4,9 млн т порожньої породи та хвостів [1].

Середній обсяг хвостосховища становить 17 млн м³. З 1950 зареєстровано 118 інцидентів категорії серйозних або дуже серйозних, з яких 11 (9%) припадає на хвостосховища подібного або більшого обсягу. На думку порталу worldminetailingsfailures.org [1], це свідчить про те, що майбутні «дуже серйозні» та «серйозні» відмови будуть мати значно більшу величину. Збереження нинішніх умов та тенденцій у сфері пропозиції (або з боку промисловості/гірничої галузі) призведе до 18 катастрофічних відмов хвостосховищ у період з 2015 по 2024 рік. Вже сталося дев'ять «дуже серйозних» та 5 «серйозних» відмов. Очікувалося, що масштаби прогнозованих 18 інцидентів у 2015-2024 роках будуть набагато більшими, ніж найбільш катастрофічні події, які вже відбулися. На це впливають три фактори [1]:

1. Більшість існуючих хвостосховищ виходять за рамки проєкту, зважаючи на необхідність складування все більших обсягів хвостів;

2. Багато хвостосховищ, у яких передбачається розмістити п'ятирічний обсяг відходів, є старими, «потенційно небезпечними» хвостосховищами без

чітко визначеного терміну експлуатації об'єкта та без ретельного незалежного аналізу стійкості;

3. Прагнення гірничодобувної галузі до переробки руд з невисокими концентраціями призведе до збільшення зволоження хвостових матеріалів і більш інтенсивнішого обводнення огорожувальних дамб, що збільшить ризик статичного руйнування (обвалення в результаті зсуву, викликаного напруженнями у самому хвостосховищі).

Прогнозується, що буде утворено протягом 5 років 40-50 млрд тон хвостів (95-120 млрд м³). Майже все це буде у вигляді звичайної пульпи, що розміщується у вже існуючих наземних хвостосховищах, приблизно 50-65% з яких було збудовано до 1990 року. Загальний світовий обсяг матеріалу у хвостосховищах станом на 2025 рік складе 640 млрд м³.

В активні об'єкти, а це приблизно в 16 000 хвостосховищ, що діють в даний час, надійде додатково 95-120 млрд м³ хвостів, таким чином, на кожне активне хвостосховище надходитиме в середньому 6 млн м³ на додаток до 17 млн м³ існуючих відкладень. Загалом прогнозується збільшення розміру кожного активного об'єкта на 35%, приблизно на 7% на рік.

1.1.1 Найкрупніші у світі аварії на хвостосховищах у XXI столітті.

Для активних і неактивних хвостосховищ причини аварій різні. Для активних об'єктів найбільш вагомим є фактор стійкості схилу дамби, який спричинив майже третину всіх аварій. Так, розподіл кількості аварій на активних хвостосховищах вказує на істотно підвищений ризик аварій для наливних дамб, особливо для тих, що споруджуються вгору за течією: із загальної кількості 172 аварійних випадків з ідентифікованим типом греблі 88 або 51,2% зареєстровано для дамб саме цього типу, а всі інші випадки сталися на греблях інших типів [2].

Найбільш небезпечними щодо аварійності неактивних хвостосховищ є сейсмічні прояви та переповнення проєктної ємності: 25-30% усіх аварій, спричинених цими факторами, припадає на неактивні об'єкти.

Розглянемо причини деяких крупних аварій на хвостосховищах [4-21].

18 лютого 2025 року в замбійському місті Чамбіші на руднику концерну China Nonferrous Metal Mining Corp., де видобували та збагачували мідну руду, через сильні зливи стався прорив дамби хвостосховища. Унаслідок аварії 500 000 м³ кислотного шламу вилилися в струмок Мвамбаші та на навколишні сільськогосподарські угіддя, що призвело до масової загибелі риби в річці Кафуе, яка є основним джерелом питної води в цьому регіоні.

На Шахті Вільямсон з видобутку діамантів концерну Petra Diamonds Ltd , округ Кішапу, провінція Шіньянга в Танзанії 7 листопада 2022 р. відбувся прорив дамби хвостосховища. Хвости витекли через прорив східної стіни дамби шириною приблизно 150 м; витік хвостів об'ємом 12,8 млн м³ тривав з 7 по 8 листопада. Хвиля бруду (шириною до 1,2 км) прокотилася на відстань понад 8 км, покривши 5,09 км², пошкодивши 13 будинків і сільськогосподарські угіддя.

27 березня 2022 р. в провінції Шаньсі, Китай на підприємстві консорціуму Shanxi Daoer Aluminium Co., Ltd. з виробництва бокситу відбувся прорив дамби хвостосховища. Дамба була розмита на ділянці довжиною близько 70–80 метрів, що призвело до виливу 224 000 м³ хвостів. У хвостосховищі утворилася велика яма розміром 0,5 га. Аварія призвела до блокування понад 200 метрів сезонних каналів і сільських доріг, а також змивання частини огорожувальних стін сусідніх підприємств.

28 березня 2020 р на підприємстві зі збагачення молібдену консорціуму Yichun Luming Mining Co., Ltd (місто Ічунь, провінція Хейлунцзян, Китай) сталася аварія. «Переливний колодязь № 4» дамби хвостосховища нахилився, що призвело до витоку надлишкової води та хвостів обсягом 2,53 млн м³ через дренажний тунель, тоді як сама дамба залишилася неушкодженою. Вода та хвости розлилися по навколишній території, досягнувши річки Іцзімі, що загрожувало джерелам питної води для 68 000 мешканців міста Тіелі; до 4 квітня забруднення досягло 208 км вниз за течією

Аварія на хвостосховищі Брумадінью (Бразилія) у 2019 році. Катастрофа на греблі, що належить компанії Vale, сталася, на думку експертів, через підйом рівня води внаслідок сильних злив, що призвело до руйнування та розмиву дамби. Після

прориву потік мулу та відходів затопив адміністративну зону шахти, а також Віла-Фертеку (Vila Ferteco) – невелике поселення, розташоване приблизно за один кілометр від рудника. Під час прориву дамби вилилося близько 12 млн м³ хвостів [3].

Національне агентство водних ресурсів (ANA) Бразилії заявило, що хвости можуть забруднювати понад 300 кілометрів річки Параопеба, головної річки регіону, з якої йде постачання водою третини регіону Велика Белу-Орізонті [1].

Ще одна катастрофа сталася в Бразилії на залізорудному родовищі під час прориву на дамбі діючого хвостосховища Бенто Родрігес або Самарко, в 2015 році. В результаті відбулася повінь, яка спустошила села Бенто-Родрігес та Паракату-де-Байшо (40 км від Бенто-Родрігеса), внаслідок чого загинуло 19 людей. Ступінь збитків, заподіяних обвалом дамби, є найбільшим із коли-небудь зафіксованих, коли забруднюючі речовини поширюються вздовж 668 кілометрів (415 миль) водотоків. Причиною аварії, як вважають фахівці, стали зливи, що привели до переповнення хвостосховища і руйнації дамби [2].

Аварія на Ріддерському гірничо-збагачувальному комбінаті ТОО «Казцинк», Казахстан. 22 травня 2016 року на Таловському хвостосховищі сталося руйнування частини конструкції системи відводу зворотньої води, в результаті якого стався аварійний скид хвостів з подальшим потраплянням в річку Пилипівка, потім в річки Тиха і Ульба. За розрахунком маркшейдерського відділу Ріддерського ГЗК ТОО "Казцинк" в результаті аварії обсяг витоку з Таловського хвостосховища склав 394 452 кубічних метра [3].

Аварія хвостосховища компанії Талвіваара в Фінляндії в 2012 році. В Фінляндії у центральній частині Суомі на шахті з видобутку нікелю "Талвіваара", що знаходиться в однойменному населеному пункті, стався витік забруднених вод з високим вмістом нікелю і урану. Витік в гіпсовому відстійнику хвостосховища утворився ще 4 листопада. Тоді швидкість потоку отруйних речовин становила 5-6 тисяч кубічних метрів на годину. За тиждень екстрено були побудовані чотири тимчасові дамби, які повинні були зупинити витік вод, який містив високі концентрації нікелю і урану. Забруднені води поширилися на багато кілометрів. Всі струмки і озера, що знаходяться поблизу,

забруднені нікелем – токсичним важким металом. За даними Центру радіаційної і ядерної безпеки, в одному з струмків в трьох кілометрах від Талвіваара концентрація урану в 50-80 разів перевищувала норму [2].

Аварія на сховищі шламу алюмінієвого виробництва в Колонтарі (Угорщина) у 2010 році. 4 жовтня 2010 року на заході Угорщини, на великому заводі з виробництва алюмінію, сталася руйнація дамби хвостосховища з токсичними відходами. Близько 700 тисяч кубометрів їдкої речовини — так званого червоного шламу — прорвали греблю й триметровим потоком затопили містечка Колонтар і Девечер, а також пошкодили газопровід та залізничні колії. Через це було призупинено рух поїздів на лінії Будапешт – Сомбатгей [2].

Аварія в Бая-Маре (Румунія) у 2000 році. Екологічна катастрофа сталася 30 січня 2000 року в румунському місті Бая-Маре на підприємстві зі збагачення золоторудного концентрату. Унаслідок прориву дамби хвостосховища близько 100 тисяч кубічних метрів води, забрудненої ціанідами та важкими металами, потрапили в річку Сомеш, а згодом – Тису та Дунай. Після розливу допустима концентрація ціаніду в Сомеші була перевищена у понад 800 разів, що разом із важкими металами завдало тривалої шкоди річковій екосистемі. Коли токсична хвиля досягла Дунаю, рівень ціаніду там усе ще перевищував норму в 20–50 разів. Основними причинами аварії експерти назвали значні прорахунки в конструкції дамби, неконтрольоване накопичення відходів та раптове танення снігу через сильні зливи [2].

1.1.2 Аварії на хвостосховищах гірничо-видобувних підприємств в Україні.

Україна – європейський "лідер" за обсягами відходів. Але якщо проблема побутового сміття хоч потроху вирішується, то з промисловими відходами проблеми тільки накопичуються [22].

Найбільша кількість відходів утворюється унаслідок економічної діяльності підприємств та організацій (біля 98%); на відходи, що створюються у домогосподарствах, припадає менше 2% [22].

Особливістю структури утворення відходів в Україні, у зв'язку з

сировинною орієнтацією економіки, є висока частка у їх складі відходів добувної промисловості (розкривних порід та продуктів збагачення корисних копалин – шламів, хвостів тощо) – понад 85 %. На інші види економічної діяльності припадає менше 15% [22].

Найбільша кількість відходів сформована на підприємствах гірничо-металургійної, вугільної, хімічної промисловості та енергетики [22].

Погіршення стану навколишнього середовища в Україні за рахунок накопичення промислових відходів є однією з найгостріших проблем, що прямо чи опосередковано стосується кожної людини. Рівні забруднення довкілля цими відходами у значній мірі обумовлені фізико-хімічними властивостями як самих відходів, так і різними сполуками, утвореними при їх розкладанні, зокрема, токсичністю складників [22].

За даними державної статистичної звітності станом на 01.01.2021 року у спеціально відведених місцях чи об'єктах на території підприємств країни, які були активні протягом 2021 року, накопичилось понад 15,6 млрд т відходів, що більше попереднього року майже на 1,0% [22].

За обсягами накопичення відходів серед галузей промисловості найбільш вагоме місце займають гірничо-видобувний комплекс, металургія. Саме під розміщення відходів цих галузей відводяться найбільші площі, а експлуатаційні параметри цих об'єктів, а саме високий потенціал пилоутворення, забруднення поверхневих і підземних вод, ґрунтів, розвиток небезпечних геологічних процесів негативно впливають на умови проживання людей в найближчих до накопичувачів відходів населених пунктах. При порушенні умов накопичення та експлуатації місць видалення відходів ці об'єкти стають потужним джерелом забруднення усіх компонентів навколишнього середовища (ґрунт, ґрунтові та поверхневі води, атмосферне повітря) небезпечними речовинами. При цьому зона наднормативного забруднення довкілля внаслідок впливу накопичувачів таких відходів може поширюватись на території поза межі встановлених 300 м санітарно-захисних зон (СЗЗ), які прийнято вважати нормативними для таких об'єктів, хоча фактично, відповідно до діючих санітарних правил 300 м СЗЗ для

накопичувачів відходів є мінімально допустимо [22].

У 2021 році техногенне навантаження в цілому на територію України становило 21,7 тис. т на 1 км². Найбільшого техногенного навантаження зазнають Дніпропетровська обл. – 318,3 тис т на 1 км², Донецька – 40,2 тис. т, Кіровоградська – майже 14,0 тис. т, Львівська – 10 [22].

Станом на 2021 рік, в Україні налічується 465 хвостосховищ, що вміщують понад 6 мільярдів тон відходів різних галузей промисловості. Більшість об'єктів – старі споруди ще з часів СРСР, багато закинутих і в дуже проблемному стані. Наявність в Україні такої кількості старих хвостосховищ, більшість з яких побудовано з порушеннями технологій, теж призводить до аварій, нехай меншого масштабу ніж приведені вище, але і вони наносять величезну шкоду довкіллю [22].

Так 14.09.1983 р. в місті Стебник на Львівщині на гірничо-хімічному підприємстві "Полімінерал" після сильного дощу відбувся прорив дамби хвостосховища. Потужний селевий потік сумарною масою понад 5 млн тон забруднив навколишні поля, сади і ліси. Висококонцентрована ропа та тверді відходи потрапили в р. Солоницю, далі – Тисменицю, Дністер і досягли Чорного моря [23].

У 2001 році на Миколаївському глиноземному заводі через пошкодження хвостосховища частина відходів токсичного пилу поширилася на десятки квадратних кілометрів. А в 2008-му через аварію на калійному заводі в Калуш відходи потрапили в Дністер [23].

Нещодавно завершився проєкт з дослідження стану хвостосховищ в басейні річки Дністер (раніше аналогічний проєкт відбувся на Донбасі, на черзі – дунайський регіон). Саме басейн Дністра нині під пильною увагою через ситуацію з повеннями, які можуть спровокувати аварії на спорудах. Тож група екологів провела їх детальну інвентаризацію. Зібрана інформація – дуже невтішна [23].

У басейні Дністра було ідентифіковано 32 хвостосховища зі 162 мільйонами тон відходів. Ці споруди перебувають на балансі 12-ти підприємств. Три з них з найбільшим обсягом відходів вимагають невідкладних протиаварійних заходів. Це: ДП "Сірка" – 85 млн тон; ТОВ "ОріанаЕко" – 26 млн тон; Гірничо-хімічне підприємство "Полімінерал" – 12,74 млн тон [23].

Дослідження хвостосховищ у басейні Дністра досить показове: воно засвідчило – ці об'єкти дуже небезпечні, й очевидно, аналогічна ситуація склалася по всій Україні. Тобто в будь-який момент десь може рвонути така "бомба сповільненої дії", що може обернутися екологічною катастрофою. Але в той же час роботи з утилізації відходів і ліквідації хвостосховищ практично ніде не ведуться.

Невтішна ситуація складається і у Кривбасі. Через часткову руйнацію дамби хвостосховища «Центральне» підприємства «Арселор Міттал Кривий Ріг» технічною водою затопило частину дачних ділянок у Миролюбівці (рис. 1.1, 1.2). На місці утворилося озеро з відходів збагачення. Аварія могла статися через прорив або просідання дамби. Усього вилилося 80000 м³, що становить 4% обсягу чаші. Аварію вдалося локалізувати зі східного боку гідротехнічної споруди [24].



Рисунок 1.1 – Хвостосховище «Центральне» підприємства «Арселор Міттал Кривий Ріг» [24]



Рисунок 1.2 – Підтоплення Миролюбівки відходами збагачення [24]

1.1.3 Аналіз причин аварій на хвостосховищах.

Збором інформації та вивченням питань безпечної експлуатації хвостосховищ займаються декілька світових інтернет-порталів: Міжнародна комісія по великим греблям (ICOLD), Глобальний портал хвостосховищ [25], Tailings.info [26], WISE Uranium Project [3] тощо.

Відомості про аварії з урахуванням інших джерел представлені в [3-21, 27-30]. Вплив конструктивних особливостей на стійкість хвостосховищ при аварійних ситуаціях було проаналізовано на основі даних про аварії, що трапилися в різних країнах світу в XX ст.

Перелік хвостосховищ, для яких були зібрані відомості з аварійних ситуацій, містить інформацію про 220 аварії, що трапилися за період 1917-2000 рр. у 29 різних країнах світу. Кожен випадок ідентифікований за трьома типами: «руйнування, прорив», «нештатна ситуація» або «порушення режиму підземних вод», фільтрація, вплив на підземні води, ерозія, просідання внаслідок ведення гірничих робіт.

Для аналізу динаміки аварійних випадків на хвостосховищах за роками з переліку було виключено 41 об'єкт, для яких не було ідентифіковано рік аварії, тому загальна кількість аварій, відібраних для аналізу, склала 179. Майже 75% усіх випадків, що аналізуються, припадають на п'ять країн світу з найбільшою кількістю аварійних ситуацій: США, Чилі, Канада, Велика Британія, Південна Африка (рис. 1.3). Це пов'язано, ймовірно, з повнішим обліком аварій у цих країнах.

Частота аварій на хвостосховищах країн світу (рис. 1.4) демонструє різке зростання з середини 1960-х років, що пов'язано з інтенсивним розвитком гірничої промисловості в той період та утворенням великої кількості таких об'єктів.

Максимальна кількість аварій у XX столітті припадає на період з 1970 по 1995 р., після чого кількість різних інцидентів дещо зменшилася. Це може бути пов'язане з введенням більш строгих стандартів безпеки, згортанням гірничого видобутку в деяких країнах, зокрема, в Європі, запровадженням інших способів видобутку, що виключають накопичення відходів на поверхні (закладення виробленого простору).



Рисунок 1.3 – Розподіл аварійних ситуацій на хвостосховищах країн світу,% [30]

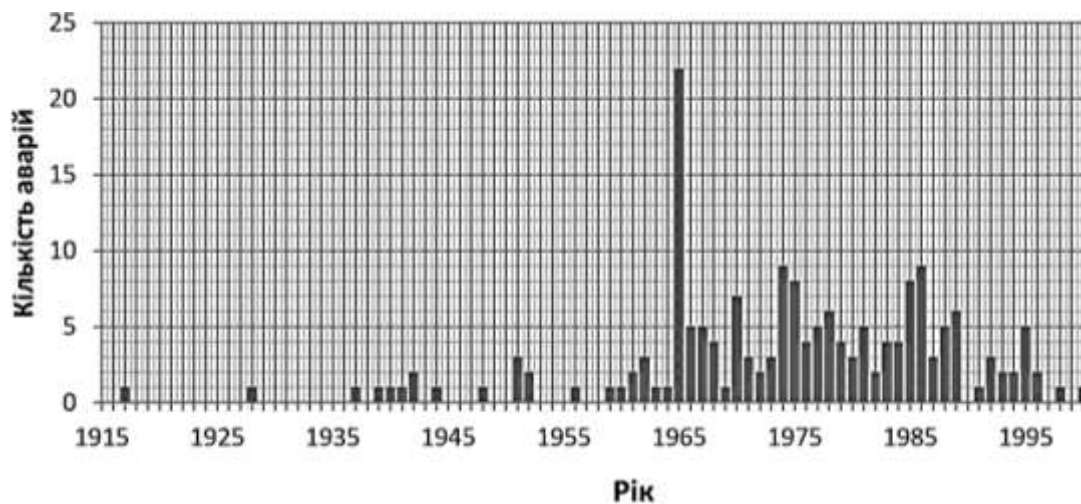


Рисунок 1.4 – Кількість аварій на хвостосховищах, що сталися за період із 1917 по 2000 роки [30]

Аналізуючи причини аварій на хвостосховищах, можна виділити в порядку зменшення їх пріоритету такі (рис. 1.5):

- порушення стійкості схилу (дамби),
- сейсмічні прояви,
- переповнення проєктної ємності,
- порушення основи та структурної цілісності
- фільтрація,
- ерозія,

– просідання в результаті ведення гірничих робіт.

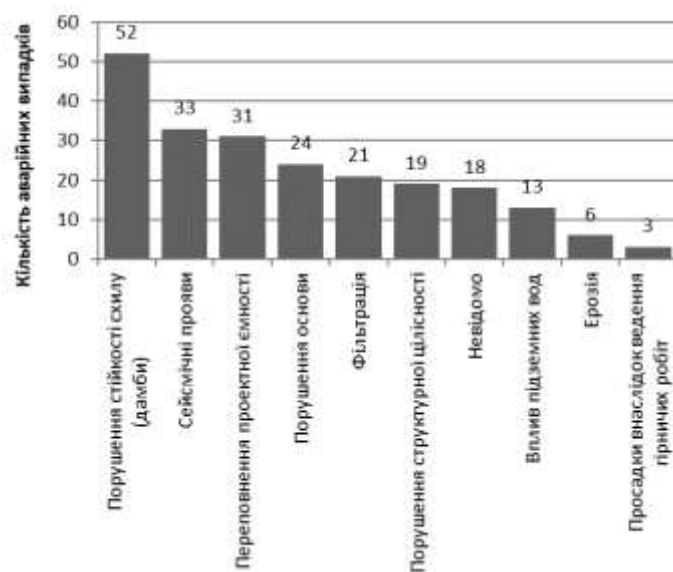


Рисунок 1.5 – Розподіл кількості аварій з їх причин [30]

У структурі гідротехнічних комплексів гірничо-збагачувальних комбінатів огорожувальні дамби хвостосховищ належать до споруд найвищого рівня відповідальності. Сучасний дефіцит територій для складування промислових відходів змушує нарощувати місткість резервуарів шляхом збільшення висоти підпірних конструкцій, що прямо пропорційно підвищує ризик їхнього руйнування. Під аварійною ситуацією в даному контексті розуміють часткову або повну деструкцію дамби, яка призводить до неконтрольованого виливу заскладованих шламів [4]. На відміну від класичних ґрунтових водонапірних гребель, які зводяться відразу на проектну висоту і функціонують у стабільних умовах, споруди хвостосховищ будуються поетапно, паралельно з їхнім заповненням. Таке суміщення процесів будівництва та експлуатації зумовлює динамічні зміни фізико-механічних властивостей тіла дамби та її основи, значно ускладнюючи контроль за надійністю об'єкта. Крім того, специфіка конструктивних рішень та внутрішніх процесів у дамбах хвостосховищ суттєво відрізняється від параметрів традиційних гідротехнічних гребель, чим і пояснюється їхній вищий рівень аварійності (понад 0,01%). Саме тому

забезпечення стійкості таких динамічних споруд вимагає впровадження специфічних методів моніторингу та неперервного прогнозування напружено-деформованого стану ґрунтового масиву.

Розподіл кількості аварій за типом огорожувальних споруд (рис.1.6) вказує на істотно підвищений ризик аварій для наливних дамб, що споруджуються вгору за течією: із загальної кількості 172 аварійних випадків з ідентифікованим типом греблі 88 або 51,2% зареєстровано для дамб саме цього типу, а всі інші випадки сталися на греблях інших типів. Висота дамби хвостосховища є ще одним важливим фактором. В розглянутих даних статистичних аварій хвостосховищ доступна інформація про висоту дамб для 195 випадків. Приблизно 90% аварій пов'язано з дамбами висотою до 50 м, в той час як при висоті дамб понад 100 м – 2%. Найбільш вразливими щодо відмов у роботі виявилися дамби хвостосховищ заввишки 10-20 м – приблизно 28%, 0-10 м – 21% та 20-30 м – 20% [4].

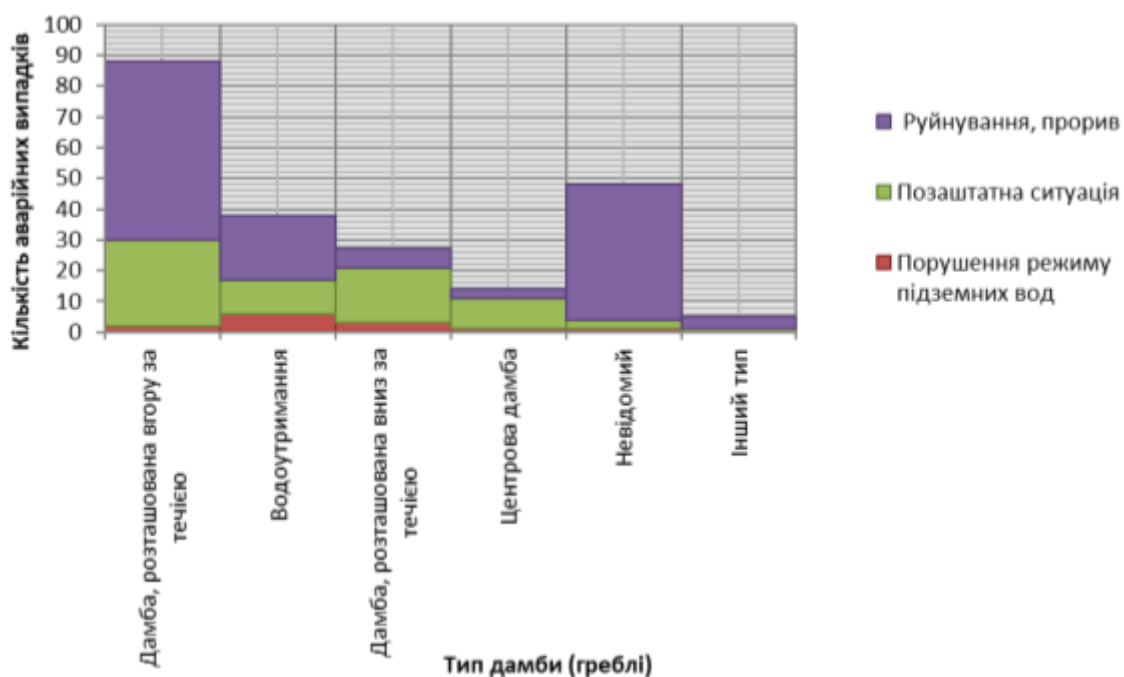


Рисунок 1.6 – Розподіл кількості аварій за типом греблі та типом аварії [30]

Об'єм заскладованих хвостів в хвостосховищі теж є важливим фактором, який впливає на масштаби при проривах огорожувальних споруд. Виявлено функціональні зв'язки між об'ємом хвостів, заскладованих в хвостосховищі, і об'ємом виливу хвостів при руйнуванні дамби [4].

Серед чинників, що впливають на стан неактивних хвостосховищ, найбільшу загрозу становлять сейсмічні коливання та перевищення номінальної місткості резервуара; сукупно на ці два фактори припадає від 25% до 30% від загальної кількості інцидентів на таких об'єктах (рис. 1.7). Водночас для діючих накопичувачів ключовим індикатором є порушення стійкості укосу споруди, що є причиною приблизно третини всіх зафіксованих аварійних ситуацій (рис. 1.7).

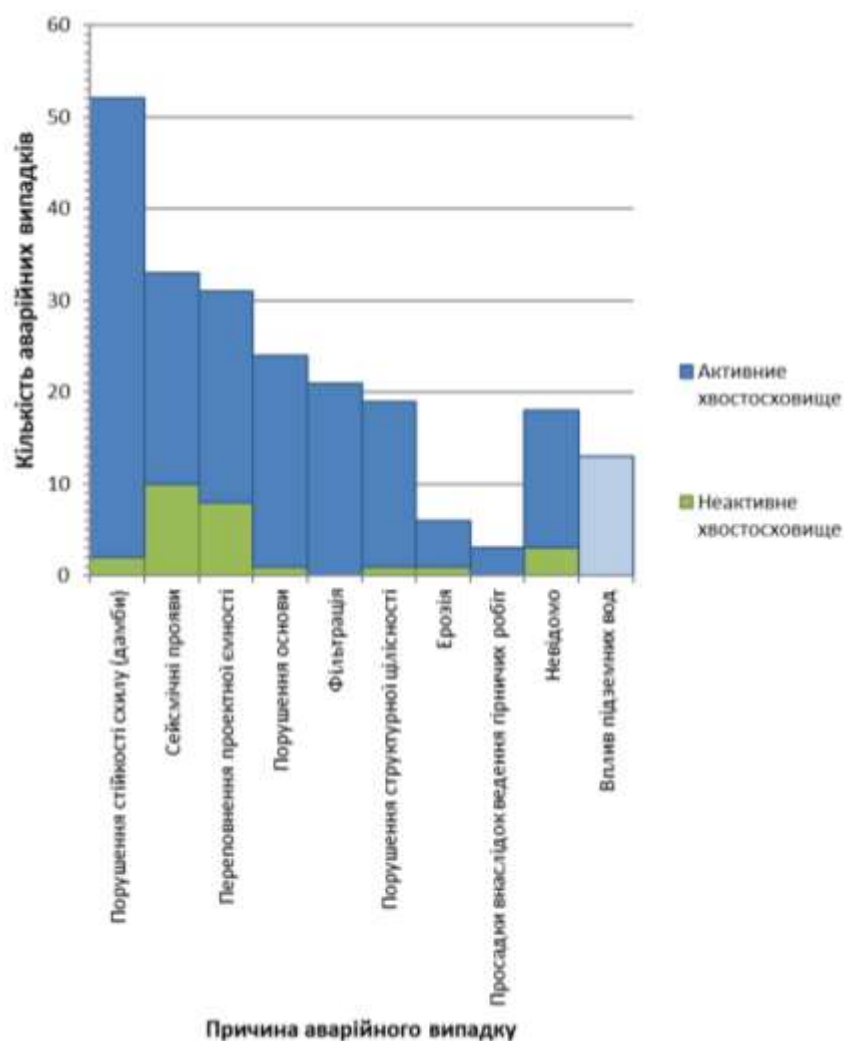


Рисунок 1.7 – Розподіл причин аварійних випадків для активних та неактивних хвостосховищ [30]

Отже, комплексне прогнозування екологічних та техногенних ризиків ГТС вимагає обов'язкового інтегрування в розрахункові моделі таких критичних параметрів, як зсувна стійкість укосів дамби, сейсмічні навантаження, деструктивні гідрологічні й гідрогеологічні процеси, а також показники загальної конструктивної міцності об'єкта. Констатація зазначених

закономірностей обґрунтовує доцільність геомоніторингу та інструментального контролю для забезпечення експлуатаційної безпеки хвосто- і шламосховищ.

Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» (ст. 22) передбачено створення державної системи моніторингу довкілля та проведення спостережень за станом навколишнього природного середовища, рівнем його забруднення. Виконання цих функцій покладено на Мінекоенерго та інші центральні органи виконавчої влади, які є суб'єктами державної системи моніторингу довкілля, а також підприємства, установи та організації, діяльність яких призводить або може призвести до погіршення стану довкілля [31].

Основні принципи функціонування державної системи моніторингу довкілля визначені у постанові Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 р. № 391 «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» [32].

Державна система моніторингу довкілля – це система спостережень, збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки. Система моніторингу є складовою частиною національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн. Контроль і моніторинг стану хвостосховищ і шламосховищ повинні включати візуальні та інструментальні спостереження [33].

До комплексу візуальних спостережень на хвостосховищах належить:

Відповідність фактично зведених огорожувальних споруд проєктним вимогам інженерної підготовки чаші та основи.

Технічний стан укосів, бERM, гребеня і берегових зон примикання з метою фіксації деформацій (зсувів, тріщин, просідань), підмивів, розгерметизації швів та замулювання.

Працездатність дренажних контурів, що включає моніторинг випадків підпору, замулювання, суфозійних проявів (провалів ґрунту), виклинювання фільтрату, руйнування лотків/колодязів або їх термічного промерзання.

Цілісність водоскидної та водоприймальної інфраструктури, зокрема виявлення дефектів бетону (тріщини, раковини), порушень герметичності стиків, корозійної деградації металу та готовності споруд до пропускання повеней.

Інструментальна готовність КВА в межах зони видимості (перевірка цілісності оголовків, наявності захисних кришок та ідентифікаційних номерів).

В якості інструментальних спостережень застосовуються в теперішній час не руйнуючі методи діагностики, які дозволяють виявляти деформації елементів, що візуально не проявляються [33-37]. Детально ці методи розглянуті у розділі 3.

Таким чином на сьогодні Законодавство України комплексно регулює питання техногенної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям безпеки хвостосховищ, але на об'єктах ці можливості залишаються не використані або повністю ігноруються.

Україна зобов'язалася вдосконалити законодавство щодо утилізації промислових відходів, підписавши Угоду про асоціацію з Євросоюзом. Зокрема, наша країна має дотримуватися вимог Директиви про управління відходами видобувної промисловості. Ця директива чітко прописує, як країни мають управляти відходами, щоб попередити або хоча б мінімізувати їхню шкоду для людини і довкілля. Фахівці з цих проблем вказують, які саме заходи, в перше чергу, має запровадити Україна, щоб адаптувати своє законодавство до вимог ЄС. Вони пропонують наступну дорожню карту [6].

Стратегічні напрями реформування сфери управління промисловими відходами в Україні:

- формування законодавчого базису для регламентації діяльності у сфері управління відходами видобувного сектору;
- розробка та впровадження багаторівневих галузевих планів інтегрованого управління промисловими відходами;
- капіталізація інвестиційних фондів підприємств та розвиток ринку екологічного страхування ризиків;
- імплементація європейських методологічних стандартів і директив (ЄС).

Розробка рекомендацій щодо принципів візуальної оцінки, методики інструментальних спостережень виявлення небезпечних ознак на хвостосховищах є однією з задач досліджень.

1.1.4 Сучасні тренди розвитку уявлень про техногенну безпеку експлуатації інших гідротехнічних споруд.

До інших гідротехнічних споруд, яким приділено деяку увагу у дисертації, відносяться зрошувальні мережі, захисні протипаводкові дамби, що призначені для захисту територій та об'єктів від підтоплення під час весняних повеней і дощових паводків, а також ґрунтові дамби та греблі, які побудовані на малих річках господарським способом.

Зрошувальні мережі (магістральні та розподільчі канали, регулюючі басейни тощо) успішно використовуються в сучасних умовах по всьому світу. За різними даними [22, 38-44], загальна протяжність зрошувальних каналів в Україні 50-60 тис. км. Важливо відмітити, що ця цифра відбиває протяжність всієї іригаційної інфраструктури, побудованої на початок 90-х років минулого сторіччя. На 9 червня 2023 р. внаслідок підриву Каховської ГЕС, більше 1100 км меліоративних каналів на півдні залишились без джерела зрошення, і відповідно без води. Ці канали обслуговували Каховську зрошувальну мережу, яка була найбільшою в Європі і Україні та забезпечувала подачу води на поля площею більш ніж 250 тис. га в Херсонській, Запорізькій і Дніпропетровській областях. Таким чином колосальний обсяг меліоративного господарства України включає у себе тисячі кілометрів каналів, а отже, і численні дамби [38-44].

На думку фахівців [43-44] сучасна ситуація в секторі зрошення має кризовий характер і призводить до подальшого погіршення технічного стану об'єктів меліоративних систем, який в більшості випадків оцінюється як обмежено працездатний [45, 46]. Загальна інженерна інфраструктура зрошувальних систем, за дослідженнями [44], повністю вичерпала свій технічний ресурс, а деякі об'єкти досягли свого граничного стану, при якому їх подальша експлуатація неможлива чи недоцільна.

Незадовільний рівень експлуатації існуючої водогосподарсько-меліоративної

інфраструктури обумовлений, перш за все, їх фізичним та моральним спрацюванням, оскільки в більшості випадків інженерна інфраструктура зрошуваних систем пропрацювала близько 40-50 років [41, 45, 46].

Так, будівництво і введення в експлуатацію зрошувальних систем (ЗС) на території Дніпропетровської області датується 1966-1980 рр. і побудовано за часів «Масштабної програми розвитку меліорації», яка розпочалась у 1966 р. [47, 48]. Фінансування реконструкції зрошувальних систем тривалий період належним чином не здійснювалось. Наприклад, на території області налічується 198,7 тис. га зрошуваних площ, з яких лише на 24 тис. га продовж 1976-1995 рр. була проведена масштабна реконструкція [48].

Незадовільний технічний стан тих чи інших вузлів зрошувальної системи призводить до суттєвих фільтраційних втрат, що обумовлює як збільшення собівартості зрошувальної води, так і підйом ґрунтових вод на прилеглих територіях, а отже створюються сприятливі умови для розвитку процесів підтоплення. Слід відзначити, що даний екзогенний геологічний процес на сьогодні є одним з найбільш розповсюджених [49].

Впровадження заходів, спрямованих на відновлення та розвиток зрошення, є одним з пріоритетних завдань Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Директиви 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради Європи від 23 жовтня 2000 р. «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики». Про актуальність проблеми відновлення та розвитку зрошення свідчить проєкт розпорядження Кабінету Міністрів України «Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» [50], підготовлений спільно експертами з Інституту водних проблем і меліорації НААНУ, Світового банку, Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН у співпраці з Координаційною радою, створеною при Кабінеті Міністрів України [50].

Потенціал існуючої водогосподарсько-меліоративної інфраструктури є ще досить значним, незважаючи на незадовільний рівень її експлуатації [44, 51], тобто навіть за умов не змоги проведення в повному обсязі необхідних заходів з

технічного обслуговування, обстеження, проведення ремонтних робіт, які визначені вимогами технічної документації.

Найбільшу загрозу для нормальної експлуатації крупних каналів створюють деформації, викликані розвитком фільтраційних процесів, під час яких відбуваються суфозійні процеси в тілі дамб каналів і в їх основі, а також зсуви і небезпечні деформації русла каналів при розмивах. Основними причинами зниження експлуатаційної надійності каналів з облицюванням є руйнування швів, водопроникність облицювання, підмив і деформація плит, а для лоткових каналів – розгерметизація стиків, замулення і нерівномірна просадка опор [42].

За дослідженнями [42] основні сценарії розвитку аварійних ситуацій на каналах можна поділити на два рівня (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Сценарії аварійних ситуацій на каналах за даними [42]

На першому рівні можна виділити три групи, засновані на впливі гідравлічних, фільтраційних і зсувних процесів, а на другому рівні – конкретні сценарії руйнування каналів.

Головними причинами аварій на ГТС вважаються втрата міцності, стійкості, просідання, вплив фільтраційних вод, суфозія, кольматаж тощо [52, 54].

На сьогодні мало уваги приділяється оцінці технічного стану регулюючих басейнів зрошувальних систем. На стадії проєктування під час вибору

місцерозташування регулюючих басейнів та магістральних каналів зрошувальних систем або в період їх експлуатації не враховують такі фактори впливу, як геологічні і тектонічні. Увага до цих факторів впливу на експлуатаційну надійність приділяється лише для більш високих класів наслідків ГТС аніж СС1, зокрема для гідровузлів.

Вік більшої частини існуючої інженерної водогосподарсько-меліоративної інфраструктури в Україні складає понад 30-50 років. Частина ГТС експлуатувалася без проведення належних ремонтних заходів, в значній мірі відпрацювала свій ресурс, а отже є об'єктами, що потребують оперативної оцінки їх технічного стану та впливу на еколого-меліоративний стан прилеглих територій. Промислово-водогосподарська інфраструктура регіону базується на розгалуженій системі низьконапірних ґрунтових гідроспоруд. Яскравим прикладом є Дніпропетровська область, де сумарна довжина штучних водотоків перевищує 36 тис. км. Функціонально ця мережа диференціюється на міжгосподарські зрошувальні системи та спеціалізовані канали дериваційного типу, спроектовані для стабільного обводнення індустриальних вузлів Придніпров'я і Донбасу.

Нагляд за технічним станом або моніторинг технічного стану зрошувальних систем виконується згідно «Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд» відповідно ДБН В.2.4-3:2010 «Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення» [54]. Цим документом визначено, що регулюючі басейни та зрошувальні канали класу наслідків (відповідальності) СС1 відносяться до постійних другорядних, тобто руйнування або ушкодження яких не спричиняє значних наслідків для навколишнього середовища, здоров'я і життя місцевого населення.

Разом з тим, в умовах воєнного конфлікту роль цивільних меліоративних каналів різко підсилюється та заслуговує на окремий аналіз [55]. Їх функціонування є ключовим для стабілізації гідрологічного режиму територій, зменшення ризиків повеней і забезпечення сталого аграрного виробництва. Водночас, ці об'єкти є вразливими мішенями, пошкодження яких може спричинити неконтрольоване поширення хімічних речовин, затоплення значних

площ та деградацію біорізноманіття. Таким чином, вони є елементом як захисту, так і ризику для екосистеми. Пошкодження або руйнування меліоративних систем в результаті військових дій може призвести до неконтрольованого підоплення або, навпаки, надлишкового осушення площ, зміни гідрологічного режиму та втрату угідь сільськогосподарського призначення.

У певних тактичних ситуаціях контрольоване затоплення за допомогою меліоративних каналів може бути використано для створення оборонних ліній або перешкоджання просуванню ворога, що опосередковано впливає на екологічну безпеку, запобігаючи подальшому руйнуванню в інших районах [55].

Меліоративні канали можуть стати шляхами поширення забруднюючих речовин (палива, боєприпасів, хімічних відходів) з зон бойових дій на великі відстані, забруднюючи ґрунт, ґрунтові води та водойми, що загрожує здоров'ю населення та екосистемам.

Пошкодження інфраструктури каналів може порушити водопостачання для зрошення або питних цілей, спричиняючи дефіцит води. Не менш важливим є доступ до води для підтримання гігієни та санітарії, що допомагає запобігти поширенню хвороб у ситуаціях, коли медична інфраструктура може бути перевантажена або зруйнована.

Водогосподарсько-меліоративна інфраструктура відіграє важливу роль у воєнний час у забезпеченні населення водою, особливо в регіонах, де доступ до інших джерел води обмежений або порушений. В умовах бойових дій традиційні системи водопостачання (водопроводи, насосні станції) можуть бути пошкоджені або зруйновані. Іригаційні канали можуть служити альтернативним джерелом води для питних (після відповідної очистки) та інших господарських потреб. Під час війни продовольча безпека стає пріоритетом. Іригаційні канали є важливою альтернативою порушеним системам централізованого водопостачання в умовах надзвичайних ситуацій. Їх використання дозволяє підтримувати безперервне зрошення аграрних угідь, що є запорукою стабільного сільськогосподарського виробництва та зниження ризиків гуманітарних катастроф, пов'язаних з продовольчою нестачею [55].

Вода з каналів може використовуватися для гасіння пожеж, які часто виникають в результаті військових дій, захищаючи громади та інфраструктуру.

У деяких випадках канали можуть використовуватися для перевезення товарів та людей, коли інші транспортні маршрути недоступні або небезпечні.

Порівняльний аналіз показує, що секціоновані лінійні канали мають суттєві переваги перед великими водосховищами. Це виражається у забезпеченні прецизійного регулювання дзеркала води, оптимізації її розподілу, мінімізації антропогенного навантаження, зниженні втрат на випаровування, мобільності обслуговування, а також у локалізації гідродинамічних ризиків та можливості акумуляції підземного стоку за сприятливих гідрогеологічних умов.

Таким чином в умовах збройного конфлікту цивільна водогосподарська інфраструктура має суттєво вищий клас відповідальності (наслідків), що підвищує її рівень значущості з точки зору забезпечення екологічної безпеки значних територій та регіонів країни.

Зруйновані зрошувальні системи вимагають значних ресурсів і часу для відновлення, що уповільнить післявоєнне відновлення сталого економічного розвитку та екологічної стабільності.

Отже, питання, пов'язані зі своєчасною реконструкцією зрошувальних систем, потребують нагального розгляду, зокрема: пошук достовірних і маловитратних за часом, трудовими і матеріальними ресурсами методів діагностики технічного стану зрошувальних каналів і регулюючих басейнів, виявлення ділянок на них, що потребують першочергово впровадження ремонтно-відновлювальних робіт, та оконтурення прихованих, візуально не визначених зон зосередженої фільтрації в тілі ґрунтових ГТС та отримання польових даних для розрахунку фільтраційних втрат, встановлення рівнів і напрямів току ґрунтових вод на прилеглих територіях.

Для більш детального діагностування технічного стану гідротехнічних споруд класу наслідків (відповідальності) СС1, які експлуатувались довгий час, не піддавались капітальному ремонту чи реконструкції, необхідно застосовувати інструментальні дослідження. Нажаль, даний вид робіт є витратним щодо часу

та трудовими ресурсами, що спонукає до пошуку нових методів оцінки технічного стану каналів і регулюючих басейнів зрошувальних систем [56].

1.2 Екологічні ризики експлуатації гідротехнічних споруд в умовах кліматичних змін

Протягом останнього півстоліття зростання температури повітря було найінтенсивнішим за 2000 років. Така температура, яка спостерігалась на планеті у 2023 році була майже 100 тисяч років тому [57]. Саме діяльність людини є причиною цих змін, такого висновку дійшли вчені у шостому звіті Міжурядових експертів з питань зміни клімату. Слід зазначити, що суттєво підвищується не лише температура атмосфери, а й океану та земної поверхні і це приводить до стрімкої зміни усіх складових кліматичної системи [57].

Підвищення температури в атмосфері зумовило зміну тривалості сезонів. Зокрема, збільшилась тривалість теплого весіннього і літнього періодів, і зменшилась тривалість холодного і зимового періодів. Також збільшилась тривалість вегетаційного періоду, який у північній півкулі зростає з 1950 року кожні десять років на два дні [57-64].

В Україні за останні 60 років підвищення середньої температури відбувалось майже у 2,5 рази швидше, ніж глобальної. Як наслідок, з 1981 року відмічається збільшення тривалості теплого періоду і періоду активної вегетації на 7-8 днів кожні 10 років. Збільшується кількість літніх днів з середньою за добу температурою повітря вище 15 градусів у середньому на 8 днів кожні 10 років. Такі зміни зумовили суттєве зростання літнього періоду в Україні. Крім того, літній період стає більш спекотним. Зростає кількість спекотних днів, збільшується кількість тропічних ночей. Тривалість холодного періоду зменшується, зима стає не лише коротшою, а й менш суворою [57-64].

Зростання температур взимку спричинило трансформацію структури атмосферних опадів. На більшій частині країни тверді опади замінюються рідкими, що призводить до відсутності стабільного снігового покриву. Разом з тим спостерігається

інтенсифікація коливань температур.

Зміна клімату в Україні має кілька характерних особливостей. Найбільш помітною є підвищення температури повітря, яка з початку спостережень наприкінці 19 століття зросла на 3 °С. Це підвищення приблизно еквівалентне зміщенню кліматичної зони країни на 500 кілометрів на Північ або навіть більше [57-64].

Важливо, що підвищення температури повітря збільшується і спостерігається протягом усього року. В результаті цього потепління значно зменшилася глибина снігового покриву. З 1991 року кількість спекотних днів з температурою понад 30 °С збільшилася в три-п'ять разів. Водночас кількість опадів істотно не змінилася. При цьому тривалість опадів зменшилася, а їх інтенсивність збільшилася. Загалом клімат країни став більш посушливим, ніж у минулому. Зміна клімату призвела до багатьох наслідків, що впливають на водний режим річок і озер, флору і фауну, сільське господарство тощо. Зміна клімату призвела до змін у вирощуванні багатьох сільськогосподарських культур.

Ще одним проявом зміни клімату є збільшення повторюваності та інтенсивності небезпечних і стихійних явищ погоди. В Україні це збільшення інтенсивності дощів, злив і снігопадів, що зумовлює збільшення паводків. Все частішими та інтенсивнішими стають грози, шквали, град, посухи, хвилі тепла [57-64].

Темпи зміни клімату у нас не нижчі, а вищі, ніж в Європі. Так, швидкість зростання середньої за рік температури в Україні у 1961-2023 рр. становила 0,41 градуса за десять років, а в Європі – 0,34 градуса [57].

При оцінювання кліматичної зміни необхідно мати доволі тривалі репрезентативні статистичні ряди спостережень за основними метеорологічними показниками. Відомо, що при виборі місцезнаходження метеорологічних станцій та організації їх роботи враховуються репрезентативні (характерні) місцеві умови. Так густота мережі станцій (шт./км²) значно варіює по території України: від 0,15-0,19 (Рівненська; Вінницька) до 0,46, 0,70 та 0,80 (Львівська, Закарпатська і АР Крим). На Дніпропетровщині, де є 10 метеостанцій, густота становить 0,31, як і на більшості регіону (в межах 0,2-0,3), радіус обслуговування кожної з них – 20-30 км. Звісно, при виборі місця розташування враховувався природний ландшафт, а не

техногенний, і ГТС гірничопромислового і цивільного призначення не були такими, як на сьогоднішній час. Тому, без облаштування поблизу або безпосередньо на цих об'єктах метеомайданчиків, за наявною мережею метеостанцій визначити якісну оцінку та кількості опадів безпосередньо на гідротехнічних спорудах та навколо них достатньо складно [65].

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

При аналізі просторового розподілу річних сум опадів по території України спостерігається закономірність – вони поступово зменшуються із заходу й північного заходу на південь і південний схід. Це зумовлено циклонічною діяльністю та надходженням повітряних мас [65].

З метою детальнішої оцінки змін погодних умов оброблені метеорологічні дані з метеостанції Кам'янське, Губиниха і Комісарівка, які розташовані в Дніпропетровській області (регіоні найбільш насиченому гірничопромисловими підприємствами). Спостереження на метеостанціях Губиниха і Комісарівка велися з інтервалами в 3 години (інтернет-ресурс RP5), середньодобові значення температур обчислені шляхом знаходження середнього арифметичного, а суми атмосферних опадів – додаванням за добу. По метеостанції Кам'янське використано подекадні значення: середні температури і суми опадів за період 1981-2022 рр. [65], (Додаток А).

Для зіставлення наявних кліматичних параметрів використані дані з Довідників по клімату, які зібрані на середину-кінець 60-х років минулого століття. Отже, норма опадів для метеостанції Кам'янське дорівнює 565 мм, Губиниха – 565 мм, і для МС Комісарівка – 492 мм. Щодо температурного режиму повітря, то норма середньорічної температури повітря по метеостанціям відповідно – 7,8, 7,5 і 7,8 °С. Дані з Додатку А.1 фіксують збільшення середньорічної температури повітря за вибраними метеостанціями на 2,0–2,3 °С [65].

Для наглядного представлення кліматичних параметрів на рис. 1.9. у вигляді

гістограми показані річні суми атмосферних опадів, а середньорічні значення температур повітря у вигляді лінійного графіка. На цьому ж графіку за даними середньорічних температур повітря по метеостанції Кам'янське побудовано лінію тренду з апроксимуючим рівнянням та значенням достовірності апроксимування.

Аналіз даних рис. 1.9 вказує на певний зв'язок в розподілі сум атмосферних опадів за період суміжних років спостережень, тобто відслідковується тенденція багатодощових і малодощових років, але чітка закономірність відсутня. На графіках зміни середньорічних температур відмічається тренд до її зростання за останні роки. Найбільш яскраво відмічена на графіку тенденція до підвищення температури повітря за 41 річний період спостережень по даним метеостанції Кам'янське. Ця закономірність апроксимована лінійною функцією з достовірністю $R^2=0,34$, що вказує на існування виявленого тренду [65].

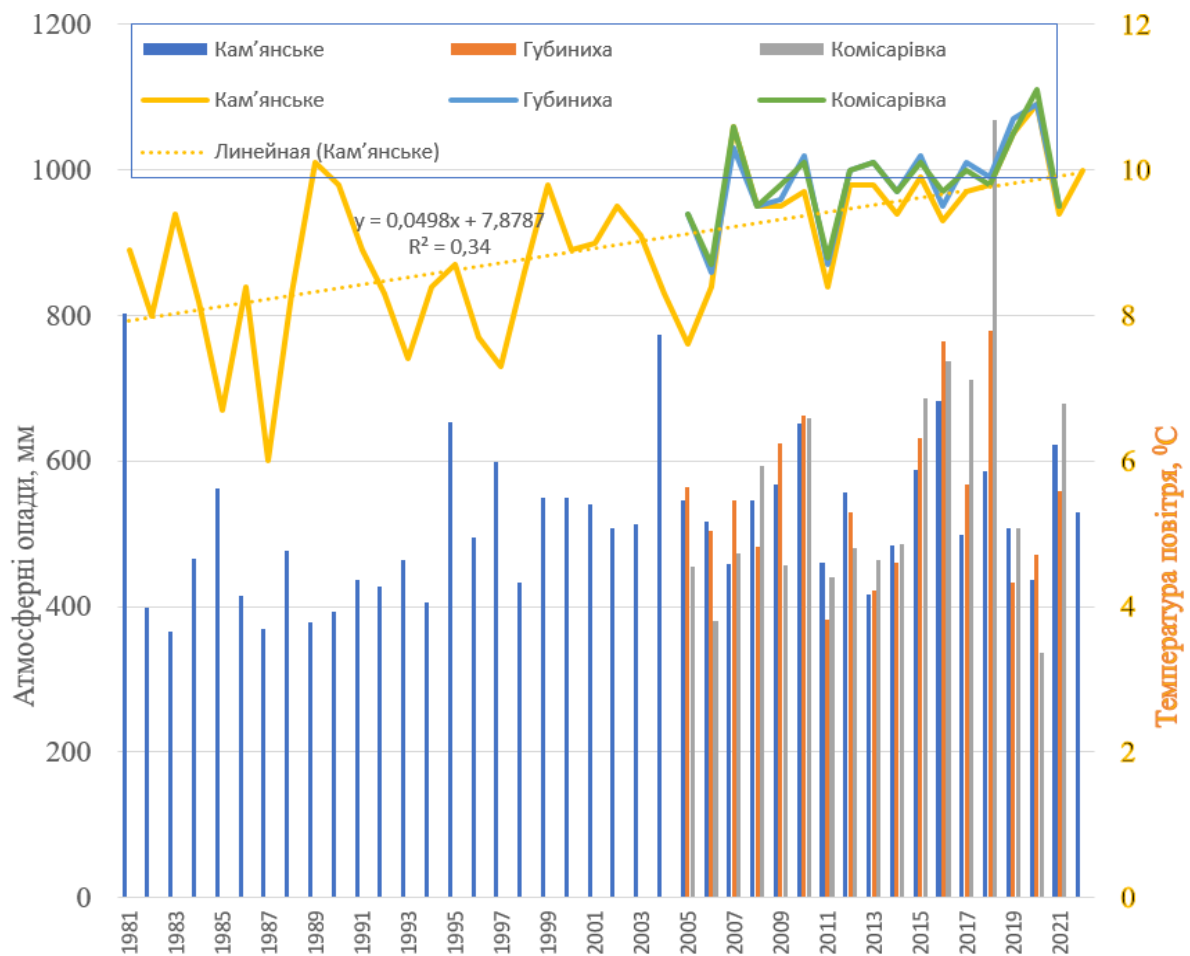


Рисунок 1.9 – Суми річних значень атмосферних опадів і середньорічні значення температур повітря за даними метеостанцій Дніпропетровської області

З метою оцінки часового розподілу добових сум атмосферних опадів протягом року виконано співставлення сум опадів за літо (червень-серпень) і теплий період (травень-вересень) до їх суми за рік по даним метеостанції Кам'янське (Додаток А.2). Літній і теплий період вибрані не випадково, адже в цей час рідкі опади випадають з великою інтенсивністю і несуть потенційну загрозу різних видів ерозії (площинної і лінійної), розмиву земляних захисних ГТС різного призначення. Висока інтенсивність опадів значно перевищує всмоктуючу здатність ґрунту, що призводить до появи калюж і при наявності нахилу місцевості утворення осередків спочатку лінійного, а в подальшому і площинного розмиву. В той же час при наявності великих шпарин і тріщин відбувається процес інфлюації, що призводить до розвитку суфозії, карстових каналів і вирв [65].

При цьому в роботі [66] зазначено, що кількість опадів за багаторічний період суттєво не змінилася. Водночас тривалість опадів скоротилася, а їх інтенсивність зросла.

Опади в осінній і зимовий період, з точки зору небезпеки для стійкості ґрунтових ГТС, несуть менші загрози внаслідок нижчої інтенсивності їх проходження і випадіння у формі твердих опадів (сніг, град, іній та паморозь).

З аналізу даних Додатку А.2 виходить, що частка опадів за літо коливається по рокам від 17,8 % до 42,3 % при середньому значення 29,3 %, а за теплий період з травня по вересень від 22,1% до 59,9% при середньому значення 45,0 %. Наведені середні значення дещо перевищують (відповідно на 4,3% і 3.0%), середні значення розраховані при рівномірному внутрішньорічному розподілу атмосферних опадів. Зв'язок між літніми і річними опадами за 42 річний період (1981-2022 рр.) по спостереженням метеостанції Кам'янське наведений на рис. 1.10.

З аналізу рис. 1.10 корелятивний зв'язок між опадами літнього і теплого періодів та річними опадами очевидний, але не дає чогось для даного дослідження. Показовими були б часові ряди добових опадів або ймовірності опадів вище 10 мм або 20 мм за день та їх зміна за роками, але нажалі така інформація відсутня.

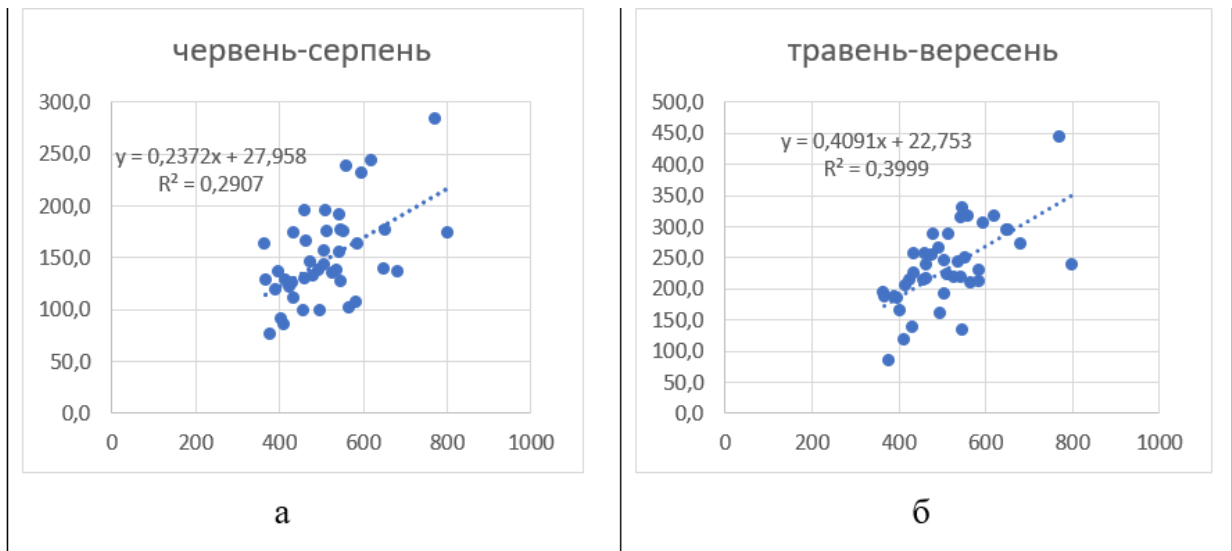


Рисунок 1.10 – Зв'язок між опадами літнього (а) і теплого (б) та річними їх значенням за даними метеостанції Кам'янське [65]

Для оцінювання просторового розподілу добових сум атмосферних опадів по території області здійснено випадкову вибірку (по три за різні роки та сезони) за даними 6 метеостанцій Дніпропетровської області (Додаток А.3).

З аналізу Додатку А.3 можна встановити, що територіальна закономірність розподілу опадів відсутня ба більше для такого сезону як осінь, для якого характерні обложні, тривалі дощі на значній території. Різниця в кількості опадів при цьому досить значна, наприклад 18.10.2011 р. від 4,5 мм на метеостанції (МС) Комісарівка до 27,0 мм на МС Чаплине, чи 18.10.2013 р. від 5,0 мм на метеостанції Чаплине до 25 мм біля МС Нікополь.

Наведені в Додатку А.3 добові значення атмосферних опадів чітко вказують на локальний та нерівномірний розподіл випадіння дощів по території. При цьому відмічається грозовий характер їх випадіння з великою інтенсивністю, незалежно від сезону, що веде до ерозійних явищ у покривних породах, як на поверхні ГТС, так і біля захисних дамб, та в їхніх межах [65].

Кліматичні зміни мають складні та часто непередбачувані наслідки, що впливають на зростання ризиків для інфраструктури (включаючи ГТС), зменшення доступності водних ресурсів та несуть загрозу продовольчій безпеці через зниження врожайності. Відмічається більш інтенсивне поширення захворювання рослин, пов'язаних із спекою і водою. Порушуються природні

екосистеми та вимирають не адаптовані до жаркої погоди види флори і фауни.

Отже, кліматичні зміни – це не лише екологічна проблема, а стратегічний виклик для сталого розвитку. Їхній аналіз, прогнозування та врахування в галузях гірничопромислового виробництва, сільського господарства, енергетики та водного господарства є критично необхідним для збереження природних ресурсів та безпеки життєдіяльності людини [65].

У сучасних умовах зміна клімату стала одним із найсуттєвіших факторів, що впливають на надійність, безпеку та експлуатаційну ефективність гідротехнічних споруд (ГТС). Ці зміни проявляються не лише у вигляді глобального потепління, а й у формі локальних екстремальних погодних явищ, які формують нові виклики для водогосподарської інфраструктури.

Основні ключові кліматичні чинники, що впливають на екологічну безпеку експлуатації ГТС: зміна режиму атмосферних опадів, повені і паводки, посухи і дефіцит вологи, зміни температур і рівня ґрунтових вод [65].

Кліматичні сценарії демонструють тенденцію до збільшення інтенсивності короткочасних злив, що спричиняє раптове зростання рівнів води у водосховищах, каналах, дамбах. Такі навантаження перевищують розрахункові параметри, закладені в конструкції споруд, і можуть призводити до їх перевантаження або пошкодження.

Збільшення кількості паводків різного типу (дощових, весняних, талих) знижує ефективність існуючих систем відведення води, створює ризики розмиття основ та руйнування гідротехнічних конструкцій. В окремих регіонах спостерігається протилежна тенденція – скорочення кількості водних ресурсів, що негативно впливає на роботу зрошувальних систем, водопостачання і навіть на стабільність дамб через висихання ґрунтів та тріщиноутворення.

Різкі перепади температури прискорюють зношування матеріалів ГТС, викликають появу мікротріщин у бетоні, а також сприяють заморожуванню/відтаванню вологи в порах матеріалів, що знижує їх міцність.

Кліматичні коливання впливають на баланс підземних вод, що може викликати осідання ґрунтів під спорудами або порушення дренажної системи.

Наслідки кліматичних змін для ГТС, за даними [65], можуть проявлятися у:

- підвищенні ризику аварійності через нестабільне навантаження на конструкції;
- терміну служби споруд через прискорене старіння матеріалів;
- збільшенні витрат на утримання, ремонт та модернізацію інфраструктури;
- необхідності перегляду розрахункових параметрів ГТС з урахуванням нових кліматичних сценаріїв.

1.3 Висновки до Розділу 1

На підставі аналітичного огляду літератури можна сформулювати наступні висновки.

1. ГТС гірничопромислового призначення через технічний стан в цілому не сприяють забезпеченню водної безпеки в частині захисту від загроз (прориви та забруднення територій) і збереження екологічної рівноваги. На більшості ГТС довгий час не проводяться моніторингові інструментальні дослідження, що призводить до подальшого розвитку небезпечних техногенних процесів таких як ерозія тіла ГТС і огорожувальних дамб, суфозія, карст, забруднення поверхневих і підземних вод і навіть до аварій на діючих об'єктах з витоків відходів на прилеглі території. В переліку факторів, що впливають на аварійні ситуації на ГТС практично не розглядаються такі природні чинники, як зміни кліматичних умов за останні 50-70 років, геологічні і тектонічні фактори розташування об'єктів. У воєнний час збільшується ризик аварій особливо на об'єктах захоронення радіоактивних відходів, що може призвести до другого «Чорнобилю».

2. Значну роль у забезпеченні водної безпеки територій та держави в частині гарантованого постачання води для сільського господарства, побуту та інших потреб населення, збереження здорових прісноводних екосистем тощо відіграють цивільні ГТС, особливо у воєнні часи. Виконуючи акумулюючу та розподільчу функції вони є надійними, а інколи і єдиними постачальниками води як для промисловості, так й для населення. Строк експлуатації більшої частини

ГТС цивільного призначення на території Дніпропетровської області завершується, а в деяких випадках перевищує розрахункові строки служби, при цьому існуюча водогосподарська ситуація ускладнюється відсутністю інструментальних досліджень за технічним станом об'єктів і проведенням своєчасних ремонтних робіт в повному обсязі внаслідок неналежного фінансування. Крім того, військові дії можуть привести до аварійних ситуацій на водосховищах і крупних каналах, а під час збройного конфлікту зростає роль цивільних ГТС як джерел водопостачання і зрошення.

3. Зміна клімату пов'язана із суттєвим зростанням середньорічної температури (на 2,0–2,3 °C у Дніпровському регіоні), а також зі збільшенням інтенсивності короткочасних злив та повторюваністю екстремальних паводків, що спричиняє критичне водонасичення ґрунтових масивів і гідродинамічне перевантаження конструкцій, що перевищує їхні початкові розрахункові параметри та підвищує ризик руйнування огорожувальних дамб.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основними структурними елементами гідротехнічних споруд (ГТС) є огорожувальні дамби, технічний стан яких залежить від багатьох факторів, що пов'язані з призначенням, місцем розташування, терміном експлуатації ГТС, зі складом ґрунтів дамби та її облицюванням, сейсмічністю району, обводненням матеріалів, складаючих ГТС та іншими чинниками. Головними причинами аварій на ГТС вважаються втрата міцності, стійкості, просідання, вплив фільтраційних вод, суфозія, кольматаж тощо [30].

Задовільний технічний стан дамби дозволяє запобігти аварійним ситуаціям, фільтрації рідини з ГТС, підтопленню і забрудненню територій підземних і поверхневих вод.

Незважаючи на простоту будови і майже однорідний склад ґрунтів дамби оцінка її технічного стану є складним завданням, оскільки візуальні методи огляду не завжди можуть надати дійсне уявлення про процеси, які відбуваються в тілі дамби [30, 53, 54, 67, 68]. Найбільшу загрозу для нормальної експлуатації ГТС, на думку Бакланової Д.В. [30, 67], створюють деформації, викликані розвитком фільтраційних процесів, під час яких відбуваються суфозійні і зсувні процеси в тілі дамб та в їх основі.

Альтернативним підходом для визначення технічного стану є інструментальні дослідження, що дозволяють встановити зони прихованої фільтрації і обводнення, розвиток небезпечних процесів таких як суфозія, карст в тілі дамби, а також виділити ділянки можливих зсувних явищ. На жаль, цей вид робіт є витратним щодо часу та трудових ресурсів, що спонукає до пошуку нових інструментальних методів оцінки технічного стану огорожувальних дамб ГТС [69-78, 79-90].

Наразі для оцінки технічного стану ґрунтових огорожувальних дамб ГТС цивільного і гірничопромислового призначення популярним є застосування неруйнівних методів діагностики, які дозволяють виявляти деформації

елементів, що візуально не проявляються [69-91].

В першу чергу до не руйнівних методів відносяться топографічні і геофізичні методи досліджень огорожувальних дамб ГТС цивільного і гірничопромислового призначення. Топографічні дослідження мають достатньо високу кошторисну вартість і трудомісткість. Останнім часом пропонується застосування штучного інтелекту при геодезичному моніторингу будівель та споруд [92].

В першому розділі зазначалось, що під час інженерних вишукувань рекомендується використовувати комплекс геофізичних методів для оцінки технічного стану і визначення рівня безпеки огорожувальних дамб [67]. Окрім традиційних геофізичних методів можна використовувати метод радіохвильового зондування за допомогою георадару – переносного імпульсного радіолокатора, який дозволяє здійснювати поділ середовищ з різною діелектричною проникністю по сигналу, що відображено [93-95].

В стандарті ДБН А.2.1-1-2014 наведено основні інженерно-геологічні задачі, що вирішуються за допомогою геофізичних методів (табл. 2.1) [35].

За рекомендаціями Посібнику до ВБН В.2.4-33-2.3-03-2000 [33] для оцінки фактичного стану ґрунтових огорожувальних дамб гідротехнічних споруд, ступеня їх експлуатаційної надійності і виявлення можливих відхилень в їх роботі від проєктних параметрів проводяться експлуатаційні обстеження за режимом роботи і технічним станом споруд із застосуванням закладених в тіло ГТС контрольно-вимірювальних приладів, візуальним обстеженням з замірами відкритих ділянок споруд та інструментальними спостереженнями за переміщенням конструктивних елементів. Пропонується визначати зони підвищеної фільтрації в тілі земляних гребель, захисних дамб та ложі за допомогою комплексу геофізичних методів, які включають: вертикальне електричне зондування (ВЕЗ), мікроелектрозондування (МЕЗ), електропрофілювання (ЕП), метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) [78, 96-100].

Таблиця 2.1 – Геофізичні методи в комплексі вишукувальних робіт за рекомендаціями Дод. К ДБН А.2.1-1-2014 [35]

Завдання досліджень	Комплекс геофізичних методів*	
	основні	допоміжні
Розчленовування геологічного розрізу (встановлення меж між шарами різного літологічного складу й стану в скельних і дисперсних породах) Місце розташування, глибина залягання і форми локальних неоднорідностей	ВЕЗ; МПХ; ГПЗ; різні види каротажу: акустичний, електричний, радіоізотопний, геополяритонний	ВЕЗ МДС; ВЕЗ ВП; ЧЕМЗ; ВСП; безперервне сейсмоакустичне профілювання на акваторіях
– зона тріщинуватості та тектонічних порушень;	ГПЗ, ВЕЗ УО; ВЕЗ МДС; КВЗ; ПП; МПХ; ВСП; сейсморозвідку міжсвердловинного простору, витратометрія, різні види каротажу; еманційно-газова зйомка	ВЕЗ ВП; ВЕЗ МДС; радіохвильове просвічування; радіокип; ДЕМП; магніторозвідка; термометрична зйомка
– карстові порожнини і підземні виробки; Вивчення геологічних процесів і їх змін:	ГПЗ; ЕП; ВЕЗ; КВЗ; ВСП; расходомерія, резистивіметрія	сейсмоакустичне просвічування; радіохвильове просвічування, гравірозвідка
Напружений стан ґрунтового масиву	ГПЗ; ПЕМПЗ; МПХ; ВСП; різні види каротажу; резистивіметрія; гравіметрія	ПП
Гідрогеологічні вишукування		
Глибина залягання рівня підземних вод	МПХ; ВЕЗ	ВЕЗ ВП
Динаміка рівня підземних вод	стаціонарні спостереження ВЕЗ; ННК	
Геотехнічні вишукування		
Вивчення складу, стану і властивостей ґрунтів Скельні: пористість і тріщинуватість, статичний модуль пружності, модуль деформації, тимчасовий опір одноосовому стиску, коефіцієнт спротиву, напружений стан.	різні види каротажу; МЗТ; сейсмоакустичне просвічування; ВСП; лабораторні вимірювання ПЕО і швидкостей пружних хвиль; ГПЗ; ПЕМПЗ; сейсморозвідку міжсвердловинного простору	ВЕЗ
Виявлення шляхів фільтрації в тілі дамб і гребель	ГПЗ; ПЕМПЗ	
Оцінка напружено-деформованого стану конструкцій будівель і споруд	ГПЗ; ПЕМПЗ	
Виявлення ділянок підвищених водопритоків і гірських ударів у гірничих виробках	ГПЗ; ПЕМПЗ	

Примітка. *Перелік скорочень (аббревіатур): ВЕЗ – вертикальне електричне зондування; ВЕЗ ВП – вертикальне електричне зондування за методом викликаних потенціалів; ВЕЗ МДС – вертикальне електричне зондування за методом двох складових; ГПЗ – геополяритонне зондування; ДЕМП – дипольне електромагнітне профілювання; ЕП – електропрофілювання; ЕП УО – електропрофілювання уявних опорів; ЕП МДС – електропрофілювання за методом двох складових; КВЗ – кругове вертикальне зондування; МЗГТ – метод загальної глибинної точки; МЗТ – метод зарядженого тіла; МПХ – метод переломлених хвиль; НГК – нейтрон-гама каротаж; ННК – нейтрон-нейтронний каротаж; ПЕО – питомі електричні опори; ПП – метод природного поля; ПЕМПЗ – реєстрація природного імпульсного електромагнітного поля Землі; СП МПХ – сейсмічне профілювання методом переломлених хвиль.

За розрахунками Чушкіної І.В. [67, 101] найбільш економічно вигідними з електророзвідувальних методів є комплекс кількісного методу вертикального електричного зондування (ВЕЗ) і якісного методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика геофізичних методів [67, 101]

Назва геофізичного методу	Кількість точок спостереження на 10 км ²	Норми часу		Кількість виконавців робіт
		загони-зміни на 10 км ²	загони-зміни на 1 точку спостереження	
ВЕЗ	5000	210	0,042	3
ПЕМПЗ	10000	81,1	0,0081	2
ЕП	20000	168	0,0084	5,75
ПП	10000	40,9	0,0041	6

За останні 20 років цей комплекс методів успішно апробований для діагностики технічного стану огорожувальних дамб гідротехнічних споруд цивільного і гірничопромислового призначення [67, 78, 102-106, 79-86].

Комплекс електророзвідувальних методів застосовувався наступним чином. На першому етапі проводились польові дослідження якісним методом ПЕМПЗ та їх обробка для виділення зон фільтрації і обводнення на огорожувальних дамбах. На другому етапі виділені зони підтверджувалися більш дорогим і трудомістким кількісним методом ВЕЗ. На хвостосховищі «Дніпровське» для визначення ділянок обводнення і фільтрації радіоактивних розчинів додатково використовувалась реєстрація іонізуючого випромінювання та буріння свердловин [33, 78, 106].

Для встановлення тектонічних і геологічних факторів впливу на екологічну безпеку експлуатації гідротехнічних споруд будувалися тектонічні схеми за даними магнітного і залишкового гравітаційного полів Землі за відомими геофізичними критеріями і проводився аналіз розташування ГТС на геологічних картах і тектонічних схемах.

2.1 Загальна характеристика методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ)

Метод заснований на реєстрації природного імпульсного електромагнітного випромінювання Землі, яке складається з трьох джерел: зовнішнього – сонячна радіація і космічні поля; внутрішнього – обумовлюється геологічними процесами під або безпосередньо на денній поверхні; техногенного – різного роду промислові і побутові випромінювання. Діапазон частот такого інтегрального імпульсного електромагнітного поля від перших герц до мега- і навіть гігагерц. Природне імпульсне електромагнітне поле, що генерується саме внутрішніми джерелами, використовується з метою вивчення геологічних особливостей територій [78, 106, 107].

Відомо досить багато процесів і явищ, в результаті або протягом яких виникає електромагнітне випромінювання або електромагнітна емісія (застосовуються обидва терміни). Одним з них є п'єзоелектричний ефект мінералів і гірських порід. Іншим досить потужним джерелом служать тектонічні напруги масиву гірських порід, особливо на рівні тисків, що передують утворенню тріщин. Третім значущим джерелом виступають різні електричні і електрохімічні процеси в породних масивах (зміни подвійного електричного шару, електронна емісія при русі розчинів, хімічні перетворення мінералів і порід). Інші джерела досліджені набагато слабкіше або їх внесок досить обмежений. В результаті перерахованих процесів утворюється стрибкоподібний сплеск електромагнітного випромінювання, який і називається імпульсом електромагнітного поля. Він характеризується різким збільшенням амплітуди і енергії випромінювання і дуже коротким (мілі- і мікросекунди) часом прояву. Частота проходження імпульсів ПЕМПЗ від перших герц до 20 кілогерц, цим поле ПЕМПЗ відрізняється від атмосферних і техногенних джерел. В поле ПЕМПЗ відсутня будь-яка періодичність, характерна для техногенних випромінювачів, що служить для розділення цих джерел [78, 106, 100].

Експериментальними дослідженнями різних авторів встановлено, що при стисненні кристалічних порід зростає кількість, енергія і амплітуда імпульсів ПЕМПЗ, які перед початком крихких деформацій досягають максимуму. Як тільки настає фаза руйнування (утворення тріщин), кількість імпульсів різко (вертикально) зменшується аж до нуля і потім незначно зростає до деякого рівня, на якому і залишається.

Електромагнітне випромінювання має здатність поширюватися в твердих породах на значну відстань від джерела, при цьому його амплітуда і енергія змінюється досить слабо. Якщо ж на шляху поширення електромагнітного випромінювання зустрічається ділянки замочування порід або зона порожнечі (обводнені і сухі тріщини і т.п.), то інтенсивність випромінювання дуже різко зменшується, а при потужній зоні воно взагалі розсіюється або поглинається. Завдяки цій особливості можна виділяти ділянки, які мають різну щільність потоку електромагнітних імпульсів, тобто кількості імпульсів за одиницю часу.

Ідея застосування методу ПЕМПЗ з метою проведення даного дослідження наступна: імпульсне електромагнітне поле генерується в кристалічних породах Українського щита. Якщо на шляху його розповсюдження зустрічаються обводнені ділянки порід, то його рівень та кількість імпульсів має зменшуватися. Теж саме буде проявлятися у тріщинуватих породах, до яких можна віднести насипні техногенні ґрунти. Розрізнити зони обводнення та техногенні ґрунти можна за допомогою інших методів [78].

Для досліджень застосовувався прилад «СІМЕІЗ» (мікропроцесорний індикатор електромагнітного поля – МІЕМП 14/4 (рис. 2.1) і призначений для вивчення ПЕМПЗ, а також електромагнітного поля техногенного походження в лабораторних і польових умовах [78, 79-86].

Прилад дозволяє визначати кількість імпульсів ПЕМПЗ за час вимірювання з відносною похибкою в межах $\pm 10\%$ і знаходити відсоткове співвідношення сумарної тривалості сигналу, який перевищив динамічний діапазон, до часу вимірювання («відсоток зашкалу») з відносною похибкою в межах $\pm 10\%$.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд приладу МІЕМП-14/4 (а) та споряджена апаратура (б) у складі власне приладу та вимірювальної штанги з трьома антенами [78]

Наявність чотирьох антенних гнізд дозволяє 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 в стаціонарній точці.

В прилад вбудований частотний фільтр, що дозволяє в процесі спостережень «відсікати» електромагнітні поля техногенного походження, викликані лініями електропередач, підземними комунікаціями, системами бездротового зв'язку, в тому числі стільникового (мобільного), вплив яких останнім часом все відчутніше позначається на реєстрації ПЕМПЗ.

Дослідження методом ПЕМПЗ на дамбах проводились як у площадному, так і в профільному варіанті [79-86].

Обробка результатів досліджень, виконаних в площадному варіанті, здійснювалась шляхом складання карт щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ для кожної антени у програмному середовищі Surfer-8.0. Для побудови карт використаний метод тріангуляції з лінійною інтерполяцією за квадратною вузловою мережею. При обробці результатів досліджень, виконаних в профільному варіанті, складались графіки для кожної антени.

В основу інтерпретації карт і графіків покладена відмічена вище

особливість поля ПЕМПЗ, а саме – зменшення щільності потоку імпульсів магнітної складової електромагнітного поля на ділянках, які розущільнені, тріщинуваті або обводнені. Для карт додатково використовується вигляд рисунку поля ПЕМПЗ. Так, для суцільних, монолітних порід та матеріалів характерне дуже диференційоване поле, з великою кількістю ізоліній та великим розмахом (амплітудою) значень. Для тріщинуватих ділянок рисунок поля більш витриманий, але також диференційований, хоча у меншому ступеню. Обводнені ж ділянки мають спокійний, «розмитий» рисунок поля, з невеликою кількістю ізоліній, значення яких знаходяться на низьких рівнях [78-86].

2.2 Загальна характеристика методу вертикального електричного зондування (ВЕЗ)

Метод вертикального електричного зондування (ВЕЗ) є одним з найбільш поширених електророзвідувальних методів. Однією з основних вимог до його застосування є контрастність за фізичними властивостями об'єкту вивчення відносно вмшуючого середовища, тобто, об'єкт (тіло, шар, пласт та ін.), що вивчається, повинен помітно (бажано у декілька разів) відрізнятися за питомим електричним опором від вмшуючих порід. ВЕЗ прийнято використовувати для вивчення горизонтально-шаруватих середовищ з невеликими кутами нахилу меж (до 15-20 градусів) [108-109, 96-97].

Питомий електричний опір (ПЕО) гірських порід є параметром речовини, що характеризує її здатність пропускати електричний струм при виникненні електричного поля [108-109, 96-97].

Гірські породи прийнято розглядати в геофізиці як трифазне середовище, тобто поєднання твердого мінерального скелету, в якому присутні тріщини або пори заповнені газом і рідиною. У будь-якій найміцнішій і щільнішій на вигляд породі присутні або пори (зокрема, для теригенних відкладень) або тріщини (зокрема, для магматичних і метаморфічних порід), або і те і інше. Саме ці пори або тріщини, заповнені повністю або частково вологою, є провідниками

електричного струму [108-109, 96-97].

Питомий електричний опір (ПЕО) гірських порід, в основному, залежить від наступних чинників:

- питомий електричний опір породоутворюючих мінералів;
- пористість (тріщинуватість);
- вологонасиченість;
- питомий електричний опір порової води (безпосередньо пов'язано з солоністю підземних вод і температурою);
- глинистість

Питомий електричний опір породоутворюючих мінералів, як правило, слабо впливає на ПЕО породи в цілому. Це пов'язано з тим, що переважна більшість мінералів є суто діелектриками і не проводять електричний струм. Виключенням є суцільні і прожилкові руди мінералів-провідників – самородних елементів, сульфідів, але такі утворення зустрічаються рідко [108-109, 96-97].

Зв'язок ПЕО гірських порід з коефіцієнтом пористості (тріщинуватості), коефіцієнтом вологонасиченості і електричним опором порової води очевидний: чим більше води в породі (тобто чим більше пористість і вологонасиченість) і нижче ПЕО води – тим нижче і ПЕО гірських порід. Наприклад, сухі піски мають вищий ПЕО, чим вологі, а останні – вищий, ніж водонасичені. При цьому рівень, нижче якого ПЕО гірської породи не може опуститися – є ПЕО води, що насичує породу [108-106, 96-97].

Питомий електричний опір води, що насичує породу, залежить в основному від солоності і температури. Чим більше солоність, тим нижче ПЕО води. З температурою ще простіше: вода – провідник, лід – ізолятор. Мерзлі гірські породи мають дуже високі значення ПЕО [108-109, 96-97].

Окреме питання з глинистістю – глини мають дуже низький ПЕО, значно нижче, ніж у води. Наприклад, ПЕО води – 25-30 Ом·м, а опір глини – 10-15 Ом·м. Цей ефект пов'язаний із складними капілярними процесами в глинах. Чим більше глинистість гірських порід, тим нижчий ПЕО.

Питомий електричний опір різних гірських порід дуже сильно розрізняється

– від перших Ом·м до десятків тисяч Ом·м, що дає можливість упевнено розпізнавати різні гірські породи і вирішувати завдання:

- пошуку і розвідки ґрунтових вод;
- картування мерзлих ґрунтів;
- пошук зон розвитку карсту в карбонатних породах;
- розділяти осадові теригенні породи за глинистістю;
- виділяти вологонасичені зони у різних техногенних об'єктах, тощо [108-109].

Ідея методу ВЕЗ надзвичайно проста. На поверхні землі збирають електророзвідувальну установку, яка, як правило, складається з двох живлячих електродів і двох приймальних (рис. 2.2). В якості електродів зазвичай застосовують металеві штирі, які забиваються в землю. Живлячі електроди прийнято позначати буквами А і В, приймальні - М і N [108-109, 96-97].

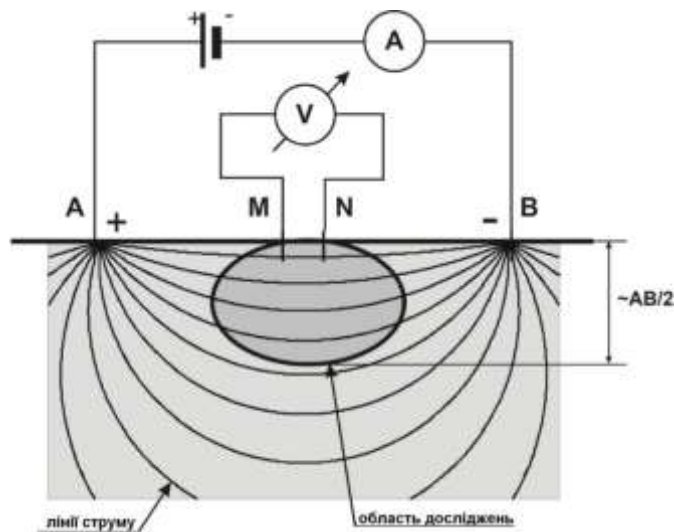


Рисунок 2.2 – Схема вимірів в методі ВЕЗ [108-109]

До живлячих електродів підключають джерело струму, наприклад, батарею. У землі виникає електричне поле і, відповідно, електричний струм. Силу струму в живлячій лінії (I_{AB}) вимірюють за допомогою амперметра, включеного в ланцюг АВ.

На приймальних електродах М і N виникає різниця електричних потенціалів (ΔU_{MN}), яка вимірюється за допомогою вольтметра [108-109, 96-97].

За результатами вимірів можна судити про електричні властивості гірських

порід на глибинах проникнення струму в землю. Глибина «занурення струму» залежить, в основному, від відстані між живлячими електродами А і В (рис. 2.2).

За результатами виконаних вимірів обчислюють уявний електричний опір (УО), якій позначається ρ_k , і вимірюється в Ом·м:

$$\rho_k = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \quad (2.1)$$

де: K – геометричний коефіцієнт (залежить від відстаней між електродами А, В, М і N);

ΔU_{MN} – різниця потенціалів на приймальних електродах М і N;

I_{AB} – сила струму, що протікає в живлячій лінії.

Уявний електричний опір характеризує інтегральне значення ПЕО гірських порід в області дослідження. Область дослідження розташовується під центром установки і тягнеться від поверхні до глибин, приблизно рівним половині довжини установки – $AB/2$ (рис. 2.3).

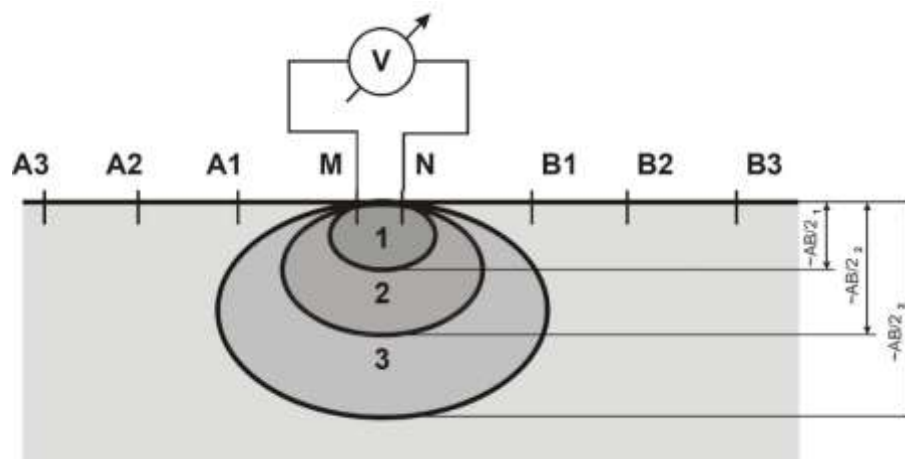


Рисунок 2.3 – Ефект зондування в методі ВЕЗ

Якщо середовище, що вивчається, однорідне – з ПЕО рівним $\rho_{сер}$, то значення отриманого уявного опору ρ_k буде тотожно рівне $\rho_{сер}$:

Якщо середовище, що вивчається, неоднорідне, тобто в області дослідження

розташовуються гірські породи з різними значеннями ПЕО, то значення отриманого уявного опору ρ_k буде більше найменшого з ПЕО порід, але менше найбільшого:

Ідея зондування припускає, що розріз вивчається зверху вниз. Для виконання зондування виробляють серію вимірів, поступово збільшуючи розмір живлячої лінії АВ. Чим більше параметр АВ/2 – тим глибше «занурюється струм в землю» і тим більше глибинність дослідження (рис. 2.3). При цьому кожна наступна область дослідження повністю включає попередню.

Значення АВ/2 вибирають залежно від потрібної глибинності досліджень. Як правило, мінімальні АВ/2 приймають 1-1,5 метра. Максимальні АВ/2 рідко роблять більше кілометра. Таким чином, метод ВЕЗ застосовують для вивчення середовищ до глибин не більше ніж сотні метрів.

В результаті описаної серії вимірів виходить набір значень уявного опору, виміряних при відомих АВ/2. У електророзвідці параметр АВ/2 називають рознесенням живлячої лінії (чи просто рознесенням).

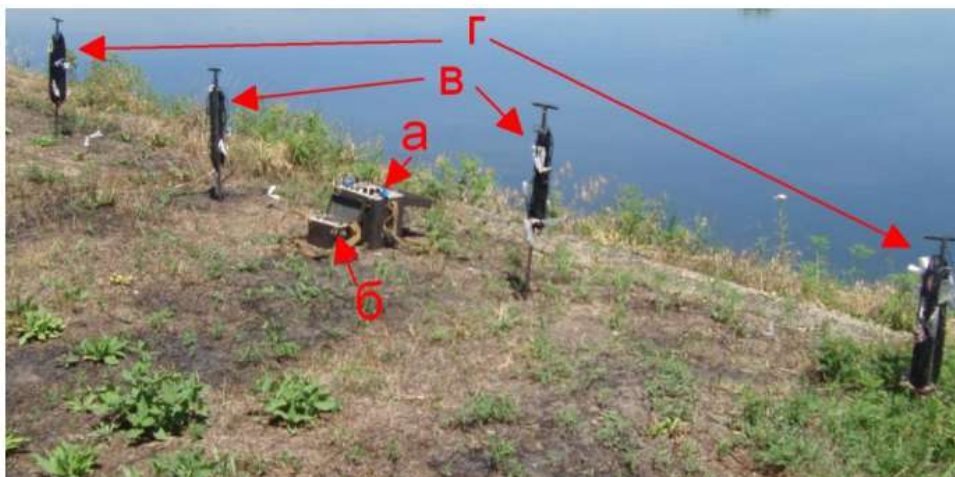
Для зручного представлення результатів спостережень будують графік залежності ρ_k (в Ом·м) від рознесення (в м). Такий графік називається кривою зондування або кривої ВЕЗ.

Для виконання спостережень методом ВЕЗ застосовується спеціалізована електророзвідувальна апаратура для збудження поля (генератори) і виміру різниці потенціалів (вимірювачі). Зараз, як правило, для методу опорів застосовується апаратура на ультранизких частотах (1-10 Гц) або на постійному струмі.

При дослідженнях використовувалася апаратура типу ШЕРС-5М (рис. 2.4).

Апаратура електророзвідувальна шахтна (ШЕРС 5М) призначена для проведення в наземних умовах і гірничих виробках геофізичних робіт методами електророзвідки.

Для монтажу живлячих і приймальних ліній застосовуються сталевомідні дроти і кабелі. Як живлячі електроди використані сталеві загострені штирі, приймальних – латунні.



а – генератор струму; б – вимірювач; в-г – електроди: в – вимірювальні, г – живлячі

Рисунок 2.4 – Електророзвідувальна апаратура ШЕРС-5М у спорядженому стані

Нормативні документи вимагають від геофізиків, щоб помилка польових спостережень не перевищувала 5%.

Як вказувалось вище дослідження, методом ВЕЗ проводилися на огорожувальних дамбах ГТС цивільного і гірничопромислового призначення у точках, встановлених за результатами інтерпретації карт щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ.

Таким чином, за комбінацією методів ПЕМПЗ та ВЕЗ можливо виконувати наступні види інженерно-геологічних та гідрогеологічних досліджень:

1. Виділення зон розущільнення та тріщинуватості природних геологічних тіл та штучних об'єктів.
2. Виділення ділянок підвищеного обводнення порід, визначення прихованих зон фільтрації крізь тіло дамби.
3. Виділення та оцінка параметрів зон фільтрації через природні та штучні об'єкти.
4. Встановлення глибини залягання рівня ґрунтових вод та виділених зон обводнення та фільтрації в тілі дамби.

2.3 Радіометричні дослідження на хвостосховищах радіоактивних відходів

В якості допоміжного геофізичного методу для встановлення зон фільтрації радіоактивних розчинів через тіло огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» залучалося вимірювання потужності експозиційної дози (ПЕД) гамма-випромінювання за допомогою радіометра СРП-68. Це відомі метод й прилад, методика проведення зйомки теж стандартна. Виконувалися виміри за тією ж мережею, що й метод ПЕМПЗ та паралельно з ним.

За результатами зйомки склалися карти ПЕД гамма-випромінювання у програмному середовищі Surfer-8. Для побудови карт використаний метод триангуляції з лінійною інтерполяцією за квадратною вузловою мережею. Ці карти наведені разом з картами щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ та використовувалися для комплексної інтерпретації результатів геофізичних зйомок на хвостосховищі «Дніпровське».

2.4 Методи математичного моделювання процесів в огорожувальних спорудах ГТС

Основними процесами, що визначають здатність дамб як огорожувальних споруд ГТС забезпечувати екологічну безпеку, є розвиток напружень і деформації під впливом навантажень, змін порового тиску та інших чинників, фільтрація та міграція розчинних речовин через породи дамби.

2.4.1 Моделі напружено-деформованого стану породних масивів.

При оцінці геомеханічної стійкості огорожувальних споруд хвостосховищ використано деформаційну пружно-пластичну модель середовища, реалізовану на базі методу кінцевих елементів (МКЕ). Дана модель є узагальненням пружного та жорстко-пластичного середовища з внутрішнім тертям. Вона зчленовує дві теорії, на яких базується сучасна механіка гірських порід: теорію пружності та теорію граничного стану [110-113].

Процедура чисельного рішення в методі кінцевих елементів заснована на передумові силової взаємодії між елементами модельованої області тільки у вузлових точках. При цьому умова безперервності середовища задовольняється нерозривністю вузлових зв'язків між елементами.

Деформування елементів обумовлене прикладанням з боку сусідніх елементів чи зовнішніх впливів вузлових сил F_i , F_j , F_k , кожна з яких розкладається на дві складові уздовж координатних осей. Залежність шести компонентів вузлових сил від шести компонентів вузлових переміщень встановлена виходячи з відомого в будівельній механіці принципу можливих переміщень: при нескінченно малому переміщенні вузлових точок робота вузлових сил повинна дорівнювати роботі внутрішніх напружень.

Результатом чисельного рішення є встановлення переміщень вузлів моделі виходячи з заданих вузлових сил, обумовлених зовнішнім навантаженням і власною вагою елементів моделі. За встановленими значеннями переміщень розраховуються осьові й головні деформації та відповідні їм напруження.

У скороченій формі рівняння кінцевих елементів може бути представлено у вигляді [112].:

$$[K]\{a\} = \{F\} = \{F_b\} + \{F_s\} + \{F_n\}, \quad (2.2)$$

де: $[K]$ – матриця жорсткості;
 $\{a\}$ – вектор вузлових переміщень;
 $\{F\}$ – вектор вузлових навантажень;
 $\{F_b\}$ – власна вага ґрунту;
 $\{F_s\}$ – сили поверхневого тиску;
 $\{F_n\}$ – зосереджена вузлова сила.

Матриця жорсткості визначається наступним чином:

$$[K] = \int v [B]_T [C] \cdot [B] dv, \quad (2.3)$$

де: $[B]$ – матриця «напруження-деформації»;
 $[C]$ – матриця пружності.

Вектор деформацій визначається з виразу:

$$\{\varepsilon\} = [B] \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \quad (2.4)$$

де u, v – вузлові переміщення в напрямках осей X і Y відповідно.

Вектор деформації також визначається складовими:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (2.5)$$

Для завдання плоскої деформації ε_z дорівнює нулю, і матриця деформацій має вигляд:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial y} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial y} & \frac{\partial N_8}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Відповідно до теорії пружності основна формула залежності напружень і деформацій має вигляд:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}, \quad (2.7)$$

де $[C]$ – матриця пружності, що визначається за такою залежністю:

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

де: E – модуль Юнга (модуль пружності);

ν – коефіцієнт Пуассона.

Напруження обчислюються в кожній точці сітки кінцевих елементів за допомогою матриці $[C]$ наступним чином:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [C] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (2.9)$$

В результаті перетворення формул (2.7) і (2.8) формула для визначення напружень і деформацій має вигляд:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (2.10)$$

Врахування граничного стану модельованого масиву і реалізація пластичної течії в області позамежних деформацій у чисельній моделі базується на методі початкових напружень, який полягає в наступному.

Чисельне рішення досягається при початково заданих пружних властивостях середовища і постійній матриці жорсткості системи.

В умовах плоскої деформації при напруженнях у середовищі, що не перевищують заданого граничного рівня, зв'язок напружень і деформацій описується законом Гука:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_n(\varepsilon_1 + \nu_n \varepsilon_3)/(1 - \nu_n^2) \\ \sigma_3 &= E_n(\varepsilon_3 + \nu_n \varepsilon_1)/(1 - \nu_n^2) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

де: σ_1 і σ_3 – відповідно найбільше і найменше головні напруження;

$E_n = E/(1 - \nu^2)$, $\nu_n = \nu(1 - \nu)$ – «плоскі» аналоги відповідно модуля деформації E і коефіцієнта Пуассона ν .

В області розтягання граничні деформації обмежуються міцністю на розтягання T ($T < 0$):

$$\sigma_3 = T, \quad (2.12)$$

а в області стискання – критерієм Кулона-Мора:

$$\sigma_1 = S + \sigma_3 \cdot \text{Ctg}\phi, \quad (2.13)$$

де: $S = 2 \cdot C \cdot \text{Ctg}(45 - \phi/2)$, $\text{Ctg}\phi = (1 + \text{Sin}\phi)/(1 - \text{Sin}\phi)$;

C і ϕ – відповідно питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя.

При виході деформованого стану елемента середовища на границю зони пружності напруження в елементі контролюються рівняннями стану, що на ділянці поза межних деформацій встановлені щодо головних напружень σ_1^T і σ_3^T :

$$\sigma_3^T = [E_n \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + S \cdot (\nu_n - 1)] / (1 - \nu_n \cdot \text{Ctg}\beta + \text{Ctg}\beta - \nu_n), \quad (2.14)$$

$$\sigma_1^T = S + \text{Ctg}\psi \sigma_3^T. \quad (2.15)$$

Кут β у рівнянні (2.13) визначає закон пластичної течії: при значенні β , встановленому для моделі рівним ψ , течія є асоційованою, що дозволяє врахувати розуцільнення порід в області поза межних деформацій.

Величини головних напружень σ_1^T і σ_3^T являють собою відповідні досягнутому рівню деформацій теоретичні напруження, до яких прагне чисельне рішення на i -ому кроці ітераційного процесу.

Крім того, в моделі передбачена можливість дослідження областей розривів, які фіксуються на ділянках деформацій розтягнення за умовою (2.14).

Реалізований спільно з методом кінцевих елементів метод зниження параметрів міцності при оцінці стійкості породного масиву забезпечує можливість одночасного визначення положення поверхні ковзання і коефіцієнта стійкості при відсутності будь-яких обмежень щодо геометрії механізму руйнування.

Згідно з методом, що використовується, коефіцієнт стійкості розраховується з відношення максимально можливої міцності ґрунту до мінімального значення, необхідного для забезпечення рівноваги:

$$k_s = \frac{\tau_{\text{гран}}}{\tau_{\text{діюч}}}. \quad (2.16)$$

При поданні формули (2.16) у вигляді стандартної умови Кулона-Мора вона набуває вигляду:

$$k_s = \frac{\sigma_n \cdot \operatorname{tg} \phi + C}{\sigma_n \cdot \operatorname{tg} \phi_r + C_r}, \quad (2.17)$$

де: C і ϕ – вихідні параметри міцності – відповідно питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя;

σ_n – фактичне нормальне напруження;

C_r і ϕ_r – параметри міцності, знижені в ході розрахунку до мінімальних значень, достатніх для підтримки рівноваги.

При цьому в умовах дії порового тиску розрахунок зсувної міцності ґрунту τ_r проводиться з використанням критерію міцності Кулона-Мора, поданого у вигляді:

$$\tau_r = (\sigma_n - u) \cdot \operatorname{tg} \phi + C, \quad (2.18)$$

де u – поровий тиск.

Метод зниження міцності за принципом розрахунку схожий з методом Р.Р. Чугаєва, відомий у гідротехнічних розрахунках. Прогноз руйнування здійснюється шляхом одночасного зниження обох показників зсувної міцності:

$$C_r = \frac{c}{k}, \quad (2.19)$$

$$\phi_r = \frac{\phi}{k}, \quad (2.20)$$

де k – коефіцієнт зниження міцності, відповідний коефіцієнту стійкості в момент руйнування.

Перевагою використання методу зниження міцності є його єдність з іншими можливостями чисельного моделювання, що дозволяє враховувати занурену частину укосів при розрахунку стійкості на слабких (стисливих) ґрунтах з урахуванням процесів консолідації основи і його зміцнення, а також виконувати розрахунок стійкості з урахуванням надлишкового порового тиску, що формує «відпір» в центральній частині укосів і сприяє зниженню їх стійкості.

2.4.2 Моделі фільтрації та міграції речовин у водонасичених породах.

Ці моделі будуються як чисельні або аналітичні розв'язки рівнянь геофільтрації та масоперенесення розчинних речовин у пористих і тріщинуватих породах. Загальною схемою моделювання є послідовне визначення поля швидкості фільтрації і, на цій основі, розрахунок концентрації речовин на основі моделі конвективної дифузії. Розглянемо базові диференціальні рівняння фільтрації та міграції, за якими виконується моделювання відповідних процесів в огорожувальних спорудах ГТС.

Рух води через ґрунти, якими складено огорожувальні споруди і які оточують ГТС різного призначення, за умов застосовності гідравлічної теорії фільтрації [114-117], може описуватися диференціальними рівняннями:

а) для безнапірного пласта

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(K m \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K m \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) + w + \sum_{i=1} Q_i = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (2.21)$$

б) для напірного пласта:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(K m \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K m \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) + \frac{K'}{m'} (H - H_d) + \sum_{i=1} Q_i = \eta m \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (2.22)$$

Тут: H – напір (рівень) підземних вод;

K – тензор коефіцієнта фільтрації, що враховує неоднорідність та анізотропію порід;

w – інфільтраційне живлення;

H_d – напір (рівень) підземних вод у нижньому водоносному горизонті;

K' та m' – коефіцієнт фільтрації та потужність відносного водотриву під водоносним горизонтом;

$\eta = (n\beta_f + (1 - n)\beta_s)\rho g$ – значення коефіцієнта пружності пласта, приведений до висоти водного стовпа;

n – пористість порід;

β_f та β_s – відповідно стисливості рідини у порах та скелету ґрунту;

ρ – густина рідини;

Q_i – додаткові потоки води від точкових, лінійних, або площинних джерел.

Всі члени рівнянь (2.21) та (2.22) мають вимірність об'ємної витрати.

Більшість фільтраційних течій всередині та навколо ГТС відбуваються поблизу денної поверхні, тому для них застосовні переважно рівняння безнапірного потоку (2.23). На межах області фільтрації ставляться умови першого, другого, або третього роду.

Умова першого роду відповідає довершеному контакту з водними

об'єктами, розміри яких порівняні з розмірами області фільтрації: річкою, великим ставком тощо. Рівень підземних вод у водоносному горизонті на такій межі вважається еквівалентним змінному у часі рівня води h_r у таких об'єктах.

Умова другого роду ставиться переважно на межах з додатковими джерелами (свердловини, техногенне інфільтраційне живлення з каналів, ставків накопичувачів, хвостосховищ). Витрата води, що надходить з лінійних (каналів, трубопроводів) та площинних джерел (басейнів, відстійників, хвостосховищ), розраховується відповідно за формулами:

$$\begin{aligned} Q_l &= q_l l_b, \\ Q_F &= q_F F_b, \end{aligned} \tag{2.23}$$

де: q_l, q_F – питома витрата з лінійного або площинного джерела;
 l_b, F_b – сумарні довжини лінійних та площинних джерел у межах блоку.

Окремим випадком умови другого роду є межа з нульовою витратою: вододіл, лінія течії, непроникна стінка в ґрунті.

Умова третього роду ставиться, як правило, на контакті підземних і поверхневих вод:

$$K \frac{\partial H}{\partial s} = \alpha(H - H_r) \text{ або } \frac{\partial H}{\partial s} = \Phi(H - H_r), \tag{2.24}$$

де: s – локальна координата, перпендикулярна межі області фільтрації;
 $\Phi = \alpha/K$ – коефіцієнт, що враховує проникність відкладів під річищем.

Міграція розчинених речовин у водонасичених ґрунтах може описуватися рівнянням конвективної дифузії [116, 118-120]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_x C \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_y C \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} - v_z C \right) + q = \\ = (1 - n) \frac{\partial N}{\partial t} + n \frac{\partial C}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Тут: v_x, v_y, v_z – компоненти швидкості фільтрації, м/добу;

D_x, D_y, D_z – коефіцієнти гідродинамічної дисперсії (конвективної дифузії), м²/добу;

C і n – масові концентрації речовини в рідкій і твердій фазах, кг/м³ (на одиницю об'єму розчину і гірської породи);

q – інтенсивність внутрішніх джерел речовини, кг/(м²·добу).

Протягом тривалих процесів міграції, характерних для довгострокової експлуатації ГТС, сорбція речовин стає більшою мірою оборотною і має рівноважний характер, що описується з достатньою точністю, особливо для малих концентрацій речовин у поровому розчині (до 10 г/л) лінійною ізотермою Генрі:

$$N = \bar{K}_d C, \quad \bar{K}_d = K_d \rho_{sk} (1 - n), \quad (2.26)$$

де: $\bar{K}_d$ – коефіцієнт розподілу, що залежить від речовини, властивостей порід, мінералізації порового розчину, присутності в ньому інших домішок тощо;

ρ_{sk} – щільність скелета ґрунту.

Кількість поглиненої речовини залежить також від швидкості фільтрації. У такому випадку рівняння (2.24) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_x C \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_y C \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} - v_z C \right) + q = n_e \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (2.27)$$

де $n_e = n + (1 - n)\bar{K}_d$ – коефіцієнт ефективної пористості, що враховує лінійну оборотну рівноважну сорбцію.

При деструкції речовини, наприклад, при радіоактивному розпаді, в ліву частину рівняння масоперенесення додається добуток $-n_e \lambda C$.

Для фільтраційного потоку, горизонтальні розміри якого на один-два порядки більші за його вертикальні розміри, можна усереднити концентрацію речовини за товщиною водоносного шару і замість (2.27) записати простіше двовимірне рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - v_x \bar{C} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} - v_y \bar{C} \right) + q - q_{v,1} - q_{v,2} = n_e \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}, \quad (2.28)$$

де: $\bar{C}$ – усереднена уздовж вертикалі концентрація речовини у поровому розчині;

m – потужність водоносного горизонту;

$q_{v,1}$, $q_{v,2}$ – масопотоки через його верхню і нижню межі – покрівлю та підшову.

На межах області міграції в підземних водах найбільш часто задаються такі умови [116, 118-120].

1. Змінна у часі концентрація на межі Γ області фільтрації:

$$C(x, y, z, t)|_{\Gamma} = C_{\Gamma}(x, y, z, t) \quad (2.29)$$

Дана умова справедлива у разі значних швидкостей фільтрації, коли на вхідній межі швидко утворюється зона з концентрацією C_{Γ} , або коли зміна у часі цієї концентрації відома. На вихідній межі ця умова відповідає миттєвому відведенню речовини шляхом виносу течією у водотоці або при значному розбавленню у водоймищі.

2. Умова Данквертса–Бреннера відповідає балансу речовини на межі, коли потік речовини з поверхневого водотоку (водоймища) дорівнює сумі конвективного і дифузійного потоків до водоносного горизонту:

$$-D \frac{\partial C}{\partial l} \Big|_{\Gamma} + v_l C = v_l C_{\Gamma} \text{ або } D \frac{\partial C}{\partial l} \Big|_{\Gamma} = v_l (C - C_{\Gamma}) \quad (2.30)$$

Тут: l – вектор нормалі до межі Γ ,
 v_l – швидкість уздовж напрямку l .

3. Умова

$$\frac{\partial C}{\partial l} \Big|_{\Gamma} = 0 \quad (2.31)$$

відповідає випадку витікання підземних вод через поверхню землі на ділянці височування, коли через порушення суцільності потоку речовина виноситься через межу шляхом конвекції. Умова (2.31) може прийматися також на досить віддалених межах і означати незмінність там концентрації речовини.

4. На межі поділу двох шарів ґрунту або ґрунту і хвостового матеріалу з різними властивостями задаються умови рівності концентрацій і масопотоків

$$C_1 = C_2, \quad n_1 \left(D_{x,1} \frac{\partial C_1}{\partial x} - v_{x,1} C_1 \right) = n_2 \left(D_{x,2} \frac{\partial C_2}{\partial x} - v_{x,2} C_2 \right), \quad (2.32)$$

аналогічно формулюється умова для компонентів потоку речовини уздовж осей Oy та Oz . Індексами «1» і «2» позначені параметри у двох різних породах (шарах).

Міграція речовин супроводжується процесами їхньої деструкції (розпаду) з утворенням дочірніх компонентів. Цей процес є характерним для хвостосховищ, що містять ізотопи ланцюгів розпаду радіонуклідів. Зменшення концентрації материнського ізотопу C_1 описується рівнянням:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -\lambda_1 C_1, \quad (2.33)$$

де: λ_1 – константа розпаду, діб^{-1} , $\lambda_1 = \ln 2/T_1$;

T_1 – період піврозпаду речовини.

Концентрація C_1 зменшується зі швидкістю, яка пропорційна поточній кількості речовини. Інтенсивність утворення дочірнього ізотопу описується рівнянням:

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = \lambda_1 C_1 - \lambda_2 C_2, \quad (2.34)$$

де λ_2 – константа розпаду дочірнього ізотопу речовини, яка визначається аналогічно λ_1 .

З часом концентрація дочірньої речовини може зростати, якщо швидкість її убування $\lambda_2 C_2$ менша за $\lambda_1 C_1$ – швидкість її утворення при розпаді материнської речовини. Відповідні доданки додаються до лівої частини рівнянь (2.33)–(2.34).

Під час міграції у водонасичених породах відбуваються фізико-хімічні перетворення. Зокрема, розчинення і кристалізація описуються рівнянням:

$$\partial N / \partial t = \gamma (C - C_{max}) N^\beta, \quad (2.25)$$

де: C_{max} – концентрація, що відповідає максимально можливій розчинності речовини;

α, β, γ – емпіричні параметри.

З рівняння (2.35) випливає, що при перевищенні концентрацією речовини в розчині граничного значення C_{max} починається кристалізація та випадіння осаду ($\partial N / \partial t > 0$) і концентрація речовини у твердій фазі збільшується. Якщо ж концентрація речовини в розчині C менша за C_{max} ($\partial N / \partial t < 0$), то відбувається розчинення кристалів і концентрація речовини у твердій фазі зменшується.

Для розрахунку фільтрації та водної міграції у ґрунтах використовують чисельні та аналітичні методи. Серед чисельних методів у підземній гідродинаміці найбільше поширення отримали методи скінченних різниць (МСР) та кінцевих елементів (МКЕ). Принципи побудови моделей на основі МКЕ в задачах фільтрації та міграції подібні до тих, які застосовуються для задач

напружено-деформованого стану (розділ 2.4.1). Для геофільтрації та міграції речовин і тепла вони детально описані у [120]. На відміну від нерівномірної, як правило, трикутної сітки в МКЕ, при побудові моделей за допомогою МСР використовується прямокутна сітка, що спрощує алгоритм розрахунку [73]. Аналітичні методи (джерел та стоків, інтегральних перетворень, розділення змінних тощо) використовують розв'язки рівнянь фільтрації та масоперенесення, або їх комбінації, які можуть бути записані як певні формули або в інтегральному вигляді (в квадратурах) [115-118].

Вибір конкретного методу розрахунку визначається умовами ділянки розташування ГТС: ступенем однорідності ґрунтового масиву, обсягом даних, що описують властивості порід, мінливістю мезових умов у часі й просторі, формою області. Загальним підходом є використання чисельних методів (МКЕ та МСР). Але завдяки фільтраційній та геоміграційній схематизації, принципи якої проаналізовано в [117, 118], стає можливим застосування аналітичних методів, які вільні від похибок апроксимації на сітці, є менш витратними при створенні моделей, оскільки не потребують, як правило, спеціального програмного забезпечення.

Чисельні методи дозволяють визначати рівень підземних і концентрації речовин вод лише в центрах блоків, а швидкість фільтрації та масопотоки – на межах блоків, тоді як аналітичні методи дозволяють виконати розрахунок цих величин у будь-якій точці області. Аналітичні методи доцільно застосовувати у відносно простих гідрогеологічних умовах, попередньої оцінки недостатньо вивчених об'єктів та калібрування чисельних моделей.

Чисельні методи, на відміну від аналітичних, мають похибку, пов'язану з апроксимацією диференціальних рівнянь фільтрації на сітці. Однак вони дозволяють моделювати геофільтрацію і міграцію речовин в областях складної форми й структури, що є доцільним за умов достатньої вивченості області, її багат шарової структури і суттєвої просторової неоднорідності.

2.5 Висновки до Розділу 2

1. Аналіз нормативних документів України дозволив встановити найбільш економічний комплекс геофізичних методів для визначення зон обводнення і фільтрації в огорожувальних дамбах гірничопромислових і цивільних ГТС. Цей комплекс складається з електророзвідувальних методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі і вертикального електричного зондування, додатково для хвостосховищ радіоактивних відходів застосовувалися радіометричні методи. Комбінація методів ПЕМПЗ та ВЕЗ використовувалася для виділення ділянок підвищеного обводнення порід і прихованих зон фільтрації крізь тіло дамби, встановлення глибини залягання рівня ґрунтових вод та виділених зон обводнення та фільтрації. Для визначення зон фільтрації радіоактивних розчинів застосовувалися радіометричні методи.

2. Достовірність виділених за геофізичними даними зон обводнення і фільтрації, а також рівень залягання ґрунтових вод завірялись бурінням свердловин з відбором зразків для лабораторних досліджень складу, вологості та міцносних властивостей порід.

3. Найбільш доцільним та широко використовуваним на практиці для розрахунків стійкості гребель хвостосховищ та інших гідротехнічних споруд на основі рівнянь механіки ґрунтів є метод кінцевих елементів (МКЕ). Створена на цій основі математична модель адекватно відтворює поведінку пружного та жорстко-пластичного середовища з внутрішнім тертям при поєднанні теорії пружності та теорії граничного стану. Використаний у даній роботі метод зниження параметрів міцності дозволяє враховувати занурену частину укосів при розрахунку стійкості на слабких (стисливих) ґрунтах, консолідацію основи, її зміцнення, а також надлишковий поровий тиск, що формує «відпір» в центральній частині укосів і знижує їх стійкість.

4. Для розрахунку фільтрації та водної міграції речовин у ґрунтах при експлуатації хвостосховищ та інших гідротехнічних споруд використовують чисельні та аналітичні методи. Серед чисельних методів найбільше поширення

набули методи скінченних різниць (МСР) та кінцевих елементів (МКЕ), які дозволяють краще апроксимувати неоднорідні області нерегулярної форми. Перевагою аналітичних методів (джерел та стоків, інтегральних перетворень тощо) є простіші способи розрахунку фільтрації та міграції (елементарні чи спеціальні функції або інтеграли від них), які вільні від похибок апроксимації на сітці, не потребують спеціального програмного забезпечення. Точність результатів на їх основі часто є достатньою, зважаючи на, як правило, недостатньо детальну геолого-гідрогеологічну параметризацію та базу даних моніторингу при нерегулярних дослідженнях.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ГІРНИЧОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

У 2013 році опубліковано аналітичний документ «Водна безпека та Глобальний порядок денний у сфері водних ресурсів», якій підготувала Робоча група ООН «Вода з питань водної безпеки», в якому надається таке визначення Водна безпека – це «...здатність населення забезпечувати сталий доступ до достатньої кількості води прийнятної якості для підтримки засобів до існування, добробуту людини та соціально-економічного розвитку, для забезпечення захисту від забруднення, що передається водою, та стихійних лих, пов'язаних з водою, а також для збереження екосистем в умовах миру та політичної стабільності»¹. В цьому визначенні неабияка роль відведена захисту від забруднення не тільки водних ресурсів, але й територій, а також запобіганню проявам небезпечних ситуацій, пов'язаних з водою та рідинами на її основі.

Аварії на хвостосховищах можуть завдати багатомільйонних збитків, та витрати на подолання наслідків аварій практично завжди перевищують витрати на забезпечення належного рівня безпеки об'єктів та розроблення заходів з попередження і реагування на НС [121].

Накопичення значних обсягів промислових відходів у спеціалізованих спорудах, а також їхня токсичність і вибухонебезпечність є внутрішніми чинниками загрози. У поєднанні із зовнішніми факторами ці обставини створюють передумови для виникнення надзвичайних ситуацій.

¹ URL: <https://sdg.iisd.org/news/un-water-brief-defines-water-security/> (дата звернення 4.12.2025).

3.1 Техногенна безпека неактивного (недіючого) хвостосховища радіоактивних відходів «Дніпровське»

Одним з техногенно-напружених міст в Дніпропетровській області є м. Кам'янське, на території якого розташований потужний промисловий комплекс, що суттєво впливає не тільки на екологічний стан міста, а й на екологічну ситуацію в області та країні в цілому. Техногенні геохімічні перетворення атмосфери, забруднення повітря та води, радіаційна спадщина – одні з найактуальніших проблем для міста. На відносно невеликій території знаходиться більше 50-ти промислових підприємств різних галузей промисловості: металургійної, хімічної, коксохімічної, машинобудівної, енергетичної та інших, деякі з них розташовані в центральній частині міста [122].

Одним з факторів забруднення території міста є велика кількість небезпечних відходів. Це залишки уранового виробництва від діяльності Виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» (ВО «ПХЗ»), залишки виробничої діяльності цехів переробки аміаку ПАТ «ДніпроАзот» та інші [122, 123].

Спадщина уранового виробництва ВО «ПХЗ» періоду 1948-1991 років – зокрема хвостосховища та виробничі потужності – виступає тривалим чинником негативного впливу на навколишнє середовище. Наявний рівень опромінення персоналу та цивільного населення створює суттєві ризики для їхнього здоров'я, зумовлюючи стійке погіршення екологічної ситуації на прилеглих територіях.

З метою екологічної стабілізації уранових об'єктів колишнього ВО «ПХЗ», проведення відновлювально-рекультивацийних робіт на забруднених радіацією територіях, а також менеджменту відходів переробки уранових руд наказом Мінпаливенерго України від 13.12.2000 р. створено Державне підприємство «Бар'єр» (ДП «Бар'єр»). Для запобігання виникненню надзвичайної ситуації на території України внаслідок погіршення екологічного стану на території колишнього ВО «ПХЗ», проведення постійного моніторингу за радіаційним станом об'єктів з переробки уранових і торієвих руд цього виробничого об'єднання, які сьогодні перебувають на балансі ДП «Бар'єр», здійснення

технічного нагляду та першочергових заходів щодо приведення їх у безпечний стан [122]. З огляду на важливість забезпечення безпечного стану об'єктів, були проведені інструментальні дослідження технічного стану дамб на хвостосховищах «Дніпровське» та Сухачівське [105, 124, 125, 126, 123, 127].

3.1.1 Загальні відомості про хвостосховище «Дніпровське».

Хвостосховище «Дніпровське» розташоване у заплавної частині правого берега Середньодніпровського водосховища, на відстані близько 1 км від лінії урізу води. Гідрографічна мережа в цьому районі представлена р. Коноплянка, яка огинає його з південного та західного боків і є правою притокою Дніпра.

З півночі до хвостосховища примикають відстійники Дніпровського (раніше Дніпродзержинського) коксохімічного заводу (ДКХЗ), зі сходу – відстійник металургійного комбінату «Камет-Сталь» (раніше Дніпродзержинський металургійний комбінат – ДМКД) і шламові відвали ДКХЗ.

Хвостосховище побудоване на правій заболоченій заплавної терасі р. Дніпро у міжріччі Дніпро – Коноплянка, яка мала висотну відмітку 51-53 м (рис.3.1). За будовою хвостосховище класифікується як рівнинно-наливного типу та споруджено шляхом утворення котловану до відмітки 48 м та насипом замкнутого контуру захисних дамб. Протяжність периметру цих дамб – 3,99 км, площа чаші хвостосховища – 0,73 км². Захисна дамба зведена на алювіальних пісках і суглинках і в період експлуатації хвостосховища нарощувалась, змінюючись в поперечному перетині.

Накопичення відходів переробки уранової руди в хвостосховище проводилось способом гідронамиву з 1954 по 1968 рр.. В результаті там на сьогодні заскладовано близько 12 млн т (5,8 млн м³) відходів переробки уранової сировини. Поверхня хвостів переробки уранових руд покрита шаром фосфогіпсу завтовшки від 0,5 до 13,5 метра згідно з техноробочим проєктом № 76-Т-3110, розробленим ОргбудНВІпроект у 1976 р. для запобігання надходженню в атмосферне повітря радіоактивних речовин при вітровому рознесенні пилу

(рис. 3.2). Відсипання фосфогіпсу припинене в 1989р.; північно-західна частина території хвостосховища засипана вуглистими шлаками та відходами металургійного комбінату без проєкту [124]. У даний час східна і північно-східна ділянка захисної дамби хвостосховища протяжністю до 1600 м засипана шаром відходів коксохімічного виробництва потужністю 7-22 м.



Рисунок 3.1 – Фрагмент топографічної карти Німецького генерального штабу, датованої 1942 р., з контуром хвостосховища «Дніпровське» і контуром сучасної берегової лінії р. Дніпро



Рисунок 3.2 – Аерофотознімок хвостосховища «Дніпровське», 1977 рік

За даними [128], північно-східна ділянка дамби має двох'ярусний профіль. В даний час східна і північно-східна ділянки загальною протяжністю близько 1600 м похована під відвалом шлаку ДКХЗ. Абсолютні відмітки гребеня змінюються в межах 63,5-64,0 м, берми – 61,1 - 61,3 м. Ширина дамб по гребеню досягає 10 м; за бермою – 30 м. По гребеню проходить бетонна дорога (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Сучасний стан хвостосховища «Дніпровське» за даними інтернет-порталу Google Earth

Західна ділянка дамби – двох'ярусного профілю, з абсолютними відмітками гребеню 62,27-64,42 м. Ширина гребеня змінюється від 9 до 18 м. Абсолютні відмітки поверхні берми – 60,15-61,3 м, її ширина варіює від 18 до 30 м. По бермі прокладена залізниця, по гребеню дамби – забетоноване полотно автошляху.

Південна ділянка дамби характеризується двох і тріярусним профілем. Абсолютні відмітки гребеня змінюються від 60,15 до 62,8 м, берм – від 54,6 до 59,4 м. Ширина гребеня 4-10 м, берм – від 3 до 10 м. По бермі дамби була прокладена вітка залізниці, яка зараз розібрана, рейки та шпали вилучені, але гранітно-щебеновий баласт залишився.

Статус хвостосховища як об'єкту підвищеної небезпеки спонукав до різноманітних досліджень з усіх боків його існування, починаючи з моменту експлуатації до теперішнього стану зберігання відходів. Було проведені численні науково-практичні роботи, які мали за мету підвищення технічної та екологічної безпеки, але в зв'язку з ліквідацією ВО «ПХЗ» та створенню на його базі ДП «Бар'єр» багато матеріалів, в тому числі й конструкторська та виробнича документація по цьому об'єкту було втрачено. Тому на початку 2000-х років відновилися дослідження стану хвостосховища «Дніпровське», в яких брали участь багато як наукових, так й комерційних організацій. Головною організацією, що

керувала роботами по хвостосховищу, був Український науково-дослідний та проєктно-вишукувальний інститут промислової технології ДП «УкрНДПВІпромтехнології» (м. Жовті Води). В 2012 році у Заключному звіті [129] наведено огляд вихідних даних щодо стану хвостосховища та оточуючої території. Окрему цінність в цьому звіті представляє перелік посилань, в якому наведено майже усі роботи, що здійснювалися на об'єкті починаючи з 2000 року. В роботі [129] показано, що існує досить велика кількість інформації, котра отримана як зі свердловин, пробурених в межах хвостосховища, на огорожувальних дамбах і на оточуючій території, так й в результаті опробування ґрунтів, повітря та підземних вод, а також моделювання процесів забруднення компонентів довкілля радіонуклідами та іншими речовинами. Але ця інформація розосереджена по різних джерелах з різними ступенем доступності, дещо дублює одне одну та потребує комплексного узагальнення та аналізу.

Дослідженням технічного стану огорожуючих дамб на хвостосховищі «Дніпровське» приділяється підвищена увага у зв'язку з тривалим терміном існування небезпечного об'єкту. Так, у 2000 році ДП «УкрНДПВІпромтехнології» розроблено програму першочергових робіт з ліквідації відкритих радіоактивних виходів на хвостосховищі «Дніпровське» [130], згідно якої планувалося проведення інженерно-геологічних досліджень, інженерно-геофізичних досліджень в складі методів природного поля, вертикального електричного зондування та оцінки сейсмічного впливу вибухів для виявлення ділянок фільтрації рідини з хвостосховища та створення мережі спостережних свердловин. Результати реалізації цієї програми автору не відомі.

У тому ж 2000 році в рамках проєкту «Невідкладні роботи на захисних спорудах...» було розроблено технічні рішення щодо створення мережі спостережних свердловин на хвостосховищі «Дніпровське» [131]. Передбачалося буріння 11 свердловин по гребеню дамби та 70 свердловин в чаші хвостосховища та за його межами. Частково ці заходи реалізовані.

У 2001 р. у Робочому проєкті з укріплення дамби на хвостосховищі «Дніпровське» відмічалось, що Пн-Сх частина дамби за інженерно-геологічною

будовою найбільш несприятлива, виявлені лінзи недоущільнених ґрунтів, розвиваються процеси суфозії, просідання, промоїни [132]. Запропоновано провести накидку кам'яного матеріалу на відкоси дамби. Ці роботи виконані.

У 2009 р. було облаштовано 10 додаткових спостережних свердловин в тілі захисних дамб, а також були встановлені деформаційні марки (поверхневі марки – ПМ) в кількості 30 одиниць для спостереження за вертикальними та горизонтальними зміщеннями в дамбі [132].

У 2011 р. ДП «УкрНДПВІпромтехнології» проведено інструментальний контроль за станом захисних споруд хвостосховища «Дніпровське». Об'єктами контролю були спостережні гідрогеологічні свердловини та ґрунтові геодезичні знаки (ПМ), встановлені в Пд, Зх та Пн-Зх ділянках огорожувальної дамби [132]. В результаті було отримано вихідну інформацію щодо параметрів контрольно-вимірювальної апаратури для подальших спостережень.

У 2016 р. ПВКП «Технотранспроєкт» в рамках проєкту «Інструментальний контроль стану захисних споруд хвостосховища «Дніпровське»» [133] виконала інженерно-геодезичні вишукування на території хвостосховища для інженерного аналізу та розрахунків. В результаті було складено топографічний план хвостосховища «Дніпровське» масштабу 1:1000, який на сьогодні є максимально точною топоосновою для проведення подальших робіт. ТОВ «УТБ-2» провела інструментальний контроль стану захисних споруд. За результатами встановлено, що дамба знаходиться у стабільному стані, рівень коливання води у спостережних свердловинах незначний, а ділянок обводнення дамби не виявлено [133]. В якості рекомендацій було відмічена необхідність виконати розрахунок стійкості дамби.

3.1.2 Моніторинг технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське».

Дослідження технічного стану огорожувальної дамби геолого-геофізичними методами на хвостосховищі «Дніпровське» проводилося в 2016, 2022, 2023 роках. В комплекс геолого-геофізичних методів в різні роки входили методи ПЕМПЗ, ВЕЗ, радіаційна зйомка, буріння свердловин з відбором зразків

для лабораторних вимірювань міцносних властивостей ґрунтів, що складають дамбу [102, 104, 105, 106, 113, 124, 125, 127, 134 – 137].

В 2016 році для оцінки технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища застосовувались методи ПЕМПЗ, радіометрична зйомка, буріння свердловин та відбір зразків для лабораторних досліджень.

Експериментальні польові дослідження методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) реалізовано у 2 етапи. На початковому етапі здійснювався моніторинг східного крила дамби. Через складну криволінійну геометрію цієї споруди, її територію було диференційовано на 5 лінійних ділянок. Геофізичні вимірювання на кожній із них виконували автономно з подальшою просторовою інтерполяцією та стикуванням отриманих карт. Зйомку на ділянках проведено за профільно-площинною схемою з кроком спостереження 5×5 м. Кінцеві точки профілів фіксувались GPS. Західне крило дамби було обстежено методом ПЕМПЗ за такою ж методикою. Відстань між профілями спостережень становила 5 м, між точками – 5 м. Всього прокладено 4 профілі по гребеню дамби. Схема розташування спостережних точок ПЕМПЗ огорожувальної дамби хвостосховища приведено в Додатку Б.1.

За отриманими результатами зйомки у середовищі «Surfer-8» було побудовано карти-схеми просторового розподілу щільності потоку сигналів магнітної складової ПЕМПЗ по трьом антенам, дві з яких орієнтовані горизонтально за напрямками «північ-південь» і «захід-схід», третя – вертикально вниз. Таким чином досягалося всебічне охоплення векторів електромагнітного поля (Додатки Б.2, Б.3).

В основу інтерпретації результатів зйомки покладена наведена вище особливість ПЕМПЗ: це поле генерується кристалічними і щільними осадовими гірськими породами і, на відміну від постійного магнітного поля Землі, кількість імпульсів істотно залежить від обводненості гірських порід, для яких характерні мінімальні значення ПЕМПЗ та «розмитий» слабо аномальний рисунок поля.

Результати аналізу карт ПЕМПЗ вказують на неоднорідність геофізичного поля. Зокрема, на картах східного крила, за вертикальною антеною, фіксується

розмита слабоаномальна структура поля, що свідчить про трансформацію магнітних властивостей гірських порід, зумовлену процесами їхнього обводнення. Такий характер поля притаманний ділянкам і з пониженими, і з підвищеними значеннями щільності потоку (Додатки Б.2, Б.3).

Понижені значення відмічаються в кінці першої ділянки – з координатами по осі Х 61410-61470 (Зона 1), а також на 2,3 і 4 ділянках від позначки по осі Х 60810 до 61090 (Зона 2). Знижені значення зафіксовані по всьому гребеню дамби за винятком нижньої частини укосу на 3 ділянці і займають більшу частину гребеня на 2 і 4 ділянках.

Порівняння отриманих результатів з даними, знятими з п'єзометрів, вказує на те, що смуга знижених значень щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ відповідає ділянкам з найвищим рівнем стояння ґрунтових вод (рис. 3.4).

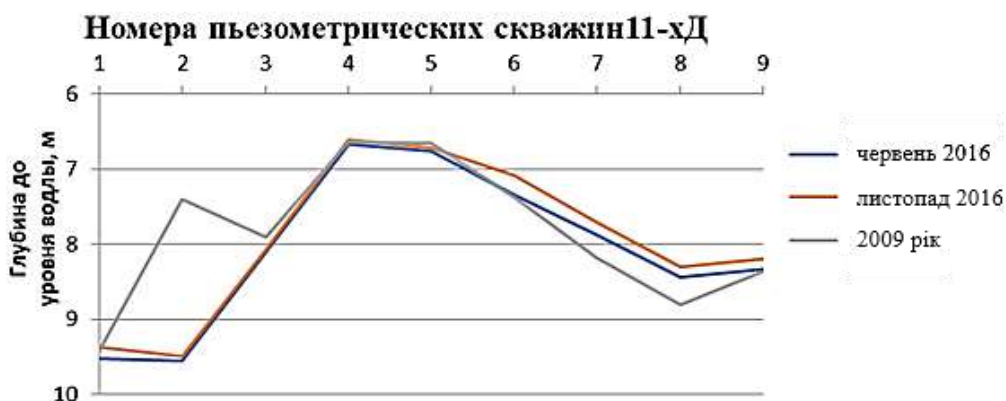


Рисунок 3.4 – Рівні води в п'єзометричних свердловинах (за даними ДП «Бар'єр»)

Таким чином, на східному крилі дамби виділяється зона підвищеного обводнення і високого стояння ґрунтових вод протяжністю 280 м (Додаток Б.2).

На західному крилі структура рисунку поля щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ істотно відрізняється від аналогічного для східного крила дамби. Тут спостерігається висока порізаність аномалій, за винятком двох ділянок з координатами по осі Х 60580-60660 і 60450-60470 (Додаток Б.3), проте вони мають високі значення поля. Знижені аномалії відмічаються на інтервалах по осі

Х 60140 – 60180 (Зона 4) і 60295 – 60315 (Зона 3), де можливе часткове обводнення ґрунтів дамби. Загалом для поля щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ характерні високі значення, рівень навіть знижених значень істотно вище за аналогічні на східному крилі дамби. Ймовірно, це пов'язано з техногенним об'єктом – ЛЕП, яка проходить поряд із дамбою.

Дані за п'єзометрами 2 і 3 (рис. 3.4) показують досить низький рівень стояння ґрунтових вод 7,41 м і 7,91 м, і за результатами геофізичної зйомки тут можуть знаходитися локальні зони обводнення невеликої протяжності.

Радіометрична гамма-зйомка проводилась по профілях на зовнішньому та внутрішньому борту дамби (рис 3.5) за допомогою радіометра «СТРИЖ». Дозиметр-радіометр «СТРИЖ» призначений для вимірювання активності гамма і бета випромінюючих радіонуклідів спектрометричним методом для пошуку локальних забруднень [136, 137]. Відстань між точками зйомки становила 10-12 метрів. Схема розташування точок спостережень приведена у Додатках Б.4, Б.5.



Рисунок 3.5 – Схема розміщення точок спостережень гамма зйомки. Червоним відмічені ділянки спостережень [136, 137]

За результатами зйомки з використанням програми «Surfer-8» побудовано карти-схеми радіаційного фону. Комплексна інтерпретація даних ПЕМПЗ та гамма зйомки дозволила встановити ділянки обводнення і фільтрації на огорожувальній дамбі хвостосховища (рис. 3.6-3.7).

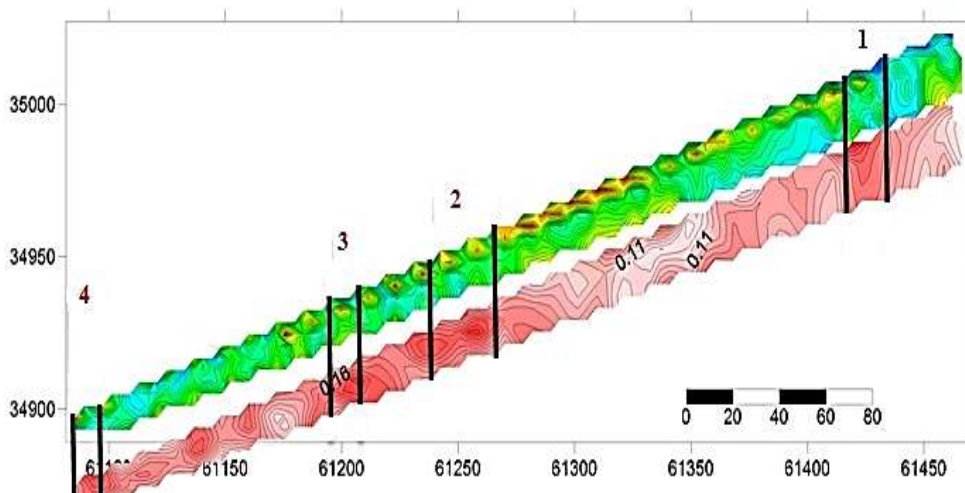


Рисунок 3.6 – Приклад комплексної інтерпретації карт-схем щільності потоку ПЕМПЗ та радіаційного фону по Південному крилу дамби хвостосховища. Умовні позначення: чорними лініями з нумерацією позначено зони найбільшої активності радіаційного фону та зони зниженої щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ [136, 137]

Таким чином, дослідження комплексом геофізичних методів технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» показало, що західна частина дамби знаходиться в задовільному стані, а східне – в незадовільному [136, 137]. Для уточнення отриманих даних по східному крилу та для вивчення фізико-механічних властивостей породного матеріалу в тілі огорожувальної дамби виконано буріння розвідувальних свердловин № 5, 8, 11 і 15 (розвідувальні профілі I-I, II-II, III-III, IV-IV) і зроблено інженерно-геологічне випробування з відбором 25 зразків непорушеної структури і подальшим визначенням основних фізико-механічних характеристик ґрунтів, що складають дамбу, в лабораторних умовах (рис.3.7, Додаток Б.6).

Згідно з даними опробування, матеріал, що складає огорожувальну дамбу, представлений переважно однією номенклатурою ґрунту – супісками важкими, жовтуватобурими і палево-бурими, з включеннями піщанистого і суглинного матеріалу, неоднорідної структури, маловологими у верхній частині дамби і водонасиченими в її нижній частині, часто з включеннями гумусованого матеріалу. У зразках, відібраних з основи дамби, в деяких випадках був присутній вуглистий матеріал. Дані лабораторних досліджень ґрунтів використані для оцінки геомеханічної стійкості огорожувальної дамби (розділ 5).

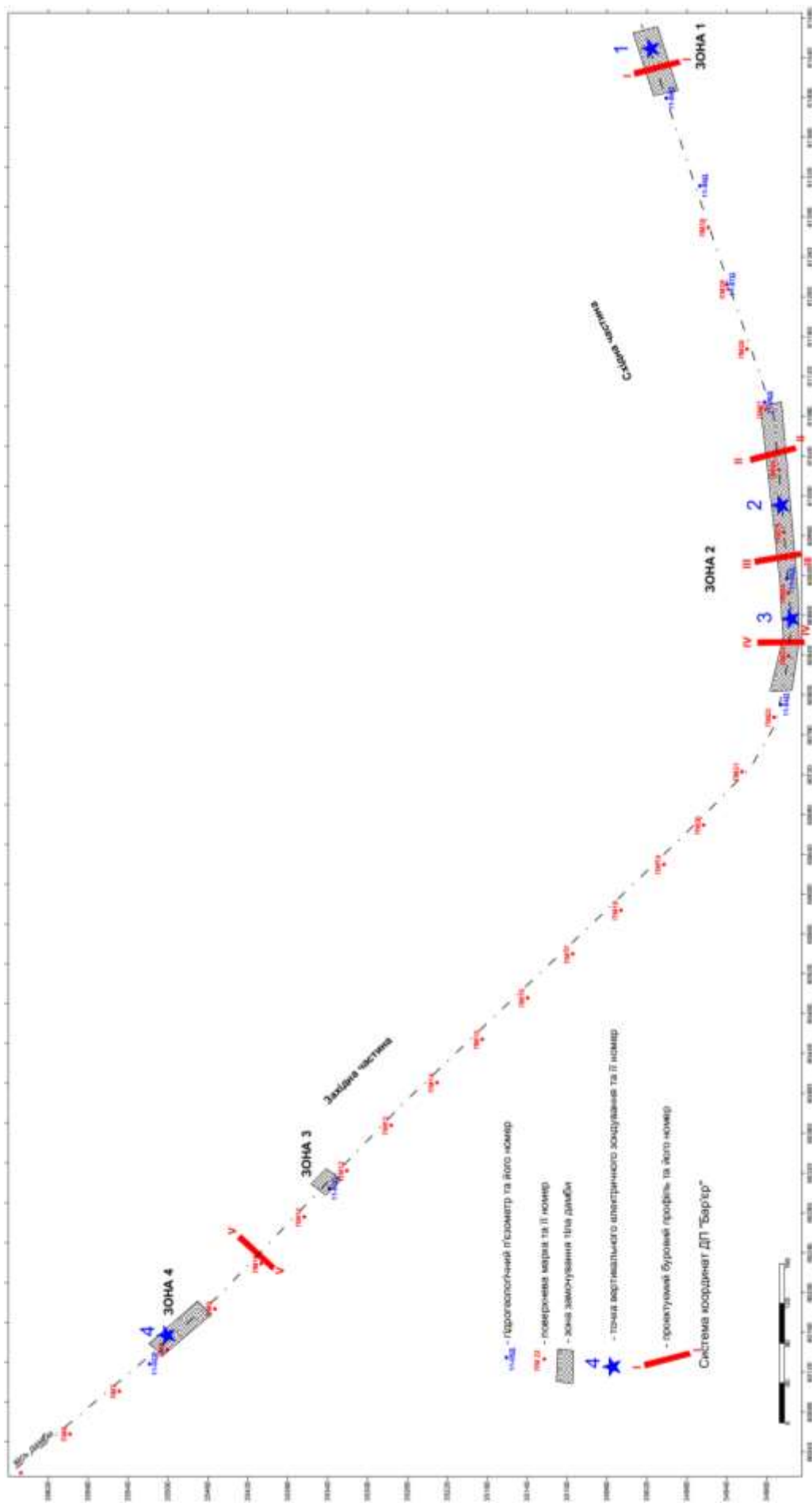


Рисунок 3.7 – Карта-схема інтерпретації геофізичних даних по дамбі хвостосховища «Дніпровське» [136, 137]

На відміну від моніторингу виконаного в 2016 році, у 2022 році дослідження проводились методами ПЕМПЗ, ВЕЗ вимірюванням радіаційного фону в межах земельного відводу на всій огорожувальній дамбі хвостосховища. Вертикальні електричні зондування застосовувались в точковому варіанті для визначення рівня ґрунтових вод на ділянках, встановлених методом ПЕМПЗ, як зони обводнення і підвищеної фільтрації [102, 104, 105, 106, 113, 124, 134, 135-138].

На початковому етапі комплекс геофізичних вишукувань на гребені огорожувальних дамб включав електророзвідку методами природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) за координатною мережею 3×3 м та вертикального електричного зондування (ВЕЗ). Інтеграція цих підходів дозволила локалізувати у просторі зони зниження щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ, здійснити їхню геологічну інтерпретацію, а також за даними ВЕЗ визначити глибину залягання рівня ґрунтових вод у тілі дамби (Додатки Б.7-Б.9).

Паралельно з ПЕМПЗ проводилося вимірювання потужності експозиційної дози гамма випромінювання за тією ж мережею 3×3 метри для визначення зон фільтрації розчинів, що містять підвищений вміст радіонуклідів (Додаток Б.7).

На другому етапі проводились інженерно-геологічні дослідження в складі буріння інженерно-геологічних свердловин, відбору зразків порід з кожного інженерно-геологічного елементу, лабораторних досліджень фізико-механічних, гідрогеологічних та інших властивостей порід.

На основі отриманих даних для всіх ділянок побудовано карти просторового розподілу щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ за кожною антеною. Відповідно до визначених принципів інтерпретації, було оконтурено аномальні зони, які ідентифікуються як ділянки локального розушільнення та обводнення ґрунтового масиву дамби. Загалом верифіковано 33 такі зони, їх розміщення зображено на рис.3.8.

Після встановлення аномальних зон методом ПЕМПЗ у найбільш характерних точках проведені дослідження ВЕЗ.

Розташування точок показане у Додатку Б.9. Приклад інтерпретації кривих ВЕЗ в точці 4 за наведено на рис. 3.9.

Точка вертикального електричного зондування 4 розташована на ділянці обводнення 6 (рис. 3.8), має розріз, який складається з трьох шарів, другий шар, представлений обводненими глинами або суглинками потужністю 0,858 м, тобто зона обводнення встановлена методом ПЕМПЗ підтверджується.

Для оцінки радіаційного стану дамб побудована карта розподілу ПЕД гамма-випромінювання по верхній частині замкнутого контуру дамб, які огорожують хвостосховище «Дніпровське» (рис. 3.10). На рисунку всі значення було розбито на 5 груп з інтервалами 0-30 мкР/год., 31-50 мкР/год., 51-100 мкР/год., 101-200 мкР/год. та понад 201 мкР/год. Ця карта дає уявлення про розповсюдження радіоактивних матеріалів по гребеню дамби.



Рисунок 3.10 – Карта потужності експозиційної дози гамма-випромінювання на дамбах хвостосховища "Дніпровське", накладена на супутниковий знімок [105, 124]

Комплексна інтерпретація даних трьох методів дозволила встановити певні закономірності в розташуванні аномальних зон по дамбі хвостосховища «Дніпровське». Аналіз просторової структури поля дозволив виділити два головні осередки концентрації аномалій: у південній частині греблі біля річки Коноплянка та на північно-східній ділянці поблизу промислових відстійників. Окремі дрібні аномальні зони встановлено на південному заході споруди. Особливу увагу привертає фокус геодинамічних аномалій на перегині південного сегмента греблі, наявність якого узгоджується з результатами оцінки технічного стану об'єкта, проведеної у 2016 році.

На рис. 3.11 наведено порівняння положення початково виділених та сучасних аномальних зон. Відмічається, що майже усі вони співпадають, але є незначні відмінності, пов'язані, насамперед, з різною мережею спостережень (у 2016 році вона становила 5×5 метрів). Таке ототожнення дозволяє констатувати, що зони виділені надійно та є об'єктивними. Це виключає можливість хибного виділення та вказує на наявність проблем з насиченням водою тіла греблі, яке за 6 років тільки посилюється.

Аналіз світового досвіду експлуатації великих гребель на річках та огорожувальних дамб на хвостосховищах свідчить, проте те, що саме ділянки вигину греблі в напрямку, протилежному хвостосховищу, як і зчленування ділянок греблі, є найнебезпечнішими з точки зору розвитку аварійних ситуацій.

В північній ділянці греблі аналогічно виявлені зони водонасичення, але їх походження, інше. Як зображено на рис. 3.12, північна частина дамба похована під значною товщею відходів металургійного комбінату і межує з відстійниками, які заглиблені до відміток 50-52 м. Відстійники, на відміну від хвостосховища, є діючими та експлуатуються, тому відмічається гідродинамічний перетік рідини як з відстійників до хвостосховища через греблю, так і навпаки, з хвостосховища до відстійників. У відстійниках радіоактивного забруднення не відмічено, але гребля у нижній частині значно обводнена. Ця обставина не впливає на її геомеханічну стійкість, в зв'язку з тим, що вона з усіх боків затиснута радіоактивними відходами і металургійним шламом.

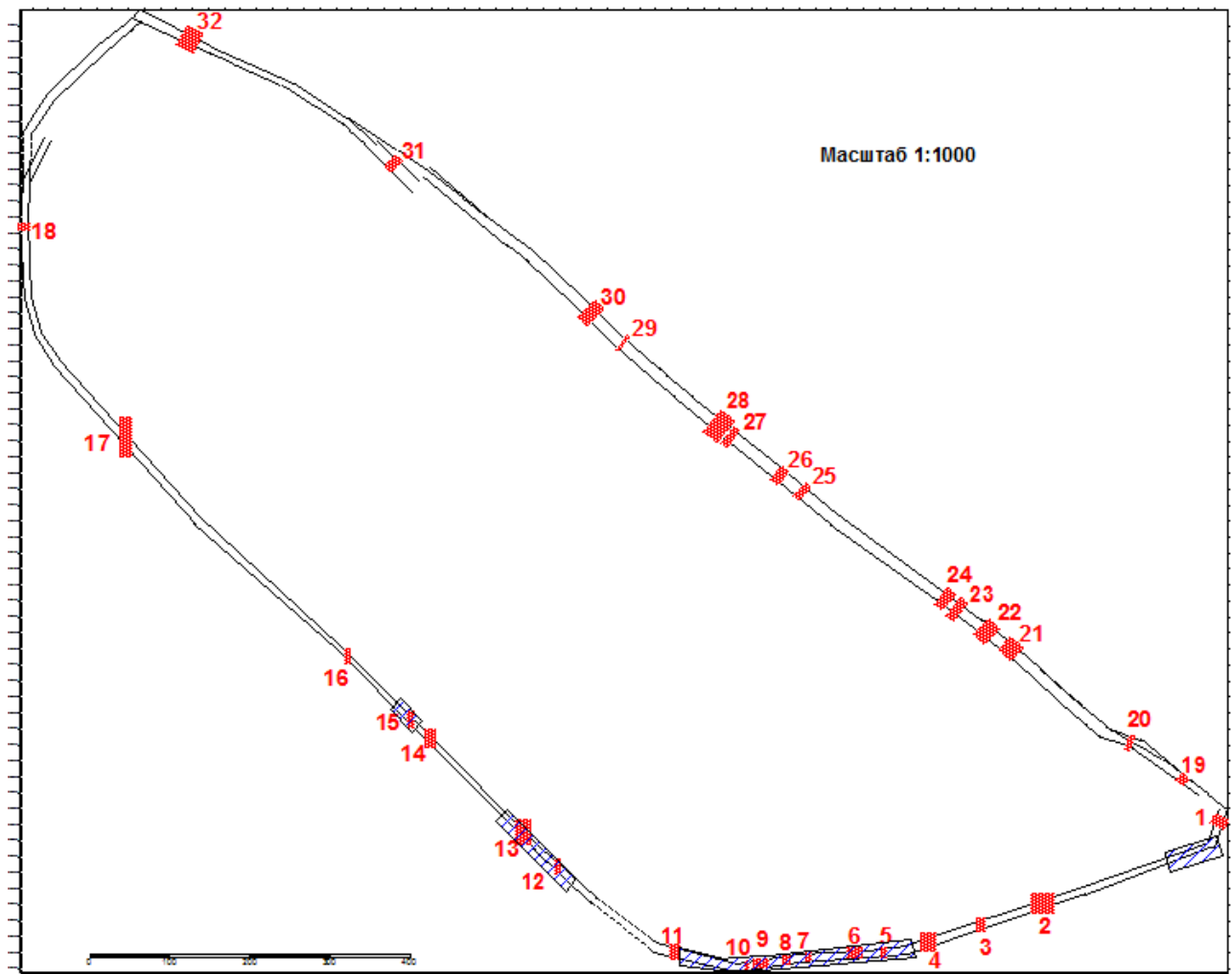


Рисунок 3.11 – Порівняльна схема розташування ділянок обводнення та фільтрації у греблі за результатами робіт 2022 року (червоне) та 2016 року (синє)

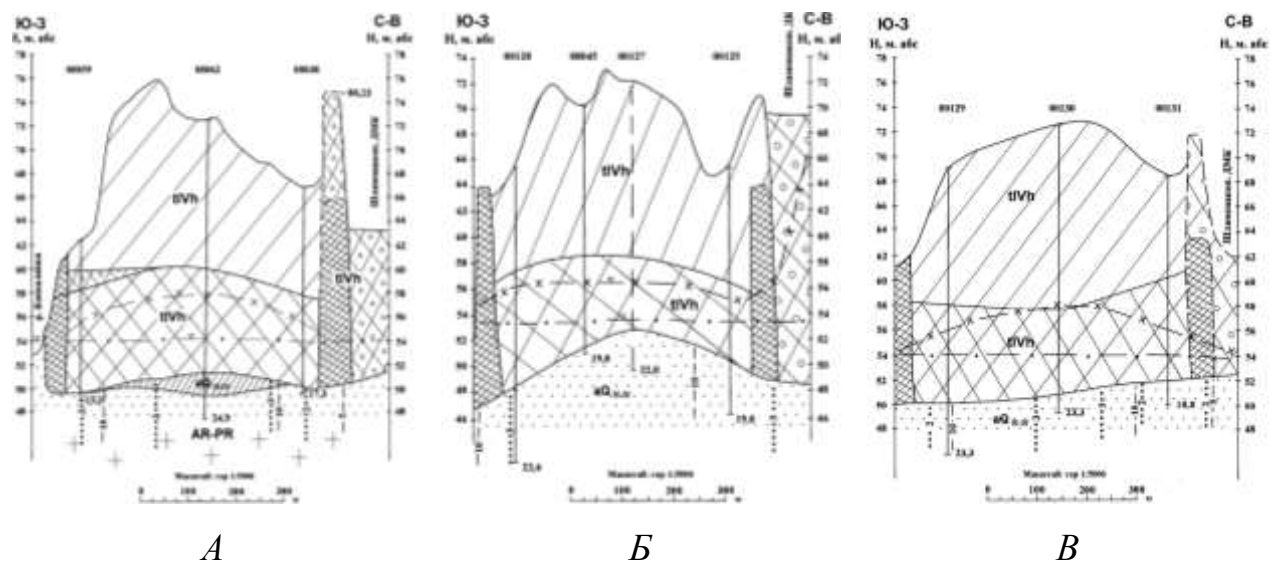


Рисунок 3.12 – Геологічні розрізи про профілях III-III (А), IV-IV (Б), V-V (В) за даними [105, 113, 124]

На південно-західній ділянці аналогічно відмічаються кілька зон розущільнення, але говорити про фільтрацію розчинів з боку хвостосховища немає підстав.

В результаті геофізичних робіт виділені ділянки, на яких було виконано інженерно-геологічне буріння (рис. 3.13). Бурові профілі розташовані таким чином, щоб з'ясувати природу та будову найбільш небезпечних аномальних зон (профілі I-III) а також для оцінки геомеханічної стійкості південно-західної ділянки греблі (профілі IV-VII).



Рисунок 3.13 – Схема розташування бурових профілів (зелені лінії) на дамбі хвостосховища «Дніпровське [102, 113]

На ділянці були пробурені 16 свердловин, глибиною 2,0-14,5 м. Зі свердловин були відібрані проби ґрунту порушеного та не порушеного складу для лабораторного визначення показників їх фізико-механічних властивостей.

Лабораторні дослідження ґрунтів проводились в акредитованій геотехнічній

лабораторії, яка відповідає вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 [139] та має відповідне свідоцтво. У складі лабораторних досліджень виконані компресійні дослідження, визначення вологості, пластичності, щільності ґрунтів, гранулометричного складу.

Досліджувана ділянка огорожувальної дамби, розділена на «західну» та «південну» частини дамби шламосховища. Ділянки різні за конструктивом зведеної споруди, та шарів гірських порід. Ґрунти, які приймають участь у формуванні моделі дамби шламосховища, складаються з укрупнених стратиграфо-генетичних комплексів (СГК), розділених за провідними ознаками на інженерно-геологічні елементи (ІГЕ) [105, 124]. Слід відмітити, що всі виділені при бурінні ґрунти розрізу є техногенними, насипними ґрунтами («штучно завезені»), які умовно можна розділити по призначенню та характером залягання у розрізі. В результаті інженерно-геологічної систематики розвіданих шарів вони зведені в нижченаведену номенклатуру:

СГК-I. – Насипи земельного полотна та технічних доріг, штучні (tQ₄)

Шар-Н (tQ₄) – Насипний шар – щебінь граніту, щільний, по давності відсипки – злежаний. Ґрунтом відсипана технічна дорога південної частини дамби, в західній частині – ґрунтом виконано підсипку під дорожні плити. Залягає першим від поверхні. При бурінні шар пройдено свердловинами №№ 1, 3, 4, 5, 7, потужністю – 0,2-0,5 м.

Шар-Н1 (tQ₄) – Фосфогіпс. Шар розкрито свердловинами №1 та 2, потужність в свердловинах – 0,5 та 2,0 м відповідно.

Шар-Н2 (tQ₄) – Насипний шар - суміш шлаку з щебнем граніту (частки Ø до 150 мм), з супіщаним заповнювачем (до 30% по масі), по давності відсипки – злежаний. Шар поширено локально в межах території, являє собою ґрунтову основу плитної дороги, що проходить по західній частині дамби. Пройдено свердловинами №6, 8, 9, потужність 1,2-2,9 м.

Шар-Н3 (tQ₄) – Насипний шар – (металургійні відходи) – супісок твердий до пластичного, піскуватий, сірий до сіро-зеленого кольору, пухкий, з включенням жорстк'яно-щебенистого матеріалу (до 40% по масі, Ø до 50мм), та одиничними глибами шлаку, розмір та кількість великоуламкових включень

збільшується з глибиною.

Шар-Н4 (tQ_4) – Насипний шар - шлак металургійний, чорний, по давності відсипки – злежаний, пухкий.

Шар-Н5 (tQ_4) – Насипний шар – звалище битої вогнетривкої цегли, при бурінні фіксується як супіщаний матеріал червоно-жовтого кольору, з характерними структурними гранулами, сухий, щільний, злежаний.

СГК-II. Насипні ґрунти «тіла» дамби природні, завезені (tQ_4) [105, 124]

Шар-1 (tQ_4) – Суглинок легкий, пилюватий, твердий до напівтвердого, бурий, з чіткими прошарками щебенисто-брилового матеріалу (включень до 70% по масі, потужність прошарків 0,3-0,4 м), з рідкісними прожилками карбонатів, щільний. Ґрунти шару поширені локально, зустрінуті свердловиною №2. Розкрита потужність шару – 1,3 м.

Шар-2 (tQ_4) – Супісок твердий до пластичного, пилюватий, бурого кольору, нерівномірно ущільнений (від пухкого, до середньої щільності від оптимальної), з включенням жорств'яно-щебенистого матеріалу (до 40% по масі, $\emptyset$ до 150 мм) граніту рідше шлаку, та одиничними глибами. Шар широко розповсюджено в межах території, зустрінуто майже в усіх свердловинах. В свердловинах південної частини дамби ґрунт залягає у верхній частині розрізу другим від поверхні, у св. №5 – підстиляє щебенисту насипку дороги. В свердловинах західної частини дамби ґрунтом складено більшу частину тіла дамби і на розрізах ґрунти мають значну потужність, часто перешаровуючись гранітним щебенем та глибами, утворюючи суглинисто-щебенисту суміш з переважаючою кількістю уламкового матеріалу, а сам ґрунт виступає в таких прошарках як заповнювач. Потужність шару в свердловинах західної частини дамби – 3,2-4,8 м; південної частини – 1,6-2,0 м.

Шар-3 (tQ_4) – Суглинок легкий, від туго-пластичного до м'якопластичної консистенції, сірий до буро-сірого, нерівномірно водонасичений, без включень. Шар розкрито св. №3, 5, 8а, потужністю 0,4-1,4 м.

Шар-4 (tQ_4) – Суглинок легкий, твердий, жовто-бурий до темно-бурого, пилюватий, щільний, маловологий. Розкрито св. №5, 6, 7, потужність в свердловинах 0,3-1,0 м.

Генетичні індекси ґрунтів розрізу прийняті по їх фактичному, а не першочерговому(корінному) заляганню, спираючись на характерні особливості того, чи іншого виділеного шару.

В межах ділянки вишукувань виділено водоносний горизонт що належить до четвертинних алювіальних відкладів заплави та кори звітрювання кристалічних порід, яка їх підстиляє [105, 124]. Характеризується водоносний комплекс приуроченістю до надзаплавних терас четвертинного віку р. Дніпро та його притоків, водовміщуючі породи представлені різнозернистими пісками з прошарками суглинків, супісків, глин, та уламково-тріщинувата зона архейських гранітоїдів що їх підстиляє.

На період проведення вишукувань (вересень 2022 р.) в межах досліджуваної ділянки огорожувальної дамби, підземні води виявлені свердловинами №1,3,5, на ділянці південної частини дамби, на глибинах 4,0-6,2 м (абсолютним відміткам 55,6-58,4 м), та свердловинами №6 та 9, на південно-західній ділянці дамби, на глибинах (абс. відм. 54,1-55,0 м) 9,0-10,2 м від поверхні (рис. 3.14-3.16). Ділянки дамби, де не виявлено зон обводнення та розущільнення порід, також перевірялись бурінням (рис. 3.17). Як видно, ґрунти дамби сухі, без ознак замочування та фільтрації води.

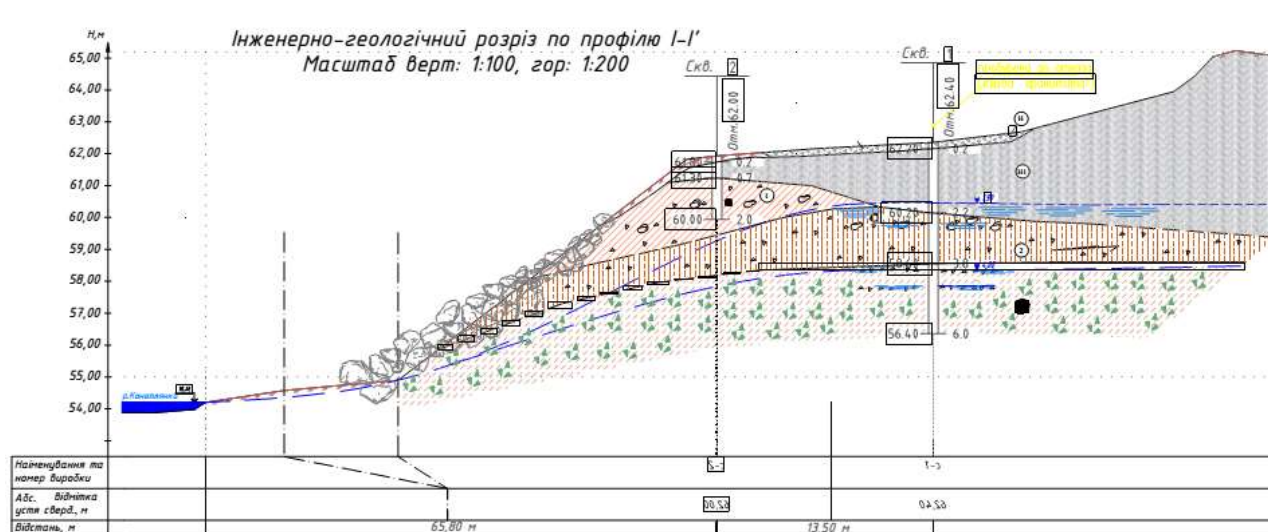


Рисунок 3.14 – Інженерно-геологічний розріз дамби хвостосховища «Дніпровське» на ділянці по профілю I-I, де за даними зйомки ПЕМПЗ встановлено обводнення. Сині пунктирні лінії – положення водоносних горизонтів [105, 124]

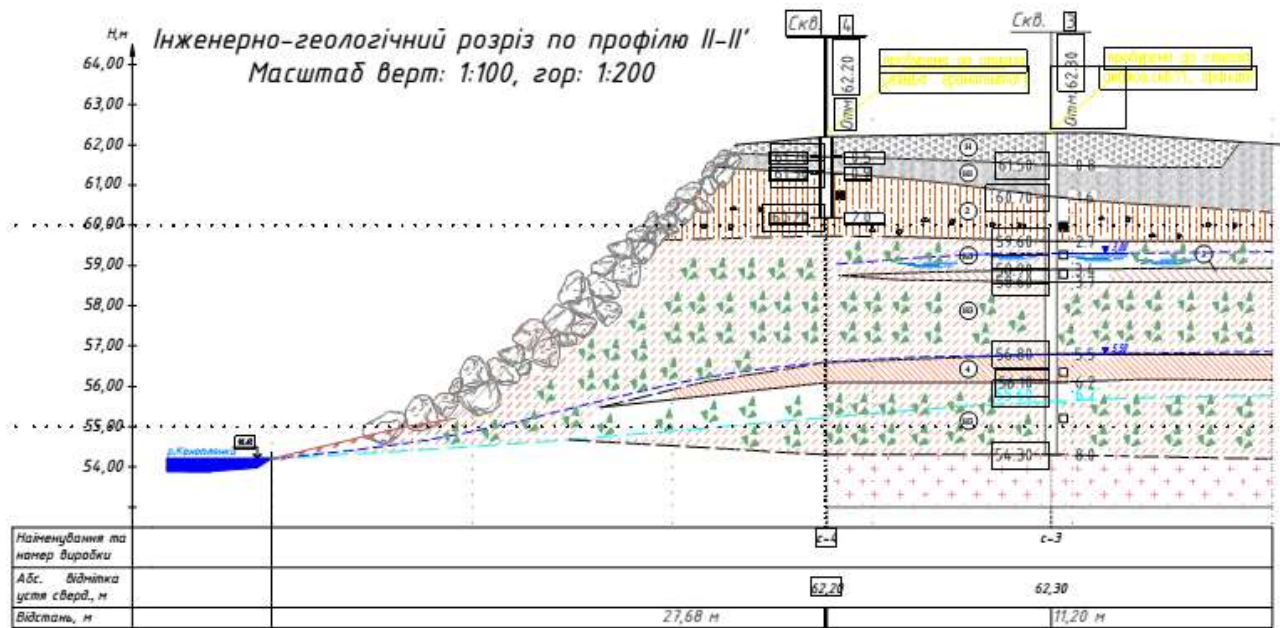


Рисунок 3.15 – Інженерно-геологічний розріз дамби хвостосховища «Дніпровське» на ділянці по профілю II-II, де за даними зйомки ПІЕМПЗ встановлено обводнення. Сині пунктирні лінії – положення водоносних горизонтів [105, 124]

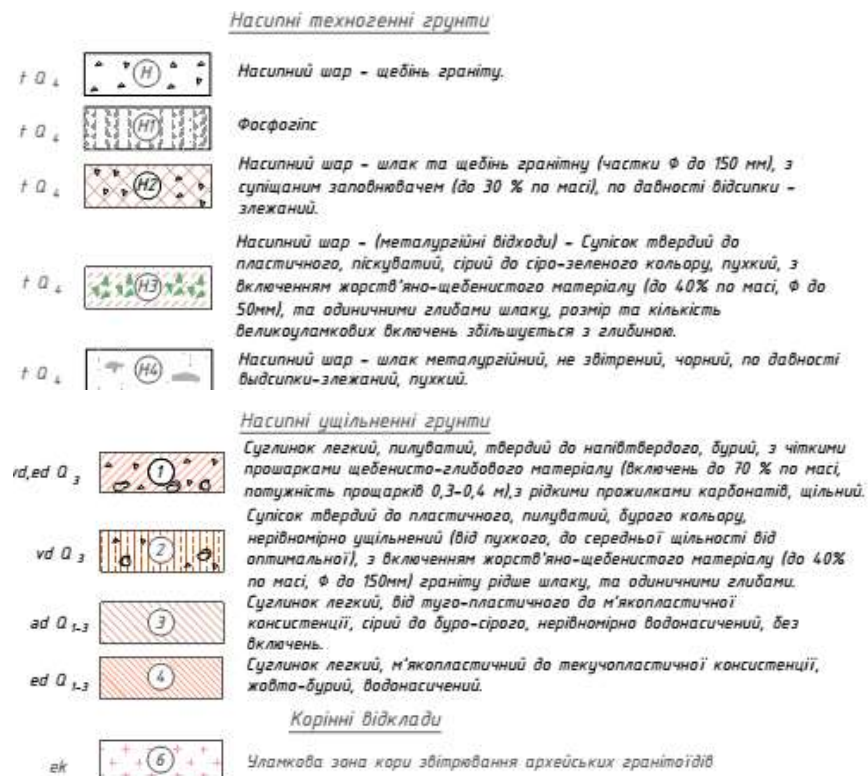


Рисунок 3.16 – Умовні позначення до інженерно-геологічних розрізів

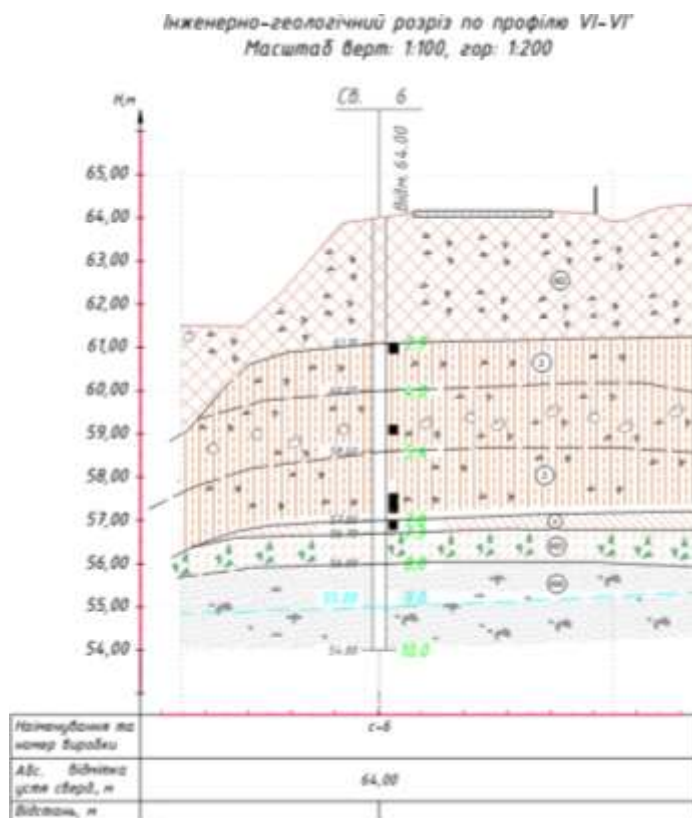


Рисунок 3.17 – Інженерно-геологічний розріз дамби хвостосховища «Дніпровське» на ділянці, де за даними зйомки ПІЕМПЗ обводнення та фільтрація відсутні [105, 124]

Крім головного водоносного горизонту, вище за розрізом розкрито локальні малопотужні горизонти «верховодки», які чітко виявляються при бурінні та підтверджуються даними вологості ґрунтів, які були відібрані з цих глибин (рис. 3.14-3.16). На відміну від горизонту у корінних відкладах, водопрояв якого при бурінні фіксувався у вигляді значного водопритоку у свердловину і повним водонасиченням вміщуючих ґрунтів, «верховодка» не визначалась подібним водозабезпеченням горизонту і тільки підвищувала вологість вміщуючих ґрунтів (потужність замоченої зони – 0,3-0,4 м), має локальне поширення в плані. У якості слабо-проникного шару, на якому формується перший від поверхні горизонт («верховодка»), виступають ґрунти шарів ІГЕ-2 і 3, водовміщуючими ґрунтами шари ІГЕ-Н1 та Н3 (для св. №1 та № 3 відповідно).

На Пд-Зх ділянці дамби (св. №6-9), жодною свердловиною не зафіксовано чітких ознак наявності «верховодки» у розрізі тіла дамби (рис. 3.17). Це

пояснюється тим, що Пд-Зх борт огорожувальної дамби зведено літологічно більш однорідними ґрунтами, ніж ті що складають південну дамбу шламосховища. Особливо помітно, як формується верхній локальний горизонт в зоні контакту літологічних різниць саме ґрунтів техногенного походження (відходи виробництва, шлами – ПГЕ-Н1, Н3), та мінеральних – природних ґрунтів (ПГЕ-1-4), які не є місцевими ґрунтами, але були завезені під час зведення огорожувальної споруди.

Значною мірою формуванню локальних горизонтів сприяла технологічна схема зведення дамби, яка передбачала чергування ущільнених шарів ґрунту з прошарками із бутової насипки, згідно настанов п.п.7, СП-32-104-98 (рис. 3.18) та попередніх видань нормативного документу, які діяли на період побудови дамби [140].

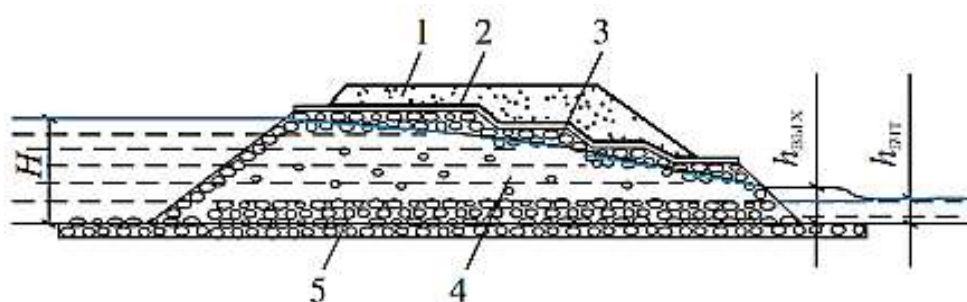


Рисунок 3.18 – Схема зведення насипу з чергуванням ущільнених шарів ґрунту з бутовим камінням [140]

Застосування даної схеми, як вказано в описі настанови, використовується «у випадку малої кількості води що надходить в бік насипної споруди, та і відсутності у водному потоці зледенінь, мулистих чи інших наносів, які б могли перешкоджати та блокувати фільтраційний потік» та чітко видно на розрізах I-I, II-II по південній ділянці споруди.

Фактично маємо схему фільтруючої дамби, але дещо обмеженою по об'єму фільтрації та колоїдному складу рідини, що фільтрується. Настанова нормативного документу цілком зрозуміла, бо в протилежному випадку високий градієнт напору фільтрації та велика різниця у гранулометричному складі часток ґрунту (глинисто-піщана фракція/щебенисто-брилова), що складають тіло дамби, призведуть до неминучого розвитку процесу суфозії з локальним розмивом та виносом більш дрібної фракції ґрунту з протилежного від напрямку

фільтрації борту дамби.

Водоносний горизонт відкритий, безнапірний. Живлення здійснюється, переважно, за рахунок інфільтрації атмосферних опадів. Дренується горизонт ерозійною мережею р. Коноплянка. Характер взаємозв'язку з поверхневими водами фільтраційний, зональний, прямий, низхідний. Розвантаження водоносного горизонту відбувається в південному, південно-західному напрямку.

З кожного різновиду порід в свердловинах відібрані зразки для проведення лабораторних досліджень. Нормативні значення показників фізико-механічних властивостей ґрунтів визначені на підставі результатів лабораторних досліджень (Додаток Б.10).

Після зливових дощів в липні-серпні 2023 року на найбільш обводненій частині дамби (ділянки 2-10, рис. 3.11) проведені дослідження методом ПЕМПЗ з метою встановлення впливу збільшення кількості та інтенсивності атмосферних опадів на її технічний стан. Методика проведення польових робіт та інтерпретації матеріалів відповідала методиці досліджень 2022 року (рис. 3.19-3.20) [138].

Аналіз рисунків показує значне обводнення тіла дамби. Так, наприклад, зона 2 збільшилась на 12 метрів, 3 – на 14 м, між 3 і 4 зонами з'явилась нова протяжність 13 м, зони 9 і 10 утворили єдину ділянку обводнення горизонтальною потужністю близько 40 метрів. Таке обводнення після злив може призвести до розвитку небезпечних техногенних явищ: зсувів, суфозії і поверхневої ерозії в тілі дамби [138].

На рисунку 3.21 наведений фрагмент карт-схем щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ на огорожувальній дамбі хвостосховища «Дніпровське» за результатами зйомок 2017, 2022 та 2023 років. Тут помітна наявність ділянок з «розмитим полем», які характеризуються доволі широкими відступами між ізолініями, ділянки сильно диференційованого поля зі «стиснутими» ізолініями, а також ділянки з ізолініями, які розташовані вхрест дамби – зони розуцільнення порід, обводнення та фільтрації.

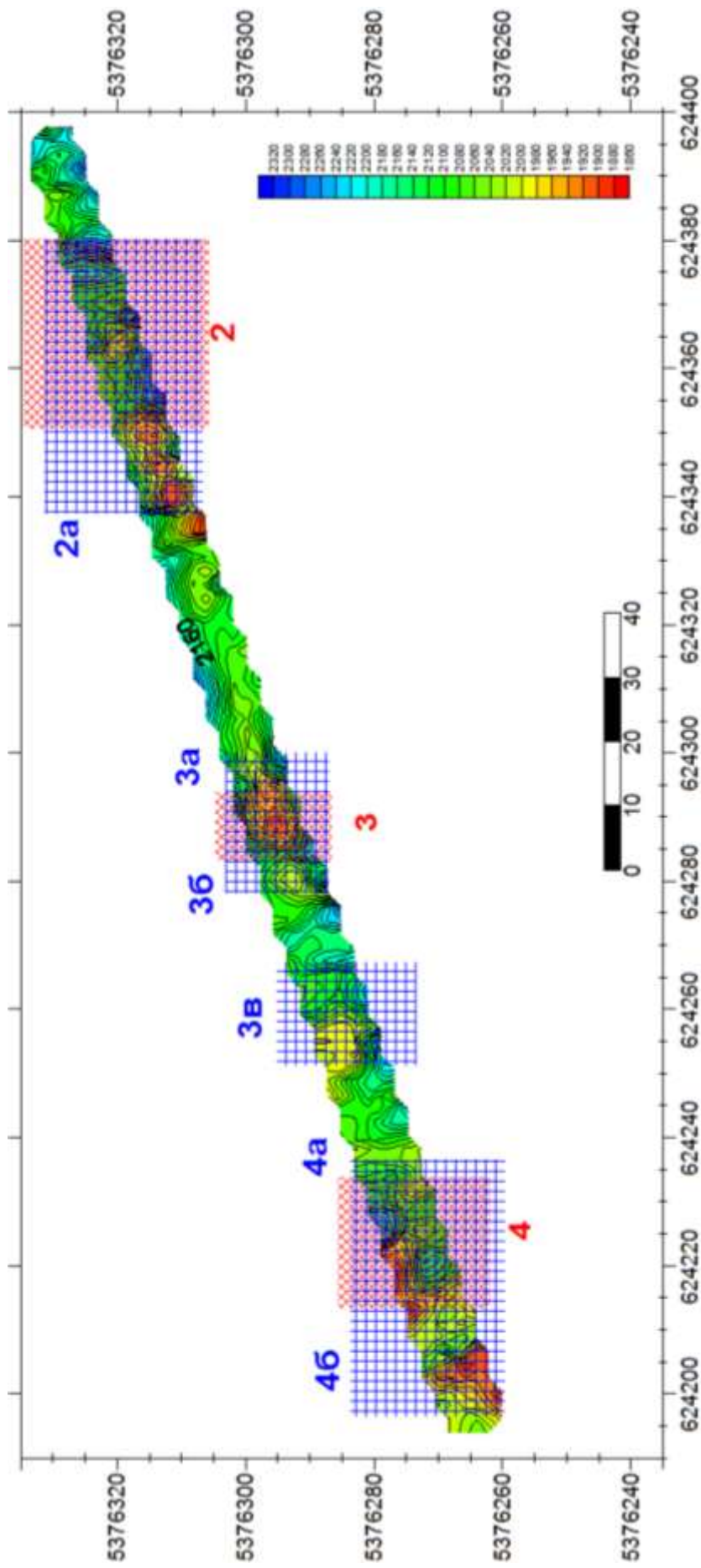


Рисунок 3.19 – Карта-схема щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ за даними 2022-2023 р.р. Зони обводнення: червоний колір – ділянки обводнення, встановлені за матеріалами зйомок 2022 року, синім кольором – за матеріалами 2023 року. Кольорова шкала характеризує щільність потоку імпульсів, імпульс/сек. Система координат умовна прямокутна, метрична

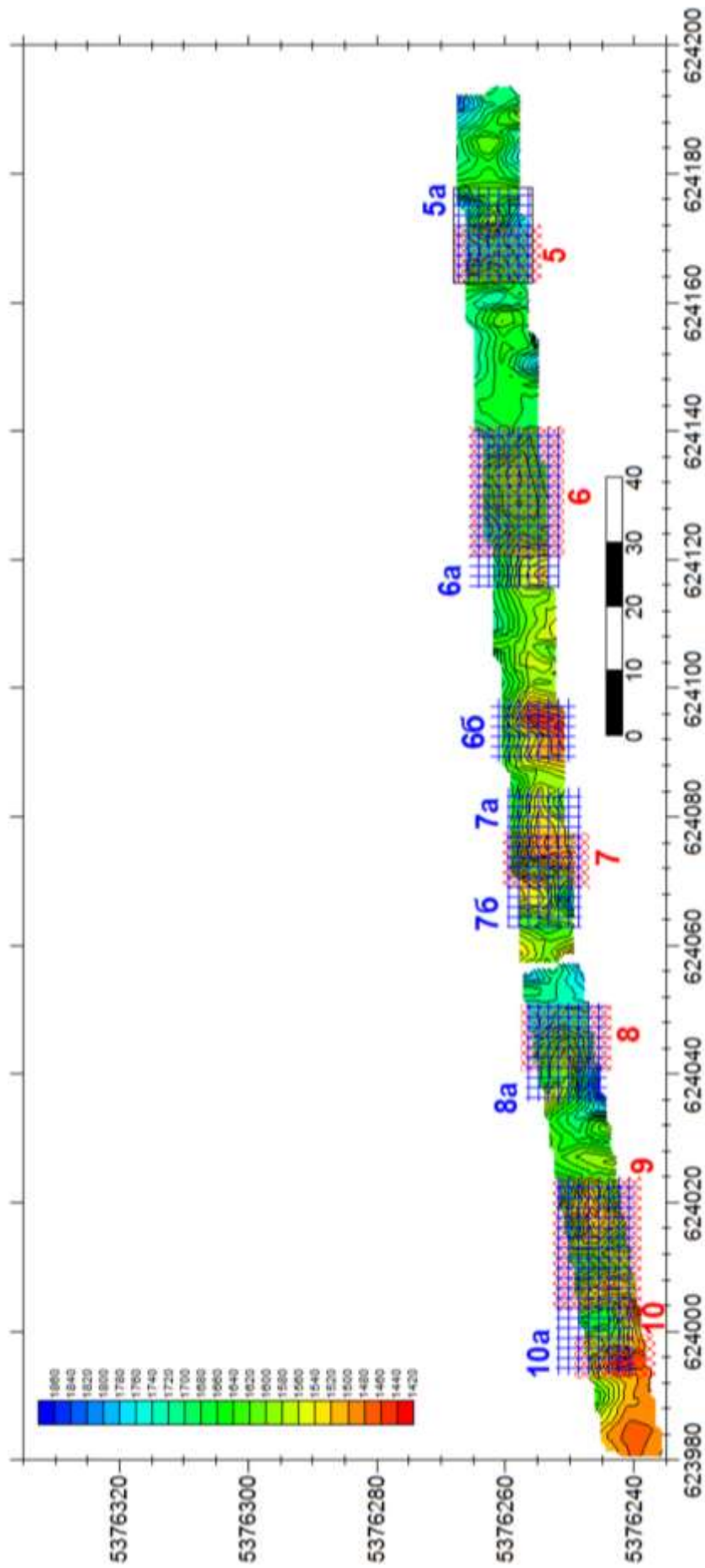


Рисунок 3.20 – Карта-схема щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ за даними 2022-2023 р.р. Зони обводнення: червоний колір – ділянки обводнення, встановлені за матеріалами зйомок 2022 року, синім кольором – за матеріалами 2023 року. Кольорова шкала характеризує щільність потоку імпульсів, імпульс/сек. Система координат умовна прямокутна, метрична

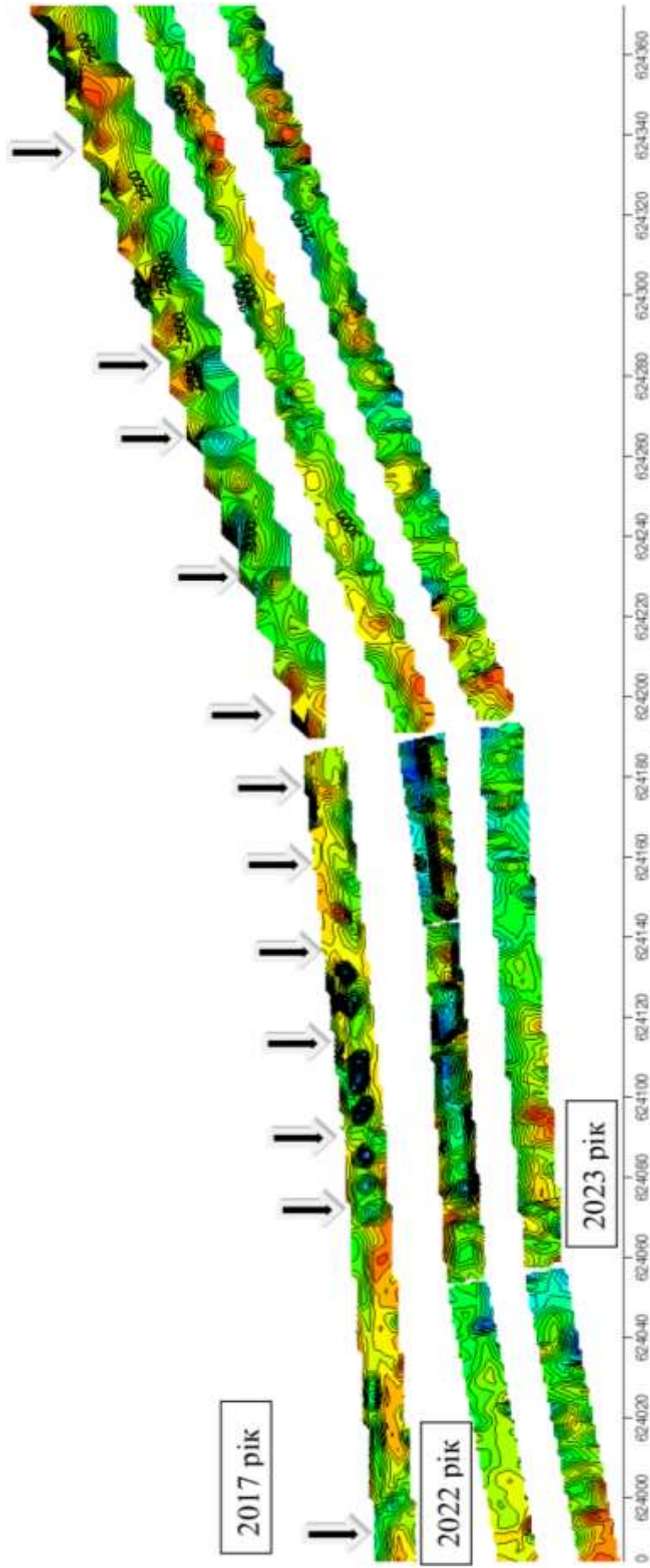


Рисунок 3.21 – Фрагмент карт-схем щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ на огороджувальній дамбі хвостосховища «Дніпровське» за результатами зйомок 2017, 2022 та 2023 років [134, 138].

Кольори відповідають категоріям щільності потоку імпульсів, імпульс/сек:

червоний (низька щільність) → жовтий → зелений → блакитний → синій (висока щільність)

Стрілками показані максимально тотожні за рисунком ізоліній та/або щільністю потоку імпульсів ділянки на трьох картах. Вісь абсцис метрична

3.1.3 Екологічні ризики хвостосховища «Дніпровське».

Аналіз причин та факторів зниження екологічної безпеки і аварій на хвостосховищах наведено у першому розділі.

До природних чинників відносяться сейсмічна активність (біля 17% випадків), частково 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%) [30]. Розглянемо їх по черзі.

Згідно ДБН В.1.1-12 2014 [141] район м. Кам'яське, територія якого має середні за складністю ґрунтові умови, має значення фонові сейсмічної активності за рівнем А і В – 5 балів, за рівнем С – 6 балів (Додатки Б.11 – Б.12).

В ДБН В.1.1-12 2014 [141] зазначено, що всі ГТС незалежно від їх призначення, класу, конструкції та матеріалу виготовлення повинні бути обстежені після кожної сейсмічної події інтенсивністю 5 балів і вище. При цьому повинні бути оперативно проаналізовані показання всіх видів контрольно-вимірювальної апаратури, встановленої у споруді, а також проведено огляд споруди.

На основі встановлених фактів виконується експертна оцінка міцності, стійкості експлуатаційних властивостей споруди [141]. Особливо це важливо для діючих хвостосховищ та ГТС термін експлуатації яких більше 30-50 років. Термін експлуатації хвостосховища «Дніпровське» більше 50 років. Враховуючи обводненість південно-західної частини огорожувальної дамби, доцільно вважати, що землетруси інтенсивністю 5 і більше балів можуть призвести до зсувних явищ і проривної фільтрації небезпечних речовин на цій ділянці дамби.

Другим фактором, який впливає на зменшення екологічної безпеки всього хвостосховища, є зміни клімату, що детально розглянуто у першому розділі. Зокрема, зазначено про зміну інтенсивності атмосферних опадів влітку, дощі випадають рідко, але мають зливовий характер. Внаслідок зливових дощів відбувається ерозія поверхні та тіла дамби хвостосховища (рис. 3.22). Ерозії сприяли розчленований рельєф та нахил поверхні хвостосховища у південно-західному напрямку (рис. 3.22). 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 сприяє відсутність поверхневого дренажу на хвостосховищі.



Рисунок 3.22 – Прояви небезпечних інженерно-геологічних явищ – обвали, зсуви та розтріскування потужного шару фосфогіпсу на північній дамбі хвостосховища «Дніпровське» [105, 124, 134]

На окремих обводнених ділянках і зонах фільтрації (зони 3-5, 10-12, рис. 3.11) спостерігаються суфозійні лійки і провали глибиною до 0,5-1,0 м по краю огорожувальної дамби. В цих місцях схил дамби заростає очеретом (рис.3.23).



А



Б

Рисунок 3.23 – Прояви небезпечних інженерно-геологічних явищ в зонах обводнення і фільтрації – суфозійні лійки (А) і провали (Б)

Для встановлення особливостей розміщення тріщин в зонах обводнення і фільтрації на ділянках, встановлених за даними зйомки ПЕМПЗ 2022 року (рис. 3.11), враховуючи добре відомі ознаки розривних зрушень в геофізичних полях, виокремлювались зони тріщинуватості та визначались їхні азимути простягання, приклад виділення тріщин наведений на рис. 3.24. Встановлено, що найбільша кількість тріщин встановлюється на ділянках обводнення 1, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 18, 19-22, 24-25). Просторові характеристики систем тріщин наведені в табл. 3.1 у вигляді азимутів простягання, а візуальне їх розповсюдження – на стовпчастій діаграмі (рис. 3.25). Аналіз діаграми дозволяє виділити домінуючі азимути простягання тріщин, що визначені в зонах обводнення і фільтрації хвостосховища [142, 143].

Найбільш яскраво проявлена 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 з напрямками простягання $340-350^{\circ} (\pm 5^{\circ})$ [142, 143].

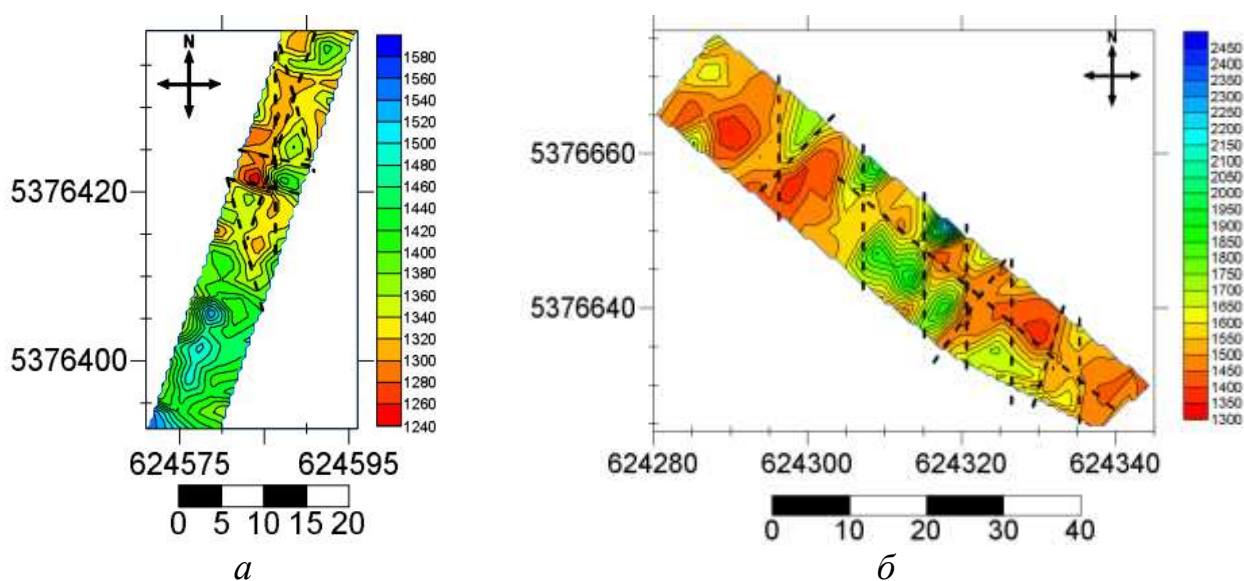


Рисунок 3.24 – Приклад виділення тріщин (чорний пунктир) на карті щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ ділянок 1 (а) та 21 (б) (див. рис. 3.11). Кольорові шкали характеризують щільність потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ, імп./0,5 с [142]

Таблиця 3.1 – Азимути простягання тріщин на обводнених ділянках дамби хвостосховища «Дніпровське» [142]

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
Всього		173	100

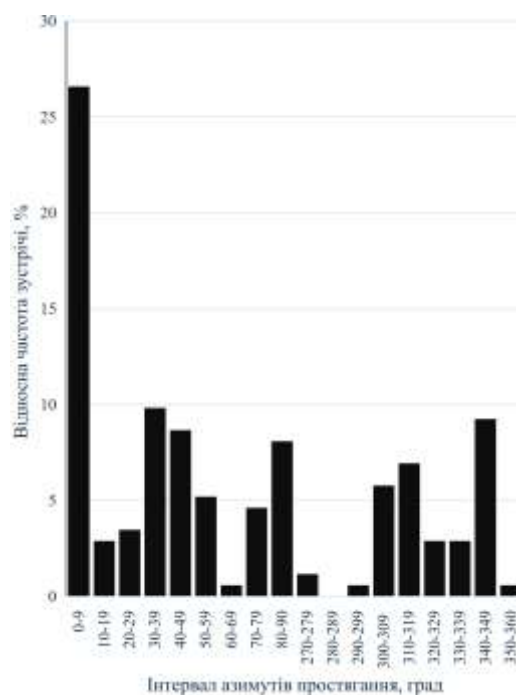


Рисунок 3.25 – Діаграма тріщинуватості дамби хвостосховища «Дніпровське» [142, 143]

Встановлені особливості показують, що має існувати певний фактор, яким зумовлюється формування окремих систем або напрямків тріщин

Розкрити цей фактор допомагають дослідження, результати яких наведені у роботах [144, 145]. 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. 3.26).

У межах території дослідження виявлені лінеamenti (зони активних на новітньому етапі розвитку розломів) – регіональні, показані на рис. 3.26 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 $90^\circ \pm 5^\circ$, $40\text{--}45^\circ \pm 5^\circ$ та $310\text{--}315^\circ \pm 5^\circ$), одну проміжну ($25\text{--}30^\circ \pm 5^\circ$ та $295\text{--}300^\circ \pm 5^\circ$) та два пригнічених напрямки ($15\text{--}20^\circ \pm 5^\circ$ та $345\text{--}350^\circ \pm 5^\circ$), що мають по одній лінеаментній зоні [144, 145]. Саме вони, на думку авторів, є найбільш небезпечними ділянками, в яких відбувається активний водообмін між поверхневими і підземними водами, а зони поглинання поверхневих вод розміщуються в місцях сполучення таких лінеаментних зон [145].

Хвостосховище «Дніпровське» розміщене на перетині трьох регіональних лінеаментних зон – субмеридіональної ($0^\circ\text{--}9^\circ \pm 5^\circ$), північно-східної з азимутами простягання $40\text{--}45^\circ$ та $310\text{--}315^\circ$ і північно-західної з азимутом простягання $295\text{--}300^\circ$. Крім того, на захід від хвостосховища розташована локальна лінеаментна зона з напрямком простягання $340\text{--}350^\circ$.

Сумісний аналіз карти активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур (рис. 3.26) та діаграми, наведеної на рис. 3.25 вказує на добру збіжність азимутів простягання лінеаментних структур і тріщин в зонах обводнення і фільтрації, встановлених за геофізичними даними. Це може вказувати на приуроченість розвитку зон обводнення і фільтрації за рахунок формування тріщин, просторово приурочених до лінеаментних зон.

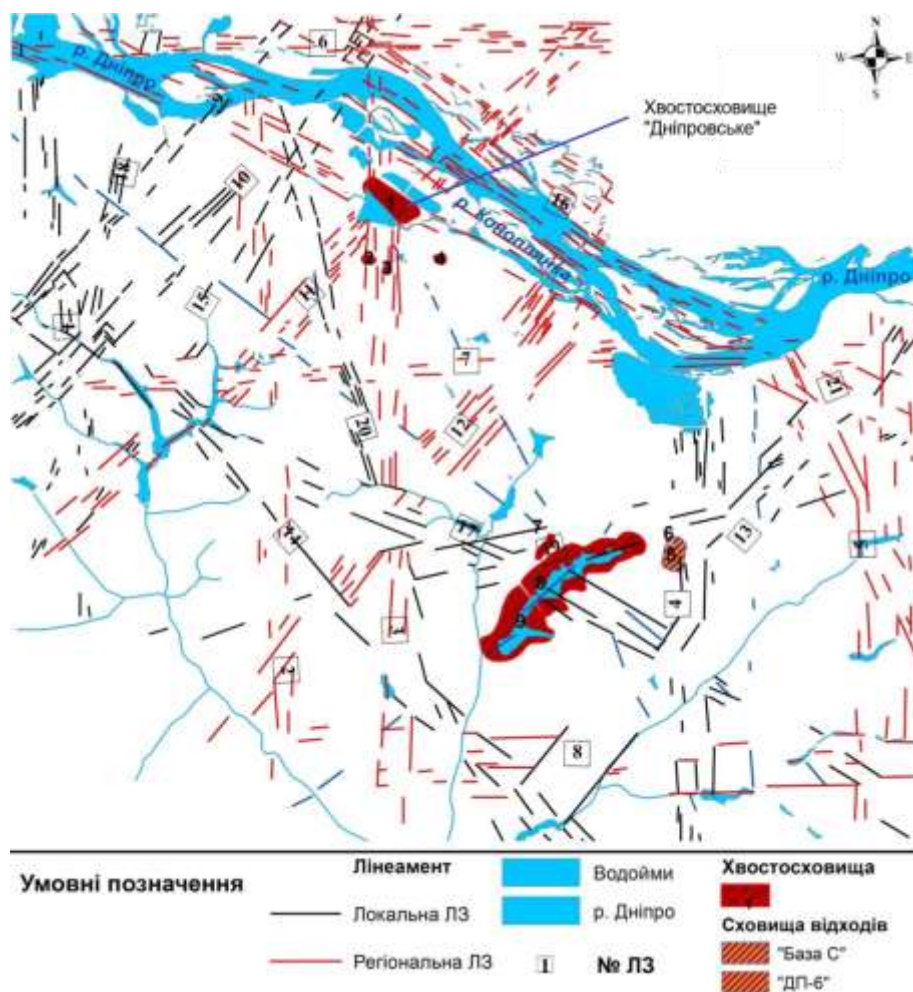


Рисунок 3.26 – Карта активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур в межах території розташування хвостосховищ уранового виробництва колишнього ВО «ПХЗ» [144]

За даними Л.С. Галецького та ін. [146], зони лінеаментів корелюються з характером поля сучасних рухів та дуже добре співпадають з розподілом ділянок аномальних градієнтів швидкостей сучасних рухів. Сітка трансрегіональних зон лінеаментів контролює в регіональному плані розвиток екзогенних геологічних процесів та обумовлює ступінь ураженості території за сукупністю їх виявлення.

В характері сучасних вертикальних рухів спостерігається активізація північно-східних рухів, які виражені більш різко ніж поздовжні. В районі, який розглядається, вертикальні рухи складали +4 мм/рік [146].

Враховуючи проведені дослідження можна виділити тектонічний фактор розвитку ділянок тріщинуватості, обводнення і фільтрації на дамбах хвостосховищ, що пов'язаний з сучасними рухами по лінеаментним зонам. Їх просторова приуроченість до розломних структур Українського щита свідчить

про успадкованість розвитку тектонічних структур, а також про вплив на сучасні техногенні екзогенні процеси [142-145].

Такий зв'язок сучасної тектоніки та процесів розушільнення дамб хвостосховищ з виникненням небезпечних зон тріщинуватості та проникності дозволяє провести діагностику ризиків порушення стійкості гідротехнічних споруд в залежності від їх розташуванн. 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 відноситься не тільки власне огорожувальних дамб, але й, що суттєво, лежа хвостосховища. Якщо технічний стан дамб можна моніторити та вживати заходів щодо забезпечення їх стійкості, то дно хвостосховищ може зазнавати порушення гідроізоляції з витокм рідких відходів у підстиляючі ґрунти та водоносні горизонти. Тому для хвостосховищ, які розташовані в такій структурно-тектонічній позиції, необхідно оцінювати не тільки стан дамб, але й навколишню територію, особливо якщо у хвостосховищ зберігаються небезпечні відходи [142-145].

3.2 Техногенна безпека неактивного (недіючого) хвостосховища радіоактивних відходів «Сухачівське»

3.2.1 Загальні відомості про хвостосховище «Сухачівське».

Хвостосховище «Сухачівське» (С) яружно-балочного типу і складається з двох секцій, розміщених одна за одною. Загальна його довжина 4,8 км, площа земельного відводу – 491,43 га [142, 147-149]. Введена в експлуатацію з 1968 р., розміщується в Дніпропетровському районі, в 14 км на південний схід від будмайданчика колишнього ВО «ПХЗ». Хвостосховище розташоване в лівому відгалуженні балки Розсолуватої, яка впадає в долину річки Суха Сура – притоки другого порядку р. Дніпро (рис. 3.27).

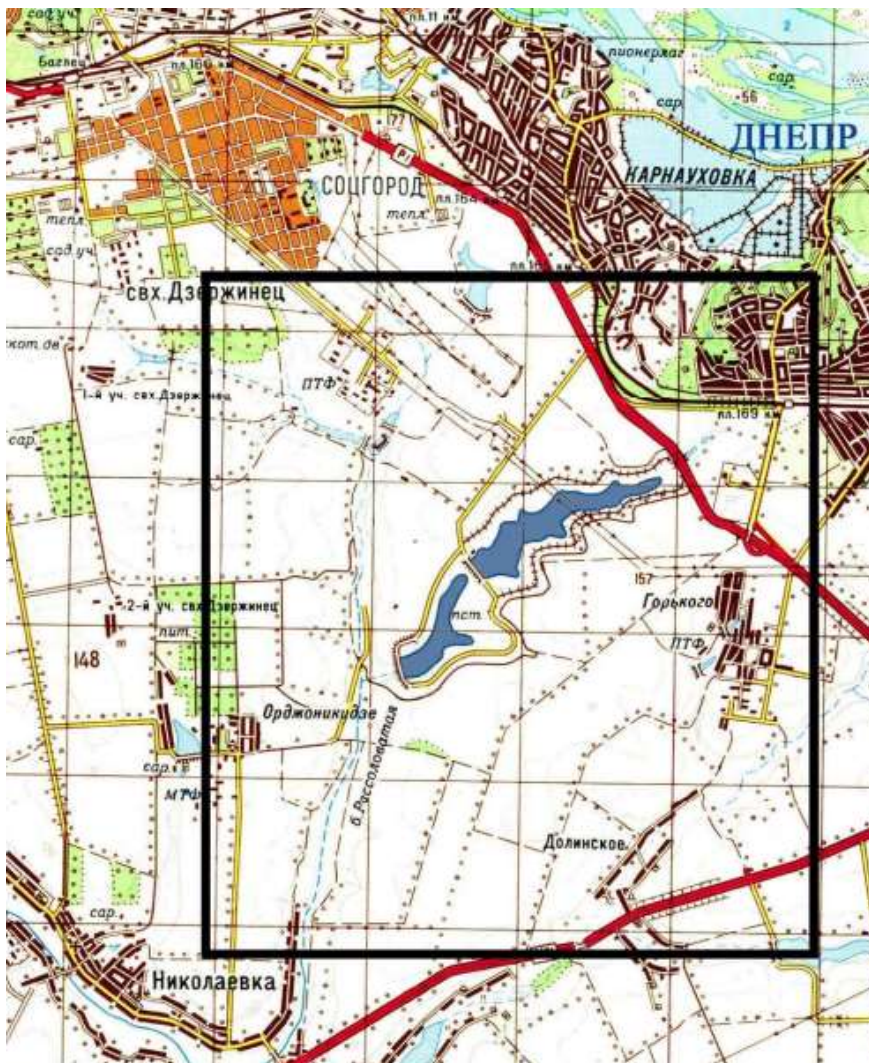


Рисунок 3.27 –Розташування хвостосховища «Сухачівське»

Перша секція, що експлуатувалася в 1968-1983 рр. (площа – близько 907 тис. м²), заповнена до проєктних позначок, у ній заскладовано 19 млн т відходів-хвостів загальною активністю $7,1 \cdot 10^{14}$ Бк (об'єм відходів – 8,6 млн м³). Хвостосховище не законсервовано [144].

ПЕД гамма-випромінювання на поверхні хвостів, не закритих водою, змінюється від 100 до 1800 мкР/год, щільність потоку радону з поверхні знаходиться в межах 0,03-1,475 Бк/(м²·с). Вміст радону-222 в РАВ на глибині 0,6 м складає від $0,17 \pm 0,03$ МБк/м³ до $1,73 \pm 0,25$ МБк/м³. Річне надходження в атмосферне повітря з поверхні хвостів радіоактивного пилу складає 23,9 т/рік загальною питомою активністю близько 37000 Бк/кг і радону – $1,86 \cdot 10^{13}$ Бк/кг [144].

В склад першої секції входить хвостосховище «Лантанова фракція», що експлуатувалося з 1965 по 1988 рік. У ньому заскладовано до 6,6 тис. т відходів

хвостів загальною активністю $8,6 \cdot 10^{11}$ Бк. На цей час хвостосховище законсервовано. Перебуває на балансі ДП «Поліхім» (м. Кам'янське) [144].

Друга секція експлуатується з 1983 року (площа – близько 700 тис. м²). Чашу хвостосховища та захисні дамби обладнано протифільтраційними елементами. Тут складовано 5,6 млн т відходів-хвостів загальною активністю $2,7 \cdot 10^{14}$ Бк, які утворюють нижню частину товщі. Поверхневий шар (завтовшки 4-5м) складається з низькоактивних шламів, фосфогіпсу. [144]. Хвостосховище є джерелом забруднення підземних вод. Коефіцієнт сумарного радіонуклідного забруднення вод складає 2,75-4,02. Ореол забруднення поширюється на 370-860м від контуру сховища [144].

Дамба ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції являє собою насип автодороги у верхів'ї першої секції. По гребеню насипу проходить автомагістраль Дніпро-Кременчук з асфальтовим покриттям. Ширина дороги становить 40 м, загальна ширина гребеня насипу – 74 м. Водопропускних конструкцій в основі насипу не має. З північної частини розташоване озеро-ставок [147, 148, 143]. Південна частина дамби складена лесоподібними суглинками.

У 2004 році через погано організований стік дощових і талих вод утворилися дві великі промоїни, а також спостерігалися численні дрібні вибоїни і тріщини [144, 147, 148]. Восени 2004 року було проведено рекультивацію насипу: суглинками засипано промоїни, тріщини і більшу частину ярів, поверхню гребеня сплановано, але це не вирішило повністю проблеми розвитку несприятливих фізико-геологічних процесів. У періоди сніготанення і після інтенсивних злив, можливе відновлення процесів яроутворення, так як ґрунти, відсипані на гребені і заповнюють яри, недоущільнені і будуть піддаватися поступовому розмиву [144, 147-149].

3.2.2 Оцінка технічного стану дамби ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції хвостосховища «Сухачівське».

В жовтні 2016 року перед виконанням геофізичних досліджень для оцінки технічного стану дамби методом ПЕМПЗ проведені візуальні обстеження греблі

[148, 149, 150]. Під час візуального обстеження виявлені численні суфозійні воронки в тілі дамби і суфозійні канали довжиною до 7 метрів і діаметром 2-2,5 м (рис. 3.28). На поверхні дамби відсутні чітко виражені сліди площинного і лінійного змиву ґрунтів атмосферними опадами. У той же час, велика суфозія вимагає постійного припливу води. Головним джерелом її надходження можуть бути приховані зони підземної фільтрації води зі ставка під автодорогою і південним бортом дамби [147-149, 150].



Рисунок 3.28– Проявлення суфозійних процесів у дамбі хвостосховища «Сухачівське» [147-149]

Для визначення обводнених зон і ділянок фільтрації води через тіло дамби проведені геофізичні роботи методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ). На ділянці робіт зйомка проводилася по квадратній сітці 3х3 м. Сигнал ПЕМПЗ реєструвався трьома антенами, дві з них орієнтовані горизонтально в широтних і меридіональних напрямках, одна – вертикально вниз. Координати крайових точок профілів визначалися за допомогою GPS-приймача. Додатково використовувалися місцеві прив'язки у вигляді знаків радіаційної небезпеки на огорожувальних бетонних стовпчиках інспекторської дороги [147-149, 150].

Польова зйомка проводилася в два етапи. На першому етапі виконані спостереження на 59 профілях, розташованих в охоронній частині дамби (рис. 3.29). На другому етапі спостереження проводилися в частині дамби, розташованій між автодорогою Дніпро-Кременчук і зовнішньою огорожею

охоронюваної зони хвостосховища. Додатково пройдені два профілі по узбіччю автодороги Дніпро-Кременчук з боку озера (ставка). Безпосередньо по полотну автодороги спостереження не проводилися через інтенсивність дорожнього руху. Ситуативний план розташування профілів спостереження і точок на них показані на рис. 3.29 [147-149].

За результатами зйомки побудовані карти-схеми щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ (рис. 3.30). За двома крайніми профілями з боку озера складені діаграми щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ (Додаток Б.13), оскільки через відсутність даних зйомки по дорожньому полотну загальну карту побудувати неможливо. Спільний аналіз карт і діаграм показав, що на побудованих картах виділяються шість різних за щільністю потоку імпульсів ПЕМПЗ (кількість імпульсів ПЕМПЗ за одиницю часу) зони (рис. 3.31-32). Перша зона в цілому має знижені значення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ, що, мабуть, пов'язано з невеликим обводненням порід, в яких вже сформувалися стійкі шляхи і канали фільтрації води з ділянок другої зони. Зовні вони проявляються у вигляді суфозійних воронок, провалів поверхні і підземних каналів, печер, тунелів (рис. 3.28) [147-149, 150].

Другій зоні відповідають підвищені значення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ. Тут може бути два варіанти інтерпретації геофізичних даних. У першому випадку можна припустити, що тут у період рекультивації в 2009 році були проведені ремонтні роботи, що зумовило дуже низьке обводнення матеріалу дамби, хоча тут і виділяються окремі ділянки фільтрації води з третьої зони в першу.

Другий варіант передбачає розвиток процесу зсувоутворення в цій зоні: масив порід знаходиться в напружено-деформованому стані, зазнає розтягуючих зусиль, що призводить до різкого збільшення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ. Зовні зсувні процеси на цій стадії майже не проявляються, але вже можуть формуватися поодинокі тріщини відриву. З огляду на це, необхідно візуально детально обстежити територію другої зони на предмет виявлення таких тріщин [147-149]. Третя зона має найнижчі значення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ, що свідчить про її сильну обводненість. До цієї зони приурочені зарості очерету і прояви поверхневої суфозії (рис. 3.33) [147-149, 150].

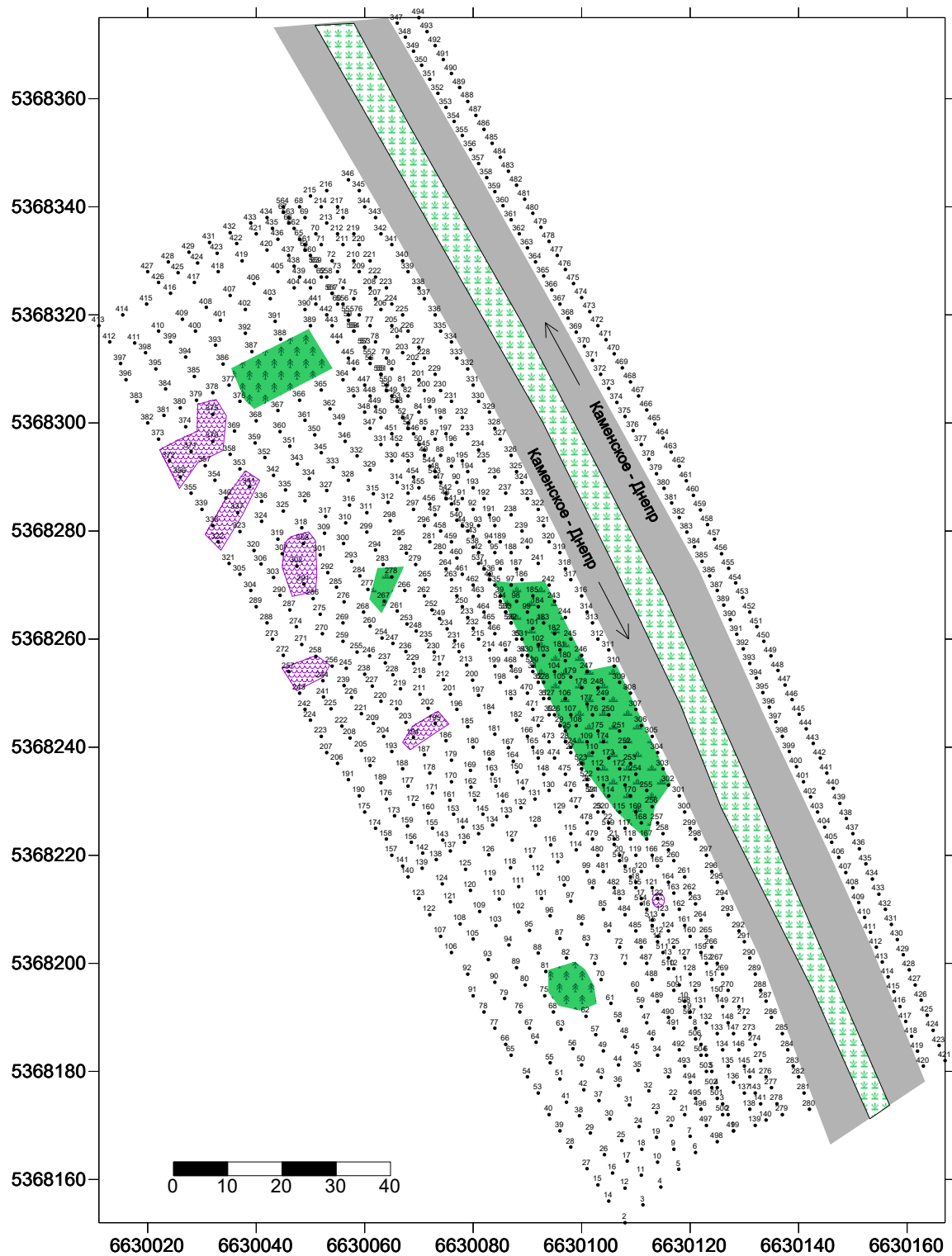


Рисунок 3.29 – Карта фактичного матеріалу зйомки ПЕМПЗ верхньої дамби хвостосховища «Сухачівське» 1 секція [147-149]. Зелений колір – ділянки розвитку рослинності, фіолетовий колір – зони поверхневої суфозії. Система координат метрична

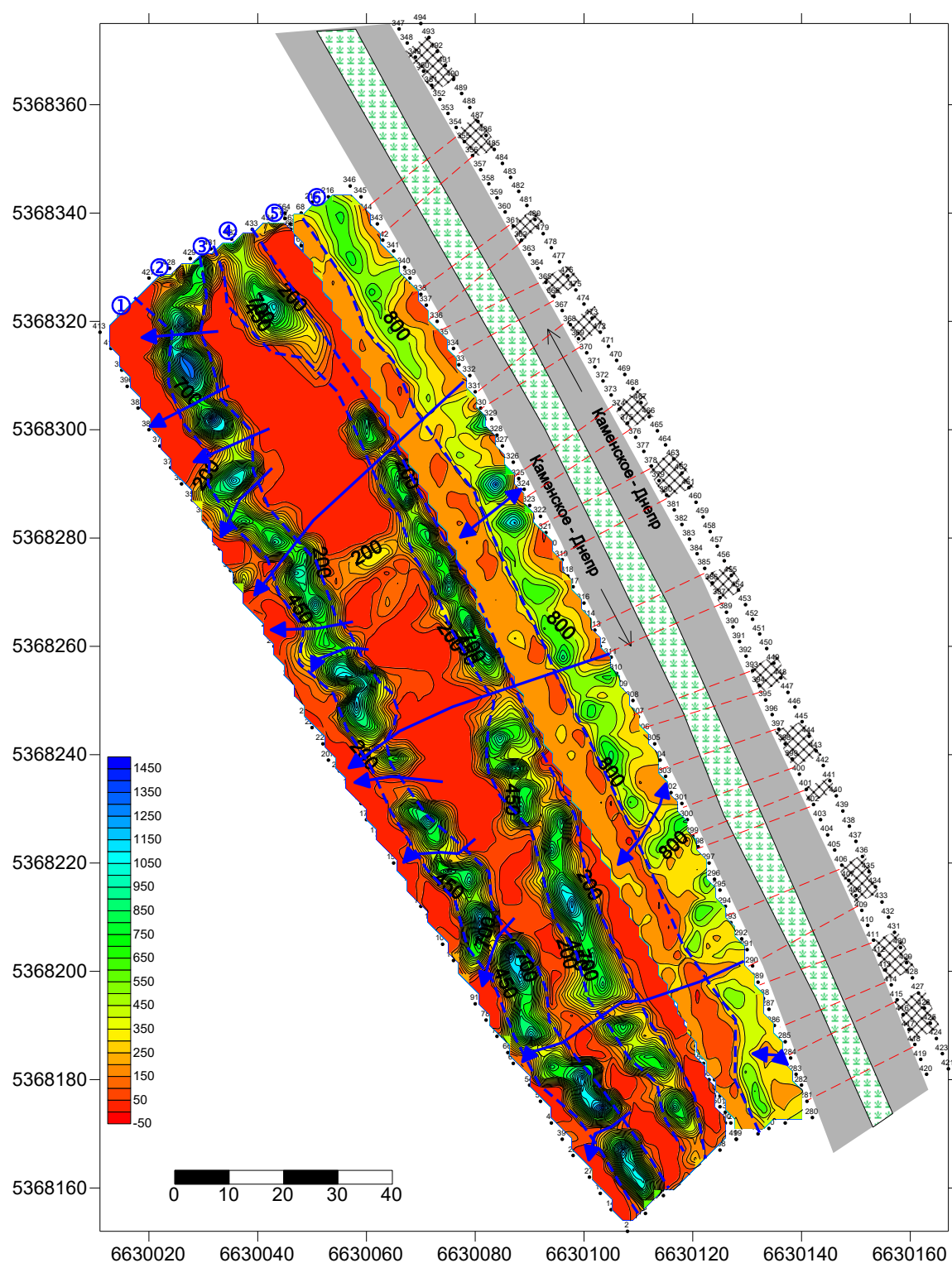


Рисунок 3.30 – Схема інтерпретації зйомки ПІЕМПІЗ за даними карти для горизонтальної антени орієнтування «захід-схід». Сині пунктирні лінії і цифри в кружках – межі і номери зон (пояснення в тексті). Сині стрілки – напрямки фільтрації води через тіло дамби. Червона пунктирна лінія – передбачувані зони обводнення. Система координат метрична [147-149]

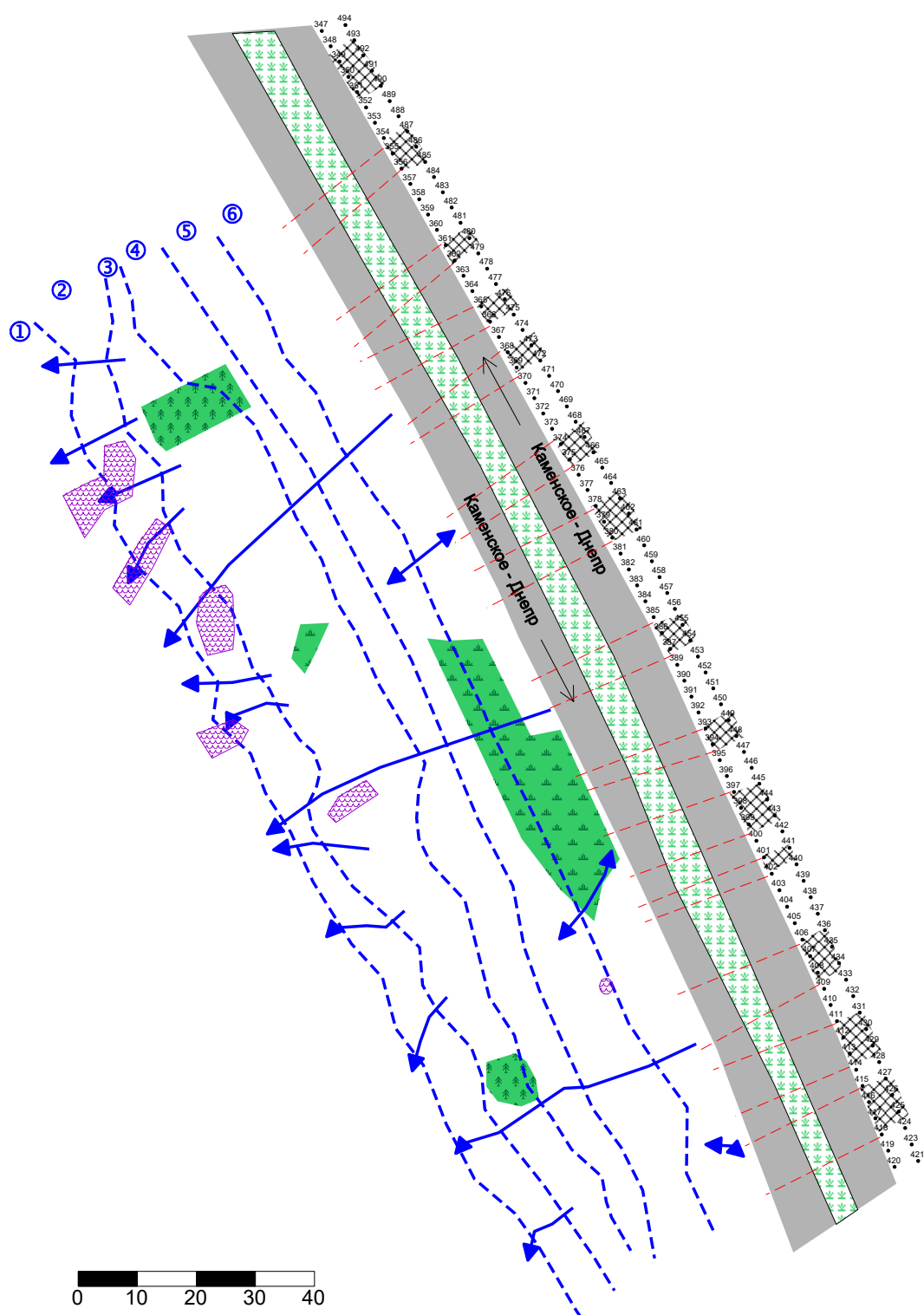


Рисунок 3.31 – Узагальнена схема інтерпретації знімків ПІЕМПЗ. Зелений колір – ділянки розвитку рослинності, фіолетовий колір – зони поверхневої суфозії. Сині пунктирні лінії та цифри в кружках – межі та номери зон (пояснення в тексті). Сині стрілки – напрямки фільтрації води через тіло дамби. Червона пунктирна лінія – передбачувані зони обводнення. Система координат метрична [147-149]



Рисунок 3.32 – Натурна прив'язка зон фільтрації води, виділені за результатами схеми зйомки ПЕМПЗ у верхній дамбі хвостосховища «Сухачівське» 1 секція.

Зелений колір – ділянки розвитку рослинності, фіолетовий колір – зони поверхневої суфозії. Сині пунктирні лінії та цифри в кружках – межі та номери зон (пояснення в тексті). Сині стрілки – напрямки фільтрації води крізь тіло дамби. Червоний пунктир – уявні зони обводнення [147-149]



Рисунок 3.33 – Поверхнева суфозія в районі зони №3 [147-149]

Четверта зона смугою підвищених значень щільності потоку імпульсів проходить у східній частині дамби відразу за внутрішньою огорожею інспекторської дороги. Ця зона слабо обводнена, складена більш щільними породами, що пов'язано, мабуть, з ущільненням дороги [147-149].

П'ята зона охоплює інспекторську дорогу і смугу території шириною 3-4 м за зовнішньою огорожею, обмежену бетонним водовідвідним лотком, який лоток має дефекти в гідроізоляції, що обумовлює замочування порід і прояв суфозії (рис. 3.34) [147-148].



Рисунок 3.34 – Водозбірний лоток і дрібна суфозійна воронка в зоні 5 [147-149]

Шоста зона розташована між бетонним лотком і дорожнім полотном. Вона також характеризується обводненням порід, про що свідчать густі зарості очеретяної рослинності (рис. 3.35). Найбільш небезпечними тут є ділянки знижених значень щільності потоку імпульсів ПІЕМПЗ, оскільки вони можуть вказувати на наявність зон фільтрації та суфозії під дорогою [147-149].



Рисунок 3.35 – Очеретяна рослинність біля автодороги в районі зони 6 [147-149]

3.2.3 Екологічної ризику хвостосховища «Сухачівське».

За даними зйомки, проведеної у верхньому б'єфі, та інтерпретації діаграм розподілу щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ (Додаток Б.13) виділено ділянки знижених значень цього потоку. Загальна протяжність таких ділянок незначна, проте при поєднанні карт і діаграм спостерігається така картина: всі обводнені ділянки, виділені на діаграмах, розташовані навпроти обводнених ділянок шостої зони (рис. 3.30-3.32). Однозначно говорити про те, що ці ділянки є шляхами фільтрації води з озера через дорожній насип в нижній б'єфі не можна, оскільки не проведено зйомку ПЕМПЗ на автомагістралі. Проте, можна припустити наявність таких шляхів; вони показані червоною пунктирною лінією на рис. 3.32

Таким чином, за результатами геофізичної зйомки методом ПЕМПЗ встановлено, що внутрішня частина верхньої дамби хвостосховища «Сухачівське» (1 секція) має досить потужні зони обводнення і пов'язаної з ними суфозії. Наявність усталених шляхів фільтрації води є досить небезпечним явищем і може призвести до руйнування тіла дамби в районі зон фільтрації та посилення процесів суфозії та ерозії, що вже почалися. Крім того, не виключається можливість формування зсуву в другій зоні, а також обводнення окремих частин дамби під автомагістраллю [147-149, 150].

Все це викликає обґрунтовані побоювання, що все тіло дамби може представляти собою велику суфозійну зону, подальший розвиток якої неминуче призведе до руйнування дамби, провалення дороги і прориву вище

розташованого ставка. Хвиля прориву може порушити усталене залягання радіоактивних відходів в 1 секції, що викличе підвищення радіоактивного фону території і розсіювання радіонуклідів по бортах і долині балки [147-149].

Згідно ДБН В.1.1-12 2014 [95], територія хвостосховища «Сухачівське» має середні за складністю ґрунтові умов і відноситься до районів зі значенням фонові сейсмічної активності за рівнем А і В – 5 балів, за рівнем С – 6 балів (Додатки Б.11 – Б.12). Враховуючи динамічні навантаження від інтенсивного руху транспорту по трасі Дніпро-Кременчук, можна припустити, що при землетрусах в 5-6 балів тут відбудуться зсуви і провали при руйнуванні дамби.

Другим фактором, який впливає на зменшення екологічної безпеки дамби хвостосховища, є зміни клімату, що детально розглянуто у першому розділу. Внаслідок зливових дощів відбувається ерозія і суфозія поверхні та тіла дамби, чому сприяють динамічні навантаження від руху вантажних і легкових автомашин, а також пошкодження в дренажній системі.

Так східна дренажна труба (Труба В) знаходиться в задовільному стані і скидає воду по спеціальній виїмці. Західна труба (Труба З) після дороги повинна відкриватися в водоскидний лоток, прокладений під інспекторською дорогою. Однак дно лотка розташовується гіпсометрично вище, ніж тальвег потоку, що виходить з труби. Оскільки розмиву інспекторської дороги не спостерігається, то вода повинна фільтруватися в тіло дамби. Цим обумовлено збільшення ширини зон обводнення в Пн-Зх частині дамби (зони 1, 3, 5). Атмосферні води, що збираються на полотні автодороги, відводяться в нижній б'єф в центральній частині обстеженої ділянки і збираються в бетонному лотку. Цей лоток протікає, що призводить до замочування ґрунту і, як наслідок, до бурхливого розвитку очерету (рис. 3.35).

Третім фактором, як і на хвостосховищі «Дніпровське», є тектонічний фактор. Розглянемо його детальніше [142, 150]. За матеріалами ПЕМПЗ вся дамба обводнена, а тому тріщини виділені на всій дамбі (рис. 3.36). Азимути простягання виділених тріщин наведені в таблиці 3.2 і на діаграмі (рис. 3.37)

Аналіз діаграми дозволяє виділити домінуючі азимути простягання тріщин, що визначені в зонах обводнення і фільтрації хвостосховища [142]. Найбільш

яскраво проявлені діагональна тріщини з азимутом простягання $71-80^{\circ} (\pm 5^{\circ})$; меридіональні $351-360^{\circ} (\pm 5^{\circ})$; – субширотні $291-300^{\circ} (\pm 5^{\circ})$. Менше розповсюджені тріщини з азимутами простягання $31-40^{\circ} (\pm 5^{\circ})$, $81-90^{\circ} (\pm 5^{\circ})$, $331-340^{\circ} (\pm 5^{\circ})$ [150].

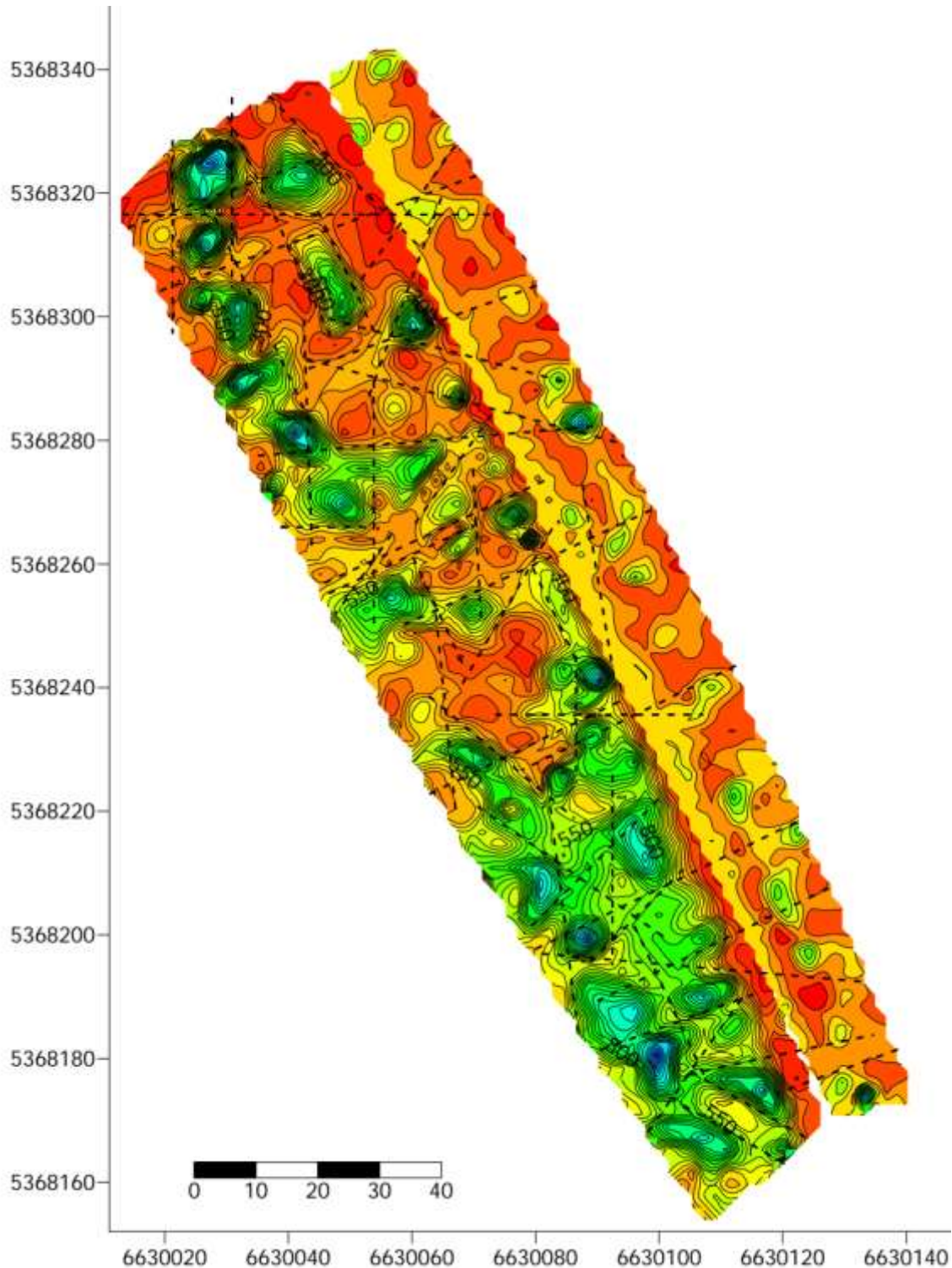


Рисунок 3.36 – Приклад виділення тріщин (чорний пунктир) на карті щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ на дамбі хвостосховища «Сухачівське». Кольорові шкали характеризують щільність потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ, імпл./0,5 с [150]

Таблиця 3.2 – Азимути простягання тріщин на обводнених ділянках дамби хвостосховища «Сухачівське»

Номер групи тріщин	Інтервал азимутів простягання, град	Кількість тріщин відповідного азимуту	Відносна частота зустрічі, %
1	20-29	1	2,1
2	30-39	5	10,6
3	70-79	11	23,5
4	80-89	5	10,6
5	290-299	9	19,2
6	330-339	5	10,6
7	340-349	2	4,3
8	350-359	9	19,1
Всього		47	100

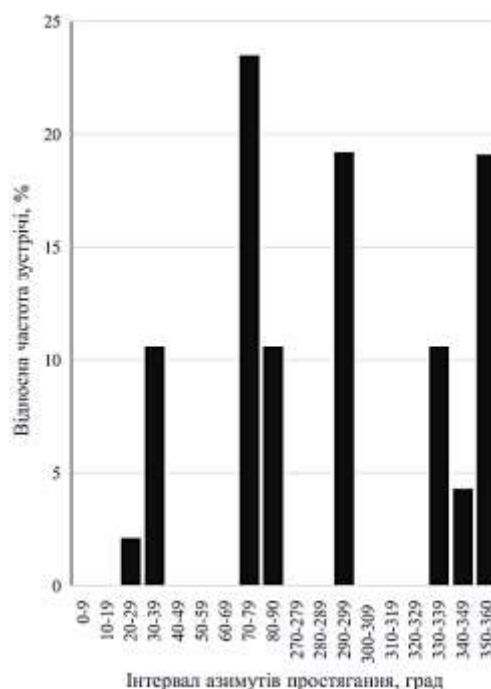
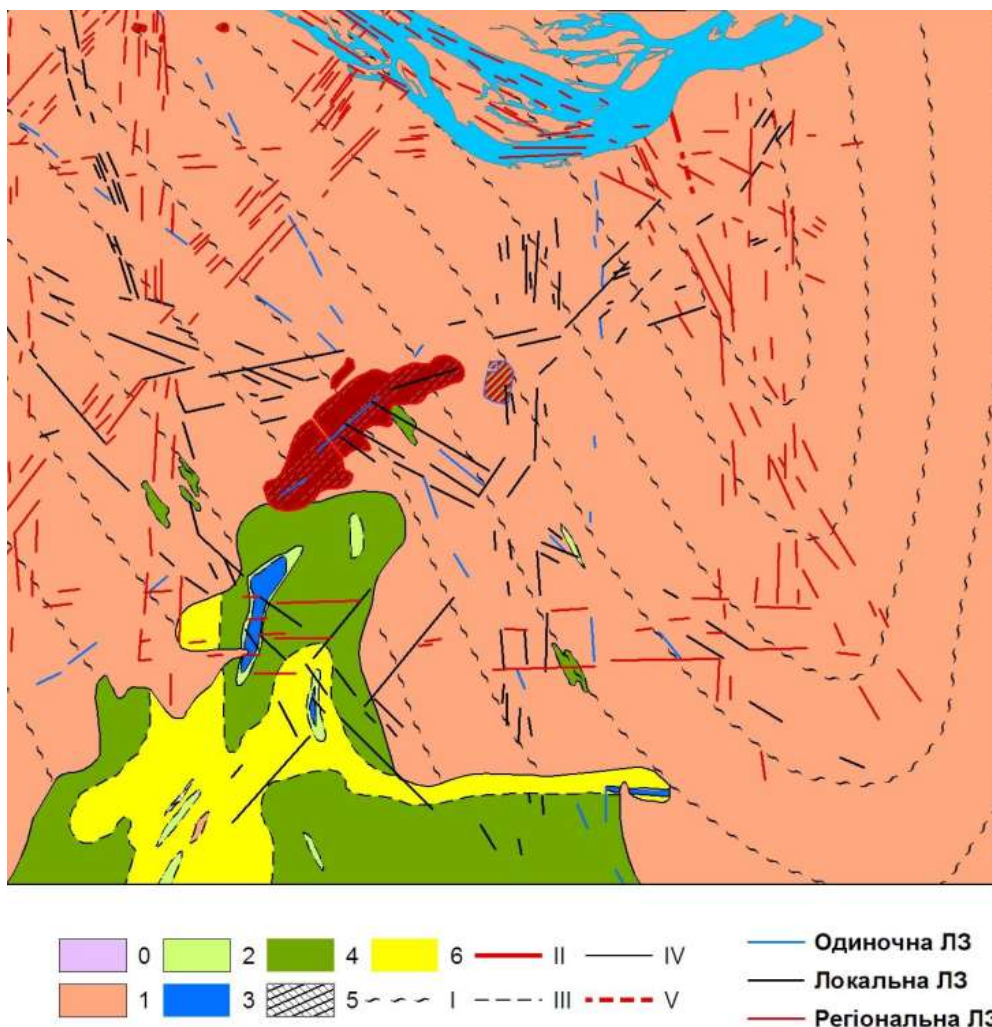


Рисунок 3.37 – Діаграма тріщинуватості дамби хвостосховища «Сухачівське» [150]

Отримані результати співпадають з матеріалами [144, 145], в яких за побудованими картами активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур та сумарних амплітуд вертикальних рухів земної поверхні у четвертинному періоді масштабу 1:25000 виділяються в районі хвостосховища «Сухачівське» лінеаментні зони проміжної діагональної системи 74-80 $\perp$ 345-350°; домінуючої ортогональної системи 0 $\perp$ 90 (± 5)°; проміжної діагональної системи 25-300 $\perp$ 295-300° (рис. 3.38).



1 – плагіограніти та мігматити, 2 – сланці талькові актиметові хлоритові;
 3 – серпентиніти; 4 – епідіабази, амфіболіти і сланці похідні амфіболітів;
 5 – залізисті кварцити; 6 – сланці кварцево-хлоритові, серецито-хлоритові

Рисунок 3.38 – Геолого-петрографічна карта кристалічних порід докембрію в масштабі 1:50 000 та співставлення її з виявленими активними на новітньому етапі розвитку лінійними структурами (складено автором з використанням фондових матеріалів [144])

Хвостосховище «Сухачівське» розташовано у вузлі перетину трьох лінеаментних зон – проміжної діагональної системи $74-80 \perp 345-350^\circ$; домінуючої ортогональної системи $0 \perp 90 (\pm 5)^\circ$; проміжної діагональної системи $25-300 \perp 295-300^\circ$ [144, 145]. На рис. 3.30-3.32 наведені червоними і синіми стрілками напрями руху розчинів з ставка-накопичувача атмосферних опадів. Напрями руху співпадають з азимутами простягання діагональних тріщин ($71-80^\circ (\pm 5^\circ)$), визначених за даними ПЕМПЗ. Таким чином і на хвостосховищі «Сухачівське» встановлюється тектонічний фактор [143, 150].

3.3 Техногенна безпека експлуатації активного (діючого) хвостосховища Вільногірського гірничо-металургійного комбінату у балці Скажена

3.3.1 Загальні відомості про хвостосховище Вільногірського гірничо-металургійного комбінату у балці Скажена.

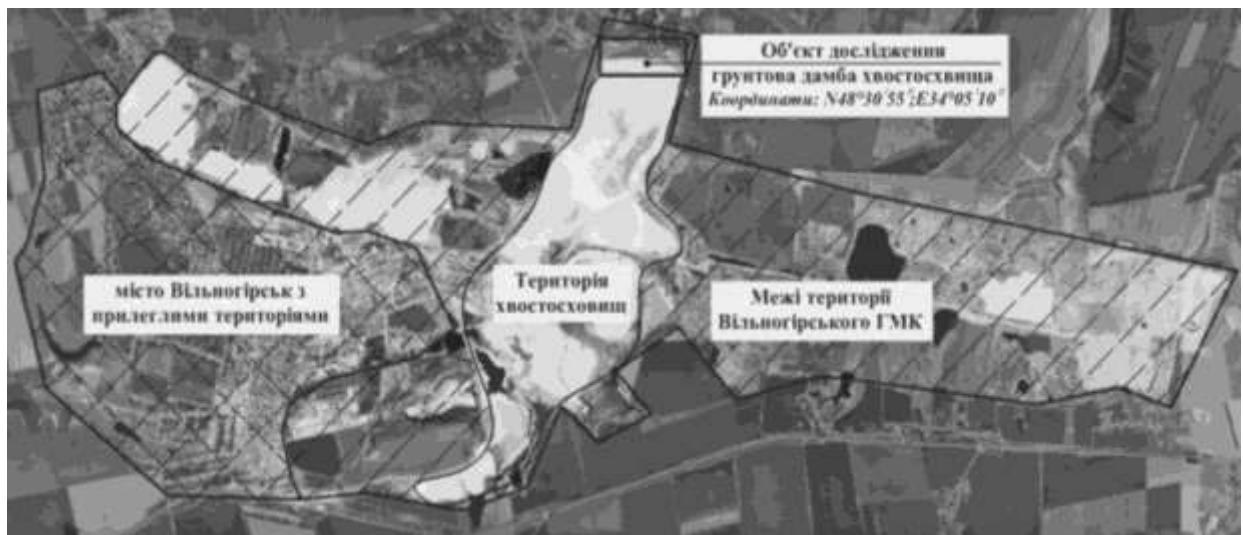
Третім об'єктом, який досліджувався, є діюче хвостосховище Вільногірського ГМК у балці Скажена.

Грунтова огорожувальна дамба хвостосховища у балці Скажена Вільногірського ГМК (рис. 3.39) утримує близько 55 млн³ відходів збагачення ільменіт-рутил-цирконових пісків. В тілі гідротехнічної споруди розташована закладна контрольно-вимірювальна апаратура, що дозволяє вести постійний моніторинг експлуатаційним штатом працівників за рівнями депресійної кривої, виконувати маркшейдерський нагляд за деформаційними процесами та контролювати технічний стан, надійність і безпеку експлуатації [151, 152].

За даними [153] хвостосховище ВГМК в б. Скажена побудовано і введено в експлуатацію у 1987 р поблизу с. Вільні Хутори. Тип хвостосховища – наливне. Тип греблі – глуха ґрунтова, насипна із суглинку, яка має клас наслідків (відповідальності) відповідно до [154] – СС3.

Низовий укос закріплений посівом багаторічних трав з улаштуванням схилового дренажу. Верховий укіс закріплений кам'яним накидом товщиною $h=0,6$ м. На гребені греблі прокладені дві нитки напірних пульпопроводів діаметром 600 мм з випусками в сторону хвостосховища. У трьох створах контрольно-вимірювальної апаратури облаштовано 12 п'єзометрів для визначення рівнів депресійної кривої.

За результатами геодезичних спостережень відділом маркшейдерії ВГМК значних деформацій тіла греблі не виявлено. Тимчасові промоїни на укосах греблі, що утворюються дощовими і талими водами, ремонтують шляхом заповнення гірничою масою або суглинком з ущільненням (рис. 3.39) [152].



A



B

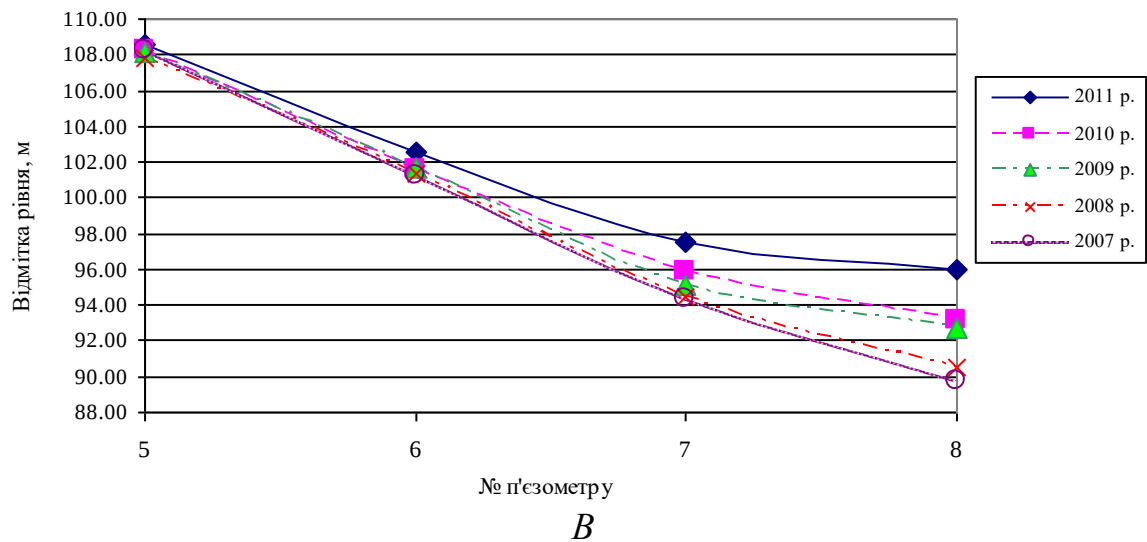


Рисунок 3.39 – Оглядова карта розташування об'єкту досліджень (А), конструктивні параметри ґрунтової дамби хвостосховища (Б) та рівні фільтраційних вод в тілі ГТС (центрального створу) у різні роки спостережень (В) [152]

Цікавість представляють спостереження за депресійними кривими в тілі споруди за період з 2007-2011 рр. За даними спостережень по п'єзометрах побудовані депресійні криві. Найбільш інформативними є криві отримані з п'єзометрів розташованих у створі II-II (центральный створ), де відбувається достатньо інтенсивний процес фільтрації води (рис. 3.39-В).

Аналізуючи дані розподілу рівня фільтрації води в тілі ГТС за місяцями і роками спостережень, відмічається тенденція до підвищення. В деякі місяці рівень коливається від 90 м до 96 м. Максимальна різниця сягає 6 м, що пов'язано з нарощуванням гребеня греблі і підвищенням рівня води у верхньому б'єфі. За рахунок збільшення градієнтів напору під час фільтрації відбувається водонасичення ґрунтів тіла ГТС у нижньому б'єфі. Відмічається тенденція підвищення рівня фільтраційного потоку в тілі ГТС, а значне обводнення та зміна форми ліній гідроізогіпс свідчать про потенційну небезпеку експлуатації ГТС [153].

Тому, під час експлуатації постала необхідність забезпечити стійкість низового укосу шляхом привантаження греблі гірничою масою. Збільшення ваги споруди та зміна контуру укосу проводяться з метою протидії зсувним силам і підвищення фільтраційної стійкості ґрунтів гідротехнічної споруди.

3.3.2 Оцінка технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища Вільногірського ГМК у балці Скажена.

Візуальний огляд дамби показав широкий розвиток на її схилах зсувів, процесів лінійного змиву і замочування тіла дамби (рис. 3.40, 3.41). Найбільш активно ці явища проявилися на верхніх терасах (уступах), тому дослідження методом ПЕМПЗ були зосереджені на терасі 133 м, 130 м і 127 м [151, 152]. На горизонтальному майданчику тераси через 5 м розбивалися профілі, а на них через 2,4-2,7 м – точки спостереження. Кількість профілів залежала від ширини тераси і склала: на терасі 133 м – 2 профілі; на терасі 130 м – 3 профілі; на терасі 127 м – 4 профілі. Розташування профілів і точок спостережень на них показано в Додатку Б.14.

Прив'язка кінців профілів на місцевості здійснювалася за допомогою GPS Garmin-72 в прямокутних метричних координатах, ним же фіксувалися точки зміни

напрямку простягання дамби і особливо характерні ділянки прояву геологічних процесів. Прив'язка профілів до схеми (плану) «Балка Скажена» масштабу 1:1000, наданої Вільногорським ГМК, здійснювалася за положенням п'єзометричних свердловин ПМ-1 і ПМ-9, а також координатною сіткою, перенесеною з плану «Балка Скажена» на карти-схеми ПЕМПЗ [152].



Рисунок 3.40 – Розвиток очеретяної рослинності на болоті, з якого витікає вода. Дамба «Балка Скажена», тераса 127 м [151, 152]



Рисунок 3.41 – Промоїни на схилах терас дамби хвостосховища ВГМК у балці «Скажена» [152]

Вимірювання кількості імпульсів ПЕМПЗ на точці спостереження проводилися за трьома антенами. Одна з них була орієнтована вздовж дамби, інша – поперек, третя – вертикально вниз. За всіма трьома антенами побудовані карти-схеми щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ у масштабі 1:1000 (рис. 3.42-3.43). За результатами інтерпретації складена результуюча схема, на яку винесені зони розвитку небезпечних інженерно-геологічних процесів (рис. 3.44) [151, 152].

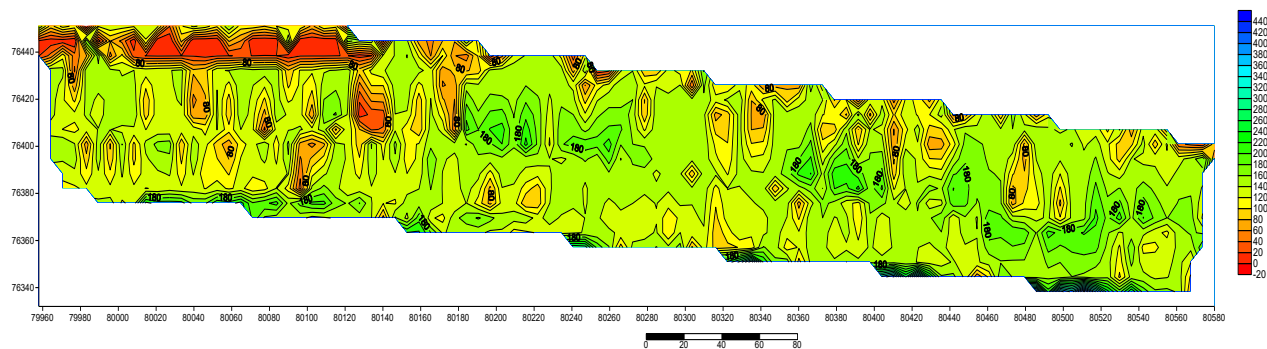


Рисунок 3.42 – Карта-схема щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ по антені, орієнтованій уздовж дамби [152]. Кольорова шкала характеризує щільність потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ, імп./с. Підписи осей абсцис і ординат – відстані в метрах

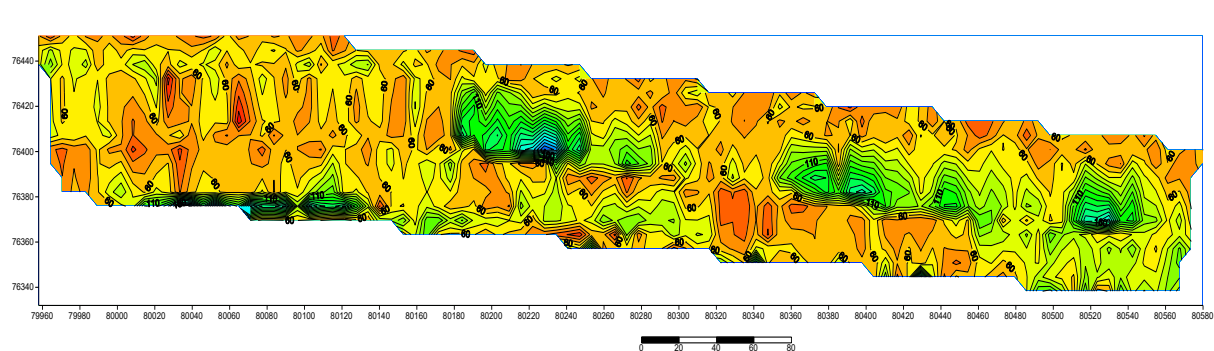


Рисунок 3.43 – Карта-схема щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ по антені, орієнтованій поперек дамби [152]. Кольорова шкала характеризує щільність потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ, імп./с. Підписи осей абсцис і ординат – відстані в метрах

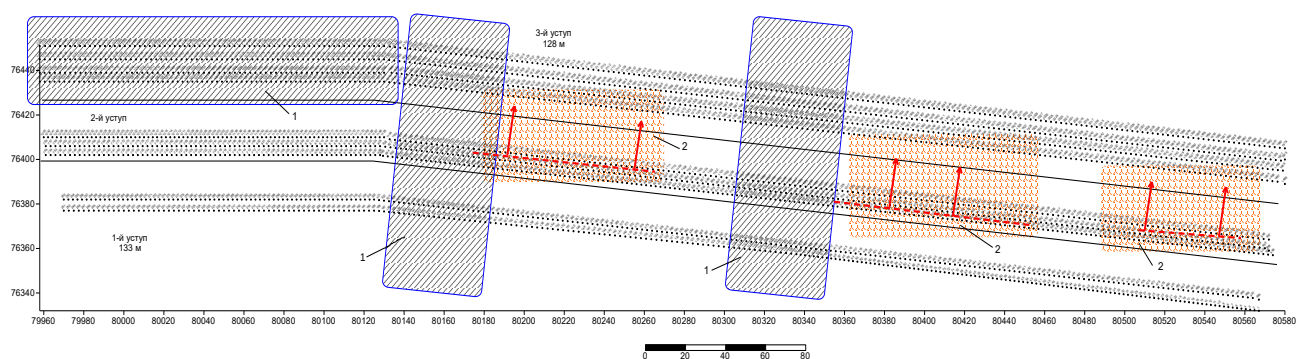


Рисунок 3.44 – Карта-схема результатів інтерпретації даних геофізичних досліджень [152]. Синя лінійна штриховка (1) – зони обводнення і підвищеної фільтрації в тілі ГТС; червона штриховка (2) – тіла формування зсувів; червоні стрілки – імовірні площини відриву зсувів і напрямок сповзання, Підписи по осям абсцис і ординат – відстані в метрах

Розглянемо карту-схему щільності потоку ПЕМПЗ, отриману за даними антени, орієнтованої паралельно дамбі (рис. 3.42). Тут добре видно, що щільність потоку імпульсів ПЕМПЗ в цілому для дамби невисока, на рівні низьких і середніх значень. Це може бути свідченням значної обводненості всього тіла дамби. Разом з тим, виділяються ділянки з підвищеними значеннями щільності потоку імпульсів (по осі абсцис): 80180-80250 м, 80360-80420 м, 80510-80550 м. Вони знаходяться в оточенні малих значень щільності потоку імпульсів. Інтерпретувати цю ситуацію можна таким чином: в даному місці виникають локальні деформації тіла дамби, які з урахуванням загальної ситуації викликані розтягуючими напруженнями і є ознаками формування зсуву. Іншими словами, виниклі напруження спрямовані на формування зони відриву ділянки дамби з подальшим її сповзанням [152].

Розділені зсувонебезпечні ділянки зонами з низькими значеннями щільності потоку імпульсів, що свідчить про формування тут зони підвищеної фільтрації води через тіло дамби. Особливо чітко це підкреслюється наявністю болота з очеретяною рослинністю і зоною стоку води на терасі 127 м (рис. 3.40) [151, 152].

Подібна картина, тільки менш контрастна, простежується і на карті для антени, орієнтованої поперек дамби (рис. 3.43).

3.3.3 Екологічні ризики експлуатації хвостосховища ВГМК в балці Скажена.

Першим фактором впливу на зниження екологічної безпеки хвостосховища ВГМК в балці Скажена є прояви сейсмічної активності, так як ця територія відноситься до районів зі значенням фонові сейсмічної активності за рівнем А і В – 5 балів, за рівнем С – 6 балів (Додатки Б.11, Б.12). Враховуючи значну обводненість дамби та формування зсувонебезпечних ділянок, навіть незначні поштовхи при землетрусах 5-6 балів можуть призвести до руйнування дамби.

Другий фактор пов'язаний з лінійною ерозією дамби, яка виникає під час злив. Її прояви візуально простежуються на терасах дамби. На схилах терас дамби спостерігаються промоїни, викликані атмосферними опадами. Їх розміри різні, але практично на всіх утворюється вершинний перепад, з якого вода робить «стрибок»

і інтенсивно розмиває дно. Оскільки руйнуються породи привантажувальної гірської маси, то при досягненні підстилаючих суглинків і їх насиченні водою можливий розвиток ярів і сповзання гірської маси по схилу [152].

Вивчення архівних матеріалів Вольногорського ГМК дозволяє зробити наступний висновок [152-153]. З часу будівництва дамби в балці Скажена в тілі греблі сформувалися два техногенних водоносних горизонта. Перший нижній водоносний горизонт в пісках перекривається суглинками, глинами і лесами і має безпосередній зв'язок з ґрунтовими і безнапірними водоносними горизонтами в бортових частинах балки. За даними п'єзометрів рівень цього водоносного горизонту піднімається в середньому на 0,7-1 м на рік. Максимальні коливання рівня спостерігалися в 2010 році, а в 2011 році всі п'єзометри фіксують мінімальну глибину техногенного горизонту. Найбільш значні зміни рівня фіксуються п'єзометрами в нижньому б'єфі.

Другий верхній техногенний водоносний горизонт сформувався в насипному шарі гірської маси, водотривом якого стали суглинки, глини, леси – початковий склад тіла греблі. В окремих місцях на терасі 127 м води виходять на поверхню, про що свідчать зони заболочування. Мабуть, в центральній частині, де відсутній шар суглинків, ці два водоносні горизонти злилися і утворили єдиний техногенний водоносний горизонт. Формуванню цього горизонту в центрі дамби сприяє ряд факторів. Перший фактор – будова дамби, де в центральній частині спостерігається незначне просідання поверхні, що сприяє руху води від бічних частин («плечей дамби») до центру, а також від верхнього б'єфу до нижнього. Другий фактор полягає в привантаженні гірською масою нижніх терас, вода з яких витісняється до верхніх терас. Третій фактор – ливневі дощі, які останнім часом проявляються навесні і влітку в зв'язку зі змінами клімату. Третій фактор пов'язаний або з відсутністю дренажних систем або з їх неналежним станом.

Розвиток водоносних горизонтів, збільшення їх потужності призводить до обводнення лесів і суглинків, які при насиченні водою збільшують масу і набувають повзучості. Все це сприяє формуванню тут зсувів. Додатковий вплив чинить бічний тиск обводнених піщаних мас з боку шламосховища.

Четвертим фактором є тектонічний (табл. 3.3, рис. 3.45-3.46) [142]. Дамба практично повністю обводнена, а тому тріщини, виділені по всій її довжині.

Таблиця 3.3 – Азимути простягання тріщин на обводнених ділянках дамби хвостосховища ВГМК у балці Скажена

Номер групи тріщин	Інтервал азимутів простягання, град	Кількість тріщин відповідного азимуту	Відносна частота зустрічі, %
1	20-29	2	4,7
2	30-39	1	2,3
3	80-89	12	27,9
4	270-279	3	6,9
5	320-329	2	4,7
6	330-339	6	14
7	340-349	3	6,9
8	350-359	14	32,6
Всього		43	100

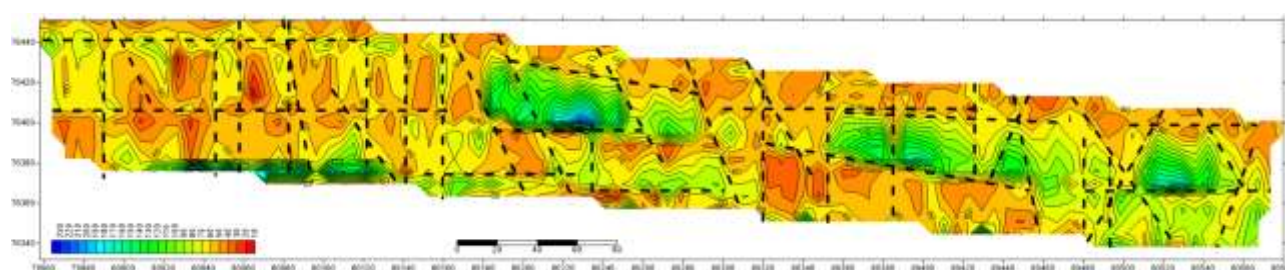


Рисунок 3.45 – Приклад виділення тріщин (чорний пунктир) на карті щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ на дамбі хвостосховища ВГМК в балці Скажена. Кольорові шкали характеризують щільність потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ, імп./0,5 с. Система координат метрична [152]

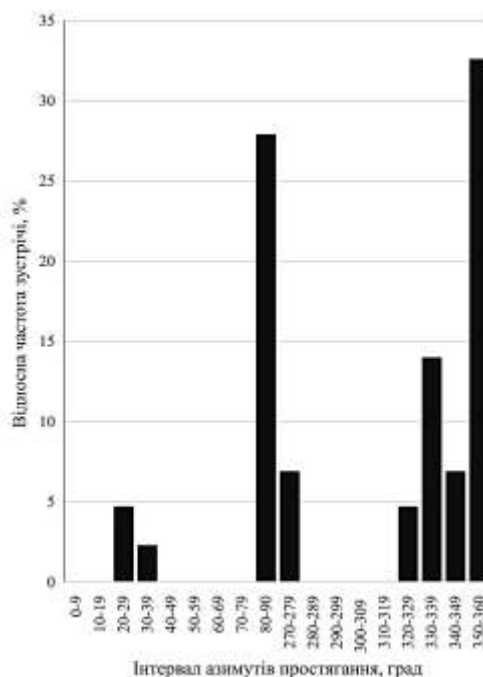


Рисунок 3.46 – Діаграма тріщинуватості дамби хвостосховища ВГМК у балці Скажена

Аналіз діаграми тріщинуватості показує, що основними азимутами простягання є субмеридіональні, субширотні та діагональні ($350-359^\circ \pm 5^\circ$; $80-89^\circ \pm 5^\circ$; $330-339^\circ \pm 5^\circ$). На рис. 3.47 наведений фрагмент геологічної карти домезозойських утворень аркушу М-36-XXXV (Дніпродзержинськ) [155], на якому винесено розташування хвостосховищ Вільногірського ГМК у б. Скажена, «Дніпровське» та «Сухачівське». Оскільки цей рисунок покликаний проілюструвати положення хвостосховищ в розломній структурі території, то усі геологічні та супутні умовні позначення не розшифровуються; вони стандартні і з ними можна ознайомитися у першоджерелі [155] у розділі «Графічні додатки».

Тріщини, виділені на діаграмі тріщинуватості, практично повністю співпадають за азимутами простягання з напрямками розломних структур на карті. Таким чином і на хвостосховищі ВГМК у балці Скажена підтверджується тектонічний фактор впливу на зниження екологічної безпеки цього об'єкту.

Звертає увагу ще один факт. Субмеридіональний напрямок відповідає напрямку руху транспорту на дамбі, подібне явище спостерігалось і на дамбі хвостосховища «Сухачівське» (рис. 3.31-3.32).

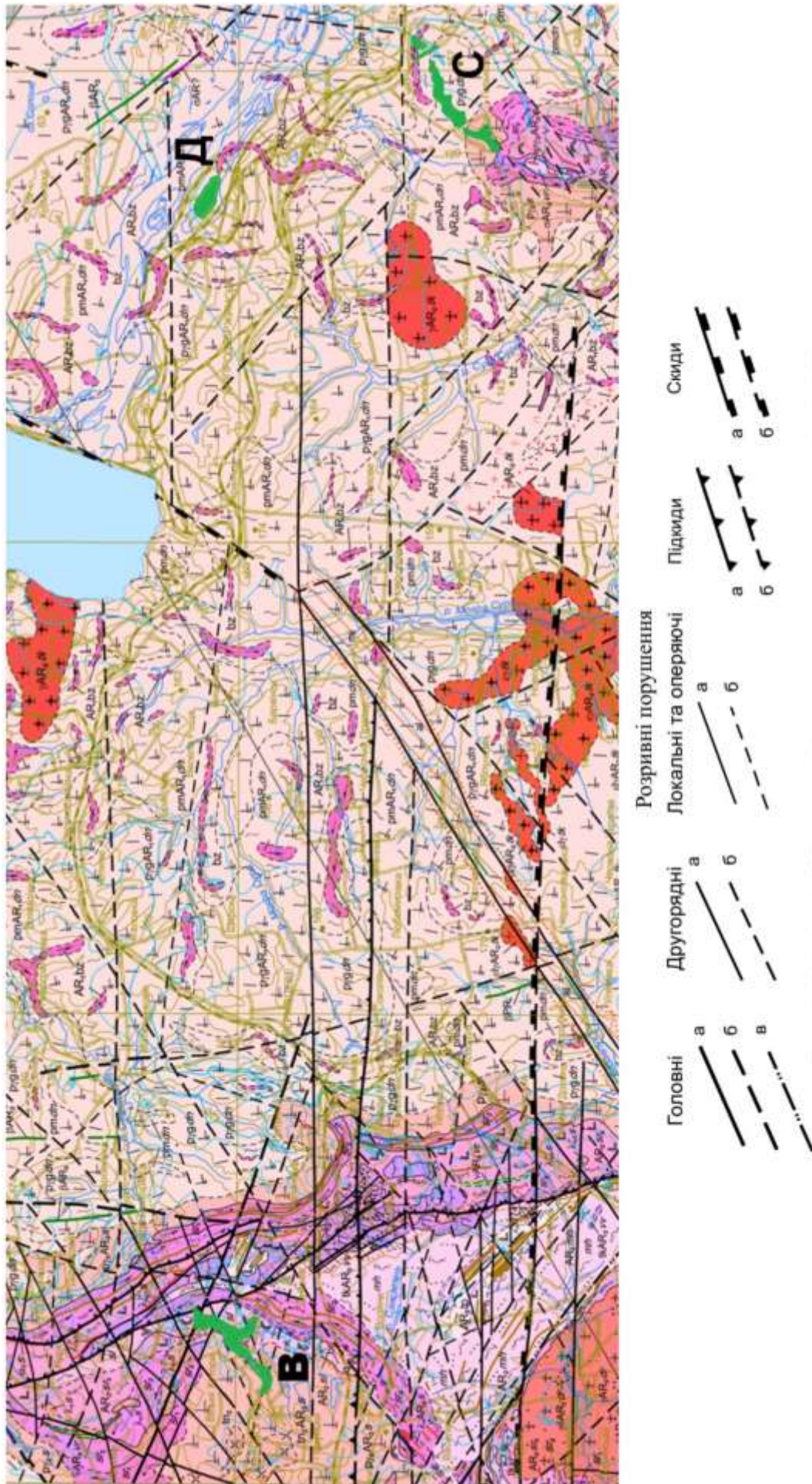


Рисунок 3.47 – Фрагмент геологічної карти домезозойських утворень території розташування хвостосховищ (зелений колір) Вільногірського ГМК у б. Скажена (В), «Дніпровське» (Д) та «Сухачівське» (С) (за матеріалами [155])

Перпендикулярно до руху транспорту на хвостосховищі «Сухачівське» спостерігалися напрямки фільтрації води крізь тіло дамби, а на хвостосховищі ВГМК – імовірні напрямки сповзання зсувів.

Як правило, лінеamenti, що активувались на новітньому етапі розвитку лінійних структур, просторово тяжіють, до розломів, що формувались в докембрії, що показано для хвостосховища ВГМК (рис. 3.47).

Сумісний аналіз діаграми тріщинуватості (рис. 3.25), карти активних на новітньому етапі розвитку лінійних структур в межах території розташування хвостосховища «Дніпровське» (рис. 3.26) і тектонічної схеми (рис. 3.47) показав наступне. Найбільш яскраво на всіх рисунках і діаграмі проявлені субширотна, субмеридіональна і діагональна системи ($40-50^\circ$ та $310-320^\circ \pm 5^\circ$), що свідчить про успадкованість розвитку тектонічних структур від докембрію до неогену.

Схожа ситуація спостерігається і на інших двох хвостосховищах. Так, у верхів'ях хвостосховища «Сухачівське» на діаграмах і картах зафіксовано розломи (тріщини, лінеamenti) меридіонального ($350-360^\circ \pm 5^\circ$), субширотного ($70-80^\circ \pm 5^\circ$) і діагонального напрямків ($330-340^\circ \pm 5^\circ$). Найбільш чітко в порівнянні з хвостосховищем «Сухачівське» проявлені тектонічні особливості в районі розташування хвостосховища ВГМК в балці Скажена. Тут найбільш характерні азимути простягання тріщин в зонах обводнення і фільтрації субмеридіональні ($350-359^\circ \pm 5^\circ$), субширотні ($80-89^\circ \pm 5^\circ$) і діагональні ($330-339^\circ \pm 5^\circ$), ці ж напрямки чітко простежуються на тектонічних схемах.

Таким чином на всіх трьох хвостосховищах підтверджується закономірна просторова приуроченість тріщин в зонах обводнення та лінеаментних зон, виявлених Юськів Ю.В. [144], до докембрійських розломів, що свідчить про успадкований розвиток тектонічних структур. За даними Юськів Ю.В. [144] по цим лінеаментним зонам відбувається забруднення підземних і поверхневих вод, у випадку з хвостосховищами «Дніпровське» і «Сухачівське» радіоактивними відходами. На хвостосховищі ВГМК у балці Скажена на прилеглі території фільтруються розчини збагачені важкими металами, забруднюючи ґрунти, поверхневі і підземні води.

3.4 Індекс небезпеки та екологічний ризик хвостосховищ

Індекс небезпеки хвостосховищ (ІНХ, англ. ТНІ) враховує такі параметри, які були визначені як найважливіші для цих об'єктів [30, 163, 193-195]:

- загальна ємність хвостосховища,
- токсичність речовин у хвостових матеріалах, що зберігаються,
- статус хвостосховища стосовно його управління,
- природні умови, характерні для ділянки хвостосховища,
- параметри безпеки дамби.

Відповідно до вищезазначених параметрів розрахунок ТНІ включає п'ять кроків. У випадку, якщо значення деяких параметрів недоступні або їх неможливо визначити, потрібно використовувати значення, які відповідають найгіршому сценарію. Таким чином, вважається, що небезпека, пов'язана з недоступним параметром хвостосховища, наприклад, токсичність, буде найвищою.

Ємність хвостосховищ. Ємність хвостосховищ $ТНІ_{\text{Сар}}$ пов'язана з об'ємом хвостів, що зберігаються у сховищі. Припускається, що параметр зростає зі збільшенням об'єму за логарифмічним співвідношенням з основою 10. Таким чином, збільшення об'єму хвостосховищ у 10 разів (на порядок) збільшить індекс на 1. Параметр розраховується за формулою:

$$ТНІ_{\text{Сар}} = \text{Log}_{10} (V_t), \quad (3.1)$$

де V_t – загальний об'єм хвостових матеріалів у хвостосховищі, м³.

Токсичність хвостових матеріалів $ТНІ_{\text{Тох}}$ оцінюється на основі класу небезпеки для води (WHC) відповідно до німецької національної класифікації [156]. Для інтегрованої характеристики токсичності вкрай важливо мати параметр, який представляє всі потенційні загрози для водної екосистеми в короткостроковій і довгостроковій перспективі. WHC вважається перевіреною

методологією, яка об'єднує всі потенційні загрози для водних екосистем, включаючи гостру та хронічну токсичність, а також біонакопичення та накопичує небезпеки для різних організмів (риб, ракоподібних, бактерій). Наразі доступні дані приблизно для понад 9000 речовин. Крім того, можлива самокласифікація відповідно до Глобально гармонізованої системи класифікації та маркування хімічних речовин ООН. Табл. 3.4 показує класифікацію WHC та відповідний індекс токсичності.

Таблиця 3.4 – Оцінювання токсичності хвостових матеріалів за класом небезпеки для води

Клас небезпеки для води	ТНІ _{Тох}
Небезпека відсутня	0
Низька небезпека	1
Середня небезпека	2
Висока небезпека	3

Особлива проблема пов'язана з радіоактивними відходами, оскільки радіоактивність не включена в класифікацію WHC. Однак існує потреба врахувати це, оскільки багато хвостосховищ містять матеріали, отримані в результаті видобутку радіоактивних речовин. Тому пропонується застосовувати $\text{ТНІ}_{\text{Тох}} = 4$, якщо у хвостосховищах зберігаються радіоактивні речовини і їх радіоактивність перевищує подвоєне значення локальної фонові радіоактивності.

Умови управління ($\text{ТНІ}_{\text{Ман}}$) характеризують статус хвостосховища, який визначається з чотирьох можливих варіантів (табл. 3.5). Статистика аварій на хвостосховищах показує, що закриті та відновлені об'єкти безпечніші з точки зору частоти аварій. На цих хвостосховищах зафіксовано значно менше аварій. Тому вважається, що параметр, пов'язаний з управлінням, має менші значення для закритих або рекультивованих споруд порівняно з активними. Оскільки на закритих хвостосховищах можуть бути відсутні необхідні заходи безпеки, їхній потенціал небезпеки може бути вищим, ніж у повністю рекультивованих. З іншого боку, покинуті або безхазяйні хвостосховища можуть мати принаймні

такий самий потенціал небезпеки, як і активні через відсутність експлуатації, управління та контролю. Таким чином, а також через запобіжні аспекти потенціал небезпеки для покинутих об'єктів оцінюється тим самим значенням, що й активні об'єкти.

Таблиця 3.5 – Оцінювання умов управління хвостосховищем

Статус	ТНІ _{Man}
Рекультивоване	0
Закрите	1
Покинута (безхазяйне)	3
Активне	3

Природні умови (ТНІ_{Nat}) пов'язані з екологічними ризиками, які дуже часто виникають через аварії на хвостосховищах. Насамперед землетруси, сильні зливи та повені класифікувалися як основні природні причини аварій на хвостосховищах.

Відповідний потенціал небезпеки розраховується за формулою

$$\text{ТНІ}_{\text{Nat}} = \text{ТНІ}_{\text{Seism}} + \text{ТНІ}_{\text{Flood}}, \quad (3.2)$$

де: $\text{ТНІ}_{\text{Seism}}$ – індекс небезпеки для сейсмічної активності;

$\text{ТНІ}_{\text{Flood}}$ – індекс небезпеки для затоплення на основі геологічних і гідрологічних умов ділянки розташування хвостосховища.

Значення $\text{ТНІ}_{\text{Seism}}$ розраховується на основі даних про еталонне пікове прискорення землі (PGA), що відповідає визначеній еталонній ймовірності перевищення або еталонному періоду повернення [157]. Параметр пікового прискорення землі можна взяти з вільно доступних джерел даних, наприклад, [195]. Це дозволяє гармонізувати різні шкали національних класифікацій. Сейсмічна небезпека визначається як «Низька», якщо параметр PGA нижче або дорівнює 0,1, і «Помірна або висока», якщо він вище 0,1 (табл. 3.6).

Таблиця 3.6– Оцінювання сейсмічної небезпеки згідно EUROCODE 8 [157]

Відносне пікове прискорення ґрунту PGA	THI _{Seism}
$\leq 0,1$	0
$> 0,1$	1

Вплив повеней пов'язаний із зонами, схильними до повеней, через статистичний параметр HQ-500, який кількісно визначає частоту повеней із п'ятисотлітнім періодом повторення, тобто повеней з ймовірністю 1 раз на 500 років. Небезпека, обумовлена паводком у зоні розміщення хвостосховища, визначається відповідно до табл. 3.7. Схильні до затоплення території відповідно до значень HQ-500 можна отримати з відкритих джерел, наприклад, [158].

Таблиця 3.7– Оцінювання небезпеки через повені [30]

Розміщення хвостосховища	THI _{Flood}
У зоні, що потрапляє до HQ-500	1
У зоні поза межами HQ-500	0

Стійкість дамби є, мабуть, найбільш критичним параметром при оцінювання небезпеки. Параметр «Умови дамби» (THI_{Dam}) вважається пов'язаним з проєктним параметром греблі «Коефіцієнт безпеки» (Factor of Safety = FoS), який має бути розрахований вже на етапі проєктування хвостосховища, і він стосується стабільності схилу греблі [159-161]. Термін FoS зазвичай використовується для вираження запасу стійкості схилів на дамбах. Вплив цього параметра на потенціал небезпеки для хвостосховищ оцінюється відповідно до табл. 3.8, на основі [162].

Таблиця 3.8– Оцінювання безпеки дамб за коефіцієнтом стійкості FoS [30]

коефіцієнт стійкості	THI _{Dam}
> 1.5	0
$\leq 1,5$ (або якщо невідомо)	1

Загальний індекс небезпеки THI розраховується з урахуванням всіх критичних параметрів, які впливають на (не)безпеку хвостосховища: об'єм

хвостів, токсичність речовин, що містяться у відходах, небезпеку, пов'язану з управлінням об'єктом, специфічні природні (геологічні та гідрологічні) умови на майданчику хвостосховища та стійкість дамби:

$$TNI = TNI_{Cap} + TNI_{Tox} + TNI_{Man} + TNI_{Nat} + TNI_{Dam} \quad (3.3)$$

TNI слід розуміти в логарифмічній шкалі, тобто збільшення значення TNI на одиницю вказує на 10-разове підвищення ризику. Розраховані індекс небезпеки TNI за даними Розділу 3 наведені в табл. 3.9

Таблиця 3.9 – Загальний індекс небезпеки TNI хвостосховищ

Назва хвостосховища	Обсяг хвостів, млн м ³	TNI _{Cap}	TNI _{Tox}	TNI _{Man}	TNI _{Seism}	TNI _{Flood}	TNI _{Dam}	TNI
Дніпровське	5,8	6,18	4	1	1	1	0	13,18
Сухачівське	19	7,28	4	1	1	0	1	14,28
ВГМК у б. Скажена	55	7,74	1	3	1	0	1	13,74

Запропонований індекс TNI надає простий інструмент для приблизної оцінки небезпеки аварій при порівнянні кількох хвостосховищ у певному регіоні. На національному чи субрегіональному рівнях можна використовувати більш детальні інструменти оцінювання.

Розроблена методологія TNI в першу чергу призначена для оцінки рівня небезпеки хвостосховищ і визначення пріоритетності небезпечних гарячих точок. Жодних кількісно визначених ризиків для конкретних територій нижче за течією об'єктів неможливо визначити шляхом застосування TNI, оскільки він не враховує потенційний прямий вплив на людей або навколишнє середовище [30].

Обґрунтування уведення ризику небезпеки. Однак у разі детального планування землекористування, яке має виконуватися в рамках проєктування та ліцензування хвостосховища, необхідно враховувати потенційні ризики для людей та навколишнього середовища [30].

Хвостосховища створюють значні ризики для життя людей, навколишнього середовища та об'єктів господарства, які розташовані нижче за течією, потенційні небезпеки слід враховувати вже під час ліцензування. У зв'язку з цим врахування населення та навколишнього середовища, що перебувають під потенційною загрозою поблизу хвостосховищ є одним із пріоритетних завдань землеустрою з метою мінімізації збитків у разі аварії [30, 163].

Ризик лиха виникає через складну взаємодію між процесами розвитку, які визначають умови впливу, вразливості та небезпеки. Таким чином, ризик лиха розглядається як сукупність тяжкості та частоти небезпеки, кількості людей та об'єктів господарювання, які піддаються небезпеці, та їхньої вразливості до збитків.

Показник ТНІ не враховує важливі критерії землекористування, такі як відстань до водойм і населених пунктів нижче за течією, а також ландшафт території. Отже, можуть існувати значні відмінності щодо ризику аварій між хвостосховищами з однаковим ТНІ, але розташованими в різних зонах.

Існують різні офіційні визначення планування землекористування, але всі вони мають спільне розуміння, що воно визначається як процес, у якому земля виділяється та регулюється для різних соціальних та економічних видів діяльності, таких як сільське господарство, промисловість, відпочинок, житло та торгівля. Для того, щоб керувати відповідним розміщенням діяльності та запобігати конфліктам землекористування, рішення щодо планування землекористування повинні враховувати всі джерела ризику, як природного, так і антропогенного характеру, які включають потенційні загрози для здоров'я людини, власності та навколишнього середовища, що виникають на небезпечних об'єктах, деякі з яких відносяться до хвостосховищ [30].

Оцінка ризиків та їх картування є важливою частиною планування землекористування для хвостосховищ. Крім того, оцінки ризиків також мають очевидні переваги для окремих країн, щоб спрямувати свої обмежені фінансові та кадрові ресурси на хвостосховища відповідно до рівня ризику. Таким чином, Індекс ризику хвостосховищ (Tailings Risk Index = TRI) був розроблений для оцінки ризиків потенційних аварій на населення та водні об'єкти [30].

Показник TRI використовується для:

- надання попереднього узагальненого півкількісного огляду різних ризиків на великій території (наприклад, транскордонні річкові басейни чи декілька країн) або визначити хвостосховища на національному рівні з найбільшим ризиком;
- визначення пріоритетів різних типів ризику для навколишнього середовища та населення.

Для оцінки ризику від хвостосховища в першу чергу враховується населення та водойми в околицях нижче за течією від дамби. Надалі TRI може визначатися з урахуванням різних потенційно постраждалих зон нижче за течією для населення та навколишнього середовища.

За аналізом аварій на хвостосховищах [30], типова довжина скиду хвостів у польових умовах (до досягнення поверхневих вод) становить до 10 км від аварійних хвостосховищ. Таким чином, зона з радіусом 10 км розглядається як зона потенційного ризику для методології TRI.

Збір і обробка даних складається з наступних кроків [30, 163]:

1. Визначення кругової зони (зони ризику) навколо хвостосховища із заданим радіусом, який представляє потенційну відстань поширення ймовірного ефекту аварії нижче за течією (рельєфом) від хвостосховища до 10 км.

2. Визначення населених пунктів та водойм, розташованих нижче за течією (рельєфом) та всередині зони потенційного ризику, які можуть бути вражені в разі аварії хвостосховища. Населені пункти та водойми, розташовані нижче за течією, можна ідентифікувати за допомогою методів ГІС, наприклад, визначення маршрутів течії за топографічною картою при спільному розгляді карти землекористування. Без використання ГІС оцінку зони ризику та населених пунктів/водойм нижче за течією (рельєфом) можна зробити шляхом візуального огляду будь-яких доступних цифрових чи паперових карт (наприклад, супутникових карт, рельєфу місцевості).

3. Отримання даних про чисельність населення та підсумовування чисельності населених пунктів нижче за течією (рельєфом) для зони потенційного ризику.

4. Отримання даних про середню швидкість стоку/площі водної поверхні найближчого водотоку/озера нижче за течією в зоні потенційного ризику.

Індекс ризику хвостосховищ спочатку оцінює потенційний прямий вплив на населення та навколишнє середовище шляхом розрахунку значень індексу незахищеності (Tailings Exposure Index = TEI). Потім TEI поєднується з THI, в результаті чого отримуємо TRI [30].

Параметр TEI_{Pop} враховує населення нижче за течією (рельєфом), яке знаходиться на відстані до 10 км від хвостосховища згідно до табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Індекс незахищеності населення у 10-км зоні [30]

Кількість населення	TEI_{Pop}
< 100	2
100 – 1000	3
1000 – 10000	4
10000 – 100000	5
≥ 100000	6

Параметр TEI_{Env} враховує величину найближчої до хвостосховища водойми, яка розташована нижче за течією в межах 10 км зони і може бути забруднена аварією на даному об'єкті. Коефіцієнт TEI_{Env} визначається на основі середнього значення річкового стоку або площі поверхні озера, наведеної в табл. 3.11. Класифікація розміру річок відноситься до схеми ICPDR, яка використовується для системи попередження про надзвичайні ситуації на Дунаї [161]. З прагматичних міркувань замість математичного рівняння (наприклад, логарифмічної функції середньої витрати річки) встановлюється проста класифікація, оскільки точні дані про потік/площу водної поверхні дуже часто недоступні.

Таблиця 3.11 – Незахищеність довкілля (водних об'єктів) [30].

Потік (витрата) води, m^3/s або площа озера (km^2)	TEI_{Env}
< 100	2
100 - 1000	3
> 1000	4

Загальний TEI розраховується за формулою:

$$TEI = TEI_{Pop} + TEI_{Env} \quad (3.4)$$

Найбільший індекс ризику згідно формули 3.4 і табл. 3.10-3.11 має хвостосховище «Дніпровське – 10, оскільки воно знаходиться в межах м. Кам'янське, в заплаві р. Дніпро, де нижче за течією розташовано місто Карнаухівка, а далі м. Дніпро. Індекс ризику збільшується за рахунок складу хвостів. Під час бойових дій руйнування огорожувальної дамби може привести до потрапляння радіоактивних відходів у р. Коноплянка, а потім і у р. Дніпро або безпосередньо у р. Дніпро при виводі з ладу північної частини дамби хвостосховища. Менший індекс небезпеки притаманний хвостосховищу «Сухачівське (TEI=8), яке розташовано далі від м. Кам'янське і р. Дніпро. Хвостосховище ВГМК у б. Скажена має TEI=7, так як воно знаходиться поряд з м. Вільногірськ з населенням від 10000 до 100000 чоловік, поблизу якого є три невеличких водосховища. Крім того треба відмітити безпечний склад хвостових матеріалів, заскладованих у хвостосховищі. Тут ризик небезпеки для населення міста виникає тільки при руйнуванні дамби [163].

У разі необхідності більш детального дослідження показник TEI можна визначити для різних зон ризику. Наприклад, межі підзон можуть бути призначені на 1 та 5 км нижче за течією від хвостосховища, а загальні значення індексу незахищеності може бути підсумовано відповідно до цих зон (0-1, 1-5, 5-10 км). Крім того, значення TEI можна розрахувати точніше, виходячи з населення та швидкості потоку/площі поверхні озера [163].

Критичний аналіз індексів ризику та небезпеки хвостосховищ До позитивних результатів створення та використання цих показників слід віднести таке. До їх розробки фактично не існували системного підходу до небезпек та ризиків хвостосховищ. Уведені показники THI, TRI дозволяють оцінити небезпеку та ризик хвостосховищ у першому наближенні. Це дає можливість провести ранжування та картування даних об'єктів за їх небезпекою і ризиком, що є дуже цінним для екологічних аудиторів, відповідних міністерств, операторів хвостосховищ. Це стимулювало створення баз даних хвостосховищ

по різних регіонах і привернуло увагу до безпеки хвостосховищ на національному та міжнародному рівнях [30].

З іншого боку, запропоновані індекси недостатньою мірою пов'язані зі статистикою аварій на хвостосховищах, оскільки окремі складові розраховуються за суб'єктивно уведеними формулами. Зрозуміло, що поєднання небезпек/ризиків різного походження в одній формулі підсумовування є складним завданням, але створений підхід потребує удосконалення щодо більш точного визначення ваги окремих чинників як причин аварій. До того ж, часто аварії трапляються через сукупність причин, які потребують індивідуального аналізу. Також потребує удосконалення бальний підхід до окремих показників, зокрема, небезпеки від сейсмічних проявів, коли вводиться порогове значення PGA. Тоді $PGA = 0,999 \text{ м}^2/\text{с}$ класифікується як безпечне, а $PGA = 1,001 \text{ м}^2/\text{с}$ – як небезпечне [30, 163].

Запропонований індекс ризику не враховує такий важливий чинник впливу на населення як пиління хвостосховищ, особливо це стосується радіоактивних відходів. Цей чинник може бути достатньо вагомим на територіях з дефіцитом вологості, а значна частина хвостосховищ знаходиться саме у таких зонах (Австралія, Середня Азія, США, Чилі, Африка, південь та схід України тощо) [30, 163].

Слід зупинитися ще на ряді чинників, що виникли на території України в зв'язку зі збройними діями на її території. Розташування хвостосховищ у зоні збройного конфлікту зумовлює додаткові загрози через зовнішні чинники небезпеки військового характеру, які можуть спричинити розвиток будь-якого аварійного сценарію, притаманного дії чинників техногенного або природного характеру. До чинників техногенного характеру можна віднести: обстріли артилерійською зброєю та безпілотними літальними апаратами, мінування територій, будівництво укріпспоруд, несанкціонований доступ сторонніх осіб.

Для попередження аварійних ситуацій необхідно проводити розмінування та постійну підтримку безпеки територій промислових майданчиків підприємств задля здійснення регулярного контролю та спостережень за безпечним станом хвостосховищ, моніторингу навколишнього природного середовища та виконання поточних і термінових ремонтних робіт в процесі експлуатації об'єктів [163].

3.5 Екологічні ризики безпечної експлуатації гідротехнічних споруд цивільного призначення

В Україні станом на 2018 р. обліковується 5485,3 тис. га меліорованих, у тому числі 2178,3 тис. га зрошуваних і 3307,0 тис. га осушуваних земель з відповідною меліоративною інфраструктурою [40].

Дніпропетровський регіон належить до областей, де виробляється значна частина сільськогосподарської продукції України. В 2021 році в Дніпропетровській області нараховувалось 29 магістральних каналів загальною довжиною 194,4 км та 97 регулюючих басейнів.

Магістральні канали постачають воду не лише для цілей промисловості, а й живлять значні площі зрошуваних сільськогосподарських угідь. Тривалі терміни роботи та відсутність належних ремонтних доглядів призвели до низького сучасного рівня їх технічної експлуатації. Руйнування облицювального покриття призводить до значних непродуктивних фільтраційних втрат води із систем, що негативно впливає на екологічний стан прилеглих територій та підтоплення земель. У зв'язку зі значним погіршенням якості водних ресурсів додатковим чинником є екологічна небезпека вторинного засолення та осолонцювання ґрунтів. Дана ситуація змушує приділяти більше уваги питанням екологічної надійності роботи та підвищенню загального рівня функціонування подібних споруд [46, 103, 163 - 165, 166].

Найбільшу екологічну небезпеку зі всіх цивільних споруд сільськогосподарського призначення під час бойових дій являють собою магістральні канали зрошувальних систем та ґрунтові дамби на водосховищах та малих річках, які як правило знаходяться поблизу населених пунктів. Руйнація цих споруд може призвести до підтоплення населених пунктів, що розташовані поблизу них. Технічний стан і екологічна небезпека від руйнування гребель на малих річках детально розглянуто в роботі [167]. Тут зупинимося лише на технічному стані і зниженню екологічної безпеки магістральних каналів зрошувальних систем. тому що інші ГТС сільськогосподарського призначення, такі

як регулюючі басейни розташовані на полях, мають невеликі обсяги поливної води в порівнянні з магістральними каналами і в разі руйнування не несуть екологічної небезпеки для населених пунктів.

В Дніпропетровській області обстежено 10 регулюючих басейнів і 3 магістральних канали. Всі досліджені канали і регулюючі басейни зрошувальних систем (ЗС) знаходяться в різних геологічних і гідрогеологічних умовах [167]. Роботи з дослідження технічного стану цивільних ГТС виконувались у декілька етапів: 1 – візуальна діагностика, 2 – дослідження та встановлення зон фільтрації методом ПЕМПЗ, 3 – затвердження зон фільтрації і визначення глибини залягання ґрунтових вод методом ВЕЗ [67, 79-80, 85-86, 99, 101, 103, 108, 168].

Зйомка ПЕМПЗ проводилася в профільному варіанті по одному профілю вздовж правого та лівого бортів (за течією) каналу з відстанню між точками спостереження на профілі 3 м, на регулюючих басейнах у профільно-площадному варіанті за квадратною мережею між профілями 3м, між точками спостережень - 3 м. Дослідження ПЕМПЗ виконувалися за допомогою приладу МІЕМП-14/4 з одночасним використанням трьох антен, орієнтованих за азимутами північ-південь, захід-схід і вертикально вниз на відстані 15-20 см від поверхні землі. Польові роботи методом ВЕЗ проводилися у точковому варіанті на бортах каналів і регулюючих басейнів в межах виділених за даними ПЕМПЗ зон фільтрації води. Для фіксації даних ВЕЗ використовувалася апаратура ШЕРС-5М з наступними параметрами: розноси АВ – 3, 4, 5, 6, 9, 15, 25 м; розноси MN – 2, 5 м. Інтерпретація кривих ВЕЗ здійснювалася за методикою та принципами, наведеними у [67, 79-80, 85-86, 99, 101, 108].

3.5.1 Технічний стан магістрального каналу МК-1 Кільченської зрошувальної системи.

Найбільшим магістральним каналом в Дніпропетровській області є магістральний канал МК-1 Кільченської зрошувальної системи (рис. 3.48) [103, 168].

Будівництво та введення в експлуатацію Кільченської (колишньої Фрунзенської) зрошувальної системи тривало з 1965 по 1975 рр. Загальна площа

зрошення складає 36,5 тис. га. Основний спосіб поливу сільськогосподарських культур – дощування. Вода по міжгосподарських системах розподіляється за допомогою магістральних каналів (рис. 3.49).



Рисунок 3.48 – Оглядова карта території з розташуванням об'єкту досліджень: синім кольором показаний фрагмент магістрального каналу МК-1 Кільченської зрошувальної системи [103, 168]

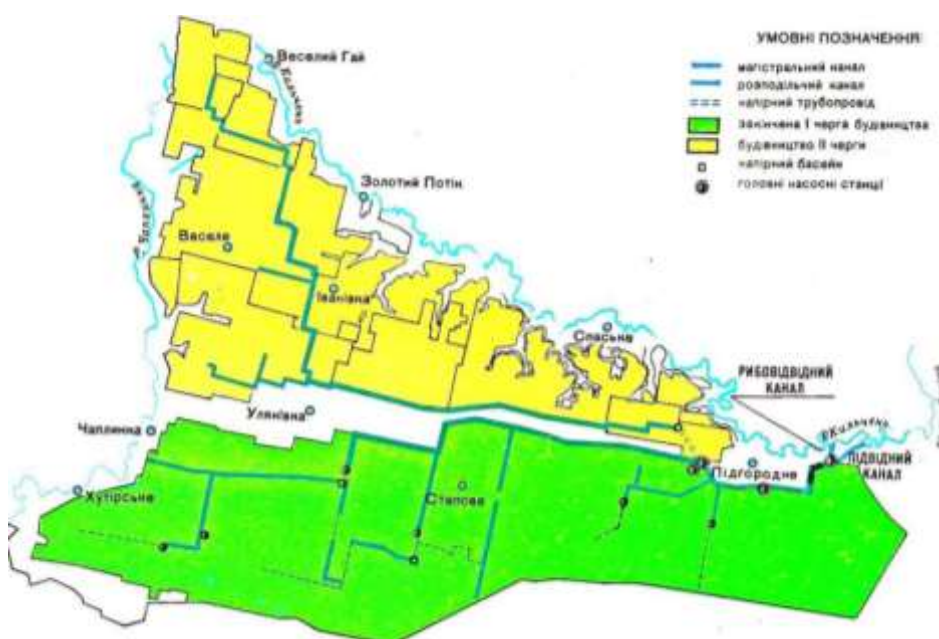


Рисунок 3.49 – Схематична карта Кільченської зрошувальної системи (за даними [103, 168, 170])

Територія Кільченської зрошувальної системи відноситься до Орільсько-Самарського гідрогеологічного району [169], якій знаходиться у межах Новомосковсько-Петропавлівської монокліналі і Дніпровсько-Донецької западини. З півночі і сходу він обмежується Михайловсько-Юріївським розломом.

Геологічний розріз осадових відкладів починається з горизонтально залягаючи кайнозойських утворень загальною потужністю декілька десятків метрів. Нижче залягають палеозой-мезозойські товщі потужність до декількох тисяч метрів. Фундамент складений кристалічними породами докембрію.

За гідрогеологічним районуванням територія досліджень відноситься до Магдалинівського підрайону. Основним горизонтом ґрунтових вод у районі досліджень є водоносний горизонт у відкладах надзаплавних терас, поширених вздовж долин рр. Дніпро, Ворскла, Оріль та інших річок [171].

За результатами візуальних діагностичних обстежень магістрального каналу встановлені наступні порушення конструкції споруди: залізобетонні плити покриття частково зруйновані, а на деяких ділянках взагалі відсутні; поліетиленова протифільтраційна плівка пошкоджена та потребує заміни; на укосах каналу спостерігається активний розвиток чагарникової рослинності, яка руйнує цілісність гідротехнічної споруди (рис. 3.50) [103, 168, 170].



Рисунок 3.50 – Порушені ділянки протифільтраційного покриття каналу на сучасному рівні технічної експлуатації [103, 168]

За рахунок значних втрат води на фільтрацію та низького попиту на поливну воду, глибина води коливається від 0,5 до 1,0 м. За тривалого терміну експлуатації та відсутності належних технічних доглядів і ремонтних робіт, МК перетворився на потенційно екологічно небезпечний об'єкт, який негативно впливає на еколого-меліоративний стан прилеглих територій. Технічний стан МК потребує суттєвого підвищення рівня екологічної надійності для подальшої експлуатації споруди [103, 172]. Схема обстеженого каналу наведена на рис. 3.51-3.52.

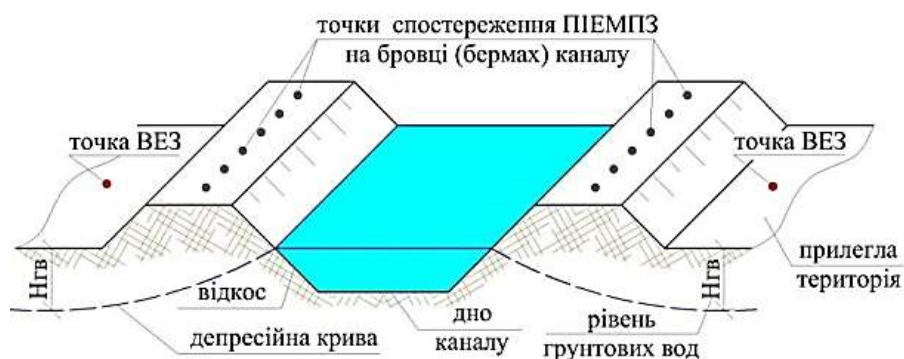


Рисунок 3.51 – Схема розташування точок спостережень ПЕМПЗ і ВЕЗ під час дослідження зон фільтрації води з каналу [103,168]

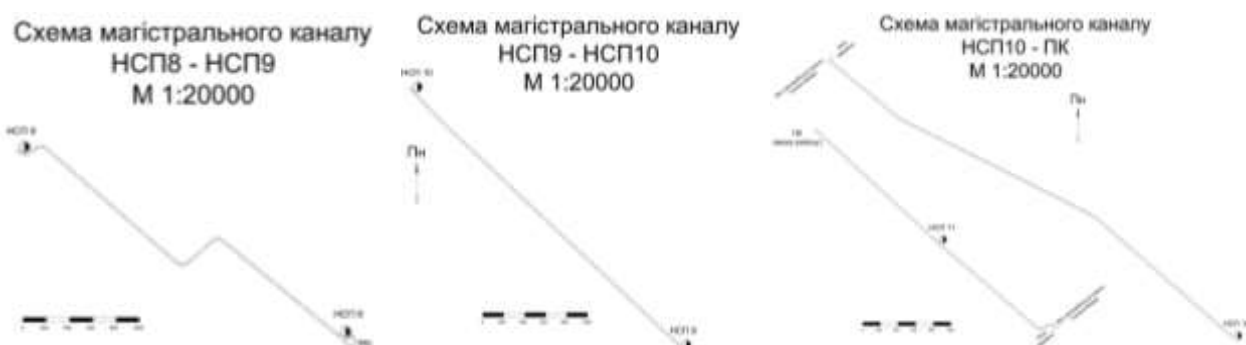


Рисунок 3.52 – Схема магістрального каналу МК-1 Кільченської зрошувальної системи [103, 168]

Окремо досліджувалося водосховище, яке розташоване на лівому борті каналу МК-1 перед аванкамерою ГНС-3 та ГНС-4 [103,168].

За даними досліджень методом ПЕМПЗ виділялись ділянки порушеного стану каналу та зони фільтраційних втрат води. Необхідно відзначити, що метод дозволяє підтвердити не лише візуально зафіксовані зони, а й встановити не проявлені зовні порушення у конструкції споруди ділянки фільтраційних деформацій та зони початкових стадій зосередженої фільтрації води з каналу.

Інтерпретація графіків проводилась за наведеною раніше закономірністю – зниження рівня щільності потоку магнітної складової ПЕМПЗ в зонах обводнення і фільтрації.

Приклад виділення методом прихованих зон обводнення і фільтрації, виділених при інтерпретації профільних зйомок ПЕМПЗ на магістральних каналах, приведений на рис. 3.53.

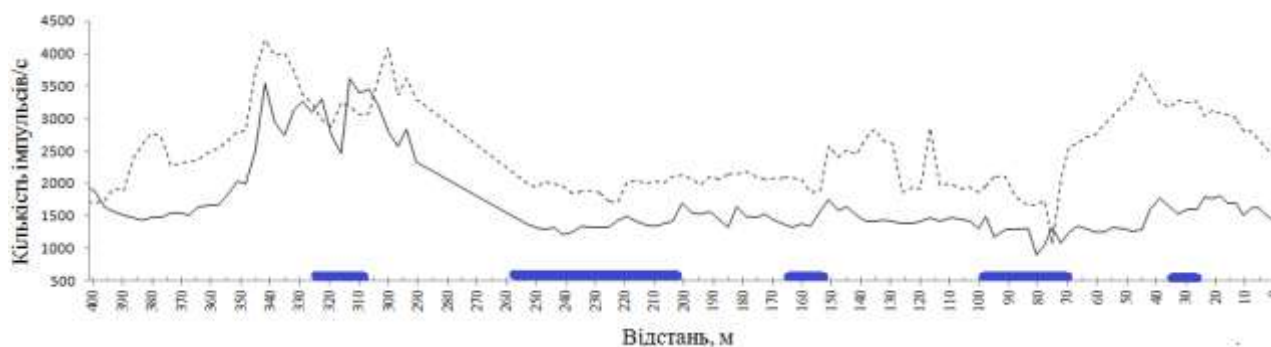


Рисунок 3.53 – Приклад виділення прихованих зон обводнення і фільтрації (синя лінія) на кривих розподілу щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ на вертикальній (суцільна лінія) та горизонтальній (пунктирна лінія) антенах, отриманих при профільній зйомці на магістральних каналах

В результаті польових спостережень на правому борту каналу МК-1 виділено 123 зони фільтрації загальною довжиною 2134 метри, а на лівому – 168 зон загальною довжиною 2519 метрів (Додаток В.1). На дамбах, огорожуючих водосховище, виявлено 8 зон фільтрації загальною довжиною 267 м (Додаток В.2). Таким чином, за результатами інтерпретації кривих ПЕМПЗ встановлено загальну протяжність порушених ділянок каналу 4653 м, що складає 30,7% від довжини дослідженої частини споруди. Це свідчить про незадовільний технічний стан об'єкту. Значні втрати води впливають на рівень ґрунтових вод прилеглих територій, що призводить до підтоплення земель [172-174]. З урахуванням низької якості поливної води [41], яка транспортується спорудою, зростають екологічні ризики вторинного засолення ґрунтів та погіршення еколого-меліоративного стану зрошуваних масивів.

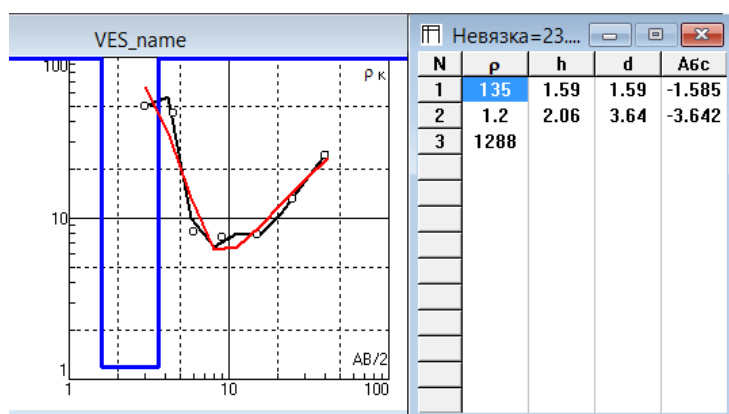
Застосування методу ВЕЗ надає змогу оцінити рівень залягання ґрунтових вод та встановити параметри депресійної кривої фільтраційного потоку. Отримані дані є основою для розрахунку фільтраційних втрат води з каналу і визначення екологічного ризику підтоплення території (рис. 3.54).

Узагальнення результатів дослідження методом ВЕЗ надало змогу встановити, що глибина до водотриву становить 5 м, а сталий рівень ґрунтових вод знаходиться на відстані 20 м від початку відкосу споруди. Схема встановлених ділянок фільтрації між НСП-1 та НСП-2 наведена на рис. 3.55.

Для розрахунків обсягу витрат з бортів магістрального каналу використовувалась формула В.В. Ведерникова [175]. Враховуючи дані обстеження каналу методами ПІЕМПЗ і ВЕЗ, фільтраційні втрати при рівні води 2 м будуть складати 609, 8 тис.м³/ міс..

Загальна довжина досліджуваної частини по двом бортам каналу разом з аванкамерою буде складати 15805 м, а протяжність ділянок обводнення і фільтрації 4653 м, що становить 29,4 %. Все це свідчить про неналежний технічний стан каналу МК-1 Кільченської зрошувальної системи.

Оцінка ризиків підтоплення прилеглих до каналу територій визначено у відповідності до запропонованого алгоритму [178].



А

Б

Точка 9

Розріз представлений трьохшаровою кривою:

- 1 шар (0 – 1,59 м) – сухі суглинки, потужність 1,5 м;
- 2 шар (1,59 – 3,64м) обводнені глини або суглинки, потужність 2, 06м;
- 3 шар (з 3,64 м) – кристалічні породи

1 – псевдокаротажна крива (синя), 2 – крива експериментальна (чорна);
3 – крива теоретична (червона)

Рисунок 3.54 – Результати інтерпретації досліджень методом ВЕЗ в точці 9 [168]: А – вікно моделей; Б – вікно параметрів моделі

Коефіцієнт ризику підтоплення території R визначається за формулою:

$$R = \lambda \cdot \nu, \quad (3.1)$$

де: λ – коефіцієнт небезпеки підтоплення;

ν – коефіцієнт уразливості до підтоплення.

Визначений коефіцієнт небезпеки підтоплення становить $\lambda=0,31$, а

коефіцієнт уразливості $\nu=0,656$. Таким чином, коефіцієнт ризику підтоплення території складає $R=0,1 \cdot 0,656=0,0656$, що класифікується як малий $0,06 < 0,1$.

3.5.2 Технічний стан магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи.

Вищетарасівська зрошувальна система розташована у Нікопольському районі Дніпропетровської області на правому березі колишнього Каховського водосховища поблизу с. Вищетарасівка (рис. 3.55) [67, 179-182].



Рисунок 3.55 – Розташування магістрального каналу МК-1 (синя лінія) Вищетарасівської зрошувальної системи

Довжина каналу складає більше 30 км, площа зрошуваних земель близько 36 тис. га [67, 179]. В геологічному відношенні знаходиться на Правобережжі Українського щита і відноситься до Східнопридніпровського гідрогеологічного району [169]. Для геологічної будови району характерно неглибоке залягання докембрійського фундаменту, перекритого малопотужними осадовими відкладами неогенового та четвертинного віків [169].

Водоносні горизонти і комплекси, розвинені на території району, частіше мають невисоку водозбагаченість. Більша частина території характеризується несприятливими гідрогеологічними умовами для організації потужного централізованого водопостачання [169].

За результатами візуальних діагностичних обстежень магістрального каналу встановлено наступні порушення конструкції споруди (рис. 3.56): залізобетонні плити покриття частково зруйновані; поліетиленова протифільтраційна плівка пошкоджена та потребує заміни; на укосах каналу спостерігається активний розвиток чагарникової рослинності, яка руйнує цілісність гідротехнічної споруди [67, 179-181].



Рисунок 3.56 – Результати візуального обстеження МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи [67, 179-181]

Довжина досліджуваних ділянок на правому і лівому бортах склала 6456 м (рис. 3.57-3.58) [181].



Рисунок 3.57 – Схема розташування ділянок досліджень природного імпульсного електромагнітного поля Землі на магістральному каналі МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи: червоні риси – межі ділянок, цифри – номери ділянок. Джерело космознимку – портал Google Earth

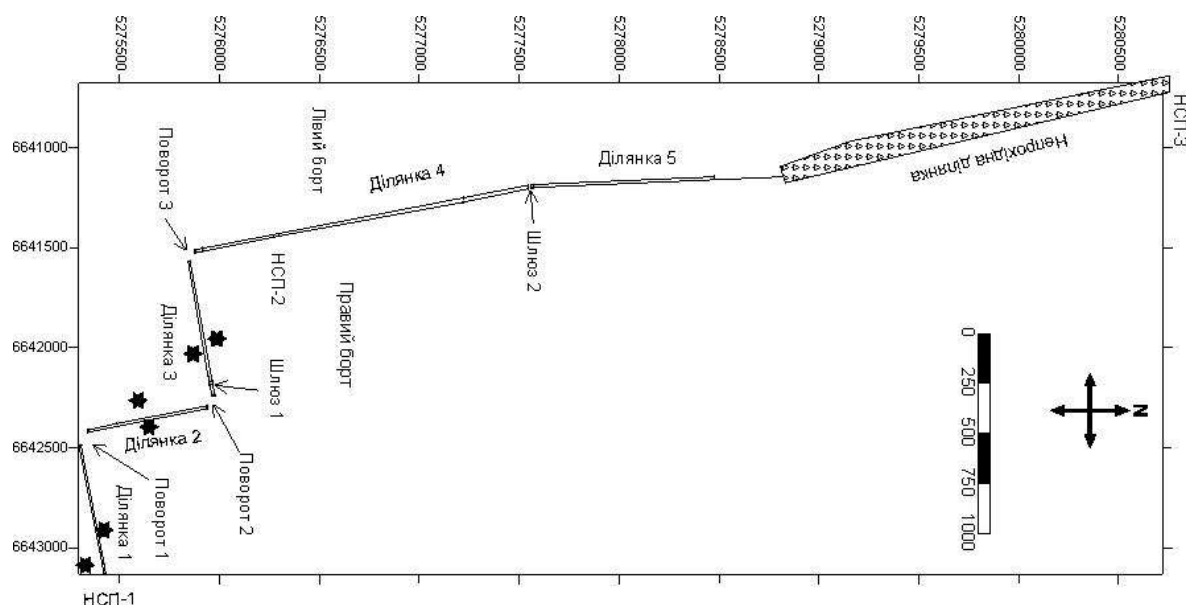


Рисунок 3.58 – Карта фактичного матеріалу зйомки щільності потоку магнітної складової імпульсного електромагнітного поля Землі магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи. Зірочка – точка вертикального електричного зондування. Шкала координат метрична, умовна [67, 179-181]

За даними польових зйомок ПІЕМПЗ магістрального каналу МК-1 в заповненому та незаповненому станах побудовані графіки щільності потоку імпульсів магнітної складової електромагнітного поля Землі, на яких виділені зони знижених значень, що відповідають зонам обводнення і фільтрації. Приклади графіків наведені у Додатку В.3.

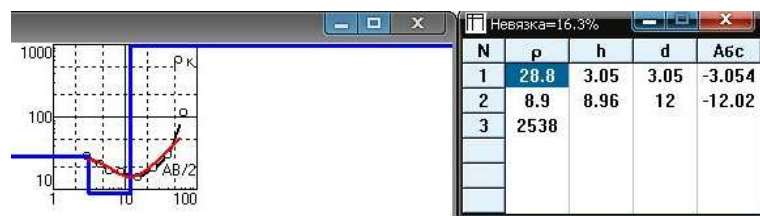
Параметричні характеристики зон фільтрації крізь борти магістрального каналу вказані в Додатку В.4, а розташування – у Додатках В.5 – В.7. Враховуючи дані, наведені в Додатках, довжина зони фільтрації і обводнення 3103м, а довжина досліджуваної частини каналу – 6456 м. Таким чином, встановлено, що порушені ділянки каналу складають 48,1% від дослідженої частини споруди. Це свідчить про незадовільний технічний стан ГТС [67, 179, 181, 182].

Результати інтерпретації кривих ВЕЗ наведені на рис. 3.59-3.60.

Узагальнення результатів дослідження методом ВЕЗ надало змогу встановити, що глибина до водотриву становить 10 м, а сталий рівень ґрунтових вод знаходиться на відстані 25 м від початку відкоса споруди.

Враховуючи дані обстеження каналу методами ПІЕМПЗ і ВЕЗ, фільтраційні втрати при рівні води 2 м будуть складати 396,56 тис.м³/міс. [67, 179, 180, 181].

Коефіцієнт небезпеки підтоплення становить $\lambda=0,2$, а коефіцієнт уразливості $\nu=0,561$. Таким чином, коефіцієнт ризику підтоплення території складає $R=0,2 \cdot 0,561=0,1122$, що відповідає помірному рівню [178].



А

Б

1 – псевдокаротажна крива (синя), 2 – крива експериментальна (чорна);
3 – крива теоретична (червона)

Рисунок 3.59 – Результати інтерпретації досліджень методом ВЕЗ в точці №1 на ділянці 1 магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи: лівий борт [181]: А – вікно моделей; Б – вікно параметрів моделі [67]



А

Б

1 – псевдокаротажна крива (синя), 2 – крива експериментальна (чорна);
3 – крива теоретична (червона)

Рисунок 3.60 – Результати інтерпретації досліджень методом ВЕЗ в точці №2 на ділянці 1 магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи: лівий борт, в 30 м від каналу [181]: А – вікно моделей; Б – вікно параметрів моделі [67, 179]

3.5.3 Технічний стан магістрального каналу МК 4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Григорівка Солонянського району.

Солоняно-Томаківська зрошувальна система територіально розташована у Солонянському районі Дніпропетровської області на правому березі р. Дніпро поблизу с. Григорівка (рис. 3.62). Довжина каналу МК 4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи 7550 м, а дослідженої частини – 3620 м (рис. 3.63) [108].

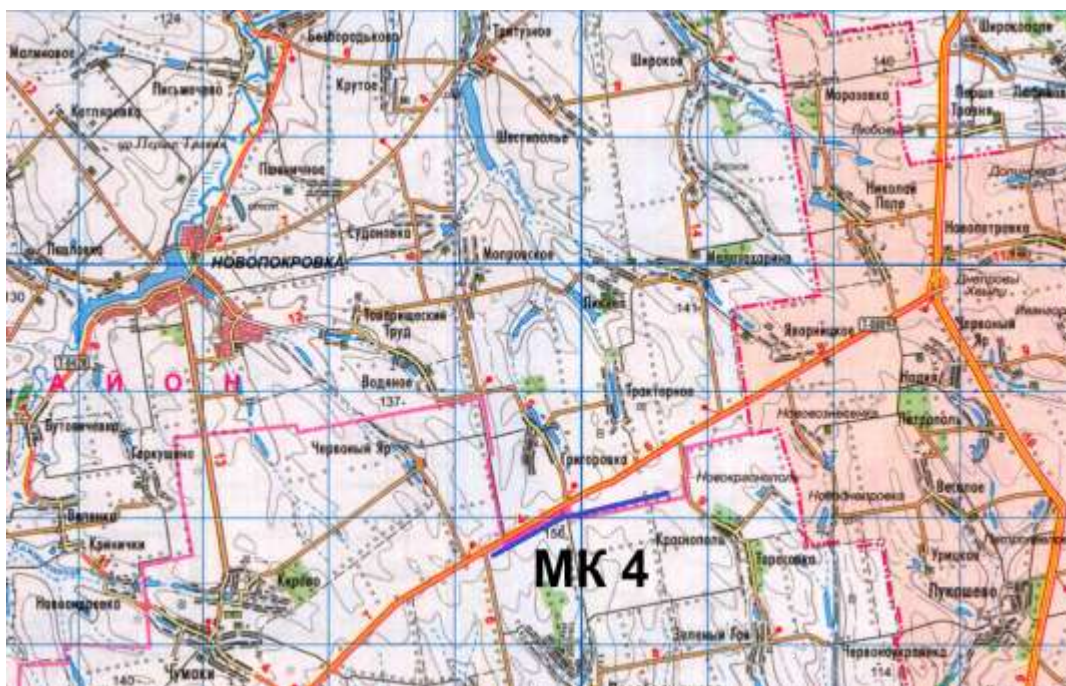


Рисунок 3.62 – Схема розташування МК 4 (синя лінія) Солоняно-Томаківської зрошувальної системи

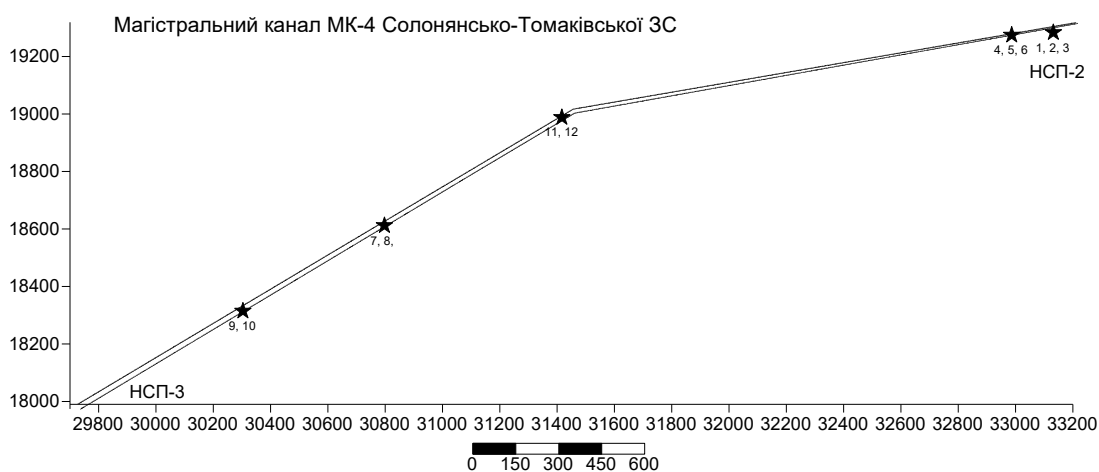


Рисунок 3.63 – Карта фактичного матеріалу зйомки щільності потоку магнітної складової імпульсного електромагнітного поля Землі каналу МК 4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи. Зірочка – точка вертикального електричного зондування. Шкала координат метрична, умовна [108]

За даними ВЕЗ рівень ґрунтових вод розташований на глибині 6,0 м, глибина до водотриву складає 12 м, а довжина від початку відкосу до точки зі сталим рівнем ґрунтових вод – 9 м.

Зведена схема розташування зон фільтрації наведена на рис. 3.64. Довжина зони фільтрації і обводнення каналу 2360 м, а довжина досліджуваної частини

каналу – 7240 м. Таким чином, встановлено, що порушені ділянки каналу складають 32,6% від дослідженої частини споруди [108]. Згідно [178] ступінь ризику підтоплення території $0,076 < 0,1$ оцінюється як малий.

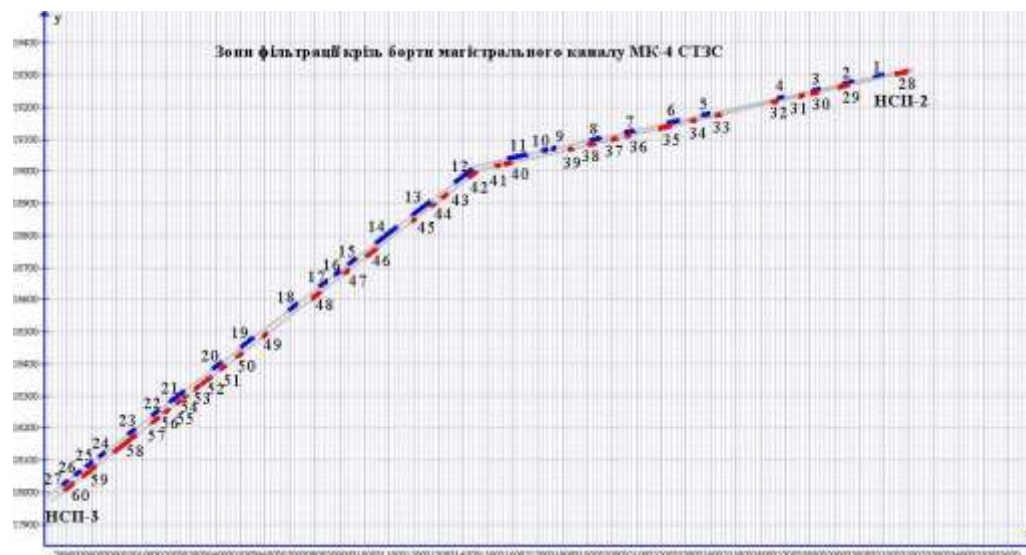


Рисунок 3.64 – Зведена схема розташування зон фільтрації по північному борту (синій колір) та по південному борту (червоний колір) магістрального каналу МК-4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи [108]

3.5.4 Екологічні ризики експлуатації цивільних ГТС.

В попередніх підрозділах встановлено тектонічний фактор впливу на технічний стан огорожувальних дамб хвостосховищ гірничопромислового призначення. Розглянемо геологічні і тектонічні особливості просторового розташування цивільних ГТС.

Територія Кільченської зрошувальної системи просторово розташована на схилах УЩ, де зафіксована потужність осадового чохла у декілька сотень метрів (рис. 3. 65) [155, 169].

Кільченську зрошувальну систему січуть розломи діагональної і меридіональної систем, що спостерігаються в районі магістрального каналу (рис. 3.65), і є глибинними дренами по яким забруднення з сільськогосподарських угідь та ґрунтових вод потрапляють у напірні водоносні горизонти. Можливо і зони фільтрації та обводнення обумовлені тим же тектонічним фактором.

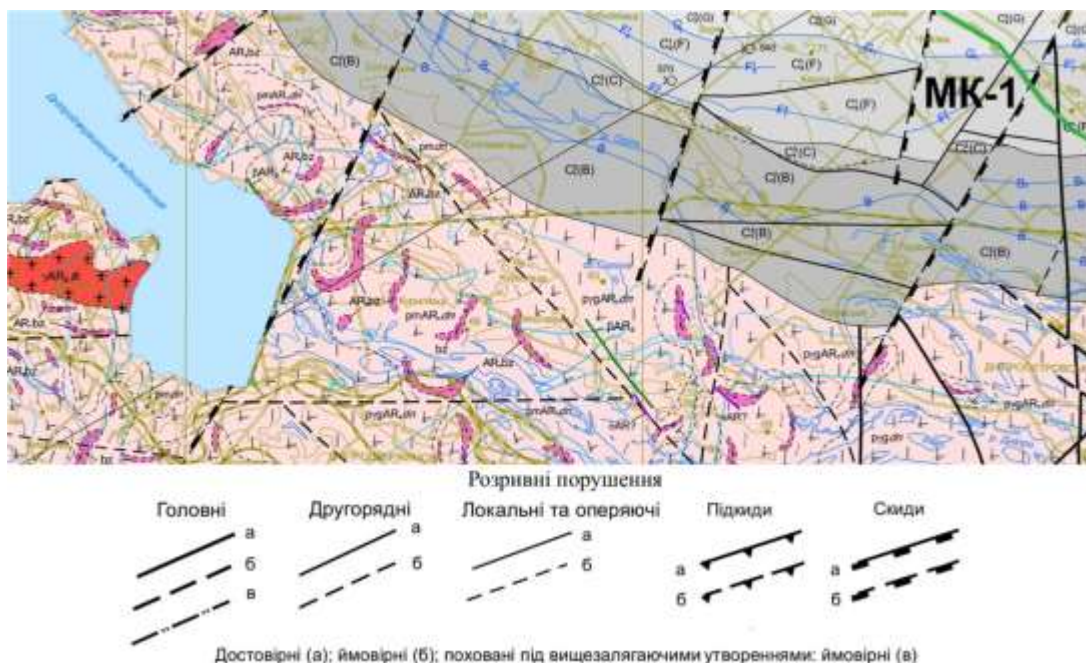
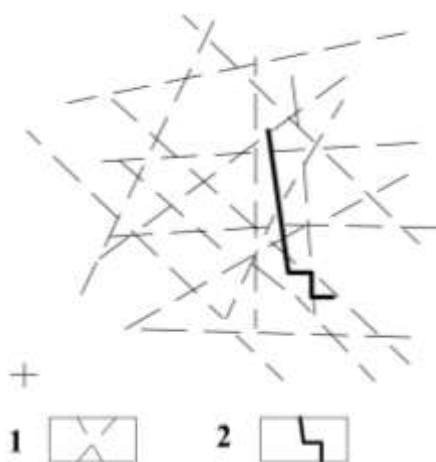


Рисунок 3.65 – Фрагмент геологічної карти домезозойських утворень території розташування магістрального каналу МК-1 Кільченської зрошувальної системи (зелена лінія) (за матеріалами [155])

Розглянемо тектонічні умови розташування МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи. Детальні тектонічні умови можна встановити, інтерпретуючи геофізичні матеріали крупних масштабів. Для цього використовуються карти аномального магнітного поля ΔZ та залишкових гравітаційних аномалій масштабу 1:50000. При виділенні зон розломів і підвищеної тріщинуватості застосовувались відомі індикатори (ознаки) розломних структур в геофізичних полях. До них відносяться: 1) сходинки в рівнях гравітаційного і магнітного полів, що відповідають лінійним тектонічним або стратиграфічним контактам порід з різними фізичними властивостями; 2) локальні магнітні та гравітаційні аномалії обох знаків, які обумовлені геологічними об'єктами дайками метаморфітів, тектонітами; 3) межі областей з різним малюнком ізоліній гравітаційного та магнітного полів [185-187]).

В результаті інтерпретації геофізичних матеріалів з використанням приведених вище індикаторів побудовано тектонічну схему району розташування каналу МК-1, яку наведено на рис. 3.66 [103, 186-187].



1 – зони тріщинуватості, виділені за даними геофізичних зйомок М 1:50000;
2 – магістральний канал

Рисунок 3.66 – Тектонічна схема масштабу 1:200000 району розташування магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи [103, 186-187]

Співставлення тектонічної схеми зі схемою магістрального каналу (рис. 3.66) та довжиною зон фільтрації (Додатки В.5 – В.7) показує, що центральна частина каналу просторово тяжіє до найбільш тектонічно порушеної зони, де знаходиться вузол перетину 5 розломів широтного меридіонального, ПН-Зх та Пн-Сх простягань. До цієї зони і приурочені ділянки з максимальною кількістю і довжиною зон фільтрації і обводнення. Таким чином і на цьому каналі встановлюється залежність між тектонічними особливостями району і технічним станом ГТС [185-187]).

Десять досліджених геофізичними методами регулюючих басейнів знаходяться у різних геологічних і тектонічних умовах. Так, регулюючі басейни в Синельниківському районі приурочені територіально до Лівобережної частини Українського щита (УЩ). Гідротехнічні споруди Солонянсько-Томаківського та Нікопольського міжрайонних управлінь знаходяться на Правобережжі Українського щита, а Царичанського в межах Новомосковсько-Петропавлівської монокліналі Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) [185, 186].

Регулюючі басейни та магістральні канали приурочені до УЩ відносяться до Східнопридніпровського гідрогеологічного району [169, 185, 186]. Для геологічної будови першого району характерно неглибоке залягання докембрійського фундаменту, перекритого малопотужними осадовими відкладами неогенового та четвертинного віків. Територія району розташована у межах центральної частини

УЩ. Тут розвинені водоносні горизонти і комплекси, віднесені як до осадових утворень кайнозою, так і до тріщинуватих порід кристалічного фундаменту. Геологічна будова, геоморфологічні особливості й кліматичні умови не сприяють формуванню значних ресурсів і запасів підземних вод (особливо у південній частині). Живлення розвинених тут водоносних горизонтів і комплексів здійснюється, в основному, за рахунок атмосферних опадів. Місцевими областями живлення є водоносні ділянки, складені переважно піщано-глинистими водопроникними породами порівняно невеликої потужності (рис. 3.67).

Рух підземних вод направлений від вододілів у бік річкових долин, де здійснюється їх дренаж. Води горизонтів осадових відкладів іноді мають гідравлічний зв'язок з водами тріщинуватої зони кристалічних порід.

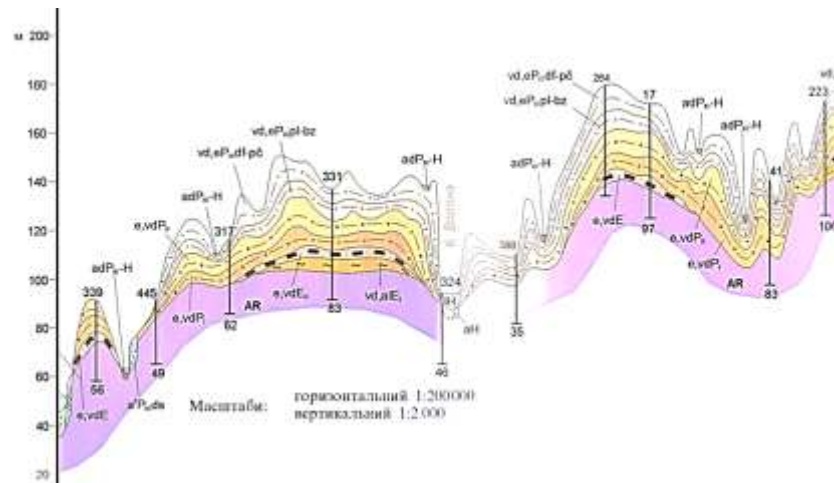
Територія Царичанської зрошувальної мережі відноситься до Орільсько-Самарського гідрогеологічного району, описаного вище (рис. 3.68) [169, 171].

Тектонічні умови районів розташування досліджуваних регулюючих басейнів та магістральних каналів різне. Для Середньопридніпровського гідрогеологічного району характерна значна подрібненість Українського щита глибинними розломами. Так, всі обстежені регулюючі басейни та магістральні канали Солонянського, Томаківського, Нікопольського та Синельниківського районів просторово тяжіють до лінеamentної зони, яка протягується від Нової Каховки до Куп'янська Харківської області в північно-східному напрямку [146]. Ця зона виділена в результаті дешифрування космічних знімків є зоною неотектонічної активності, яка контролює межі неотектонічних районів, що відрізняються характером та амплітудою вертикальних або горизонтальних рухів земної кори [146, 186].

За даними Л.С. Галецького та інших [146] такі зони лінеamentів корелюються з характером поля сучасних рухів та дуже добре співпадають з розподілом ділянок аномальних градієнтів швидкостей сучасних рухів. Із 120 ділянок в зонах лінеamentів на Українському щиті 92 (77%) є місцями стикання негативних та позитивних градієнтів швидкостей. Сітка трансрегіональних зон лінеamentів контролює в регіональному плані розвиток екзогенних геологічних процесів та обумовлює ступінь ураженості території за сукупністю їх виявлення [103, 146, 186].



а)



б)

N₂cb	Товща червоно-бурих глин. Глини червоно-бурі, бурувато-червоні, щільні (5 м)
N₂sg	Товща строкатих глин. Глини безкарбонатні, щільні, піщані, з друзами гіпсу (18 м)
N₂pv	Товща пісків та вапняків. Піски кварцові, дрібнозернисті до середньозернисті (30 м). З відкладами товщі проявлені родовище та прояви титан-цирконієвих руд, родовище та прояви будівельних пісків, прояви формувальних пісків
N₂p₂	Новолатріська світа. Середня підсвіта. Піски кварцові, кволіністі, тонкозернисті (40 м)
N₂p₃	З породами підсвіти пов'язані прояви формувальних пісків та родовище титан-цирконієвих руд
N₂p₃	Новоселітська світа. Нижня підсвіта. Глини та піски, часто вуглисті, з прошарками та лінзами бурого вугілля (16 м)
P₂br	Берекська світа. Піски кварцові, дрібнозернисті, з домішкою глауконіту (31 м)
P₂mz	Межигірська світа. Піски кварц-глауконітові, глауконіт-кварцові, глинисті, щільні, іноді в основі з гравієм (20 м)
P₂ob	Обухівська світа. Піски та пісковики кварцові, часто з домішкою глауконіту, глауконіт-кварцові, іноді вуглисті, шаруваті, іноді з рештками викопної фауни (21 м)
P₂kv	Київська світа. Піски та пісковики глауконіт-кварцові; мергелі; глини, часто вапняковісті; з рештками викопної фауни; в основі - гравій з галькою (25 м)
P₂dc	Бучацька серія. Піски, глини, часто вуглисті; буре вугілля; вторинні каоліни; осадові боксити; гравій та галька (51 м)



свердловини та їх номери**:
на карті (а); в площині розрізу (б) -
знизу глибина свердловини

Лінія геологічного розрізу

Рисунок 3.67 – Геологічна карта кайнозойських утворень (а) та розріз (б) місця розташування регулюючого басейна РБ-1 НСП Калинівської ЗС [185]

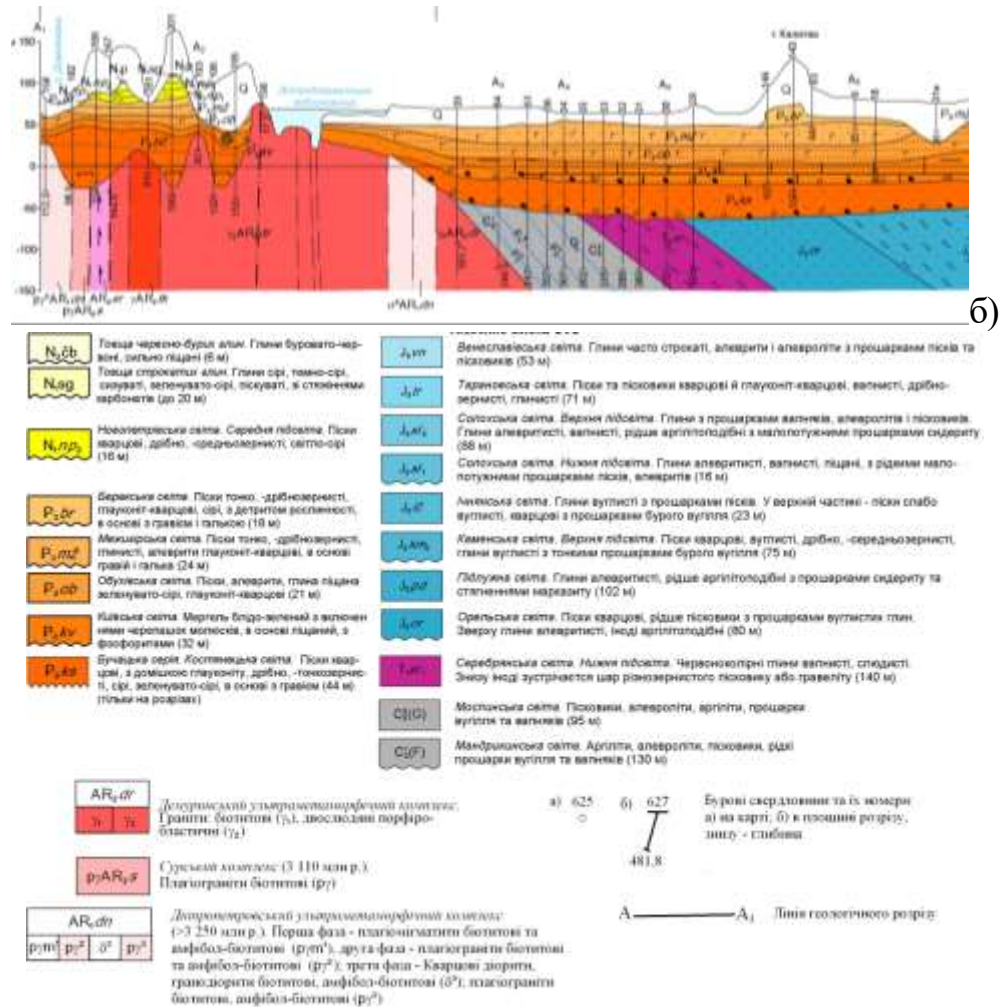
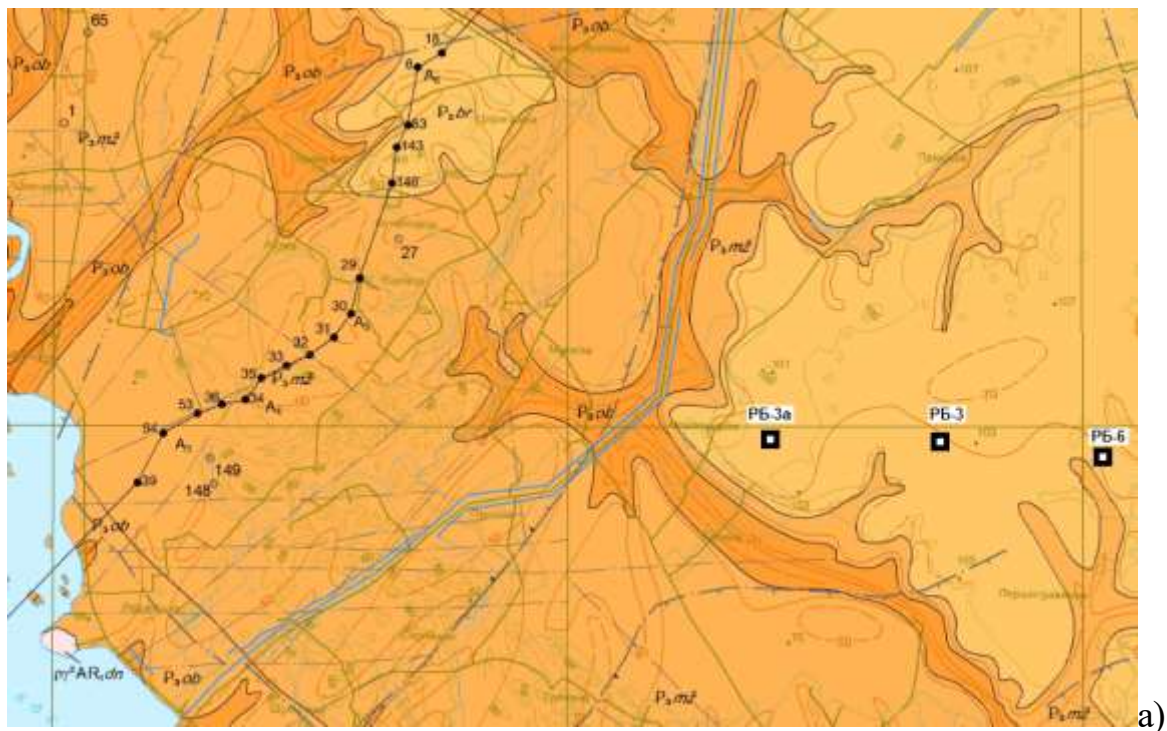


Рисунок 3.68 – Геологічна карта докайнозойських утворень (а) та розріз (б) місця розташування регулюючих басейнів РБ-3, РБ-3а, РБ-6 Царичанської зрошувальної системи [121]

За даними геофізичних зйомок масштабу 1:50000 та тектонічних карт масштабу 1:100000 ГТС Солонянського та Томаківського районів приурочені до вузлу перетину двох глибинних розломів Орджонікідзевсько-Іларіонівського північно-східного напрямку (з азимутом простягання $45-50^\circ$) та Петриківсько-Запорізького (з азимутом простягання $332-340^\circ$) [103, 146, 186, 187]. Перший глибинний розлом широкою смугою 10-15 км трасується сходінками в гравітаційному і магнітному полях та лінійними ділянками гідромережі і входить до лінеamentної зони, описаної вище, другий фіксується лінійними максимумами в геофізичних полях.

Регулюючий басейн Калинівської зрошувальної мережі просторово тяжіє до вузла перетину Орджонікідзевсько-Іларіонівського глибинного розлому з Дніпропетровсько-Приазовським (з азимутом простягання $345-350^\circ$).

Він має ширину зони до 20 км, трасується тільки в гравітаційному полі і дуже слабо представлений в магнітному, але підкреслюється зміною простягання долини р. Дніпро з субширотного на субмеридіальне після м. Дніпро [103, 146, 186, 187].

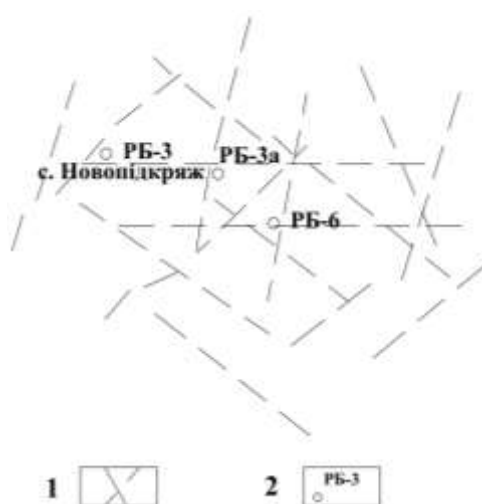
Три регулюючих басейни в Царичанському районі розташовані в вузлі перетину двох глибинних розломів Миколаївсько-Верхньодніпровського північно-східного напрямку з азимутом простягання $35-40^\circ$ та Пержансько-Дніпродзержинського північно-західного орієнтування з азимутом простягання $305-310^\circ$. Перший глибинний розлом встановлюється в гравітаційному і магнітному полях серією позитивних лінійних аномалій, лінійними ділянками гідромережі довжиною більше 30 км та западинами і виступами в фундаменті [146, 186, 187]. Другий спостерігається в гравітаційному полі сходінками, в магнітному серією лінійних максимумів, а в фундаменті уступами [103, 146, 186, 187].

Більш детальні тектонічні закономірності встановлюється, інтерпретуючи геофізичні матеріали карти аномального магнітного поля ΔZ та залишкових гравітаційних аномалій масштабу 1:50000. В результаті інтерпретації геофізичних матеріалів побудовані тектонічні схеми для районів розташування каналів і регулюючих басейнів ЗС в Солонянському, Синельниківському і Царичанському районах (рис. 3.69-3.70) [186].



1 – зона глибинного розлому; 2 – зони тріщинуватості, виділені за даними геофізичних зйомок М 1:50 000; 3 – регулюючі басейни;

Рисунок 3.69 – Тектонічна схема району розташування досліджених регулюючих басейнів Дніпропетровської області: РБ-1 КЗС – РБ-1 НСПП Калинівської зрошувальної системи біля с. Суха Калина; РБ-1 ВЗС – РБ-1 Василівської ЗС за с. Оріхове; РБ-1 ПЗС – РБ-1 Петровської ЗС 32 км траси Дніпропетровськ-Запоріжжя, біля с. Дніпрельстан; РБ-2 ПЗС – РБ-2 Петровської зрошувальної системи біля с. Любимівка; РБ-1 СТЗС – РБ-1 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Перше Травня; РБ-2 СТЗС – РБ-2 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Малозахарине; МК-4 СТЗС – магістральний канал МК 4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Григорівка Солонянського району [108, 186]



1 – зони тріщинуватості, виділені за даними геофізичних зйомок М 1:50 000;
2 – регулюючі басейни

Рисунок 3.70 – Тектонічна схема району розташування регулюючих басейнів Царичанської зрошувальної системи [108, 186]

Всі регулюючі басейни і магістральні канали знаходяться в лінеаментній зоні північно-східного простягання, що встановлена за даними дешифрування космічних знімків і до якої приурочені сучасні вертикальні та горизонтальні рухи, але просторове положення каналів та регулюючих басейнів по відношенню до зон тріщинуватості різних високих порядків, насичуючих лінеаментну зону різне. Так найбільшу довжину ділянок фільтрації мають регулюючі басейни біля с. Малозахарине (131 м), с. Дніпрельстан (66 м), с. Любимівка (47 м) СТЗС та РБ-1 КЗС (табл. 3.12). Моніторинг технічного стану останнього РБ з 2013 р. по 2018 р. показав збільшення зони фільтрації з 46 м (2013 р.) до 88 м (2017 р.).

Таблиця 3.12 – Результати розрахунку фільтраційних втрат з регулюючих басейнів за формулою Ведерникова В.В. [175, 186]

Найменування ГТС	Довжина зони фільтрації (загальна по всім відкосам), L, м	Об'єми води, м ³			Відсоток фільтраційних втрат, %
		Повний об'єм регулюючих басейнів, м ³	Втрати води за проєктом, м ³ /місяць	Місячні фільтраційні втрати з ГТС з урахуванням зони фільтрації, q, м ³ /місяць	
РБ-3а ЦЗС (2016 р.)	90,2	31500	3150	7590	24,1
РБ-3 ЦЗС (2016 р.)	85,0	41800	4180	7140	17,1
РБ-6 ЦЗС (2016 р.)	52,0	15700	1570	4380	27,9
РБ-1 ВЗС за с. Оріхове	42	10000	1000	2671	26,7
РБ-1 ПЗС с. Дніпрельстан	66	15400	1540	4774	31
РБ-2 ПЗС біля с. Любимівка	47	9600	960	3132	32,6
РБ-1 СТЗС біля с. Перше Травня	26	19500	1950	2495	12,8
РБ-2 СТЗС біля с. Малозахарине	131	53800	5380	13413	23,1
РБ-1 НСП КЗС (2017 р.)	88	20 000	2000	4841	24,2

Два регулюючих басейна біля с. Перше Травня та с. Оріхове мають найбільш задовільний технічний стан. На цих басейнах ділянки фільтрації складають відповідно 36 м і 42 м [108, 186].

На рис. 3.70 наведена тектонічна схема розташування регулюючих басейнів Царичанської зрошувальної системи. Нажаль, детальні геофізичні карти магнітного та гравітаційного полів відсутні, тому тектонічна схема побудована з використанням матеріалів масштабу 1:200000 та топографічної карти масштабу 1:100000. На топографічній карті встановлювались прямолінійні ділянки річкової та яружно-

балкової мережі, які відповідають розривам та зонам тріщинуватості. З побудованої схеми видно, що виділені розломи та зони тріщинуватості відповідають напрямкам простягання глибинних розломів Миколаївсько-Верхньодніпровського та Пержансько-Дніпродзержинського з азимутами простягання відповідно $35-40^\circ$ і $305-310^\circ$. Незважаючи на те, що побудована схема менш детальна, чим приведені раніше, можна зробити наступні висновки. Регулюючі басейни РБ-3, РБ-3а знаходяться в складних тектонічних умовах. Тут зони фільтрації складають відповідно 85 м (3 зони) та 90 м (5 зон). На регулюючому басейні РБ-6 виділені 3 зони загальною довжиною 52 м (табл. 3.12) [108, 186]. Всі регулюючі басейни знаходяться у занедбаному стані, на гребнях дамб РБ ростуть дерева, чагарник та трава, що крім тектонічного фактору впливає на технічний стан каналів і регулюючих басейнів зрошувальних систем [103, 186].

Найбільший відсоток ділянок прихованої фільтрації і обводнення має МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи – 48,1%, другий за неналежним технічним станом є МК-4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи (31,9%), а третій – МК-1 Кільченської зрошувальної системи – 29,4% [146, 186, 187]. Відповідно і тектонічні умови розташування цих каналів різні. МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи приурочений до найбільш тектонічно порушених ділянок, інші два знаходяться у більш спокійних тектонічних умовах.

Аналіз приведених даних свідчить, що встановлюється наступна закономірність – чим більш тектонічно порушені райони, де розташовуються канали та регулюючі басейни ЗС, тим більша кількість та протяжність зон прихованої фільтрації та обводнення в них [186].

Для з'ясування геологічних і тектонічних факторів впливу на технічний стан цивільних ГТС, а також для визначення напрямку рухів водних розчинів проведені детальних геофізичні дослідження на двох регулюючих басейнах. Перший басейн РБ-1 Калинівської зрошувальної системи Синельниківського району розташований в межах східної частини УЩ [185, 186], другий РБ-6 Царичанської зрошувальної системи в зоні переходу від УЩ до ДДЗ [171, 186]. Обидва райони приурочені до вузлів перетину крупних глибинних розломів.

За даними геофізичних зйомок та тектонічних карт масштабу 1:1000000 РБ-1 Калинівської зрошувальної мережі просторово приурочений до вузла перетину Орджонікідзевсько-Іларіоновського (з азимутом простягання $45-50^\circ$) і Дніпропетровсько-Приазовського (азимут простягання $345-350^\circ$) глибинних розломів [103, 146, 186].

Регулюючий басейн Царичанської зрошувальної системи знаходяться більше сприятливих тектонічних умовах. За даними [103, 146, 186], сучасні рухи в цьому районі проявлені слабо, але теж знаходиться у вузлі перетину двох глибинних розломів – Миколаївсько-Верхньодніпровського північно-східного напрямку з азимутом простягання $35-40^\circ$ та Пержансько-Дніпродзержинського північно-західного орієнтування з азимутом простягання $305-310^\circ$.

Моніторинг технічного стану регулюючого басейну Калинівської зрошувальної системи (далі по тексту РБ-1 КЗС) проводився у 2013 р., 2017 р. та 2018 р. [189-190]. У 2013 та 2017 роках технічний стан РБ оцінювався комплексом геофізичних методів ПЕМПЗ і ВЕЗ. У 2018 р. на РБ-1 НСП КЗС та на територіях, прилеглих до споруди, проведені дослідження методами ПЕМПЗ та ВЕЗ (Додаток В 8-9). Дослідження проводились в площинному варіанті по профілях. Відстань між профілями складала 10 м, між точками на профілі 5 м

Аналіз поля ПЕМПЗ показав наступне:

1. Знижені значення щільності потоку магнітної складової зафіксовані в північно-західній та в східній частинах відкосів РБ (Додаток В. 8). Перша аномалія встановлена в 2013, 2017, 2018 роках і відповідає зоні фільтрації в греблі РБ. Друга аномалія зафіксована вперше у 2018 р., хоча її перші ознаки вже були на карті в 2017 році [186, 189, 190].

2. Всі аномалії і підвищених і знижених значень чергуються та орієнтовані в північно-західному напрямку з азимутом простягання $345-350^\circ$. Цей напрямок співпадає з орієнтуванням Дніпропетровсько-Приазовського глибинного розлому північно-західного простягання [186].

3. Моніторинг, проведений протягом 3-х років, показав, що рівень ґрунтових вод практично не змінюється і складає 12,5-13 м (Додаток В. 9).

Останнє свідчить про добру дренуваність території. Дійсно, якщо продовжити аномалії в напрямку 345-350°, то через 1,5 км в рельєфі фіксується балка з р. Суха Калина. Враховуючи незначну потужність осадового чохла, можна припустити, що фільтраційні води з РБ дренуються по системі тріщин фундаменту в б. Суха Калина (рис. 3.71) [186, 189, 190].



Рисунок 3.71 – Шляхи фільтрації потоків з регулюючого басейну РБ-1 НСП Калинівської зрошувальної системи (синя стрілка) [186, 189, 190]

У 2016 р. на регулюючому басейні РБ-6 ЦЗС проводилась комплексна зйомка ПЕМПЗ та ВЕЗ за стандартною методикою. У 2018 р. були повторені дослідження технічного стану РБ комплексом методів, при цьому були охоплені й прилеглі території. На прилеглій до ГТС території дослідження ПЕМПЗ виконувались в площинному варіанті по профілям, відстань між якими складала 10 м, а між точками на профілі – 5 м [186, 189, 190].

В Додатку В. 10 представлені результати зйомки методом ПЕМПЗ на території, прилеглій до регулюючого басейну РБ-6 ЦЗС.

Результати інтерпретації даних геофізичних зйомок наступні:

1. Всі аномалії підвищених і знижених значень щільності потоку магнітної складової ПЕМПЗ чергуються та лінійно орієнтовані у північно-західному напрямку, азимут простягання 300-310° (Додаток В.10).

2. На площі зйомки фіксуються лише 4 аномалії підвищених значень,

практично для всієї території спостерігається зниження потоку магнітної складової, що свідчить про значне обводнення ділянки досліджень.

3. За результатами інтерпретації даних ВЕЗ рівень ґрунтових вод за даними ВЕЗ 2016 року складав від 4 м в східній до 5-6 м в західній частині РБ, в 2018 році він піднявся в східній частині до 3 м (Додаток В.9Б)

4. В східній частині РБ спостерігається зниження в рельєфі до 1 м на протязі 50 м, що може бути обумовлено замоченням лесів і розвитком провальних явищ

5. Всі зони фільтрації і обводнення виділені в 2016 році збільшились. За даними зйомки 2018 року і північний і східний відкоси за виключенням незначної ділянки в північно-західній частині обводнені. Поле знижених значень слабо аномальне, має розмитий характер, що свідчить про стояння ґрунтових вод навколо РБ.

Аналізуючи геологічні і гідрогеологічні особливості районів розташування РБ Калинівської і Царичанської зрошувальних систем та результати зйомок, можна зробити наступні висновки [103, 186-192]:

1. Зони обводнення навколо РБ мають простягання, які відповідають напрямку крупних глибинних розломів та зон тріщинуватості, що входять до їх складу. Так, найбільшим глибинним розломом в Синельниківському районі є Дніпропетровсько-Приазовський з азимутом простягання $340-350^\circ$, зони обводнення навколо РБ Калинівської зрошувальної системи орієнтовані в цьому ж напрямку. В Царичанському районі крупний глибинний розлом Пержансько-Дніпродзержинський має азимут простягання $305-310^\circ$, зони обводнення РБ-6 Царичанської ЗС мають таке ж простягання [103, 186-192].

2. Результати зйомки ВЕЗ показали, що рівень ґрунтових вод навколо РБ-1 Калинівської ЗС за 5 років піднявся на 0,5 м, а на РБ-6 Царичанської ЗС за два роки на 1-1,5 м. З одного боку, це можна було б пояснити доброю дренажістною першого району, але поряд з РБ-6 на відстані 1,5 км знаходиться балка з притокою р. Чаплинка, але ґрунтові води не дренажуються у цей бік. Можна припустити, що ця закономірність пов'язана з геологічними і тектонічними умовами території. Природними дренами в районі Калинівської ЗС є зони тріщинуватості в фундаменті, по яким фільтраційні води з басейну рухаються в

бік б. Суха Калина. Осадовий чохол тут малопотужний і фільтраційні води поповнюють тріщинні води фундаменту. Навпаки в Царичанському районі осадова товща потужна і фільтраційні води насичують її. Тут спостерігається кілька водоносних горизонтів типу верховодки та ґрунтових вод, які мають гідравлічний зв'язок. Таким чином тріщинні породи фундаменту в Царичанському районі знаходяться на значній глибині і не є природними дренами для фільтраційних вод регулюючого басейну [103, 186-192].

Отримані результати дають можливість сформулювати наступне: в умовах центральної частини Українського щита фільтраційні потоки з каналів і регулюючих басейнів ЗС дренуються по зонам тріщинуватості в найближчі яри, балки, річки. Тут не слід очікувати різкого підйому ґрунтових вод за рахунок фільтрації з регулюючих басейнів і магістральних каналів, маючих незадовільний технічний стан. На рис. 3.72 показані можливі шляхи руху фільтраційних потоків на прикладі регулюючих басейнів Солонянського управління водних ресурсів [103, 186-192].

Інша картина спостерігається на схилах УЩ, де зафіксована значна потужність осадового чохла та слабка дренажність території. В осадовому чохлі розповсюджені кілька горизонтів ґрунтових та напірних вод, тому фільтраційні води поповнюють їх, а не дренують по зонам тріщинуватості в яри, балки та річки [103, 186-192].

Майже на всій площі Царичанської ЗС глибина залягання рівня до початку зрошення складала 10,0-23,5 м і більше [179]. За 30 років її експлуатації площі з глибиною РГВ 10-20 м значно зменшилися і є поширеними на південній частині системи. На півночі та північному сході з'явилися площі з глибиною рівня 2-5 м. Зараз глибина залягання рівня коливається від 2,3 до 17,0 м. Максимальне підняття (у середньому до 7 м) відбулось у зоні регулюючих басейнів [103, 179, 186].

За рахунок фільтраційних потоків з РБ і каналів йде поповнення спочатку першого водоносного горизонту – верховодки, а за наявності гідравлічного зв'язку і ґрунтових, і напірних горизонтів. Цим можна пояснити постійний підйом рівня верховодки та ґрунтових вод після поливів навколо каналів і регулюючих басейнів.

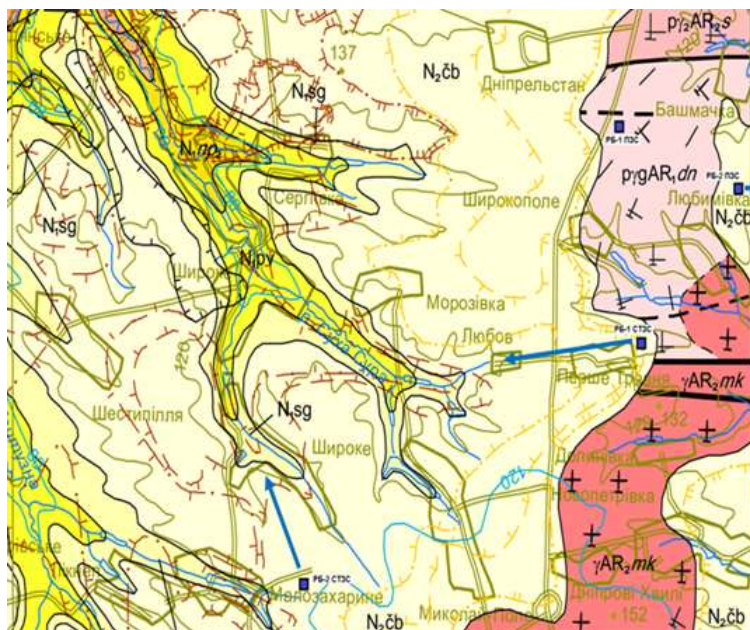


Рисунок 3.72 – Ймовірні шляхи фільтрації потоків з регулюючих басейнів Солоняно-Томаківської і Петрівської зрошувальних систем (синя стрілка)

Наприклад, вплив каналу Дніпро-Донбас привів до збільшення по обидві сторони від нього площ земель з глибиною рівня ґрунтових вод (РГВ) від 0 до 3,0 м за рахунок фільтраційних сумісних втрат води з каналу та іригаційних вод з розташованих поряд зрошувальних систем [179]. Вплив каналу простежується вздовж його траси на ширину 2-3 км, а місцями 7 км. Режим ґрунтових вод формується під впливом природних факторів і роботи дренажно-водовідвідної мережі. Вздовж каналу ґрунтові води мають мінералізацію переважно від 1 до 3 г/дм³, хімічний тип води строкатий.

Більш ніж за 30 років експлуатації Фрунзенського зрошуваного масиву підйом рівня склав 2-4 м, а на деяких ділянках, що розташовані в зоні впливу магістрального каналу, 5-6 м. Зникли площі з глибиною РГВ більше 10,0 м [179].

3.6 Висновки до розділу 3

1. Для діагностики та прогнозування запропонований комплекс геофізичних методів (ПЕМПЗ, ВЕЗ) та алгоритми їхньої обробки, що можуть бути впроваджені в практику технічної діагностики для оперативного виявлення дефектів та прихованих фільтраційних зон у тілі дамб, що підвищує їхню

експлуатаційну надійність та рівні екологічно безпечної експлуатації. Розроблена комплексна методика інтегральної оцінки рівня екологічної безпеки ГТС може бути використана органами державного нагляду та організаціями, що здійснюють експлуатацію для проведення аудиту безпеки та регламентування моніторингу хвостосховищ.

2. Одним з чинників підвищення рівня техногенної небезпеки хвостосховищ є сучасні кліматичні зміни (зростання температури на $2,0\text{--}2,3^{\circ}\text{C}$ та зниження гідротермічного коефіцієнта прибутку на $0,037\text{--}0,042$), що призводить до пересихання ґрунтового покриву дамб із подальшим тріщиноутворенням і під час інтенсивних злив зумовлює неконтрольоване перезволоження матеріалів, активізацію фільтрації та ерозійних процесів (зокрема суфозії). Це обумовлює щорічне розширення параметрів зон замочування дамб на $10\text{--}15\%$, яке підтверджено польовими спостереженнями та математичним моделюванням.

2. Тектонічна будова району розташування визначає в дамбах ГТС ступінь розвитку тріщин, максимальна кількість яких приурочена до основних глибинних розломів Українського щита ортогональної системи і пригніченої системи північно-західних напрямків з азимутами простягання $300^{\circ}\text{--}330^{\circ}$, за якими відбуваються сучасні рухи, що може розглядатися як тектонічний фактор підготовки дамб ГТС до прояви небезпечних процесів. Техногенні вібрації (вибухи, рух транспорту тощо) підсилюють роль тектонічного фактору та пришвидшують фільтраційно-деформаційні процеси. Встановлений тектонічний фактор дає змогу спрогнозувати на діючих та недіючих ГТС генеральні напрямки розвитку тріщин та розуцільнення матеріалів, які можуть виступати в якості потенційних зон фільтрації, замочування, розвитку небезпечних геологічних процесів, а для ГТС, які проєктуються – врахувати ці закономірності.

3. Розрахунки показали, що найбільший загальний індекс небезпеки ТНІ серед розглянутих хвостосховищ має недіюче «Сухачівське», другий індекс небезпеки притаманний діючому ВГМК у б. Скаженій, а третій відповідає «Дніпровському» хвостосховищу. Найбільший індекс ризику має

хвостосховище «Дніпровське – 10, так як воно знаходиться в межах м. Кам'янське, в заплаві р. Дніпро, де нижче за течією розташовано місто Карнауховка, а далі м. Дніпро. Індекс ризику збільшується за рахунок складу хвостів. Під час бойових дій руйнування огорожувальної дамби може привести до потрапляння радіоактивних відходів у р. Коноплянка, а потім і у р. Дніпро або безпосередньо у р. Дніпро при виводі з ладу північної частини дамби хвостосховища. Менший індекс небезпеки притаманний хвостосховищу «Сухачівське (TEI=8), яке розташовано далі від м. Кам'янське і р. Дніпро. Хвостосховище ВГМК у б. Скажена має TEI=7, так як воно знаходиться поряд з м. Вільногірськ з населенням від 10000 до 100000 чоловік, поблизу якого є три невеличких водосховища. Крім того треба відмітити безпечний склад хвостових матеріалів, заскладованих у хвостосховищі. Тут ризик небезпеки для населення міста виникає тільки при руйнуванні дамби.

4. В теперішній час на території України виникли техногенні ризики, пов'язані з бойовими діями, до яких можна віднести: обстріли артилерійською зброєю та безпілотними літальними апаратами, мінування територій, будівництво укріпспоруд, несанкціонований доступ сторонніх осіб. Особливу небезпеку ці ризики мають у хвостосховищах радіоактивних відходів. Під час бойових дій застосування важкого озброєння поблизу хвостосховищ може призвести до виникнення сейсмічних хвиль, які спричинять схід зсувів в обводнених частинах огорожувальних дамб.

5. Тривалий час експлуатації цивільних ГТС сільськогосподарського призначення (більше 50 років), а також недбале ставлення обслуговуючого персоналу призвело до значного погіршення їх технічного стану. Так, на 10 обстежених регулюючих басейнах довжина зон прихованої фільтрації і обводнення коливається від 26 до 131 метра, а фільтраційні втрати – від 1341 до 7950 м³/міс. На магістральних каналах ділянки прихованої фільтрації і обводнення досягають в окремих випадках 48,1 % довжини каналу. Фільтраційні втрати з ГТС сільськогосподарського призначення приводять до підйому рівня ґрунтових вод, при цьому на прилеглих до МК територіях виникає помірний

ризик підтоплення селищ, розташованих поблизу каналів, а навколо регулюючих басейнів у зв'язку зі значним погіршенням якості водних ресурсів додатковим чинником є екологічна небезпека вторинного засолення та осолонцювання ґрунтів.

6. Значну роль в екологічній небезпеці відіграють геологічні і тектонічні умови розташування ГТС. Отримані результати дають можливість сформулювати наступне: в умовах центральної частини Українського щита фільтраційні потоки з цивільних гідротехнічних споруд дренують по зонам тріщинуватості в найближчі яри, балки, річки. Навпаки на схилах УЩ при переході до ДДЗ в районах з великою потужністю осадового чохла фільтраційні розчини не дренують у ерозійні форми рельєфу, а по тріщинам і глибинним розломам потрапляють у підземні води, забруднюючи їх. Такий механізм слід очікувати і для гірничопромислових ГТС, розташованих в різних геологічних і тектонічних умовах

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ В ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ

4.1 Аналіз та прогноз стану безпеки хвостосховища «Дніпровське»

4.1.1 Геоекологічний моніторинг об'єкта.

Екологічна небезпека хвостосховища «Дніпровське», яке розташовано у східній частині м. Кам'янське (рис. 4.1), визначається насамперед ризиком водної міграції радіонуклідів, які містяться у відходах в межах огорожувальних споруд. Якщо повітряна міграція та поверхневий стік суттєво затримуються поверхневим шаром фосфогіпсу (рис. 4.2), то нижній шар радіоактивних відходів насичений ґрунтовими водами, вище рівня р. Коноплянки. Це створює гідравлічний градієнт убік її річища, який уможливорює винос радіонуклідів, які вилуговуються при контакті з водою, до самої річки та їх подальшу водну міграцію до р. Дніпро. Іншим важливим чинником екологічної безпеки даного об'єкта є геомеханічна стійкість огорожувальних ґрунтових дамб, створених кілька десятиліть назад, які зазнають ерозійного впливу вітрів та атмосферних опадів. Геоекологічний моніторинг в зоні впливу хвостосховища за останні десятиліття включав спостереження за гідрологічним режимом, геотехнічним станом огорожувальної дамби, рівнем води, вмістом радіонуклідів у хвостових матеріалах, водах р. Коноплянки та Дніпро, а також донних відкладах р. Коноплянки.

Гідрологічний режим. За даними багаторічних спостережень, рівень води у р. Коноплянка коливається в діапазоні від +51,1 м до +55,0 м. Він залежить від рівня води у р. Дніпро, який у найближчому пункті спостереження (західна околиця м. Дніпро, рис. 4.3) протягом останніх 6 років коливався від +51,2 м до +51,9 м з середньоквадратичним відхиленням 0,15 м від середнього значення +51,52 м. Коливання рівня протягом цього періоду не мали чітко вираженого сезонного характеру, хоча спостерігалось певне зменшення рівня літа – початку осені.

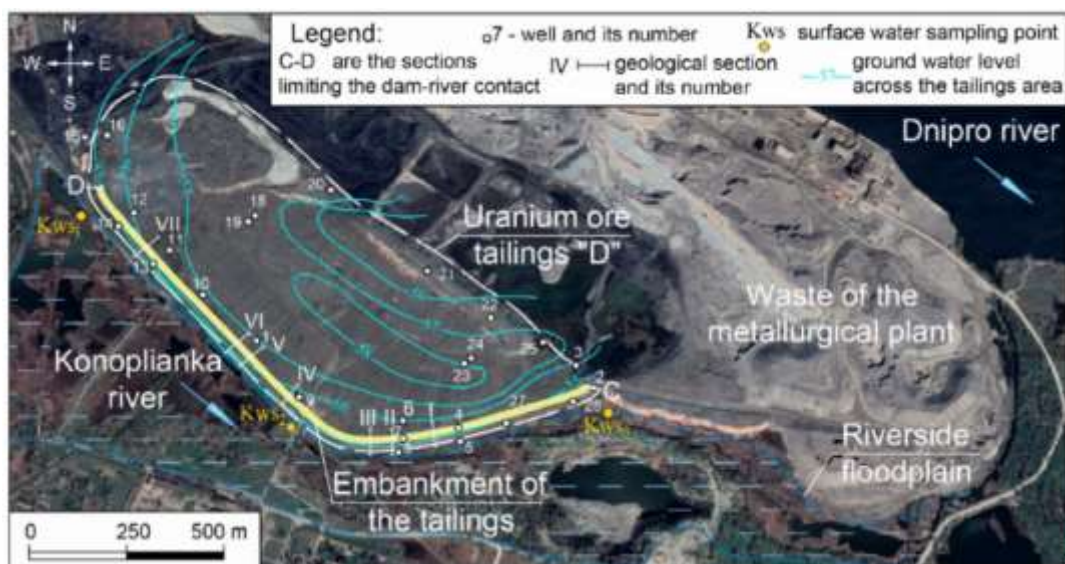


Рисунок 4.1 – Карта розташування хвостосховища «Дніпровське» з розрізами геодезичного обстеження у 2022 р. [106]

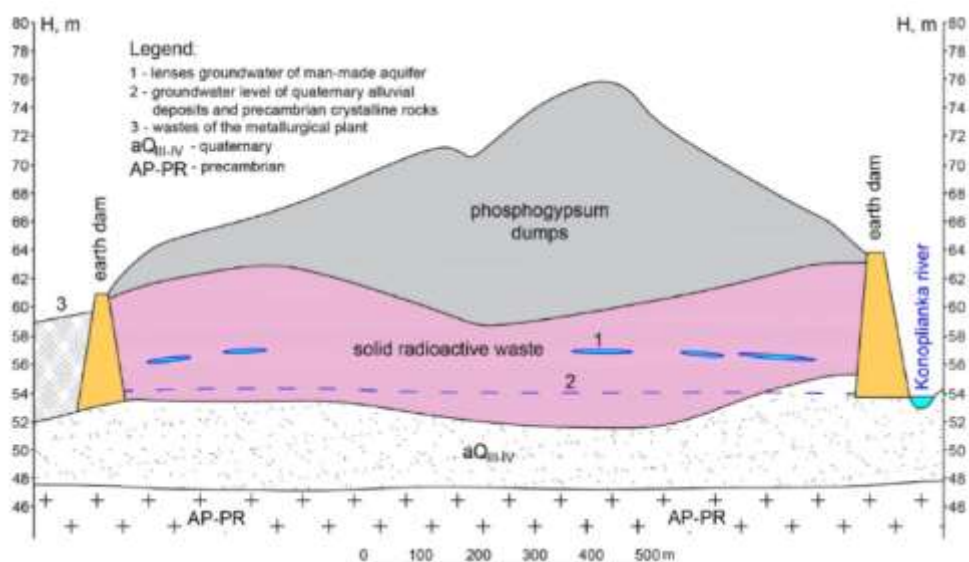


Рисунок 4.2 – Геологічний розріз через південну частину хвостосховища «Дніпровське» [106]

Через гідравлічний опір неширокого річища р. Коноплянка її рівень на ділянці контакту з дамбою хвостосховища «Дніпровське» вище і за даними геодезичних досліджень влітку 2022 р. становив близько +54 м.

Гідрогеологічний режим. Потужність порід у зоні обводнення та їх склад було оцінено за даними геодезичного знімання та побудованих розрізів (табл. 5.1, рис. 5.1). Свердловини 7 та 8 не досягли рівня ґрунтових вод, який оцінено за інтерполяцією між розрізами IV – IV' та VII – VII', тобто по свердловинах 6 і 9.

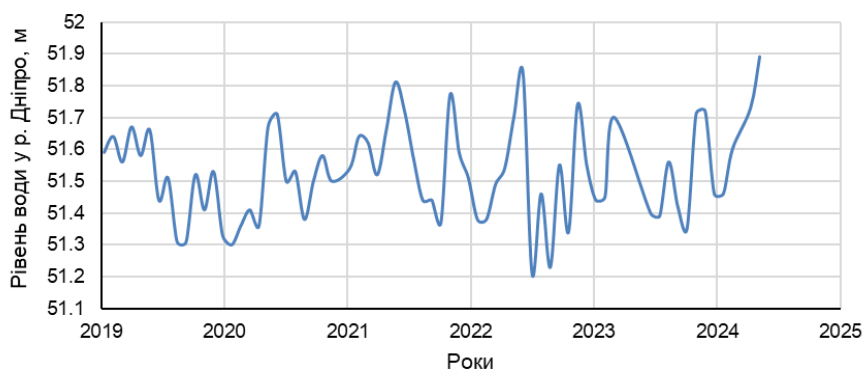


Рисунок 4.3 – Рівень води у р. Дніпро у пункті спостереження біля м. Дніпро з координатами (34.9414 С.Д., 48.5069 П.Ш.) за даними бази даних Copernicus [196]

Рівень підземних вод у межах хвостосховища, за даними спостережень і моделювання [197, 198], знаходиться на рівні +54...+56 м. Згідно [83], коефіцієнти фільтрації для порід у зоні огорожувальної споруди становлять: 0,4 м/доб для суглинків, 0,28-0,7 м/доб для супісків, 2,7 м/доб для пилюватих пісків, 10,7–27,4 м/доб для пісків від дрібних до гравелистих.

Геомеханічний стан дамби хвостосховища. За наявною інформацією, геотехнічний моніторинг хвостосховища не включав спостережень за зрушеннями у дамбах та ґрунтовому масиві. Візуальні обстеження влітку 2022 р. (рис. 4.4, табл. 4.1) показали суттєву еродованість поверхні дамби, що може знижувати її стійкість і підвищувати небезпеку виходу радіоактивних матеріалів на поверхню.

За даними гранулометричного аналізу 24 проб з 11 свердловин в діапазоні глибин 1,0–14,5 м, склад порід відповідає піску, суглинкам та супіскам. Для суглинків у приповерхневому шарі ґрунту визначені такі значення фізико-механічних властивостей: межа текучості близько 20%, межа розкочування – 17%, природна вологість 20%, число пластичності – 3,5, показник консистенції глинистого ґрунту 0,86. За даними лабораторних випробувань матеріалу дамби у 2016 р., модуль деформації $E = 16,3$ МПа, питоме зчеплення $C = 13,79$ кПа, кут внутрішнього тертя $\varphi = 19^\circ$.



Рисунок 4.4 – Фото дамби хвостосховища «Дніпровське», експозиція на південь, літо 2022 р. [105]

Таблиця 4.1 – Параметри фільтрації через греблю хвостосховища за даними буріння та геофізичної зйомки влітку 2022 р. [105]

Параметр	Номер розрізу Номер свердловини						
	$\frac{I-I'}{1}$	$\frac{II-II'}{3}$	$\frac{III-III'}{5}$	$\frac{IV-IV'}{6}$	$\frac{V-V'}{7}$	$\frac{VI-VI'}{8}$	$\frac{VII-VII'}{9}$
Відстань від сверд. до берега р. Коноплянка, м	46,3	38,9	32,4	35,4	35,4	35,4	35,4
Рівень підземних вод у свердловині, м	58,4 (60,5 ¹)	56,8 (59,3 ¹)	55,9	55,0	54,72 ⁴	54,70 ⁴	54,1
Рівень водотриву, м	54,3 ²	54,3	54,3 ²	54,0	54,3 ²	54,3 ²	54,3 ²
Породи у зоні обводнення та їх потужність	НЗ – 4,1 м	НЗ – 1,8 м, 4 – 0,7 м	НЗ – 0,5+1,1 м, 4 – 0,2 м	Н4 – 1 м	НЗ	НЗ	З – 3 м
Коефіцієнт фільтрації ⁵ , м/доба	0,7	0,62	0,67	2,7 ⁶	0,7	0,7	0,4
Відстані між розрізами ⁷ , м	90	40	200	150	20	330	

Примітки.

¹. Існує невелика зона обводнення над рівнем ґрунтових вод.

². Свердловини не досягли рівня водотриву, значення прийняте аналогічно розрізу II – II'.

³. Позначення шарів згідно з результатами геодезичних робіт:

НЗ – насипний шар металургійних відходів: супісок з включеннями жорстк'яно-щебенистого матеріалу до 40% по масі й розміром до 50 мм з одиничними брилами шлаку;

Н4 – шлак металургійний: не зв'язаний, по давності відсипки злежаний, пухкий;

З – суглинок легкий, нерівномірно водонасичений, без включень;

4 – суглинок легкий, водонасичений.

⁴. Визначено за лінійною апроксимацією між контурами IV – IV' та VII – VII'.

⁵. Розраховано за товщиною шарів у свердловині.

⁶. Коефіцієнт фільтрації для шлаку не визначався, прийнято як для пилюватих пісків.

⁷. Середня відстань від розрізу до наступного розрізу уздовж дамби.

Радіоекологічний моніторинг включав аналіз вмісту радіонуклідів у шарах відходів (табл. 4.2), у поверхневих водах (табл. 4.3) і донних відкладах (табл. 4.4).

Таблиця 4.2 – Вміст радіонуклідів у шарах відходів хвостосховища «Дніпровське»

№	Місце відбору	Інтервал глибин відбору, м	Питома активність, Бк/кг				Вміст U_{nat} , %	Джерело даних
			^{238}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Pb		
1	Св. 08-16Д, півн.-зах. частина	3,0÷11,0	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	0,0145 ±0,0123	[199]
2	Св. 08-17Д, півн.-зах. частина	3,6÷13,0	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	0,0159 ±0,0080	[199]
3	Св. 08038, північна частина	9,2÷16,5	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	0,0148 ±0,0056	[199]
4	Св. 08045, центральна частина	11,6÷18,7	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	0,0203 ±0,0104	[199]
5	Св. 08059, південна частина	4,0÷13,0	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	0,0069 ±0,0035	[199]
6	Св. 08-6Д, південна частина	2,4÷10,5	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	0,0230 ±0,0156	[199]
7	Св. 08062, центральна частина	12,4÷21,1	1923 ±969 *	114 ±44 *, **	9642 ±6993 *	11673 ±11144 *	н.в.	[201]
8	Територія хвосто-сховища	3,5÷4,5 6,0÷7,5 8,0÷10,0	1590±490 1300±420 1550±560	14375±3000 33025±4900 57500±8100	16300±400 26300±600 45500±1200	13600±850 22400±1400 47000±3000	н.в.	[199]
9	Територія хвостосховища	12,5÷13,5 14,5÷15,0	2600±900 3550±1100	62000±8000 54700±8300	51500±1200 47400±1050	50300±2800 44800±2470	н.в.	[199]
10	Територія хвостосховища	14,0÷14,5 15,0÷15,5	125±65 1800±600	13500±2000 62000±8000	11600±300 40000±1000	7700±500 36700±1900	н.в.	[199]
11	Св. 09-20Д, півн.-зах. частина	6,0÷11,8	1162 ±1106	38569 ±18864	32288 ±9245	34983 ±16488	0,0095 ±0,0087	[201]
12	Св. 09-21Д, північна частина	6,0÷11,8	1449 ±687	33829 ±11817	20349 ±10822	19941 ±13313	0,0118 ±0,0056	[201]
13	Св. 09-22Д, півд.-схід. частина	7,0÷11,5	3381 ±3107	81523 ±105072	46596 ±57328	52632 ±69386	0,0272 ±0,0248	[201]

Примітки:

н.в. – показник не визначався;

* перше значення – середнє, друге значення – середньоквадратичне відхилення;

** результат стосується ^{232}Th .

Таблиця 4.3 – Виміряні середньорічні концентрації радіонуклідів у поверхневих водах (середнє, мінімальне÷максимальне) у зоні впливу хвостосховища «Д» (Бк/л): для ^{238}U протягом 2010–2014 рр., для ^{226}Ra , ^{210}Pb – протягом 2010–2012 рр.

Пункт відбору	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb
Dws1	0,0164 0,011÷0,024	0,0177 0,009÷0,029	0,0293 0,024÷0,04
Kws1	0,1432 0.0920÷0.1850	0,0357 0.0280÷0.0500	0,0450 0.0300÷0.0550
Kws2	0,0804 0.0460÷0.1070	0,0283 0.0220÷0.0350	0,0363 0.0250÷0.0500
Kws3	0,1576 0.1270÷0.1820	0,0310 0.0190÷0.0400	0,0460 0.0400÷0.0570
Kws4	0,0298 0.0220÷0.0370	0,0220 0.0130÷0.0310	0,0373 0.0340÷0.0430

Таблиця 4.4 – Вміст природних і штучних радіонуклідів у воді р. Коноплянка, мБк/дм³ [203]

Точки відбору проб	^{226}Ra	^{232}Th	^{90}Sr	^{137}Cs
№1 – водонасосна станція на початку ділянки хвостосховища	10	0,03	0,027	< 0,03
№2 – біля хвостосховища «Дніпровське»	29	0,02	0,038	< 0,04
№3 – біля дамби хвостосховища	51	0,03	0,034	< 0,04
№4 – впадіння річки р. Коноплянка у Дніпровське водосховище	10	0,025	0,025	0,03

Виміряні середньорічні концентрації радіонуклідів у поверхневих водах протягом 2010–2014 рр. підвищені, але знаходяться у межах ДК_Б (табл. 4.3). Пункти відбору зразків води позначено так: Dws1 – р. Дніпро, район міського пляжу м. Кам’янське, Kws1 – р. Коноплянка, озеро-виток, Kws2 – р. Коноплянка, мостовий переїзд до хвостосховища «Дніпровське», Kws3 – р. Коноплянка, верхній водовипуск седиментаційного відстійника, Kws4 – район Дніпровського водосховища, 500 м нижче за течією втікання р. Коноплянка.

Вимірювання вмісту радіонуклідів у донних відкладах у 2024 р. (табл. 4.4, 4.5) показали, що вміст природних і штучних радіонуклідів у воді за 15 років

суттєво не змінився порівняно з даними досліджень НДІ біології ДНУ, які проводились 15 років тому [202]. У точках, розташованих безпосередньо біля хвостосховища (№2 і №3), рівень радіонуклідів був підвищений. Найвищі коефіцієнти накопичення природних радіонуклідів були відмічені у точках 1 і 4 по ^{226}Ra ; у точках 2 і 4 по ^{232}Th . Коефіцієнт накопичення штучних радіонуклідів ^{90}Sr та ^{137}Cs був найбільший у точках 3 і 4.

Таблиця 4.5 – Вміст природних та штучних радіонуклідів у донних відкладах р. Коноплянка, Бк/кг. Чисельник – виміряні дані, знаменник – коефіцієнти накопичення радіонуклідів у ґрунтах відносно води [203]

Точки відбору проб	^{226}Ra	^{232}Th	^{90}Sr	^{137}Cs
№1 – водонасосна станція на початку ділянки хвостосховища	18,0/1,8	5,8/193	0,8/30	1,8/60
№2 – біля хвостосховища «Дніпровське»	26,0/0,9	16,6/830	1,4/36	5,4/135
№3 – біля дамби хвостосховища	54,3/1,1	20,0/667	4,2/124	10,8/270
№4 – впадіння річки р. Коноплянка в Дніпровське водосховище	30,0/3,0	22,2/888	3,4/136	11,6/386

Велика розбіжність у коефіцієнтах накопичення залежить від типу ґрунту. Мулові відкладення, що утворюються в гирлі річки, мають найбільші коефіцієнти накопичення штучних і природних радіонуклідів, порівняно з замуленими пісками у верхній частині річки.

Слід звернути увагу на суттєве збільшення у донних відкладах вмісту ^{226}Ra як вище хвостосховища (в 4,5 рази), так і нижче його (в 13,5 рази). Вміст ^{232}Th , навпаки, був нижче у всіх точках, крім точки №4, яка знаходилась у гирлі р. Коноплянка. Результати досліджень показали суттєве збільшення накопичення ^{137}Cs і ^{226}Ra у донних відкладах р. Коноплянки за останні 15 років, особливо у точках, розташованих нижче хвостосховища (у 2–6 разів).

Таким чином, найбільші показники накопичення радіонуклідів у донних відкладах отримані для гирла р. Коноплянки. Це свідчить про те, що місце впадіння р. Коноплянки в Дніпровське водосховище є постійним вторинним джерелом радіаційного забруднення для р. Дніпро.

Зіставлення табл. 4.3–4.5 показує, що вміст радіонуклідів у воді не перевищує встановлені межі за НРБУ-97 [204], але можливі суттєві накопичення у донних відкладах. Зауважимо, що основна маса радіонуклідів у відходах, і викликана ними екологічна небезпека пов'язана з ізотопами уранового ряду (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb), які формуватимуть підвищені ризики для довкілля на довгі роки, оскільки періоди їхнього піврозпаду набагато довші, ніж у ^{90}Sr і ^{137}Cs . Хоча період піврозпаду ^{210}Pb порівняний з останніми двома ізотопами, він також являє суттєву небезпеку, оскільки його вміст постійно підтримується внаслідок розпаду попередніх компонентів радіоактивного ланцюга з материнським елементом ^{238}U .

Отже, виходячи з аналізу результатів геоекологічного моніторингу і поточного стану хвостосховища «Дніпровське», підвищення рівня його екологічної безпеки потребує вирішення таких наукових завдань.

1. Прогноз геомеханічної стійкості ГТС
2. Прогноз міграції радіонуклідів через дамбу хвостосховища та їх виніс з підземними водами і подальша міграція в р. Коноплянка та до р. Дніпро.

4.1.2 Визначення стійкості ґрунтових захисних ГТС.

Для оцінки геомеханічної стійкості огорожувальних дамб хвостосховищ «Дніпровське» і «Сухачівське» використано реалізовану на базі методу кінцевих елементів деформаційну пружно-пластичну модель середовища [111, 112], опис якої наведено у розділі 2.4.

Методика моделювання та розробка прогнозу стійкості огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» включає розв'язування прямих геомеханічних задач, які на першому етапі полягали в оцінці напружено-деформованого стану ділянок огорожувальної дамби, на другому – оцінці їх стійкості з урахуванням зниження параметрів міцності. Геомеханічна стійкість дамби розрахована на чотирьох профілях, проведені через характерні ділянки дамби в напрямку найбільш ймовірного розвитку негативних деформаційних процесів (рис. 4.5). Розрахунки виконувалися в програмі Phase 2 (ліцензія НТУ «Дніпровська політехніка» - співавторів досліджень).

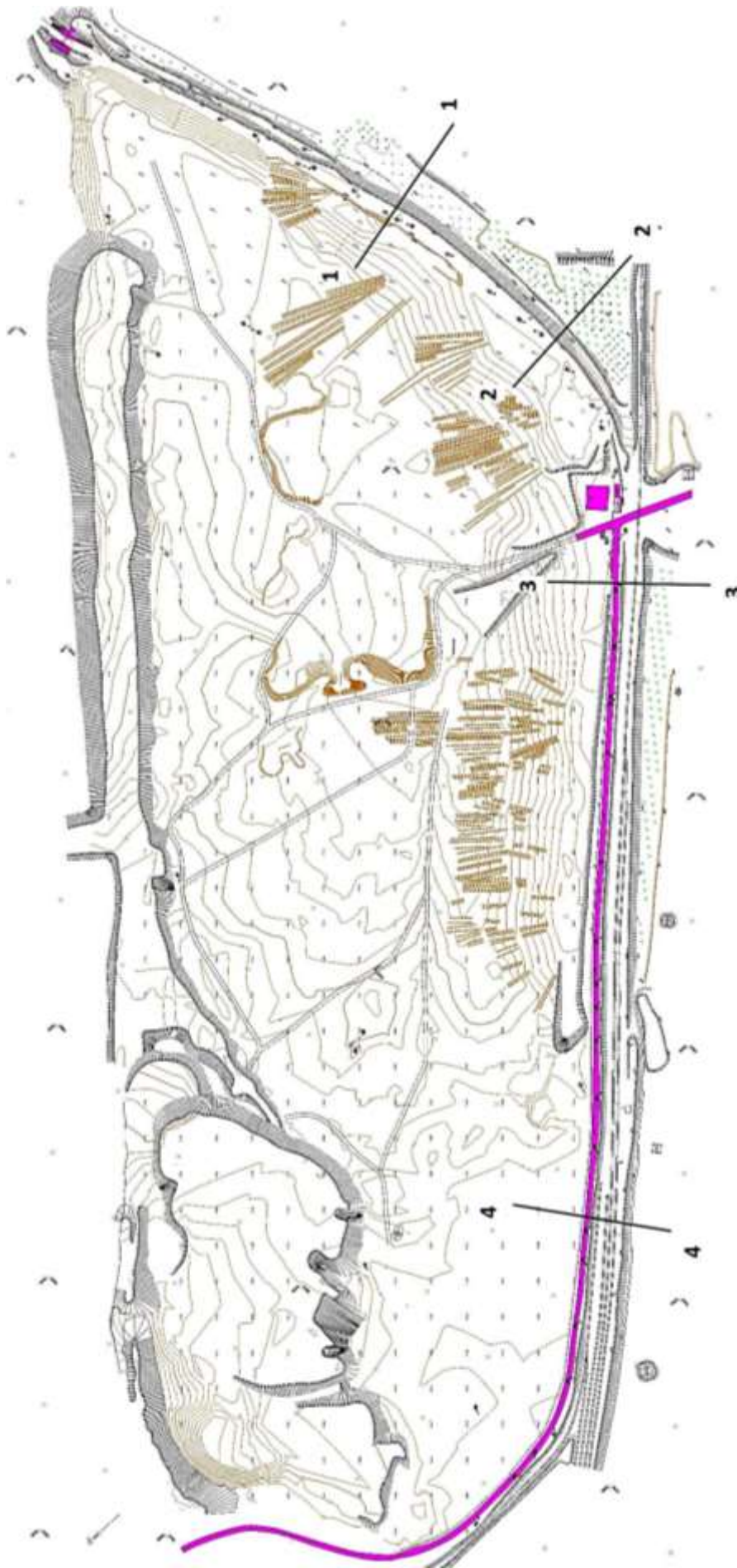
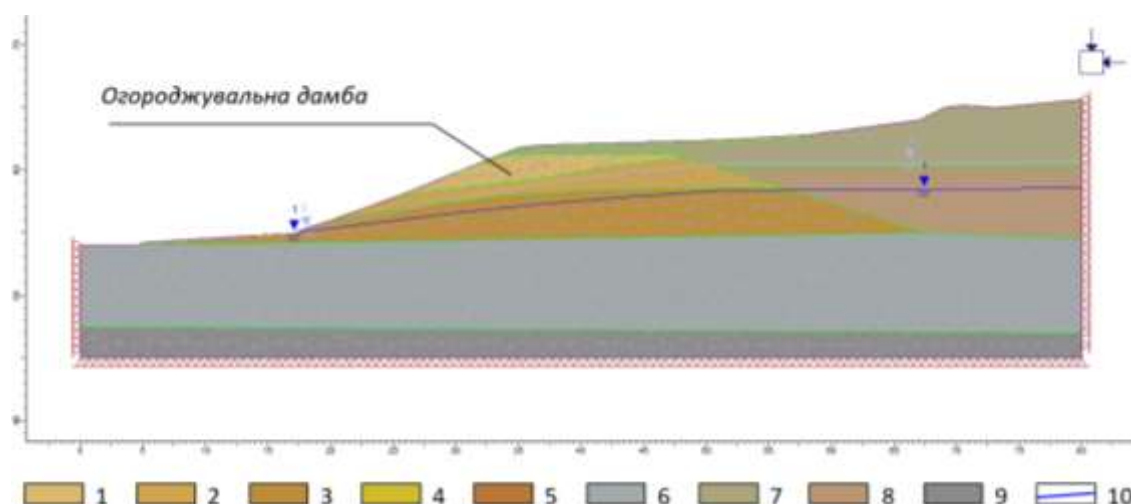


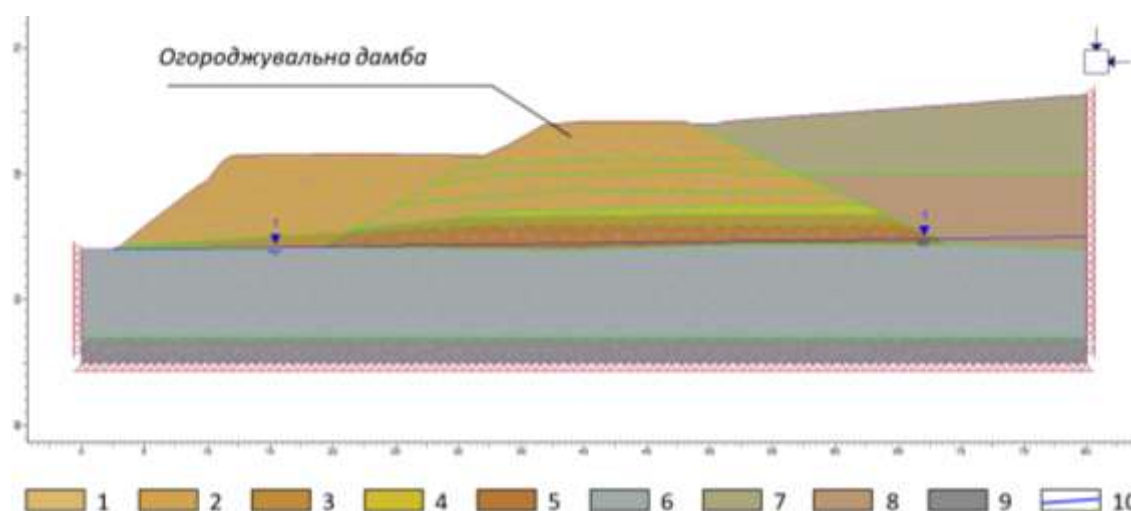
Рисунок 4.5 – Схема розташування розрахункових профілів в межах зовнішньої огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське»

Розміри моделей відповідно до розрахункових профілів визначені з умови мінімізації впливу їх контурів на напружено-деформований стан породного масиву, що моделюється, і охоплюють ділянки довжиною 80,0 м при потужності ґрунтової товщі від 9,0 м біля низового укосу огорожувальної дамби до 21,0 м – в межах чаші хвостосховища (рис. 4.6, 4.7).



1 – суглинок легкий; 2 – супісок; 3 – супісок ($S_r \geq 0,8$); 4 – суглинок; 5 – суглинок ($S_r \geq 0,8$); 6 – фосфогіпс; 7 – супісок (РАВ); 8 – пісок; 9 – граніт; 10 – рівень ґрунтових вод

Рисунок 4.6 – Розрахункова схематизація ділянки огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» – профіль 1-1



1 – суглинок легкий; 2 – супісок; 3 – супісок ($S_r \geq 0,8$); 4 – суглинок; 5 – суглинок ($S_r \geq 0,8$); 6 – фосфогіпс; 7 – супісок (РАВ); 8 – пісок; 9 – граніт; 10 – рівень ґрунтових вод

Рисунок 4.7 – Розрахункова схематизація ділянки огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» – профіль 3-3

Для забезпечення просторової визначеності модельованої області на бічних границях моделі та по її нижньому контуру задані нульові переміщення, а силова взаємодія між елементами моделі визначається гравітаційними (об'ємними) силами в ґрунтовій товщі. У загальному вигляді чисельна модель в межах оцінюваних ділянок представлена кінцевими елементами дев'яти типів відповідно до геолого-літологічної будови ґрунтової товщі в основі хвостосховища, складованих до чаші хвостосховища радіоактивних відходів (РАВ) і фосфогіпсу, а також породного матеріалу в тілі огорожувальної дамби.

Значення деформаційних параметрів і характеристик міцності породного матеріалу в чисельній моделі прийняті за результатами лабораторних визначень, даними чинних нормативів та досліджень, виконаних на об'єктах аналогах.

Для вивчення фізико-механічних властивостей породного матеріалу в тілі огорожувальної дамби в процесі буріння розвідувальних свердловин №№1, 2 (профіль I-I), №№3, 4 (профіль II-II), №5 (профіль III-III), №6 (профіль IV-IV), №7 (профіль V-V) №8 (профіль VI-VI), №9 (профіль VII-VII) було виконано інженерно-геологічне опробування з відбором зразків непорушеної структури та подальшим визначенням основних фізико-механічних характеристик ґрунтів у лабораторних умовах.

Згідно з даними опробування, породний матеріал огорожувальної дамби представлений переважно однією номенклатурою ґрунту – супісками важкими, жовтуватобурими і палево-бурими, з включеннями піщанистого і суглинистого матеріалу, неоднорідної структури, з малим вмістом води у верхній частині дамби й водонасиченими в її нижній частині, часто з включеннями гумусового матеріалу. У зразках, відібраних з основи греблі, у інколи був присутній вуглистый матеріал.

Визначення деформаційних характеристик ґрунтів для випробуваних інтервалів проводилося в умовах компресійного стиснення, а міцності – в умовах швидкого неконсолідованого-дренованого зрізу. Прийняті до розрахунку значення фізико-механічних характеристик, встановлені з урахуванням коефіцієнта надійності по ґрунту γ_g і використані в чисельній моделі при оцінці геомеханічної стійкості огорожувальної дамби, наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Розрахункові значення фізико-механічних характеристик ґрунтів основи, відходів збагачення і матеріалу огорожувальної дамби

Номер типу елементів	Найменування	Питома вага, γ , кН/м ³	Модуль деформації, E , кПа	Коефіцієнт Пуассона, ν , дол. од.	Питоме зчеплення, C , кПа	Кут внутрішнього тертя, ϕ , град
1	Суглинок легкий (дамба)	19,23	53190,0	0,30	22,0	20,9
2	Супісок $S_r < 0,8$ (дамба)	18,93	40400,0	0,30	11,5	24,7
3	Супісок $S_r \geq 0,8$ (дамба)	17,87	30570,0	0,35	7,0	18,3
4	Суглинок $S_r < 0,8$ (дамба)	19,23	54460,0	0,30	26,7	22,0
5	Суглинок $S_r \geq 0,8$ (дамба)	19,03	33480,0	0,35	26,0	20,0
6	Фосфогіпс	15,00	15000,0	0,30	18,7	27,8
7	Супісок (РАВ)	18,00	16000,0	0,30	8,7	20,9
8	Пісок	17,00	40000,0	0,30	1,3	34,5
9	Граніт	25,50	45000000	0,12	110000,0	32,0

Критерієм забезпечення стійкості укосів проектного породного відвалу було виконання для найнебезпечнішої призми зсуву нерівності:

$$\gamma_{fc} F \leq \frac{1}{\gamma_n} \left(R \frac{\gamma_c}{\gamma_{m(g)}} \right) \quad (4.1)$$

де: γ_n , γ_{fc} , γ_c , $\gamma_{m(g)}$ – коефіцієнти, відповідно, надійності за відповідальністю, сполучення навантажень, умов роботи, надійності за матеріалами або ґрунтами;

R – узагальнене розрахункове значення сил (або їх моментів) граничного опору зсуву по поверхні, що розглядається;

F – узагальнене розрахункове значення активних сил (або моментів цих сил) відносно центра поверхні ковзання.

При пошуку небезпечної поверхні зсуву використана залежність для коефіцієнта стійкості:

$$k_s = \frac{R}{F} \quad (4.2)$$

звідки умова (4.1) може бути записана як

$$k_s \geq [k_s], \quad (4.3)$$

де $k_s \geq [k_s]$ – допустиме (нормоване) значення коефіцієнта стійкості:

$$[k_s] = \frac{\gamma_n \cdot \gamma_{fc} \cdot \gamma_{m(g)}}{\gamma_c}. \quad (4.4)$$

Відповідно до класу (підкласу) відповідальності СС3, до якого віднесено огорожувальну споруду, для періоду експлуатації при основному сполученні навантажень для категорії відповідальності конструкції та її елементів А значення нормованого коефіцієнта надійності згідно з ДБН-В.1.2-14-2018 [69] становить $\gamma_n = 1,25$.

Відповідно до основного поєднання навантажень ($\gamma_c = 1,0$) під час застосування розрахункових значень властивостей ґрунтів (значення коефіцієнта надійності за ґрунтами $\gamma_{m(g)} = 1,0$ і коефіцієнт умов роботи $\gamma_c = 1,0$), допустиме нормоване значення коефіцієнта запасу стійкості для основного поєднання навантажень становить $[k_s] = 1,25$.

Розрахунки геомеханічної стійкості огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» показали, що її напружено-деформований стан у межах досліджуваних ділянок визначається геометричними розмірами дамби, закладенням її низових укосів, положенням рівневої поверхні ґрунтових вод і розподілом деформаційних характеристик матеріалу в профілі.

Вплив обводнення огорожувальної споруди на її геомеханічний стан визначено порівняльним розрахунком стійкості дамби хвостосховища в необводненому стані та за існуючого рівня ґрунтових вод, що представлено для розрахункових профілів 1 і 3 (рис. 4.8, 4.9).

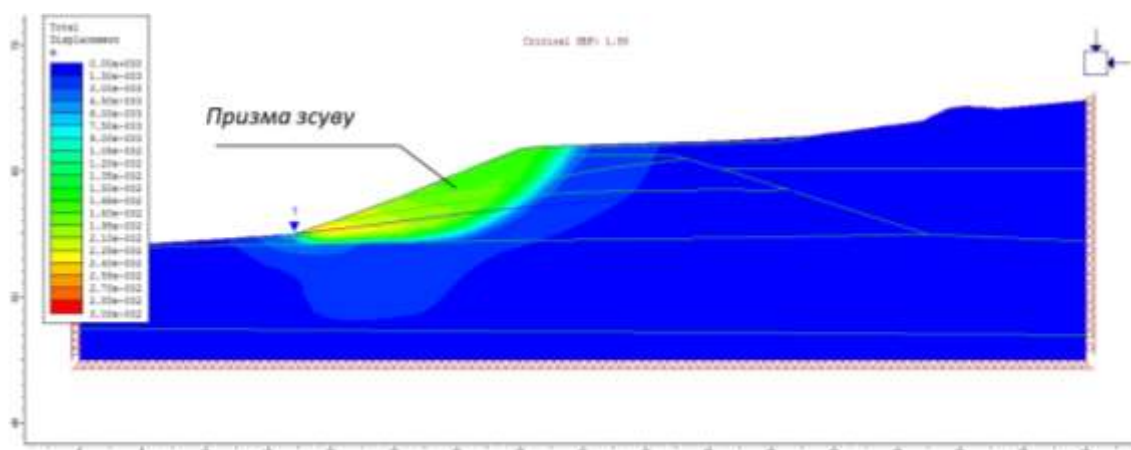


Рисунок 4.8 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби при існуючому положенні рівня ґрунтових вод, розрахунковий профіль 1-1 – $k_s = 1,580$

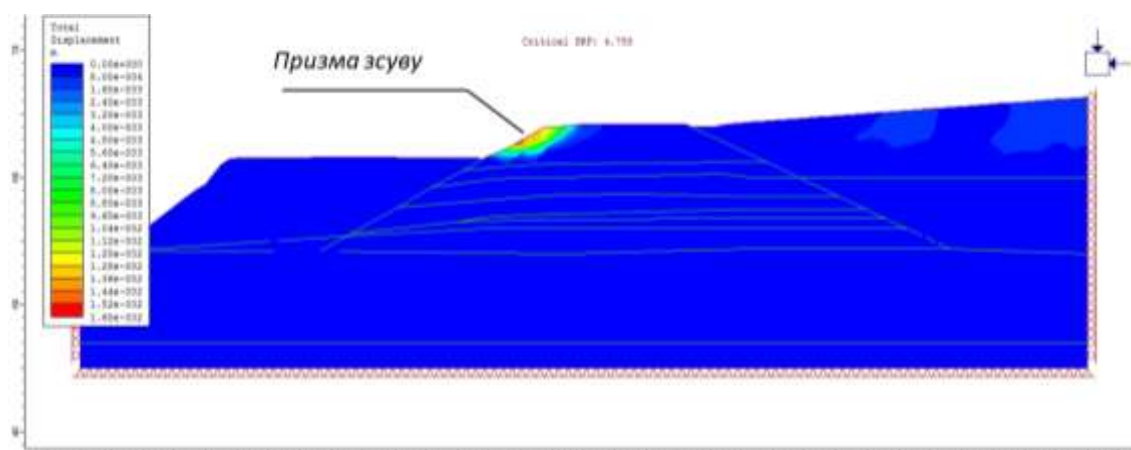


Рисунок 4.9 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби за існуючого рівня ґрунтових вод, розрахунковий профіль 3-3, $k_s = 4,758$

Отримані за результатами моделювання значення коефіцієнта стійкості k_s (табл. 4.7) перевищують нормоване для даного класу споруд значення $[k_s] = 1,25$, що свідчить про достатню стійкість низових укосів огорожувальної дамби в межах оцінюваних ділянок. Насамперед це стосується ділянок профілів 3-3 і 4-4, де в межах низового укосу дамби розташована залізнична насип, яка виконує роль упорної призми в межах її примикання до огорожувальної дамби. Розрахований коефіцієнт запасу стійкості для цих ділянок $k_s = 2,613...4,758$ не залежить від положення рівня ґрунтових вод в огорожувальній споруді.

Для оцінки геомеханічного стану ділянки огорожувальної дамби з встановленими за результатами моделювання дещо зниженими значеннями

коефіцієнта стійкості $k_s = 1,580 \dots 1,695$ (табл. 4.7, профілі 1-1 і 2-2) виконана деталізація укосів дамби стосовно їх геометричних розмірів та змін у вертикальному перерізі властивостей породного матеріалу за даними розвідувального буріння та інженерно-геологічного опробування.

Таблиця 4.7 – Розраховані значення коефіцієнта запасу стійкості низового укосу огорожувальної дамби

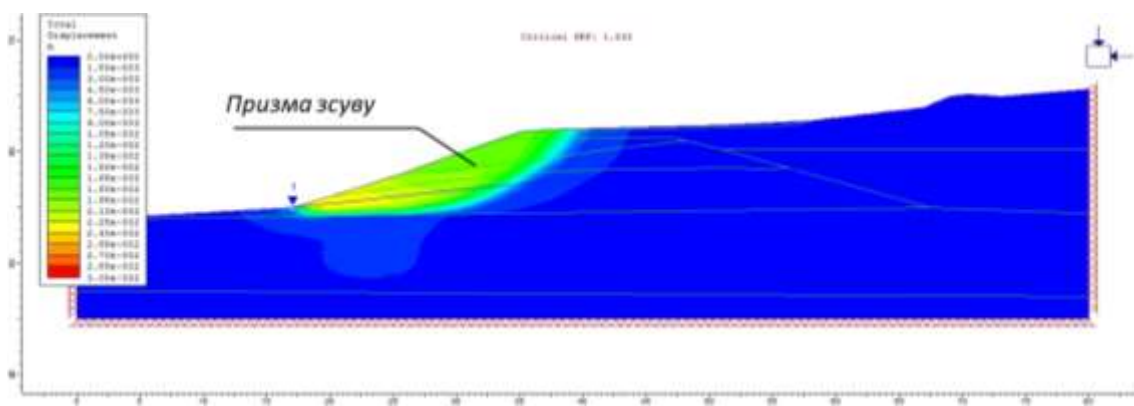
Варіанти рішень	Коефіцієнт стійкості, k_s , частки од.			
	Розрахункові (розвідувальні) профілі			
	1-1 (I-I)	2-2 (III-III)	3-3 (IV-IV)	4-4 (VII-VII)
Дамба в необхідному стані	1,744	1,978	4,758	2,613
Дамба при існуючому положенні рівня ґрунтових вод	1,580	1,695	4,758	2,613

Положення рівня водоносного горизонту в основі огорожувальної дамби вздовж розрахункових перерізів ділянок, що моделюються, прийнято за результатами замірів рівня води у п'єзометрах і даними геофізичних досліджень. Згідно з даними замірів в п'єзометрах у межах ділянок, рівень ґрунтових вод в основі дамби знаходиться на глибині від 6,61 до 8,20 м, що відповідає його положенню на абсолютних відмітках 54,90 – 55,42 м.

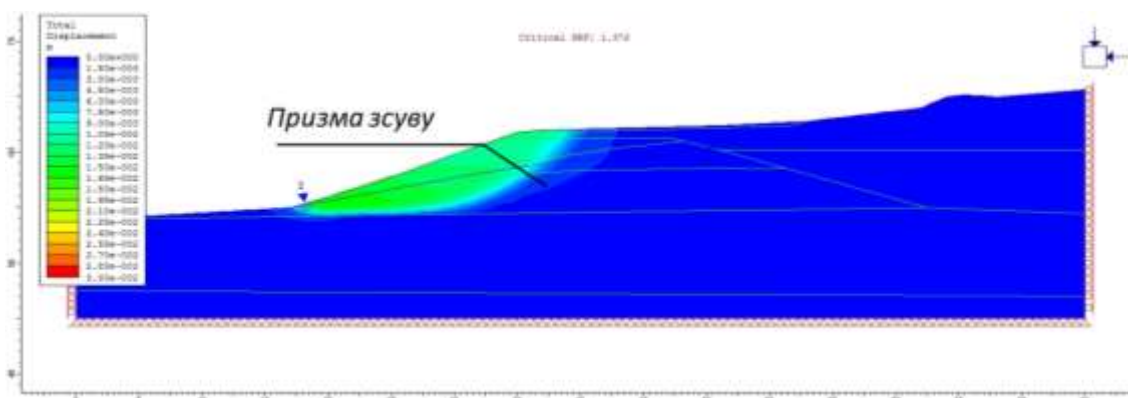
При визначенні потужності водонасиченої зони вище рівня ґрунтових вод використані результати розвідувального буріння та лабораторного визначення вологості ґрунтів у межах інтервалів опробування.

Зважаючи на положення поверхні ковзання для розрахункових профілів 1-1 і 2-2 і призм потенційного зсуву в товщі ґрунтів у підшві огорожувальної споруди, опір розвитку зсувних деформацій на цих ділянках можна порівняти з опором зсуву алювіальних пісків в основі дамби (рис. 4.10, 4.11).

При цьому розвиток зсувних деформацій відбувається в тілі дамби з концентрацією максимальних значень в межах низової ділянки укосу. В цих умовах, на зниження стійкості оцінюваних ділянок зростає вплив можливого підйому рівня води й пов'язаного з ним зниження механічних властивостей породного матеріалу, що складає тіло зовнішньої огорожувальної дамби.



1)



2)

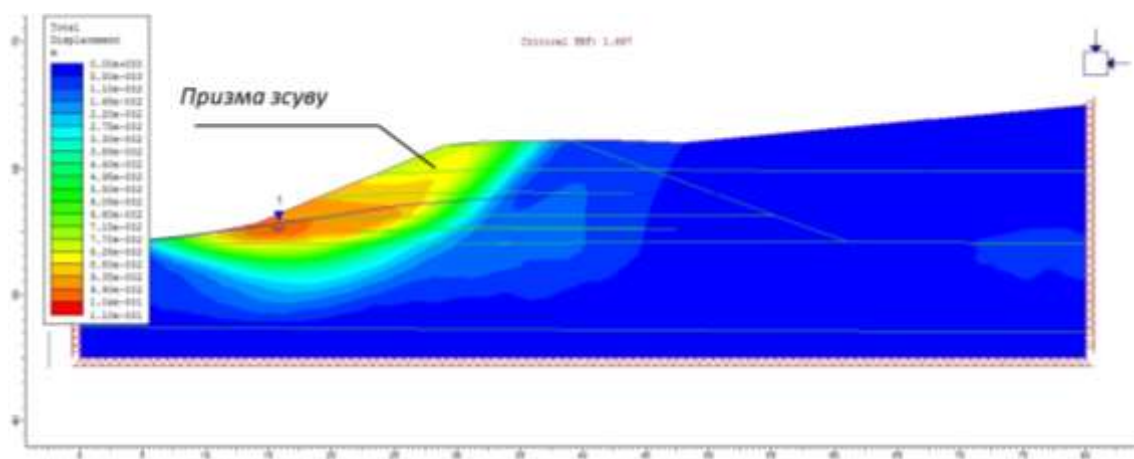
Рисунок 4.10 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби, розрахунковий профіль 1-1:

- 1) – при зниженні параметрів міцності матеріалу дамби вище рівня ґрунтових вод до величин, що відповідають їх водонасиченому стану ($k_s = 1,532$);
- 2) – при заданому підйомі рівня ґрунтових вод до покрівлі обводненої товщі ґрунтів ($k_s = 1,372$)

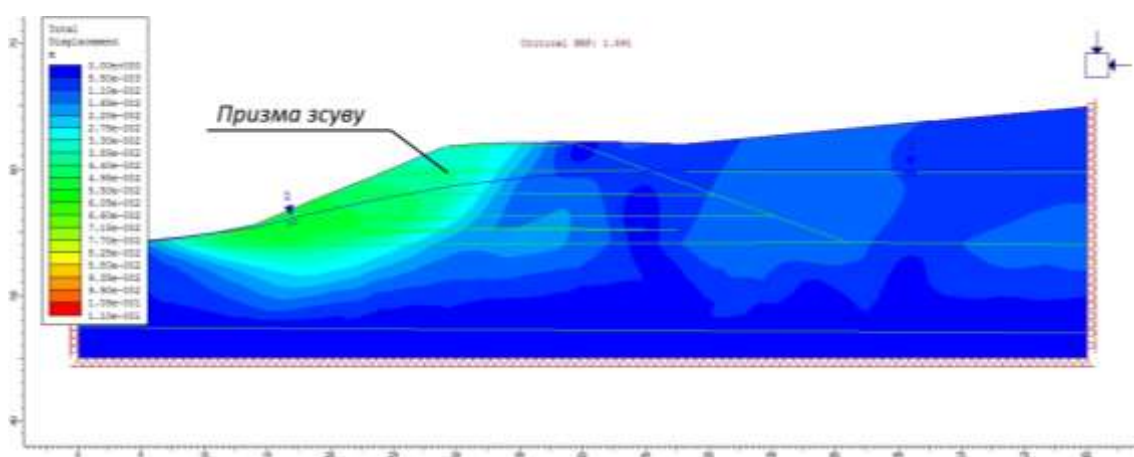
Встановлені за даними моделювання значення коефіцієнта стійкості, що враховують наявність в розрізі дамби вище рівня підземних вод ґрунтів з вологістю, близькою до їх повного насичення ($S_r > 0,8$), наведені в табл. 4.8.

Ділянка дамби, розташована в створі перерізу 1-1, характеризується мінімальним значенням коефіцієнта запасу стійкості $k_s = 1,372$. Це пов'язано з визначальним впливом на стан огорожувальної дамби інтервалу водонасичених ґрунтів потужністю до 3,8 м, розташованих вище рівня ґрунтових вод за середньої висоти дамби 7,5 м і закладенні її низового укосу 1:1,8.

В цілому ж, отримані значення коефіцієнта запасу стійкості для ділянок, що розглядаються, перевищують встановлене допустиме нормоване значення $[k_s] = 1,25$, що свідчить про збереження стійкого стану низового укосу дамби при можливому підвищенні рівня води в межах інтервалу ґрунтів з підвищеною вологістю.



1)



2)

Рисунок 4.11 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби, розрахунковий профіль 2-2:

1) – при зниженні параметрів міцності матеріалу дамби вище рівня ґрунтових вод до величин, що відповідають їх водонасиченому стану ($k_s = 1,667$);

2) – при розрахунковому підйомі рівня ґрунтових вод до покрівлі обводненої товщі ґрунтів ($k_s = 1,591$)

Таблиця 4.8 – Розраховані значення коефіцієнта стійкості низового укосу огорожувальної дамби на ділянці деталізації

Стан огорожувальної дамби	Коефіцієнт стійкості, k_s , частки од.	
	Розрахункові (розвідувальні) профілі	
	1-1 (I-I)	2-2 (III-III)
Існуюче положення рівня підземних вод, знижені вище рівня води параметри міцності	1,532	1,667
Розрахункове положення рівня підземних вод, знижені параметри міцності в обводненій зоні	1,372	1,591

4.2 Оцінка геомеханічної стійкості дамби хвостосховища «Сухачівське»

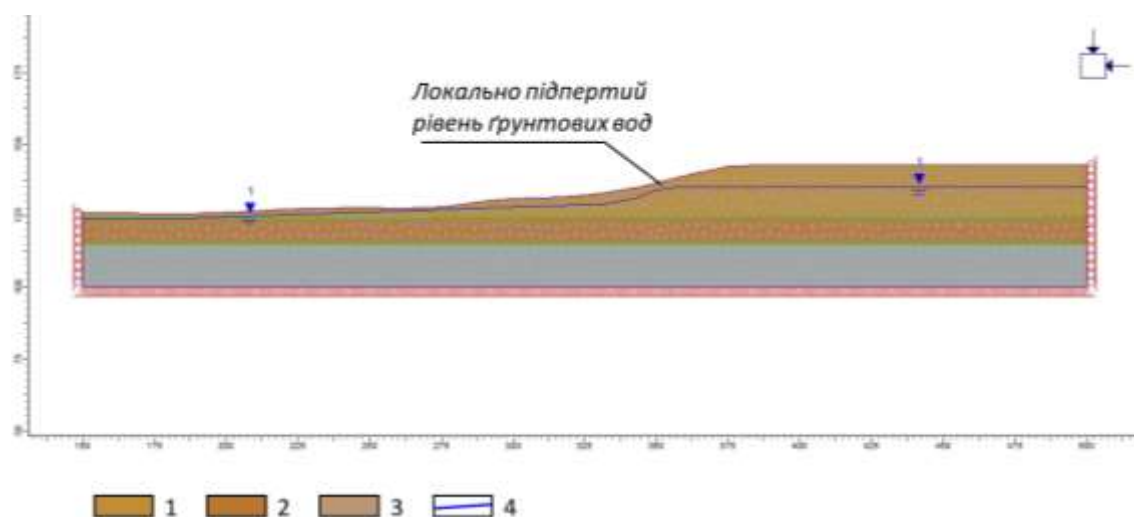
Оцінка геомеханічної стійкості огорожувальної дамби хвостосховища «Сухачівське» виконана з використанням математичного моделювання за наведеною вище методикою. До розрахунку були прийняті два профілі, проведені через характерні ділянки дамби (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 – Схема розташування розрахункових профілів на ділянці огорожувальної дамби хвостосховища «Сухачівське»

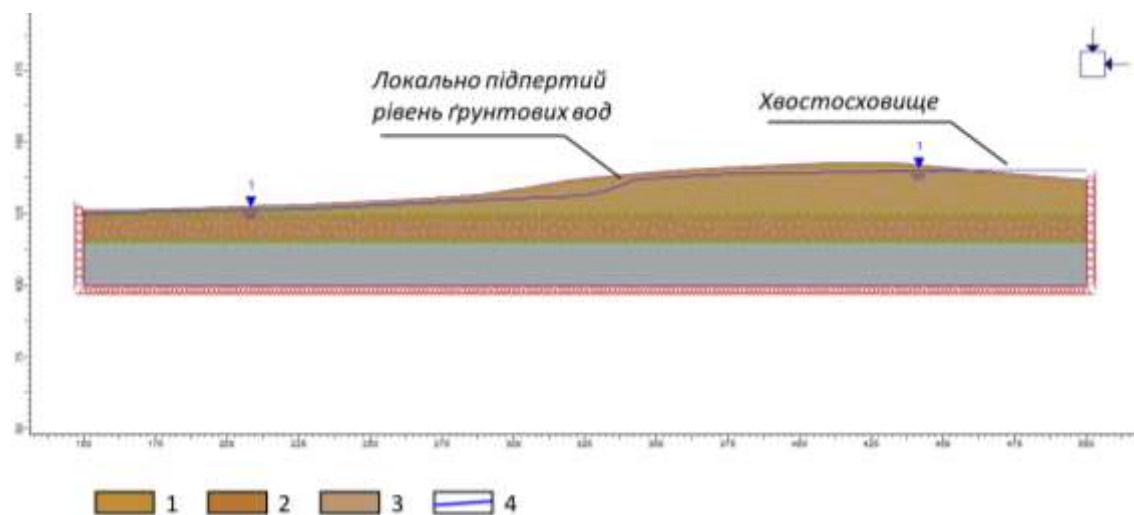
При виборі розрахункових профілів враховувалось їх положення відносно чаші хвостосховища, вплив якого визначає положення гідравлічної депресії у низовому укосі дамби, і, як наслідок, геомеханічної стійкості самої дамби.

При виконанні модельних розрахунків враховані також результати геофізичної зйомки методом природного імпульсного електромагнітного поля землі (розділ 3), згідно з якими зафіксовано положення зон обводнення ґрунтової товщі в межах низового укосу огорожувальної дамби (зони 3 і 6). Відповідно до положення цих зон на розрахункових профілях було задано підвищене положення рівнів ґрунтових вод, що може бути одним із чинників розвитку суфозійних процесів і, як наслідок, порушення стійкості низового укосу дамби хвостосховища (рис. 4.13 і 4.14).



1 – супісок ($S_r \geq 0,8$); 2 – суглинок ($S_r \geq 0,8$); 3 – пісок; 4 – рівень ґрунтових вод

Рисунок 4.13 – Розрахункова схематизація ділянки огорожувальної дамби хвостосховища «Сухачівське» – профіль 1-1



1 – супісок ($S_r \geq 0,8$); 2 – суглинок ($S_r \geq 0,8$); 3 – пісок; 4 – рівень ґрунтових вод

Рисунок 4.14 – Розрахункова схематизація ділянки огорожувальної дамби хвостосховища «Сухачівське» – профіль 2-2

Врахування динамічних впливів від руху автомобільного транспорту по дамбі хвостосховища виконано з використанням даних щодо зниження параметрів міцності супіщаних і суглинистих ґрунтів на стійкість штучного ґрунтового масиву. Згідно з результатами досліджень, наведених у [205], зниження величин питомого зчеплення і кута внутрішнього тертя при величині вібраційного прискорення від руху наземного транспорту близько $4,0 \text{ м/с}^2$ для типових ґрунтових умов складає:

$$- \text{ для питомого зчеплення } - \frac{C}{C_d} = 1,9;$$

$$- \text{ для кута внутрішнього тертя } - \frac{\varphi}{\varphi_d} = 1,4;$$

де: C і φ – відповідно розрахункові значення питомого зчеплення і кута внутрішнього тертя супіщаних і суглинистих ґрунтів;

C_d і φ_d – те ж, в умовах дії динамічних (вібраційних) навантажень на рівні $4,0 \text{ м/с}^2$.

В характерних для даної території умовах для виділених геолого-генетичних типів літологічних різновидів ґрунтів – супісків і суглинків лесовидних, були прийняті осереднені значення параметрів міцності при ступені водонасиченості $S_r > 0,8$, відповідно рівних для супіщаних ґрунтів $C = 7,0 \text{ кПа}$, $\varphi = 18,3^\circ$, для суглинистих – $C = 26,0 \text{ кПа}$, $\varphi = 20,0^\circ$.

При прийнятих розрахункових значеннях параметрів міцності їх значення за умови динамічних впливів становили:

– супіщані ґрунти:

$$C_d = \frac{C}{1,9} = 3,68 \text{ кПа};$$

$$\varphi_d = \frac{\varphi}{1,4} = 13,07^\circ;$$

– суглинисті ґрунти:

$$C_d = \frac{C}{1,9} = 14,28 \text{ кПа};$$

$$\varphi_d = \frac{\varphi}{1,4} = 13,68^\circ.$$

Згідно з даними модельних розрахунків отримані значення коефіцієнту запасу стійкості для характерних перерізів огорожувальної дамби складають: для профілю 1 – $k_s = 1,797$, для профілю 2 – $k_s = 2,552$ (рис. 4.15, 4.16). В умовах

дії динамічних навантажень від руху наземного транспорту фіксується зниження стійкості низового укосу ґрунтової дамби, яка характеризується коефіцієнтами запасу стійкості відповідно $k_s = 1,202$ і $k_s = 1,704$ (рис. 4.17, 4.18).

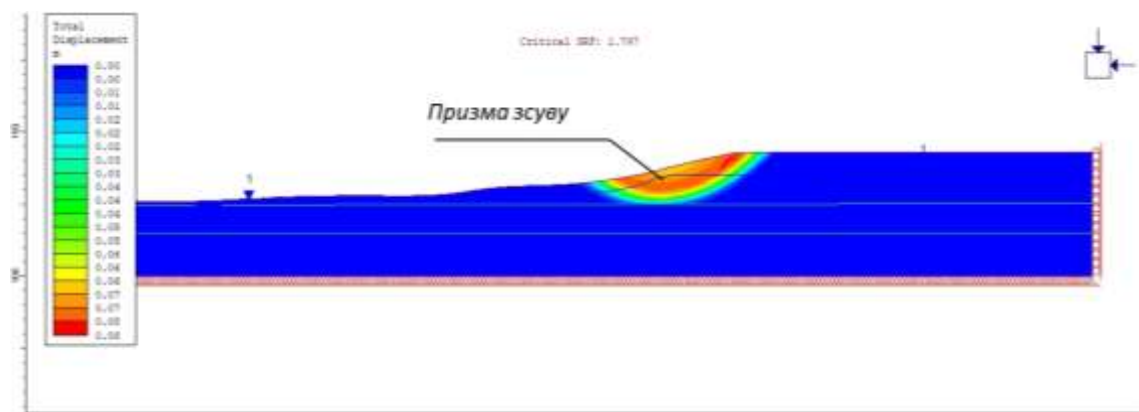


Рисунок 4.15 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби, розрахунковий профіль 1-1 – $k_s = 1,797$

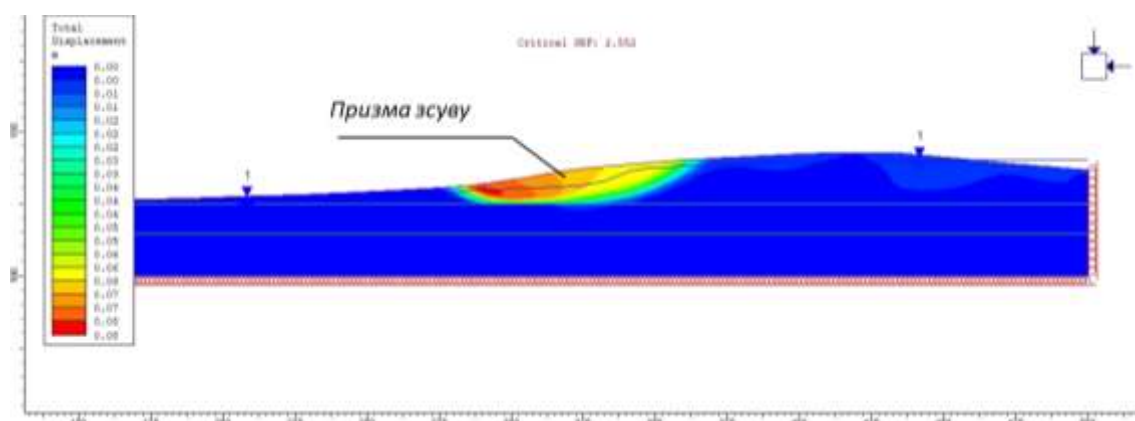


Рисунок 4.16 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби, розрахунковий профіль 2-2 – $k_s = 2,552$

Наявність достатнього навіть за умови обводнення верхньої частини укосу дамби хвостосховища і динамічних навантажень запасу стійкості (окрім в умовах динамічного впливу для профілю 1, для якого коефіцієнт стійкості менше нормативного $\gamma_n = 1,25$) дозволяє розглядати у якості можливого фактору порушення існуючого стану ґрунтового масиву діяльність фільтраційних вод і пов'язані з ними прояви поверхневої суфозії. В останньому випадку інтенсивність суфозійних процесів буде визначатися величиною гідравлічного градієнту на ділянці локально підпертого рівня ґрунтових вод в укосі дамби.

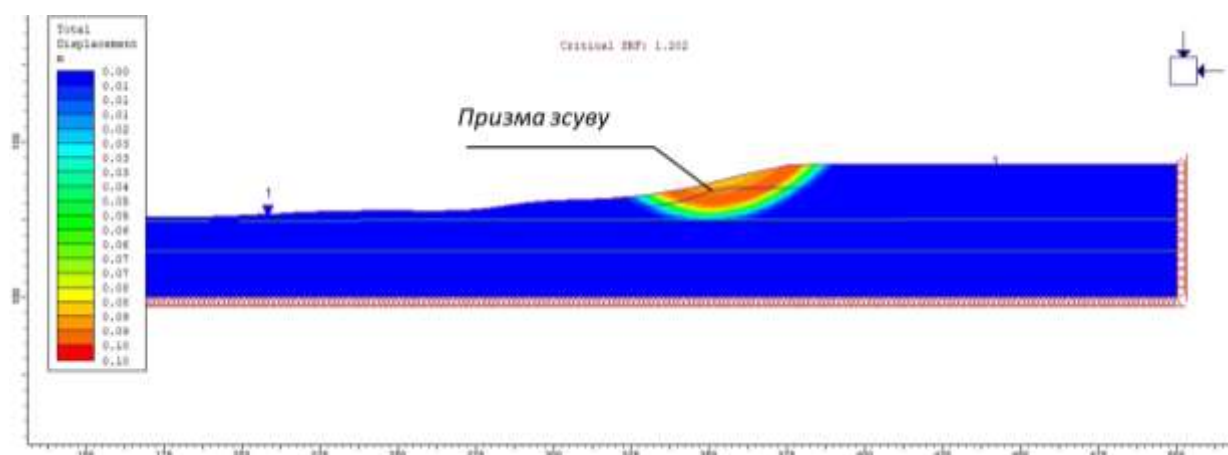


Рисунок 4.17 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби в умовах дії динамічного навантаження, розрахунковий профіль 1-1 – $k_s = 1,202$

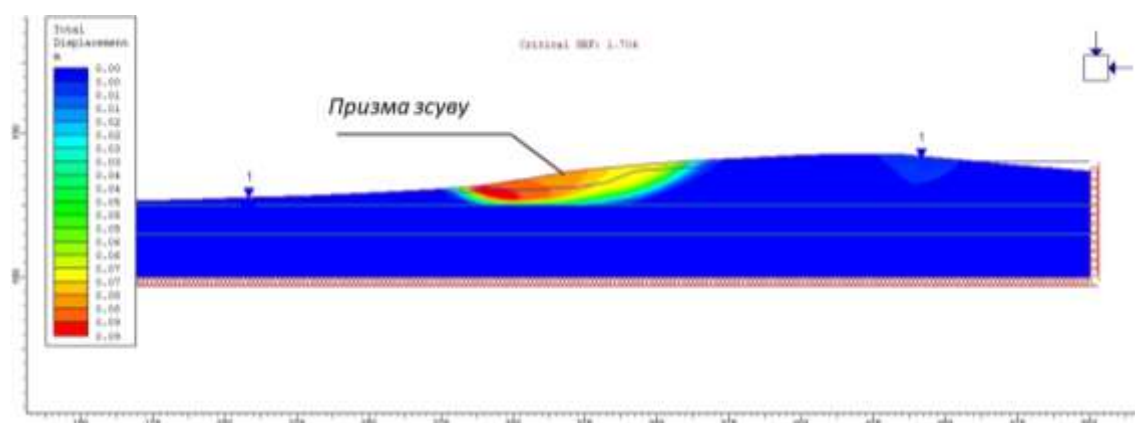


Рисунок 4.18 – Характер зсувного деформування низового укосу огорожувальної дамби в умовах дії динамічного навантаження, розрахунковий профіль 2-2 – $k_s = 1,704$

4.2.1 Оцінка та прогноз міграції радіонуклідів через дамбу хвостосховища «Дніпровське».

Фільтраційна та геоміграційна схематизація. Наявні дані для проведення розрахунків міграції, що були отримані за результатами бурових та геодезичних робіт на ділянці хвостосховища «Дніпровське» у 2022 р., зведені у табл. 4.1, 4.2.

У попередніх дослідженнях для оцінки екологічної небезпеки хвостосховищ колишнього Придніпровського хімічного заводу використовувалися чисельні моделі геоміграції, зокрема, з використанням методу скінченних різниць у програмі ModFlow [206]. Зауважимо, що протяжна форма області фільтрації та подібність профілів між дамбою та річкою дозволяють у такому випадку використати більш гнучкі аналітичні моделі

міграції [207, 208], вільні від похибок різницевої апроксимації. Це дозволить точніше адаптувати модель міграції до розрахункових профілів (рис. 4.1, 4.19-а).

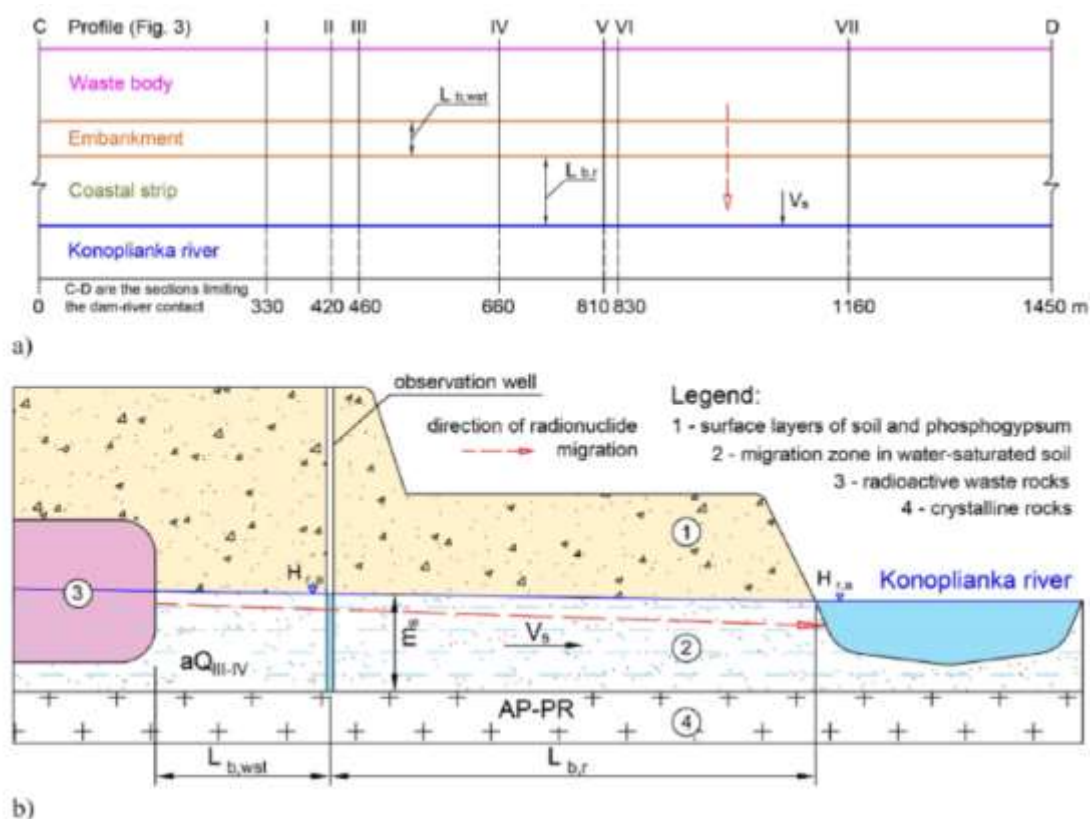


Рисунок 4.19 – Схематизація області фільтрації та міграції:
 а) представлення зони між р. Коноплянка та хвостосховищем;
 б) вертикальний профіль ділянки між хвостосховищем та р. Коноплянка (позначення див. у тексті)

Для розрахунків міграції необхідно визначити такі параметри:

- 1) довжина шляху міграції від джерела надходження радіонуклідів з хвостосховища до берега р. Коноплянка;
- 2) швидкість фільтрації, яка визначається за різницею між рівнями води у свердловині й р. Коноплянка і коефіцієнтами фільтрації порід у зоні обводнення за схемою безнапірної течії ґрунтових вод;
- 3) потужність зони обводнення, яка визначається як різниця між рівнем ґрунтових вод та рівнем водотриву (слабопроникних порід під зоною обводнення);
- 4) ширина зони розвантаження ґрунтових вод з дамби до р. Коноплянка;
- 5) інтенсивність переходу радіонуклідів з твердої фази у розчинний стан.

За даними геофізичних досліджень у 2022 р. та попередніх вимірювань активності ґрунтів на території хвостосховища «Д» [129, 199, 200], радіоактивно забруднений шар знаходиться на рівні рівня ґрунтових вод або кілька метрів нижче. Тоді припустимо прийняти схему горизонтальної міграції з джерелом надходження речовин, що знаходиться безпосередньо у водоносному шарі, причому це джерело радіонуклідів майже повністю займає зону насичення [207, 208] (рис. 4.19, б).

Період міграції радіонуклідів з відвалів через зону насичення водою визначається як:

$$t_m = \frac{L_{wst,r}}{v_m} = \frac{L_{wst,r}}{\frac{v_s}{n_a}}. \quad (4.5)$$

де: $L_{wst,r}$ – відстань від контуру хвостосховища до р. Коноплянки,
 v_s – середня швидкість фільтрації на цій ділянці,
 n_a – активна пористість.

Швидкість фільтрації v_s на ділянці між шаром відходів та р. Коноплянка розраховується за формулою:

$$v_s = \frac{q_s}{m_s}, \quad q_s = K \frac{H_{b,a}^2 - H_{r,a}^2}{2L_{b,r}}, \quad (4.6)$$

де: m_s – середня потужність зони насичення над кристалічними породами,
 K – коефіцієнт фільтрації порід у цій зоні, визначений за літологічним складом, встановленим для кожної свердловини (табл. 4.1),

$H_{b,a}$ та $H_{r,a}$ – середньобогаторічні рівні води у спостережній свердловині в шарі відходів та р. Коноплянка протягом періоду розрахунку, відповідно,

$L_{b,r}$ – відстань від свердловини до берега.

Сумарна витрата підземних вод на ділянці, де вони розвантажуються до з хвостосховища у р. Коноплянка (ділянка між розрізами I–I' та VII–VII') визначається інтегруванням питомої витрати q_s уздовж цієї ділянки:

$$Q_{gw} = \int_{l_I}^{l_{VII}} q_x dl \quad (4.7)$$

Відстань між контуром хвостосховища та берегом р. Коноплянки оцінюється так $L_{wst,r} = L_{b,r} + L_{b,wst}$, де $L_{b,wst}$ – відстань між свердловинами та контуром хвостосховища, яка оцінюється у діапазоні 5–10 м.

Оцінена за даними досліджень швидкість фільтрації (табл. 4.1) на ділянці дамби довжиною 830 м змінюється від 0,09 м/доб (розріз VII–VII') до 1,67 м/доб (розріз IV–IV'). Тривалість фільтрації уздовж ліній течії від контуру хвостосховища до берега річки на більшій частині ділянки не перевищує 2 місяці, і лише на розрізі VII–VII' може перевищити один рік.

Модель водної міграції радіонуклідів з хвостосховища. Зважаючи на коротку відстань між контуром хвостосховища та берегом р. Коноплянки можна вважати, що міграція радіонуклідів відбувається лише в одному напрямку – перпендикулярно берегу. Тому для розрахунків допустимо використовувати рівняння одновимірної конвективної дифузії речовин, що розпадаються, за умов рівноважної сорбції [207, 207]:

$$D \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial C_f}{\partial x} - \lambda n_e C_f = n_e \frac{\partial C_f}{\partial t} \quad (4.8)$$

де: C_f – концентрація радіонукліда у рідкій фазі,

D – коефіцієнт конвективної дифузії у водонасиченій породі,

v_s – швидкість фільтрації,

λ – константа радіоактивного розпаду,

$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$, $T_{1/2}$ – період піврозпаду радіонукліда,

n_e – т. зв. ефективна пористість, яка враховує рівноважну сорбцію за ізотермою Генрі, $n_e = n + \bar{K}_d$,

$\bar{K}_d$ – безрозмірний коефіцієнт розподілу,

$$\bar{K}_d = K_d \rho_{sk} \quad (4.9)$$

де: K_d – коефіцієнт розподілу речовини між твердою та рідкою фазами, $\text{см}^3/\text{г}$;

ρ_{sk} – щільність скелета ґрунту, $\text{г}/\text{см}^3$;

n – пористість.

Згідно з ізотермою Генрі рівноважної сорбції концентрація речовини у твердій фазі C_s лінійно пропорційна концентрації речовини у рідкій фазі C_f :

$$C_s = \bar{K}_d C_f. \quad (4.10)$$

Коефіцієнт розподілу K_d залежить від речовини, властивостей порід, мінералізації порового розчину, присутності в ньому інших домішок тощо [151–154]. Кількість поглиненої речовини зростає з уповільненням швидкості фільтрації.

Загальна активність радіонукліда в елементарному об'ємі породи A_t дорівнює:

$$A_{tot} = A_f + A_s = V_0 (nC_f + C_s) = V_0 (nC_f + \rho_{sk} K_d C_f). \quad (4.11)$$

Враховуючи, що загальна активність радіонуклідів визначалась для зразків з урахуванням твердої та рідкої фаз $A_{tot} = V_0 C_{tot}$, де C_{tot} – загальна концентрація радіонукліда у зразку ґрунту, то можна записати:

$$C_f = \frac{C_{tot}}{n + \rho_{sk} K_d}. \quad (4.12)$$

За формулою (4.12) за відомими лабораторними даними щодо C_{tot} можна визначити рівноважну концентрацію радіонукліда у поровому розчині, здатну до міграції, тобто концентрацію мобільної форми. Оскільки запаси радіонуклідів у шарі відходів достатньо великі відносно їх щорічного зменшення внаслідок розпаду та міграції, то можна прийняти, що у поровому розчині в шарі водонасичених відходів підтримується усталена протягом багатьох років концентрація, яка дорівнює C_f . Отже, для розрахунків міграції надалі використовується рівноважна концентрація у шарі відходів, обчислена за формулою (4.12).

Через великі значення коефіцієнта розподілу K_d [209–212] для ^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , тривалість їх міграції становитиме для не більше кількох років, що значно менше порівняно з періодом їх піврозпаду. Однак тривалість міграції ^{210}Pb у 5–8 років для відповідних K_d вже порівняна з періодом піврозпаду цього ізотопу (22,3 роки), тому при прогнозі міграції ^{210}Pb , на відміну від інших, треба враховувати розпад.

Радіонукліди ^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra та ^{210}Pb є елементами одного ланцюга розпаду і, строго кажучи, мають моделюватися системою рівнянь міграції всіх елементів, як запропоновано у [207]. Разом з тим, враховуючи значний період піврозпаду перших трьох елементів відносно періоду експлуатації хвостосховища (близько 60 років), коли між ними встановлюється так звана «вікова рівновага» [213, 214], можна розраховувати міграцію перших трьох елементів ланцюга незалежно один від одного. Вміст ^{210}Pb , який має значно менший період піврозпаду, дещо зменшується внаслідок радіоактивного розпаду. Але одночасно ^{210}Pb утворюється як дочірній елемент ^{226}Ra . Розрахунки за відповідною формулою з [213] показали, що загальне зменшення вмісту ^{210}Pb за 13 років з моменту останнього вимірювання у 2009 р. становить близько 0,1%, що несуттєво порівняно з варіаціями вмісту цього елемента при аналізах у понад 20%.

Питомий підземний стік розчинних речовин з ґрунтовими водами до поверхневих водотоків ψ_s , Бк/(м²·доб), розраховується за виразом [207]:

$$\psi_s = 2v_s C_{out}, \quad (4.13)$$

де C_{out} – концентрація радіонукліда в підземних водах на березі р. Коноплянки.

Оскільки швидкість фільтрації, потужність зони насичення та концентрація на виході з ґрунтового водоносного горизонту C_{out} змінюються уздовж берега, то загальний потік радіонуклідів з ґрунтовими водами на ділянці річки між розрізами I–I' та VII–VII', ψ_{Σ} , розраховується як інтеграл:

$$\psi_{\Sigma} = 2 \int_{l_I}^{l_{VII}} v_s C_{out} m_s dl, \quad (4.14)$$

в якому криволінійна координата l відлічується від розрізу I–I' до розрізу VII–VII'. При обчисленнях у формулі (4.14) інтеграл замінюється формулою трапецій, яка застосовується до кожної ділянки берега між розрізами.

Концентрація радіонуклідів у підземних водах C_{out} біля берега р. Коноплянки визначається на основі розрахунку їх горизонтальної міграції у зоні насичення за математичними моделями конвективної дифузії у водонасичених ґрунтах [207, 208, 116, 119, 215, 216]. Необхідна для проведення розрахунків концентрація радіонуклідів у поровому розчині в масі відвалів C_0 оцінюється за результатами лабораторного визначення загальної активності зразків ґрунту [197]. Вважається, що фізико-хімічний стан у водонасиченому шарі відходів описується лінійною ізотермою рівноважної сорбції (ізотермою Генрі), яка застосовна для тривалих періодів міграції з невеликою швидкістю та у разі малої масової концентрації речовин.

Зважаючи на незначну ширину р. Коноплянки (8–20 м) уздовж її річища на ділянці довжиною близько 1 км, де річка межує з хвостосховищем, можна прийняти, що відбувається достатньо повне перемішування радіонуклідів з водою, яка припливає зверху по течії. За середньої швидкості течії 0,1–0,2 м/с час проходження біля цієї ділянки не перевищує 3 години. Тоді середня концентрація радіонуклідів у р. Коноплянка C_{rK} може бути розрахована за формулою змішування:

$$C_{rK} = \frac{\psi_{\Sigma} + C_{rK,0} Q_{rK}}{Q_{gw} + Q_{rK}}, \quad (4.15)$$

де: ψ_{Σ} – потік радіонуклідів з ґрунтовими водами до р. Коноплянка, який розраховується за формулою (5.14);

$C_{rK,0}$ – концентрація радіонукліда у р. Коноплянка до ділянки розвантаження ґрунтових вод з хвостосховища;

Q_{gw} – витрата ґрунтових вод через ділянку їх розвантаження у р. Коноплянку між розрізами I–I' та VII–VII', ця витрата розраховується чисельним інтегруванням питомої витрати q_s , яка визначається за формулою (5.16), уздовж тієї ж ділянки берега;

Q_{rK} – середня витрата р. Коноплянки.

Концентрація радіонуклідів у воді р. Дніпро нижче місця впадіння до неї р. Коноплянки розраховується аналогічно формулі (4.15):

$$C_{rD} = \frac{C_{rK} Q_{rK} + C_{rD,0} Q_{rD}}{Q_{rK} + Q_{rD}}, \quad (4.16)$$

де: $C_{rD,0}$ – концентрація радіонукліда у р. Дніпро до місця впадіння до неї р. Коноплянки,

Q_{rD} – середня витрата р. Дніпро.

Властивості радіонуклідів, міграція яких визначалася при моніторингу і моделювалась, зведені до табл. 4.9. Наявні дані щодо вмісту радіонуклідів у шарі відходів за результатами різних досліджень узагальнено у табл. 4.3. Найбільшою мірою ділянки міграції стосуються дані зі свердловин 08-6Д, 08059, частково 08-16Д і 08-17Д; дані з досліджень № 8-10 не конкретизовані стосовно місця відбору, і можуть використовуватися для оцінювання концентрацій радіонуклідів на південному контурі хвостосховища, з якого триває їх міграція до р. Коноплянки.

Таблиця 4.9 – Властивості радіонуклідів, що контролювалися при моніторингу хвостосховища «Дніпровське» [204]

Радіонуклід	U-238	Th-230	Ra-226	Pb-210
Період піврозпаду, років	$4,468 \cdot 10^9$	$7,7 \cdot 10^4$	1600	22,3
Гранична концентрація у воді ДКВ, Бк/м ³	$1 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^2$ (*)	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$

* для ^{230}Th значення відсутнє, тому воно прийнято для ^{232}Th

Виходячи з аналізу табл. 4.2 та 4.3, можна зробити такі висновки.

1. Наявні дані стосуються шарів у діапазоні глибин 2,5–21 м, отже, ці інтервали потрапляють до зони водонасичення і є вихідними для розрахунків концентрації мобільних форм радіонуклідів у рідкій фазі.

2. Існує досить великий розкид значень та неоднорідність розподілу вмісту радіонуклідів по профілю, причому стандартне відхилення результатів з різних місць випробування варіює від 10% до 50%. Дані по свердловині 09-22Д з аномально великим розкидом даних безпосередньо не враховувались, але середні значення також бралися до уваги.

3. Локалізовані дані по свердловинах 08-16Д, 08-17Д, 08-6Д, 08038, 08045, 08059 не визначені для окремих радіонуклідів, тому до уваги брався лише вміст у них природного урану.

Розрахунки проводилися за припущення щодо однаковості концентрацій кожного радіонукліду уздовж ділянки. Тобто, за відсутності даних щодо мінливості концентрації радіонуклідів у кожному з 7 профілів вважалося, що концентрація радіонуклідів у шарі відходів однакова. При розрахунках вона приймалась як максимальна з табл. 4.2.

Як показали експериментальні дослідження [209–212], K_d залежить від рН, вмісту органічного та неорганічного вуглецю, оксидів заліза, різних компонентів ґрунтів, вмісту макрокомпонентів та хімічної форми радіонукліда (табл. 4.10). Більша частина ґрунтів, де відбувається міграція від дамби до берега річки, не містить багато органічних речовин, які здатні адсорбувати більшу кількість радіонуклідів. Це може стосуватися лише прибережної частини з більш розвинутою рослинністю. Зауважимо, що протягом міграції за кілька десятиліть сорбційний

потенціал навіть цієї зони вже значно вичерпаний, відповідні оцінки будуть наведені далі. Тому при прогнозах міграції на даний час доцільно виходити зі значень коефіцієнта K_d , з табл. 4.11, близьких до мінімальних значень.

Таблиця 4.10 – Коефіцієнти розподілу радіонуклідів K_d , см³/г, за даними лабораторних досліджень

Джерело зі списку посилань	U	Th	Ra	Pb
[209]	U(IV): 5000 (1000÷10000) ¹ U(VI): 10 (5÷20) ² 5 (1÷20) ³	5000 (1000÷10000) ¹	100 (50÷500) ² 20 (10÷100) ³	Не визначався
[210]	12÷34 ⁴	3495÷5845 ⁴	600÷800 ⁴	Не визначався
[211]	1700÷5800	25000÷85000	600÷2300	2500÷29000
[212]	—	—	—	10÷10 ⁷

Примітки:

1 – прісні та солоні води;

2 – прісні води (pH≥7, [Cl⁻] < 500 мг/л, Eh < -200 мВ);

3 – солоні води (pH≥7, 500 мг/л < [Cl⁻] < 6500 мг/л, Eh < -200 мВ);

4 – ґрунти з вмістом органічних речовин менше 21%, pH = 3,9–4,1.

Таблиця 4.11 – Оцінки загальної активності C_{tot} радіонуклідів у місцях прогнозу міграції [129] та коефіцієнти розподілу K_d для хвостосховища «Д» [197]

	Концентрація	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb
Загальна активність C_{tot} , Бк/кг	мінімальна	1196	21931	17810	15378
	середня	2011	41089	32360	30825
	максимальна	2825	60247	46909	46272
K_d in situ (хвости), мл/г	мінімальний	31	10000	700	1298
	середній	232	40000	5250	9652
K_d in situ (алювіальні піски), мл/г	мінімальний	36	5102	1162	565
	середній	115	12755	5033	7464
K_d розрахункові (хвости), мл/г		30	10000	700	200
K_d розрахункові (алювіальні піски), мл/г	Консервативний варіант (I)	5	600	40	80
	Базовий варіант (II)	10	3000	200	100

З урахуванням загального вмісту радіонуклідів у шарі відходів (параметр C_{tot} , табл. 4.2) та коефіцієнтів їх розподілу (табл. 4.10) та формули (4.12), можна визначити діапазони концентрацій радіонуклідів у розчинній формі в поровому просторі шару відходів (табл. 4.12). Щільність скелета ґрунту $\rho_{sk} = 1,7$ г/см³, пористість $n = 0,25$.

Таблиця 4.12 – Оцінки діапазонів концентрації радіонуклідів у водонасиченому шарі відходів поблизу місць їх міграції [199, 200]. Період спостережень 16.07.2002–05.11.2003. За наявності кількох спостережень у дужках наведено середнє значення.

Профіль	Найближча свердловина	Вміст у водному розчині, Бк/дм ³			
		U _{прир}	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb
I–I'	4д	1,03÷4,43 (3,04)	0,11	0,02–0,14 (0,066)	0,33
II–II'	6д, 7д	3,2	0,11÷0,14 (0,125)	0,22÷0,24 (0,23)	0,08
III–III'	6д, 7д	3,2	0,11÷0,14 (0,125)	0,22÷0,24 (0,23)	0,08
IV–IV'	9д	2,95÷7,38 (4,4)	0,1	0,003÷0,17 (0,068)	0,09
V–V'	10д	1,64÷327,7 (92,6)	н.д.	0,007÷17,09 (3,27)	0,98÷6,4 (4,21)
VI–VI'	10д	1,64÷327,7 (92,6)	н.д.	0,007÷17,09 (3,27)	0,98÷6,4 (4,21)
VII–VII'	11д	0,76÷9,84 (3,86)	0,24	0,01÷0,27 (0,11)	0,11

н.д. – немає даних.

Прогнозні розрахунки міграції радіонуклідів включали визначення:

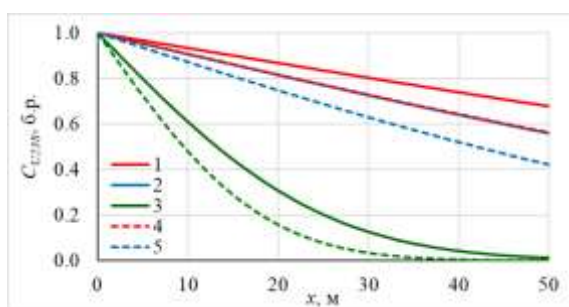
- 1) концентрації радіонуклідів у підземних водах межі ґрунтового водоносного горизонту – контуру його розвантаження до р. Коноплянки,
- 2) інтенсивності надходження радіонуклідів до р. Коноплянки й р. Дніпро, їх концентрацій у цих водотоках.

Через відсутність даних щодо вмісту радіонуклідів у насичених ґрунтах в прибережній зоні за межами дамби південного контуру хвостосховища (наявні лише дані щодо шару порід під відходами) основними даними для верифікації розрахунків були дані гідрохімічного моніторингу вмісту радіонуклідів у водах р. Коноплянки та Дніпро [198, 203].

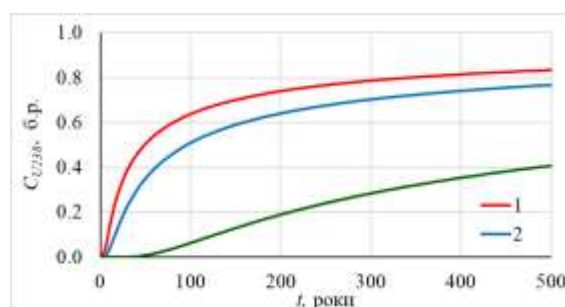
Концентрація радіонуклідів розраховувалась за аналітичними рішеннями рівняння конвективної дифузії (4.8), коли швидкість фільтрації спрямована до зовнішньої межі області течії з граничною умовою 3 роду – контакту підземних та поверхневих вод. Вихідна концентрація радіонуклідів на лініях течії (контурі хвостосховища) визначалась за найближчою свердловиною (табл. 4.6), а коефіцієнти розподілу приймалися за консервативним (I) та базовим (II) варіантами згідно з попередніми дослідженнями [197], які враховували експериментальні визначення K_d *in situ*. Варіанти розрахунків наведено у табл. 4.13, а їхні результати – на рис. 4.20–4.23.

Таблиця 4.13 – Варіанти розрахунків, результати яких наведено на рис. 5.13–5.16. Значення K_d за табл. 5.10, v_s – за даними табл. 5.1

Варіант	1	2	3	4	5	6
Рік прогнозу	2073	2073	2073	2023	2023	2023
K_d	I	II	II	I	II	II
v_s	Максимум, Профіль IV	Максимум, Профіль IV	Мінімум, Профіль VII	Максимум, Профіль IV	Максимум, Профіль IV	Мінімум, Профіль VII

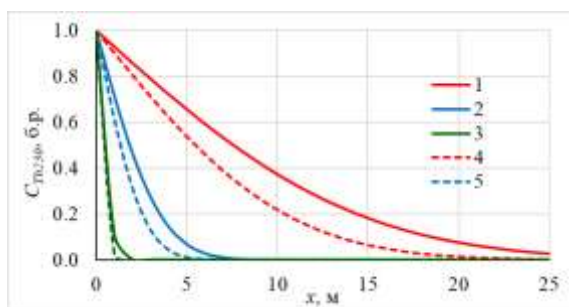


а

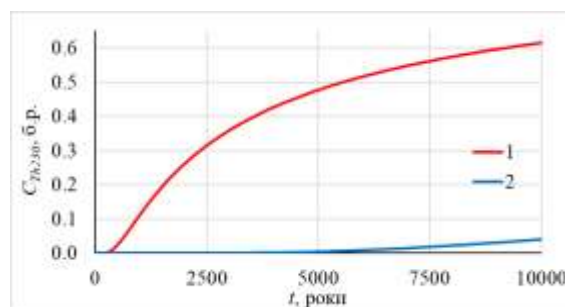


б

Рисунок 4.20 – Розраховані показники міграції ^{238}U від контуру хвостосховища уздовж ліній течії ґрунтових вод до берега р. Коноплянки: а) профіль відносної концентрації уздовж ліній течії на 2023 р., б) зміна відносної концентрації у часі на вході ліній течії у р. Коноплянка



а



б

Рисунок 4.21 – Розраховані показники міграції ^{230}Th від контуру хвостосховища уздовж ліній течії ґрунтових вод до берега р. Коноплянки: а) профіль відносної концентрації уздовж ліній течії на 2023 р., б) зміна відносної концентрації у часі на вході ліній течії у р. Коноплянка

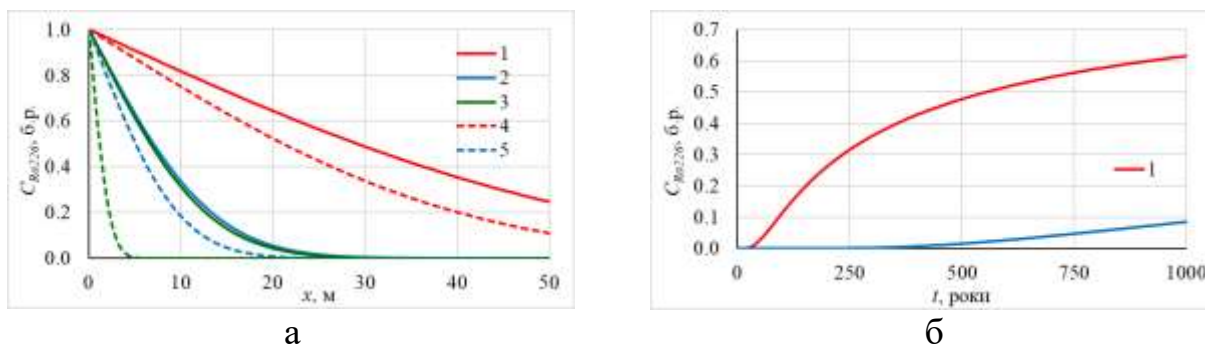


Рисунок 4.22 – Розраховані показники міграції ^{226}Ra від контуру хвостосховища уздовж ліній течії ґрунтових вод до берега р. Коноплянки: а) профіль відносної концентрації уздовж ліній течії 2023 р., б) зміна відносної концентрації у часі на вході ліній течії у р. Коноплянка

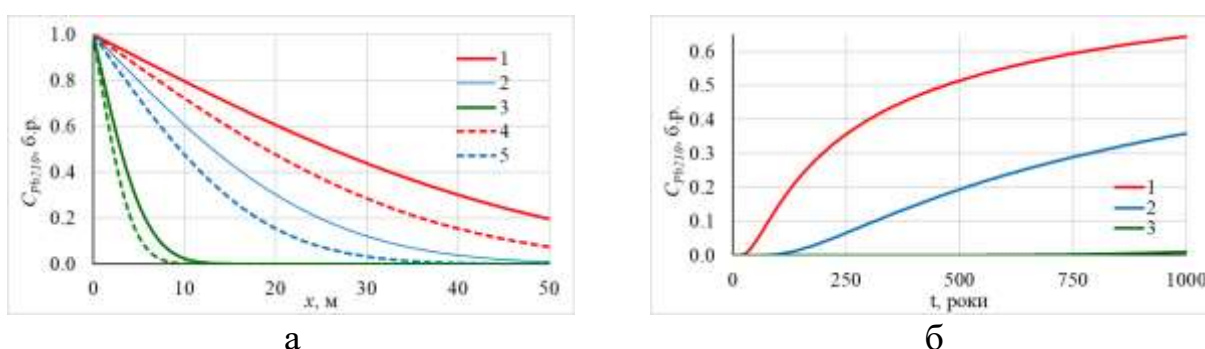


Рисунок 4.23 – Розраховані показники міграції ^{210}Pb від контуру хвостосховища уздовж ліній течії ґрунтових вод до берега р. Коноплянки: а) профіль відносної концентрації уздовж ліній течії на 2023 р., б) зміна відносної концентрації у часі на вході ліній течії у р. Коноплянка

Виходячи з результатів розрахунків, можна стверджувати, що на момент виконання розрахунку на 2023 р. (55 років з початку закладення хвостів у 1968 р. та їх водної міграції з того часу) концентрація радіонуклідів на вихідній межі ґрунтового горизонту ще не досягла свого максимального значення, яке фіксувалося у водному розчині відвалів. Концентрація урану у ґрунтових водах поблизу берегу р. Коноплянки зростає найбільше, тоді як концентрація радію і, особливо торію, залишилися практично незмінними, а фронт міграції, ймовірно, ще не дійшов берегу р. Коноплянки. Зауважимо, що така оцінка отримана для т. зв. консервативного варіанту параметрів сорбції із заниженими значеннями порівняно з експериментально визначеними.

Оцінені діапазони інтенсивності надходження радіонуклідів до р. Коноплянки та їх концентрація у поверхневих водах представлена у табл. 4.14.

Зауважимо, що пункт Kws1 знаходиться вище за течією р. Коноплянки відносно південного контуру хвостосховища і не входить до зони його впливу, тому підвищені концентрації радіонуклідів у ньому пов'язані з іншими джерелами їх надходження.

Таблиця 4.14 – Виміряні середньорічні концентрації радіонуклідів у поверхневих водах [198] та їх розраховані концентрації з урахуванням винесення з ділянки між розрізами I–I' і VII–VII' хвостосховища «Дніпровське» (Бк/л): для ^{238}U протягом 2010–2014 рр., для ^{226}Ra , ^{210}Pb – протягом 2010–2012 рр.

Пункт відбору	^{238}U		^{226}Ra		^{210}Pb	
	Вимірювання середнє мін.÷макс.	Розрахунок мін.÷макс.	Вимірювання середнє мін.÷макс.	Розрахунок мін.÷макс.	Вимірювання середнє мін.÷макс.	Розрахунок мін.÷макс.
Dws1	0,0164 0,011÷0,024	н.в.,	0,0177 0,009÷0,029	н.в.,	0,0293 0,024÷0,04	н.в.,
Kws1	0,1432 0,0920÷0,1850	н.в.,	0,0357 0,0280÷0,0500	н.в.,	0,0450 0,0300÷0,0550	н.в.,
Kws2	0,0804 0,0460÷0,1070	0,06÷0,08	0,0283 0,0220÷0,0350	0,0177÷0,0179	0,0363 0,0250÷0,0500	0,0293
Kws3	0,1576 0,1270÷0,1820	0,07÷0,093	0,0310 0,0190÷0,0400	0,0177÷0,018	0,0460 0,0400÷0,0570	0,0293÷ 0,0295
Kws4	0,0298 0,0220÷0,0370	0,018÷0,019	0,0220 0,0130÷0,0310	0,0177	0,0373 0,0340÷0,0430	0,0293

Примітки:

н.в. – не визначалось, оскільки виходить за межі області міграції;

Пункти відбору зразків води:

Dws1 – р. Дніпро, район міського пляжу м. Кам'янське,

Kws1 – р. Коноплянка, озеро-виток,

Kws2 – р. Коноплянка, мостовий переїзд до хвостосховища «Дніпровське»,

Kws3 – р. Коноплянка, верхній водовипуск седиментаційного відстійника,

Kws4 – район Дніпровського водосховища, 500 м нижче за течією втікання р. Коноплянка.

Активність ^{230}Th лабораторно не визначалась, оскільки через високу сорбцію його міграція є дуже повільною. Як фонові концентрації у р. Коноплянка без урахування інших джерел впливу приймалася активність радіонуклідів у р. Дніпро в пункті Dws1 вище за течією, який не потрапляє до зони нижче місця впадіння р. Коноплянка у р. Дніпро. Витрата р. Коноплянки прийнята 3,5 м³/с [129], у р. Дніпро – 1500 м³/с. Слід зважати на те, що змішування води з р. Коноплянки у пункті Kws4 недалеко від місця її впадіння

до р. Дніпро відбувається не всією його витратою, а лише смугою, ширину якої можна оцінити за коефіцієнтом турбулентної дифузії у водному середовищі, середньою швидкістю течії р. Дніпро біля правого берега та відстанню 500 м між місцем впадіння та пунктом вимірювання Kws4. При розрахунках прийнято, що 5% витрати р. Дніпро розбавляють води р. Коноплянки уздовж прибережної смуги до пункту вимірювання Kws4.

Зважаючи на суттєві коливання концентрації у різні роки, які пов'язані, крім процесів підземної міграції, також з флуктуаціями гідрологічного режиму, зокрема, добовими, та клімату, розраховані значення порівнювалися з діапазонами та середніми значеннями концентрації, що визначалися протягом 2010–2014 рр.

Результати у табл. 4.14 наведені для середньої витрати р. Коноплянки. У разі тривалої посухи влітку, у тому числі через зміни клімату, витрата у цій річці може бути суттєво меншою. У цьому випадку можуть спостерігатися тимчасові збільшення концентрації радіонуклідів. Так, для витрати $1 \text{ м}^3/\text{доб}$ розраховані значення у пунктах спостереження Kws2 і Kws3 зростуть для урану в 3,05–3,11 рази, для радію – на 16–19%, для свинцю – на 9–12%. З іншого боку, значне зростання витрати у період весняної повені, наприклад, для 5% забезпеченості до $19,3 \text{ м}^3/\text{доб}$, має зменшити концентрацію у цих пунктах, насамперед для урану: на 65–72%, але його концентрація все одно буде вище за фонову у 2–2,2 рази. Очікуване зменшення концентрації для радію та свинцю за такої витрати р. Коноплянки несуттєве, до 3%. Зміни концентрації урану у пункті Kws4 при зміні витрати р. Коноплянки не перевищують 3–4% від фонового значення через потужне розбавлення водою р. Дніпро; концентрації інших елементів фактично близькі до фонових значень.

Загальний добовий виніс радіонуклідів через ділянку дамби між розрізами I–I' і VII–VII' хвостосховища «Д» до р. Коноплянки станом на 2023 р. оцінювався $(1,63\text{--}2,36) \cdot 10^7$ Бк/доб для ^{238}U , до $9,98 \cdot 10^4$ Бк/доб для ^{226}Ra , до $6,44 \cdot 10^4$ Бк/доб для ^{210}Pb . Через 50 років ці показники зростуть і сягнуть $(2,34\text{--}2,97) \cdot 10^7$ Бк/доб до $2,97 \cdot 10^7$ Бк/доб для ^{238}U , до $2,79 \cdot 10^5$ Бк/доб для ^{226}Ra , до $2,35 \cdot 10^5$ Бк/доб для ^{210}Pb .

Враховуючи зростання концентрації на різних ділянках (рис. 4.13–4.16-б) і приймаючи приблизно середній виніс радіонуклідів з 1968 р. як половину від сучасного значення, можна оцінити загальний виніс радіонуклідів за весь період експлуатації хвостосховища: для ^{238}U – $2,21\text{--}2,85 \cdot 10^{11}$ Бк (6–7,7 Кі), для ^{226}Ra – до $2,4 \cdot 10^9$ Бк (0,063 Кі), для ^{210}Pb – до $1,96 \cdot 10^9$ Бк (0,053 Кі).

Середня концентрація урану у підземних водах між південною дамбою та р. Коноплянкою сягає приблизно половину від його концентрації у водонасичених породах хвостосховища (рис. 4.20-а) і змінюється від 3200 до 92900 Бк/м³. Зважаючи на присутність у поровому розчині також інших радіонуклідів, можна припустити, що сорбційна ємність порід між дамбою та берегом р. Коноплянки частково вичерпана, тому в подальшому міграція буде проходити при менших значеннях K_d , отже, з більшою часткою виносу порівняно з попереднім періодом. Підтвердження цього потребує лабораторного визначення вмісту радіонуклідів у поровому розчині та породах ґрунтового водоносного горизонту між дамбою та р. Коноплянка.

4.2.2 Висновки та рекомендації щодо стану безпеки хвостосховища.

Результати геоекологічного моніторингу хвостосховища показують високий вміст радіонуклідів ряду ^{238}U у шарі відходів, який частково знаходиться в обводненому стані. Близьке розташування південної огорожувальної дамби до р. Коноплянка створює високий ризик потрапляння радіонуклідів до поверхневих вод з підземним стоком. Вміст радіонуклідів у воді р. Коноплянка підвищений відносно фонових значень, хоча не перевищує санітарні норми за НРБУ-97, але їх вміст у донних відкладах суттєво підвищений. Сучасний стан огорожувальної дамби потребує інструментальних вимірювань на можливі зрушення та моделювання її стійкості, оскільки її поверхня суттєво еродована, хоча наразі захищає від розмиву та пилового виносу радіоактивних матеріалів.

Чисельне геомеханічне моделювання розвитку зсувних деформацій в тілі зовнішньої огорожувальної дамби, проведене методом кінцевих елементів, показало вплив можливого підйому рівня води на зниження стійкості

оцінюваних ділянок через зниження механічних властивостей тіла дамби. Значення коефіцієнта запасу стійкості дамби для чотирьох характерних профілів знаходяться в межах 1,37–1,67, що перевищує мінімальне значення за нормативами 1,25. Мінімальне значення 1,37 отримано для ділянки дамби, яка перебуває під впливом інтервалу водонасичених ґрунтів потужністю до 3,8 м вище рівня ґрунтових вод, що потребує контролю порового тиску при проведенні геотехнічного моніторингу.

Прогнози водної міграції радіонуклідів добре узгоджуються з діапазоном вимірних концентрацій радіонуклідів у поверхневих водах. Слід враховувати, що хвостосховище «Дніпровське» не є єдиним джерелом надходження радіонуклідів до р. Коноплянки, про що свідчить підвищена концентрація радіонуклідів вище ділянки контакту з південною дамбою (пункт Kws1). Серед радіонуклідів, які мігрують від контуру хвостосховища, найбільшу небезпеку зараз створює уран, винос якого з хвостосховища на 50–80% підвищує його концентрацію у р. Коноплянка (пункти Kws2, Kws3). Через значно більшу сорбцію у породах ґрунтового водоносного горизонту, порівняно з ураном, внесок ^{226}Ra і ^{210}Pb у зростання радіоактивності води у р. Коноплянка оцінюється як незначний, а фронт міграції ^{232}Th , ймовірно, ще не досягнув берега річки. Їх внесок буде зростати у кілька разів у наступні 50 років, а винесення урану зростатиме повільніше.

Підвищення вмісту радіонуклідів у р. Коноплянка та Дніпро у найближчі 50 років не перевищить санітарних норм, головним чином, через розбавлення поверхневими водами. Разом з тим, у разі тривалої посухи влітку у р. Коноплянка можуть спостерігатися суттєві тимчасові збільшення концентрації. Наявність рослинності у заплаві р. Коноплянка є чинником зменшення радіоактивності її вод та накопичення нуклідів у донних відкладах. Слід зважати на певне вичерпання сорбційної ємності порід між дамбою та берегом річки внаслідок тривалої міграції урану та інших радіонуклідів.

Через відсутність системного гідрохімічного моніторингу р. Коноплянка за останнє десятиріччя рекомендується поновлення відповідних спостережень

разом з відбором проб ґрунтових вод поблизу лівого берега р. Коноплянка, що дасть змогу уточнити результати прогнозу.

Для удосконалення геотехнічного, гідрогеологічного та радіоекологічного моніторингу рекомендується:

- закладення спостережних гідрогеологічних свердловин у межах породних укосів огорожувальної дамби та на прибережній смузі з орієнтацією на інженерно-геологічні розрізи, побудовані за результатами польових робіт у 2022 р.;
- створення геодезичної спостережної станції для контролю за вертикальними й горизонтальними деформаціями зовнішніх укосів огорожувальної дамби в межах ділянок найімовірнішого розвитку зсувних процесів, та у місцях раніше зафіксованих зсувів;
- регулярне проведення візуальних обстежень породного відвалу з фіксацією деформацій укосів огорожувальної дамби та можливого розвитку суфозії, розмивів, водної ерозії тощо;
- проведення замірів рівнів води в існуючих та нових гідрогеологічних свердловинах з періодичністю не рідше двох раз на місяць і відбору проб води на хімічний аналіз – один раз у квартал, що дозволить уточнювати положення рівня ґрунтових вод, швидкість фільтрації та міграції з урахуванням сезонних коливань;
- відбір проб води з р. Коноплянка та Дніпро з раніше визначених пунктів контролю раз на квартал на вміст радіонуклідів з фіксацією параметрів гідрологічного режиму для коректної інтерпретації результатів з урахуванням добових змін.

Для забезпечення деформаційної стійкості дамби хвостосховища слід передбачити можливість формування в межах зовнішніх укосів дамби дренажного щебеневого шару, що мінімізуватиме фільтраційний виніс порідного матеріалу дамби в умовах її нерівномірного обводнення у вертикальному перерізі.

Отримані дані дозволять уточнити прогнозні моделі розвитку деформацій дамби та водної міграції радіонуклідів з хвостосховища.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

5.1 Огляд існуючих методів безпечного складування гірничопромислових відходів

У світі утворюється велика кількість хвостів через зростання гірничодобувної діяльності разом зі зростанням потреби у сировині. У багатьох країнах існують правові норми щодо утилізації хвостосховищ. У Європі проєкт директиви, що регулює управління хвостосховищами, був вперше опублікований Комісією ЄС у жовтні 2000 року [1]. Сьогодні Регламент № 596/2009/ЄС, опублікований у 2009 році відповідно до Директиви № 2006/21/ЄС Європейського Союзу про управління хвостосховищами, спрямовано на забезпечення довгострокової стабільності об'єктів утилізації та зменшення негативного впливу гірничодобувної діяльності на навколишнє середовище. Законодавство ЄС запроваджує певні мінімальні зобов'язання, і має на меті сприяти захисту природних, ресурсів, особливо шляхом їх переробки, щоб покращити управління хвостосховищами з урахуванням ризиків для навколишнього середовища та здоров'я людини. Крім того, Комісія ЄС вимагає від держав-членів та сусідніх країн вживати відповідних запобіжних заходів для того, щоб керувати хвостосховищами, а тому зобов'язують власників підприємств, створювати плани управління хвостосховищами щодо їх безпечної експлуатації [216].

Методи утилізації хвостосховищ, що використовуються в гірничодобувній промисловості, можна класифікувати за типом хвостосховища, метою, використаного методу, типом будівництва та статусом скидання води. Хвостосховища, сухе захоронення, захоронення у відкритому кар'єрі, захоронення в руслах моря, озера та річок, поверхневе захоронення пастових

хвостів та захоронення хвостів з використанням геотекстилю є основними методами поверхневого захоронення хвостів. Хоча хвостосховища є найбільш використовуваним методом захоронення гірничопромислових відходів, вони також створюють багато проблем з точки зору вартості, довкілля та здоров'я людини [217-220].

Сьогодні для організації комплексів з нуля можливо застосувати цілий ряд нових технологій, які можуть підвищити безпеку та екологічність до сучасних вимог. Тим більше, що з кожним роком відповідних інновацій у видобувній галузі стає все більше [221].

Але і тут не обійтися без застережень. І питання навіть не в тому, які технології вибрати для організації сучасного хвостосховища, а в тому, чи можливо застосовувати їх в умовах конкретного регіону. Тому що «сучасний» далеко не завжди означає «універсальний».

Шкода для навколишнього середовища, що виникає під час утилізації хвостів за допомогою хвостових дамб над землею, може бути значно зменшена за допомогою нових технологій та методів. Сьогодні досліджується безпечне утилізування хвостів збагачення металевих корисних копалин, які зазвичай скидаються у поверхневі хвостові дамби за допомогою технології пастового хвостовика та утилізації хвостів за допомогою геотекстильних матеріалів, які є одними з методів утилізації, важливість яких поступово зростає в останні роки [221].

У роботі [222] було оцінено переваги та недоліки методів поверхневої утилізації пастових хвостів та утилізації хвостів за допомогою геотекстильних матеріалів, які були розроблені як альтернативи традиційному методу хвостових дамб, а також порівняно експлуатаційні та капітальні витрати цих трьох методів з точки зору свинцево-цинкового рудника.

Річний обсяг хвостів, що використовуються в цьому дослідженні, був визначений як 1250000 тон відповідно до даних, зібраних з установи, а аналіз витрат був проведений відповідно до терміну утилізації хвостів протягом 5 років. Статті витрат для кожного з цих методів утилізації хвостоподібних відходів представлені на рис. 5.1.

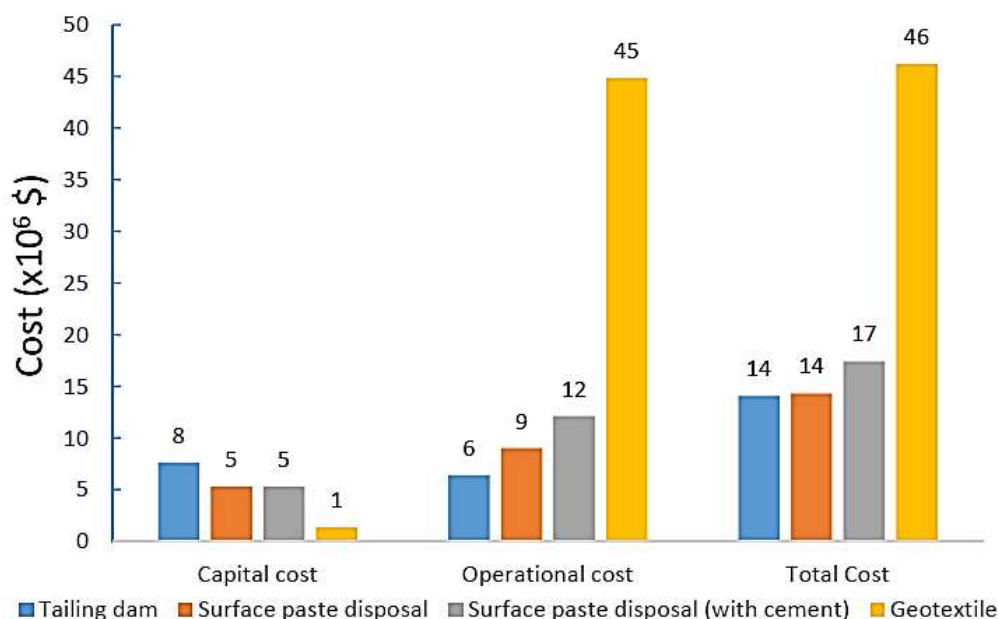


Рисунок 5.1 – Експлуатаційні та капітальні витрати для 4 методів (хвостова дамба; утилізація поверхневої пасти; утилізація поверхневої пасти (з цементом); геотекстиль) [222]

Методи поверхневої утилізації хвостів пастоподібної структури та утилізації з використанням геотекстильних матеріалів, розроблені як альтернатива традиційному методу хвостової дамби, мають багато екологічних переваг. Хоча методи поверхневої утилізації хвостів пасти та утилізації хвостів з використанням геотекстилю мають багато переваг, застосування цих методів є складнішим порівняно з традиційним методом хвостового господарства. Крім того, висока вартість геотекстильних труб збільшує експлуатаційні витрати цього методу [222].

Витрати на утилізацію хвостів, які становлять основну частину капітальних витрат проєкту, є досить важливими для підприємств. Таким чином, аналіз витрат слід проводити при виборі методу утилізації хвостів. Аналіз витрат на методи поверхневої утилізації хвостів пасти та утилізації хвостів з використанням геотекстилю був проведений для модельного об'єкта Pb-Zn у контексті цього дослідження та порівняний з витратами на традиційний метод хвостогосподарства. В аналізі витрат термін використання методів вважався 5 років, при цьому враховувалися топографічні умови моделі.

Аналіз рис. 5.1 показав що, загальні витрати на хвостосховище та методи утилізації поверхневої пасти були розраховані приблизно на 14 млн доларів

США. У випадку цементу, який використовується для методу утилізації поверхневої пасти, експлуатаційні витрати зростають з приблизно 9 млн доларів США до – 12 млн доларів США, і це робить розраховану загальну вартість у розмірі – 17 млн доларів США вищою, ніж загальна вартість методу хвостосховища. Оскільки для методу хвостосховища потрібно більше площ для утилізації хвостосховища, капітальні витрати більші порівняно з іншими методами. Однак експлуатаційні витрати нижчі, ніж в інших методах. Хоча капітальні витрати на утилізацію хвостосховища з використанням геотекстильного матеріалу нижчі, ніж в інших методах, і становлять – 1 млн доларів США, експлуатаційні витрати, а отже, і загальна вартість цього методу, є досить високими і становлять – 46 млн доларів США через високу вартість геотекстильних труб [222].

Будівництво хвостосховища становить – 12% від загальних капітальних витрат. Вартість будівництва майданчика для сховища є найвищою статтею витрат серед загальних капітальних витрат для методу поверхневої утилізації пасти та становить ~58% від загальних капітальних витрат. Вартість насоса йде після вартості будівництва майданчика для сховища та становить – 19% від загальних капітальних витрат. У методі утилізації з використанням геотекстилю вартість землі є найвищою статтею витрат серед загальних капітальних витрат та становить – 60% від загальних капітальних витрат. Вартість насоса йде після вартості землі та становить – 28% від загальних капітальних витрат [222].

Вартість дозволу на землю є найвищою статтею витрат у загальних експлуатаційних витратах для методу хвостосховища та становить – 48% від загальних експлуатаційних витрат. Вартість споживання енергії йде після вартості дозволу на землю та становить – 36% від загальних експлуатаційних витрат. У випадку методу утилізації поверхневої пасти, витрати на енергоспоживання в загальних експлуатаційних витратах за відсутності цементу є найвищою статтею витрат і становлять – 49% від загальних експлуатаційних витрат. Вартість флокулянта йде після витрат на енергоспоживання і становить – 21% від загальних експлуатаційних витрат. Вартість енергоспоживання знову

ж таки є найвищою статтею витрат за наявності цементу і становить – 36% від загальних експлуатаційних витрат. Вартість цементу йде після витрат на енергоспоживання і становить – 26% від загальних експлуатаційних витрат. У методі утилізації з використанням геотекстильного матеріалу, вартість геотекстильної трубки є найвищою статтею витрат у загальних експлуатаційних витратах і становить – 79% від загальних експлуатаційних витрат. Вартість дозволу на землю йде після вартості геотекстильної трубки і становить – 9% від загальних експлуатаційних витрат [222].

Аналіз рис. 6.1 показує, що питомі витрати на хвостосховище та метод поверхневої утилізації пасти були розраховані як 2,25 \$/тона та 2,29 \$/тона відповідно, дуже близькі одне до одного, але питомі витрати на поверхневий метод утилізації становлять 2,79 \$/тона при використанні цементу. Екологічне законодавство та відмінності в конструкціях можуть змінювати ці значення витрат. Наприклад, питомі витрати на хвостосховище для шахти з видобутку золота становили 0,5-1,2 \$/тона [222]. У випадку методу утилізації хвостосховища з використанням геотекстилю ціна за одиницю досить висока і становить 7,39 \$/тонна через високу вартість геотекстильних труб (0,66 \$/м³) [222].

Методи утилізації хвостової дамби та поверхневої утилізації пасти близькі один до одного. Однак метод хвостової дамби є простим у порівнянні з поверхневою утилізацією пасти та її утилізацією з використанням геотекстилю з точки зору проектування та застосування. Під час утилізації поверхневої пасти необхідно провести багато випробувань у лабораторії та польових умовах. Найважливішими серед них є експерименти з осідання та реології, що проводяться на етапі проектування суміші пастоподібного матеріалу, а також вимірювання рН, що проводяться для всмоктування матриксної структури, споживання кисню та фільтраційної води на етапі проектування утилізації. Тип насоса, який буде використовуватися для переміщення пастоподібного матеріалу, та поведінка потоку матеріалу в зоні утилізації визначаються за допомогою експериментів з осідання та реології. У випадку методу утилізації з використанням геотекстилю слід провести експерименти з дегідrataцією геотекстильних трубок, а тип

геотекстильної трубки, що підходить для хвостового матеріалу, слід визначити на етапі проєктування. Ще одним важливим експериментом є експеримент з седиментацією, щоб отримати оптимальне дозування флокулянту. Таким чином, спочатку, перш ніж застосовувати в польових умовах, слід повністю розкрити експериментальні дослідження щодо методів обробки поверхневої пасти та її утилізації з використанням геотекстильного матеріалу, які мають багато екологічних переваг [222, 223].

Згідно розрахунків методи з найнижчими загальними капітальними витратами – це утилізація за допомогою геотекстилю, утилізації поверхневої пасти та хвостової дамби відповідно.

Вартість будівництва майданчика для захоронення відходів та пов'язані з цим витрати на землю становлять найважливішу частку капітальних витрат. Методи з найнижчими експлуатаційними витратами – це метод хвостової дамби, метод поверхневого захоронення пасти та захоронення з використанням геотекстилю відповідно. Причиною надмірного збільшення експлуатаційних витрат при методі захоронення з використанням геотекстилю є висока вартість геотекстильних труб. У контексті цього дослідження було виявлено, що вартість геотекстильних труб повинна бути нижчою, щоб бути більш економічною порівняно з іншими методами. Крім того, загальна вартість методу поверхневого захоронення пасти, який має багато переваг з точки зору екологічних ризиків та міцності, дуже близька до загальної вартості методу хвостової дамби, коли цемент не використовується. Отже, можна зробити висновок, що метод поверхневого захоронення пасти є найбільш доцільним методом захоронення хвостів на поверхні з економічної точки зору при будівництві нових підприємств [222].

В теперішній час неможливо ігнорувати інформацію про те, що все більше компаній у світі починають переходити на використання подібних технологій, будь то пастове згущення або зберігання сухих фільтр-кеків. Причому географія їх застосування стає ширшою: у контексті цієї теми можна знайти згадки про США, Японію, Німеччину, Австралію, Туреччину [224, 225, 223].

Так у 2021 році бразильська корпорація Vale запустила на залізорудному ГЗК Vargem Grande в штаті Мінас-Жерайс фільтраційну установку, яка дозволяє отримувати сухі відходи збагачення. І це незважаючи на серйозну дорожнечу технології. Однак експерти виділяють масу переваг методики, які, за їхніми словами, виправдовують таку вартість [224, 226].

Впровадження сухого складування хвостів вимагає залучення капітальних вкладень на придбання обладнання, проте це дозволяє відмовитися від будівництва хвостосховищ і практично повністю відмовитися від використання додаткової води для технологічного процесу, що в довгостроковій перспективі дозволяє знизити операційні витрати підприємства [224].

Перехід до сухого складування дозволяє повністю відмовитися від експлуатації хвостосховища і залишити у внутрішньому обороті до 96% води.

Наприклад, у малодоступних, замкнутих регіонах або сейсмічно небезпечних місцевостях сухе складування хвостів збагачення є оптимальним з цілої низки причин. По-перше, воно значно економить місце в порівнянні з традиційними хвостосховищами. По-друге, метод гарантує мінімізацію ризиків для навколишнього середовища (наприклад, внаслідок обвалення дамби). По-третє, дозволяє повторно використовувати очищену технологічну воду і, нарешті, відповідає вимогам законодавства більшості країн. У інших країнах також починають поступово освоювати сухе складування: встановлюють чашоподібні пастові згущувачі або зневоднюють хвости [223, 224, 225, 227, 228].

Будь-яка технологія підбирається ще на етапі складання відповідного проекту з урахуванням природних умов регіону, видобутого продукту, фізико-механічних процесів тощо. Наприклад, складно назвати практичні приклади використання методів сухого складування в умовах напівпустелі і пустелі, тому що не можна зберігати фільтр-кекі в такому сухому кліматі. Додайте сюди те, що їх потрібно транспортувати від фабрики на спецтехніці. Обидва ці фактори сприятимуть активному процесу пиління від шкідливих відходів, створюючи несприятливу екологічну ситуацію [224]. Крім того спецтехніка може пошкодити геомембрану, що ізолює відходи, і в такому випадку не можна

виключати намокання кеків від дощу і снігу, а значить, і потрапляння небезпечних речовин в ґрунт.

До того ж експерти галузі повторюють тезу: зберігання відходів видобувної промисловості шкідливе саме по собі, але неминуче. У зв'язку з цим важливо розуміти, що згущення і зневоднення можуть забезпечити навколишнє середовище далеко не в повній мірі, а більш традиційні басейни з дамбами можуть бути безпечними при дотриманні ряду вимог [224].

Ризики при складуванні відходів в хвостосховищах зберігаються в будь-якому випадку, але мінімізувати їх можна, впроваджуючи сучасні технології, що підвищують стійкість і довговічність, зокрема, геомембрани для гідроізоляції, футеровані трубопроводи, рішення для пилопридушення. Для впровадження таких технологій не потрібні великі інвестиції за один раз – проблему можна вирішувати в горизонті 5-10 років [223, 224, 229].

Сьогодні більшість видобувачів по всьому світу, які працюють з традиційними хвостосховищами, ізолюють ґрунт його основи за допомогою геосинтетичних матеріалів. Вони стають обов'язковими при управлінні хвостовим господарством, і це при тому, що в країнах колишнього СРСР геосинтетику стали застосовувати відносно недавно [224].

Досить складно простежити еволюцію матеріалу, тому що на території країн СНД до недавнього часу використовували стару добру технологію «глиняного замку». По суті, вона полягала в обробці дна гідровідвалу (для ізоляції ґрунту від хімікатів) суглинком із вмістом піску менше 15%. За відсутності інших альтернатив цей спосіб був цілком непоганий: він забезпечував хорошу фільтрацію площі, але все ж не стовідсоткову [224].

Проте повністю від старого способу «глиняного замку» у вітчизняній видобувній галузі не відмовилися. Він відмінно «подружився» з сучасною геосинтетикою, і в тандемі вони забезпечують максимальну ізоляцію ґрунту. Дуже важливо спочатку правильно підготувати підстильний шар. Виконуються попередні роботи, що включають повне очищення від рослин і ущільнення ґрунту (необхідний високий коефіцієнт ущільнення 0,95), щоб ніде не випирав скальник і

вже на вирівняний суглинок, на підготовлену основу укладають геомембрану. На ложі можна використовувати матеріал меншої товщини і трохи більшої на схилах. У деяких регіонах, де є різкий перепад температур і вода в басейнах замерзає, використовують геомембрану максимальної товщини. Її попередньо розкрояють, укладають частинами і зварюють між собою, після чого перевіряють шви на міцність контрольно-вимірвальним обладнанням (рис. 5.2) [224].



Рисунок 5.2 – Приклад застосування геосинтетичної ізоляції ґрунту на хвостосховищах [224]

У різних країнах прописані різні мінімальні терміни служби такого матеріалу. Середній мінімум – 25 років. Виробники геосинтетики відзначають, що сучасні геомембрани здатні служити значно довше, навіть 50 і 100 років, але тільки в тому випадку, якщо підібрано добротний матеріал з продуманим складом, який згодом правильно змонтують на дно резервуара.

Ще одне потенційно вразливе місце – пульпопроводи. Багато в чому від традиційних хвостосховищ не відмовляються через високу екологічність гідротранспорту, так як пульпа переміщається по закритих трубах, не даючи ніяких шкідливих викидів в повітря. Таким же чином транспортуються технологічні розчини і вода, яка проходить кілька етапів посиленої фільтрації і повертається в оборот на підприємство [224, 230].

Підвищене навантаження на труби якраз і може призвести до їх зносу. В основному це стосується тих «гілок», по яких йдуть саме відходи видобутку.

Проблемними питаннями є пориви труб, утворення свищів, протікання пульпи, і як наслідок, затоплені, замулені проїзди до пульповодів не придатні для руху техніки, що обслуговує трасу. Хвостова пульпа – матеріал абразивний, і тому в процесі гідравлічного транспортування відбувається абразивний знос стінок труби. Стінка труби стоншується, і труба втрачає здатність витримувати внутрішній тиск. Рано чи пізно відбувається розрив у найтоншому місці, і відбувається це завжди раптово, тому що спрогнозувати місце прориву практично неможливо. Автоматизувати такий контроль на сьогоднішній момент неможливо: немає технічних рішень щодо контролю ступеня зносу труби. Єдиний доступний варіант – здійснювати перевірку трубопроводу «в ручному режимі». Протяжність трубопроводних систем хвостопроводів становить часом десятки кілометрів.

Щоб максимально знизити ризик форс-мажорного прориву труби, рекомендується встановлювати футеровані трубопроводи з внутрішнім абразивостійким покриттям. Це більш дороге рішення, проте такі посилені зсередини труби перевищують звичайні сталеві за терміном експлуатації в 15-20 разів. Разове фінансове вкладення в довговічні трубопроводи дозволяє скоротити експлуатаційні витрати в горизонті 20-30 років [224].

У випадку зі сталевими трубами їх необхідно міняти через пару років, якщо пульпа сильно абразивна. При менших абразивних навантаженнях заміна зношеної труби відбувається через 5-10 років. Експлуатаційні витрати складаються з демонтажу зношеної труби, закупівлі нової і її монтажу, а через деякий час знову демонтаж.

Особливо актуальна проблема швидкого зносу сталевих пульповодів при транспортуванні згущених хвостів. Абразивність згущених хвостів підвищується багаторазово, відповідно, зростає і швидкість зносу труби. У такому випадку технічному керівництву фабрики варто обов'язково проконсультуватися з фахівцями компаній, які займаються вивченням проблем абразивного зносу і виробництвом футерованих труб [224].

Українська видобувна промисловість розвивається, розвідуються нові рудні тіла, а інновації, значно збільшують термін служби видобувних комплексів. Тому часто виникає потреба нарощувати екрани і стіни дамб вже існуючих хвостосховищ. Такі ж процедури застосовують і до старіших резервуарів, які, незважаючи на довгий термін служби, все ще справляються зі своїми завданнями. У цьому напрямку також з'явилися нові рішення. До них, зокрема, відносяться системи армування ґрунтового насипу. Вони являють собою модульну систему армування ґрунту, де модулі розташовуються шарами. У лицьовій частині монтується габіонний блок, який можна заповнити місцевими матеріалами. Така система, як відзначають експерти, є більш гнучкою і дозволяє створювати як симетричні, так і асиметричні дамби. Вона є альтернативою залізобетонним підпірним стінам. Часто технологія передбачає горизонтальне укладання геосинтетичних стрічок всередині ущільненого насипу для його зміцнення. Метод можна використовувати і при будівництві резервуарів з нуля [224].

5.2 Новітні методологічні підходи до діагностики та моніторингу ГТС

Сучасна екологічно безпечна експлуатація гідротехнічних споруд стоїть перед викликом, що виходить за межі простого управління водними ресурсами. Застаріла інфраструктура, зростаючі вимоги до водних ресурсів та непередбачувані наслідки кліматичних змін вимагають нового, комплексного підходу до забезпечення надійності та екологічної безпеки гідротехнічних споруд. Це вже не просто обслуговування, а перехід до стратегічного управління ризиками, що ґрунтується на безперервному моніторингу та використанні передових технологій. Мета полягає в тому, щоб не лише реагувати на аварійні ситуації, а й прогнозувати їх, забезпечуючи стабільну роботу інженерних систем та захист навколишнього середовища [231, 232, 233].

Діагностика стану ГТС, зокрема дамб, історично ґрунтувалася на поєднанні візуальних та інструментальних методів. Це були надійні, але часто трудомісткі та дискретні (не безперервні) підходи [234].

Візуальний огляд є первинним інструментом оцінки. Кваліфіковані інженери регулярно оглядали поверхні споруди, шукаючи ознаки деформацій, тріщин, зон суфозії, ознак фільтрації та ерозії.

Інструментальні виміри дозволяють перейти від якісної до кількісної оцінки. Це включає використання [235-236]:

1. П'єзометрів, що вимірюють гідростатичний тиск води в порах ґрунту або тріщинах бетонних споруд. Різке збільшення тиску може свідчити про небезпечне внутрішнє просочування, яке може призвести до руйнування тіла дамби.

2. Інклінометрів, встановлених у спеціальні свердловини, що дозволяють відстежувати горизонтальні зміщення всередині тіла ґрунтової споруди, виявляючи зони потенційного зсуву або осідання.

3. Датчиків деформацій та щілиномірів, які фіксують зміну розмірів елементів конструкцій, відображаючи напружено-деформований стан конструкції та ідентифікуючи розвиток тріщин.

Додатково використовуються лабораторні дослідження зразків ґрунту та бетону для оцінки їх фізико-механічних властивостей, а також геодезичні і геофізичні методи, які дозволяють неруйнівним способом виявляти внутрішні порожнини або зони насичення водою.

Використання передових технологій дозволяє не лише вчасно виявляти ризики, а й прогнозувати потенційні аварії, забезпечуючи надійність та безпеку споруд. Перехід до безперервного моніторингу, що став можливим завдяки автоматизації, є революційним кроком у забезпеченні безпеки.

Автоматизована система моніторингу (АСМ) – це мережі взаємопов'язаних датчиків, які збирають дані у режимі реального часу, забезпечуючи повну та актуальну картину стану споруди. Ці системи відстежують широкий спектр параметрів (табл. 5.1). Найбільш значний прогрес у підвищенні безпеки експлуатації досягнуто завдяки інтеграції даних від АСМ у єдині інформаційно-діагностичні системи (ІДС). Ці системи є «мозком» усієї мережі моніторингу, оскільки вони не просто збирають дані, а й здійснюють їх комплексний аналіз, перетворюючи масиви даних на цінну інформацію для прийняття обґрунтованих рішень.

Таблиця 5.1 – Параметри та прилади для контролю стану ГТС [237-239, 240]

Параметр	Прилад	Можливість контролю
Напружено-деформований стан	Датчики напруги (тензометри)	розподілу навантажень і виявлення зони перенапруги
Фільтраційні параметри	Автоматичні п'єзометри, та витратоміри	аномальних змін, що є ознакою внутрішньої ерозії (суфозії)
Геодезичні параметри	GNSS-приймачів (GPS) і автоматизованих тахеометрів	мікрозміщення та осідання споруди в просторі
Кліматичні та гідрологічні параметри	Рівнеміри, опадоміри, термометри та даталоггери	зовнішніх факторів, що впливають на ГТС

Функціонал ІДС базується на трьох ключових напрямках: централізація та візуалізація, аналіз та виявлення аномалій, а також прогнозування та моделювання [240, 241, 242, 243]. Усі дані, що надходять із різноманітних датчиків та моніторингових систем, акумулюються в єдиній інтегрованій базі. Це забезпечує інженерам можливість бачити повну та актуальну картину стану споруди, яка відображається на зручних візуальних дашбордах.

ІДС використовують статистичні алгоритми та методи машинного навчання для виявлення неочевидних тенденцій та прихованих аномалій. Наприклад, система здатна встановити, що незначне, але постійне збільшення фільтраційного потоку в певній зоні корелює з певними коливаннями температури або рівня води. Таке виявлення кореляцій слугує ранньою ознакою потенційної проблеми [244].

Однією з найцінніших функцій ІДС є здатність використовувати історичні дані та поточні показники для побудови прогностичних моделей. Ці моделі дозволяють оцінювати ймовірність відмови елемента конструкції або прогнозувати сценарії розвитку потенційної аварійної ситуації, що дає змогу завчасно розробити стратегію реагування.

Впровадження ІДС переводить управління ризиками на якісно новий рівень – від реактивного (вирішення проблем після їх виникнення) до проактивного (запобігання проблемам до їх появи).

Розвиток технологій моніторингу є постійним. Сучасні напрямки досліджень та практичного впровадження включають: супутниковий моніторинг (InSAR), використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та концепцію «цифрового двійника» (Digital Twin) [241, 242, 243, 245].

Супутниковий моніторинг (InSAR) – ця технологія дозволяє вимірювати деформації поверхні споруди (наприклад, дамби) з точністю до міліметрів, використовуючи радіолокаційні знімки. Це забезпечує глобальну перспективу та дає змогу контролювати важкодоступні території.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – дрони, оснащені камерами високої роздільної здатності, тепловізійними камерами та лазерними сканерами (LiDAR), надають можливість швидкого та детального огляду зовнішніх поверхонь конструкції, а також виявлення зон просочування розчинів крізь дамби хвостосховищ [246].

Концепція «Цифрового двійника» (Digital Twin) – це віртуальна копія реальної ГТС, яка моделює її поведінку в режимі реального часу, інтегруючи дані моніторингу та зовнішні фактори (кліматичні, сейсмічні). «Цифровий двійник» дозволяє імітувати різні сценарії навантажень, прогнозувати їхній вплив на конструкцію та оптимізувати рішення щодо експлуатації [247].

На сьогоднішній час перспективними є нові методи вимірювань і моделювання (рис. 5.3). періодичного обстеження до безперервного моніторингу, забезпечуючи вищу безпеку та ефективність експлуатації.

Отже, екологічно безпечна експлуатація гідротехнічних споруд сьогодні неможлива без застосування комплексної системи моніторингу та діагностики. Еволюція від традиційних, дискретних методів до інтелектуальних, прогностичних систем є не просто технологічним прогресом, а стратегічним імперативом. Забезпечення довгострокової стійкості, безпеки та мінімізації ризиків для довкілля вимагає поєднання передових датчиків, автоматизованих систем збору даних та потужних аналітичних інструментів. Це дозволяє здійснювати ефективне управління ризиками, що є основою надійної та безпечної роботи гідротехнічного комплексу в умовах постійних змін.



Рисунок 5.3 – Перспективні методи вимірювань і моделювання стану гідротехнічних споруд [248, 249, 250, 251-253, 254-255]

5.3 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки ГТС гірничопромислового призначення

Розвиток ядерної енергетики, як у світі в цілому, так і в Україні зокрема, спричинив значне накопичення радіоактивних відходів збагачення уранових руд. На сьогодні ці хвостосховища є джерелом суттєвої екологічної та радіаційної небезпеки для довкілля та населення [256]. Усвідомлення цієї загрози стимулює науковців до активного пошуку нових стратегічних рішень у сфері управління, експлуатації, рекультивації та реабілітації таких об'єктів [257].

У процесі довготривалої експлуатації хвостосховищ неминуче відбувається комплексна трансформація їх складових елементів, що вимагає постійної уваги та контролю. З плином часу критично зростає обсяг та вплив накопичених хвостових матеріалів – основних технічних компонентів, що визначають загальну стійкість об'єкта. Водночас відбувається фізичне старіння та зношування ключових елементів гідротехнічних споруд, як-то дамби, дренажні системи та трубопроводи, що суттєво підвищує ймовірність аварійних ситуацій. Ці зміни призводять до значного погіршення стану навколишнього

середовища, оскільки неконтрольоване вивільнення токсичних відходів становить пряму екологічну загрозу. Таким чином, поточні завдання з безпечної та надійної експлуатації постійно переглядаються, визначаючи актуальний рівень і ризик екологічної безпеки (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Задачі щодо безпечної і надійної експлуатації хвостосховища та відповідні рівні і ризики екологічної безпеки

Етапи життєвого циклу хвостосховищ	Задача	Рівень екологічної безпеки	Ризик для екологічної безпеки
проектування	забезпечення стійкості дамб	регіональний та національний	проектні помилки.
будівництво	моніторинг і контроль	локальний	техногенні ризики
експлуатація	управління водним балансом	регіональний	експлуатаційні помилки
	належне технічне обслуговування	регіональний	техногенні ризики
закриття	управління ризиками	регіональний та національний	довгострокові екологічні наслідки
рекультивация та догляд після неї	екологічний моніторинг	локальний та регіональний	залишкові забруднення; неефективний моніторинг

За даними інвентаризації відходів уранового виробництва [258] у світі накопичено понад 2352 млн т цих матеріалів (рис. 5.4).

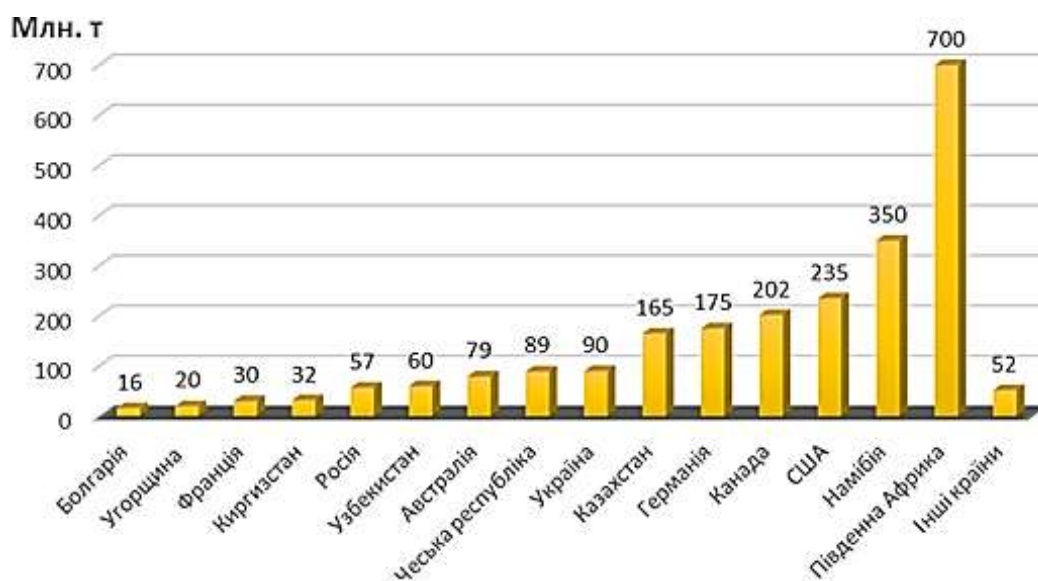


Рисунок 5.4 – Обсяги накопичення відходів уранового виробництва у різних країнах світу [258]

Водночас кількість аварій на хвостосховищах щорічно зростає, що призводить до негативних наслідків екологічного та соціально-економічного характеру [259]. Основними чинниками, що впливають на підвищення рівня аварійності хвостосховищ є техногенні фактори впливу, кліматичні зміни [231, 260, 261], тривалі терміни експлуатації, а також те, що не враховано попередніми дослідженнями – геологічні і тектонічні особливості розташування ГТС [262].

Україна відноситься до однієї з країн світу, де повинна приділятися підвищена увага до хвостосховищ радіоактивних відходів (РАВ), як зі сторони держави так і міжнародного співтовариства (наприклад ІАЕА). У центральній частині України розташовані чисельні сховища РАВ, які були створені через високий попит на уран для військових цілей під час холодної війни без належного (у період будівництва середини ХХ сторіччя) розуміння радіаційної та екологічної небезпеки. Більшість таких об'єктів споруджувалися шляхом засипання ярів та балок з улаштуванням ґрунтових дамб обвалування. Недосконалість технічних рішень та часткова відсутність водонепроникних протифільтраційних екранів в основі хвостосховищ та захисного покриття на їх поверхні, з плином часу посилює міграцію радіонуклідів з хвостів у ґрунти, підземні та поверхневі води, атмосферне повітря [263, 264]. Ризик існуючих радіоактивних хвостосховищ для навколишнього середовища та людини посилюється невідповідністю між більш жорсткими сучасними вимогами до проектування та будівництва таких об'єктів у порівнянні із застарілими інженерними рішеннями, застосованими на стадії їх будівництва та введення в експлуатацію 50-80 років тому.

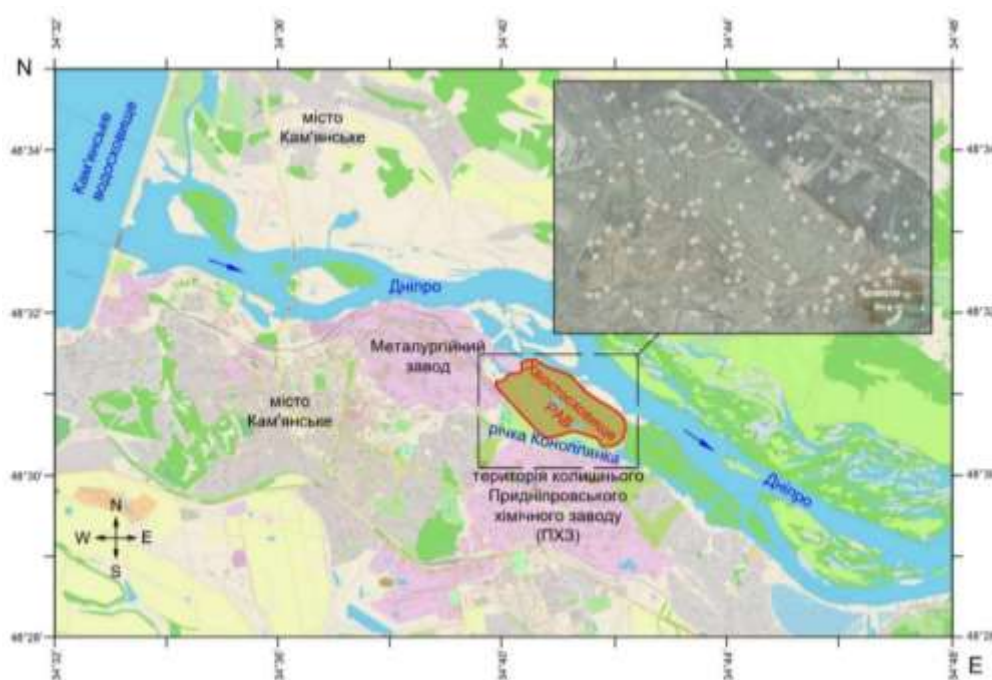
Найбільша кількість хвостосховищ РАВ знаходиться у м. Кам'янське (колишня назва – Дніпродзержинськ, Дніпропетровська область) де з 1948 по 1991 рр. переробляв уранові руди колишній Придніпровський хімічний завод (ПХЗ). Через це у 9 хвостосховищах на площі близько 270 га накопичено $42,4 \cdot 10^6$ тон ($19,8 \cdot 10^6$ м³) радіоактивних матеріалів. Одним із найбільших і найнебезпечніших місцевих хвостосховищ є «Дніпровське» («Д»), яке розташоване в заплаві р. Дніпро [104].

5.3.1 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки хвостосховища радіоактивних відходів «Дніпровське».

Серед усієї сукупності гідротехнічних споруд цивільного та гірничопромислового призначення, хвостосховище радіоактивних відходів (РАВ) «Дніпровське» (рис. 5.5) становить найбільшу потенційну екологічну та радіаційну небезпеку, що безпосередньо зумовлює актуальність розробки комплексного проєкту його рекультивації. До тих пір, поки не проведена рекультивація, шкоду завдають навіть закриті хвостосховища, а процес відновлення через свою дорожнечу може тривати роками. В 3 розділі наведено детальну характеристику цього об'єкту. Ключовим інженерним елементом цього проєкту має стати мінімізація інфільтрації атмосферних та талих вод, які проникають через покривний шар фосфогіпсу в тіло хвостосховища.

Практично вся вода, що випадає у вигляді атмосферних опадів, фільтрується через слабо водопроникний фосфогіпсовий шар, що інтенсифікує винос радіонуклідів до горизонтів підземних вод та поверхневих водних об'єктів. Додатковим критичним фактором є прояв негативних геологічних процесів, зокрема формування ділянок суфозії, обводнення та зсуву на ґрунтовій огорожувальній дамбі.

За аналогією з попередніми дослідженнями [81], на хвостосховищі РАВ «Дніпровське» було ідентифіковано ділянки підвищеної фільтрації із застосуванням геофізичних методів. Роботи [106] підтвердили значний негативний вплив об'єкта на поверхневі та підземні води, що є прямим наслідком міграції радіоактивних речовин з інфільтраційними водами. Крім того, підвищення рівня ґрунтових вод у чаші хвостосховища критично впливає на стійкість огорожувальних ґрунтових дамб [232]. Розрахунки, наведені у [113], демонструють чітку негативну тенденцію до зниження стійкості цих захисних споруд. Таким чином, узагальнення наявних досліджень дає обґрунтовану підставу стверджувати, що основною причиною зниження рівня екологічної та радіаційної безпеки хвостосховища є його обводнення внаслідок неконтрольованого надходження значної кількості атмосферних опадів.



а)



б)

Рисунок 5.5 – Оглядова карта (а) та загальний вигляд поверхні хвостосховища (б)

Аналіз метеорологічних даних Дніпропетровської області за останні двадцять років (2004–2023 рр.) вказує на суттєву просторову нерівномірність випадіння інтенсивних опадів.

Опади шаром 50 мм і більше спостерігалися від двох разів на рік (метеостанції Кривий Ріг, Дніпро) до шести-семи разів (метеостанції Комісарівка, Синельникове, Чаплине). Ці дані підтверджують, що великі зливові опади мають локальний та плямистий характер, що необхідно враховувати при проектуванні дренажних систем. Дослідженнями умов формування дощових паводків встановлено, що модулі максимальних витрат зменшуються зі зростанням площі водозбору, що

відображено у побудові редукційних формул. Параметри таких формул визначаються на основі багаторічних спостережень у різних кліматичних регіонах [265]. Зважаючи на відсутність на штучному покритті хвостосховища факторів регулювання стоку (лісів, боліт, озер), знижувальні коефіцієнти, що враховують вплив басейну на стік, у даному випадку дорівнюють одиниці. Для визначення розрахункових витрат дощових вод використовують різні редукційні формули або формулу граничної інтенсивності стоку, вибір якої залежить від розмірів площі водозбору та природно-кліматичних умов. У відповідному нормативному документі [266] для визначення максимального стоку з малих водозборів (площею менше 50 км²), у яких перебуває об'єкт, рекомендовано застосування формули граничної інтенсивності:

$$Q_{p\%} = H_{1\%} \cdot \varphi \cdot A_{1\%} \cdot \delta \cdot \lambda_{p\%} \cdot F, \quad (5.1)$$

де: $H_{1\%}$ – максимальний шар опадів за добу 1%-ї забезпеченості, який визначається за даними найближчих до водозбору метеостанцій;

φ – збірний коефіцієнт стоку;

$A_{1\%}$ максимальний модуль стоку 1%-ї забезпеченості, виражений в частках від добутку $\varphi A_{1\%}$ при $\delta = 1$, прийнято згідно $\lambda_{p\%}$ - перехідний коефіцієнт від $P=1\%$ до іншої розрахункової забезпеченості, що визначається за додатком [266].

Для розглянутих умов площа поверхні хвостосховища визначена за допомогою ресурсу Google Earth Pro дорівнює 0,9462 км² прийнятий максимальний добовий шар опадів в 50 мм, збірний коефіцієнт стоку II категорії штучно-насипаної поверхні при площі водозбору 0,1 – 1,0 км² прийнято рівним 0,7. Значення максимального модуля стоку 1%-ї забезпеченості визначено для 5 району згідно карти [266] $A_{1\%} = 0,47 \text{ м}^3/(\text{с км}^2)$. Значення перехідних коефіцієнтів згідно Додатку А.1 [266] прийняті $\lambda_{5\%} = 0,42$ і $\lambda_{10\%} = 0,30$.

Результати розрахунків максимальних витрат заданої забезпеченості зведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Максимальні витрати заданої забезпеченості

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

Реалізація поставлених завдань дослідження проводилася у декілька послідовних етапів, спрямованих на розробку технічних рішень.

На першому етапі було виконано дослідження сучасного стану рельєфу території хвостосховища. Це включало візуальні огляди чаші об'єкта, а також детальний аналіз технічних звітів підприємства ДП «Бар'єр». З метою графічного представлення поверхні та подальшого моделювання використовувалися геоінформаційні системи (ГІС) з відкритим кодом, зокрема, Surfer, QGIS та Google Earth.

Для забезпечення мінімально необхідних ухилів та організації ефективного стоку поверхневих вод, запропоновано виконати вирівнювання поверхні хвостосховища. Це перепланування передбачає зміну профілю від центральної частини до захисних огорожувальних ґрунтових дамб по периметру об'єкта.

Реалізацію цього інженерно-технічного заходу та наближений розрахунок обсягів земляних робіт доцільно виконати за класичною методикою нівелювання по квадратах. Для цього план ділянки хвостосховища розбивається регулярною сіткою квадратів. Для спрощення розрахунків вершинами квадратів були прийняті наявні висотні точки, використані для побудови топографічної карти рельєфу хвостосховища. Далі визначається висотна відмітка лінії нульових робіт – проєктна площина, що мінімізує обсяги насипу та виїмки. Запропонована сітка розбивається на умовні літерні та цифрові позначення вершин точок квадратів. Загалом, для розрахунку в межах даної методики, було використано 55 розрахункових квадратів (рис. 5.6).

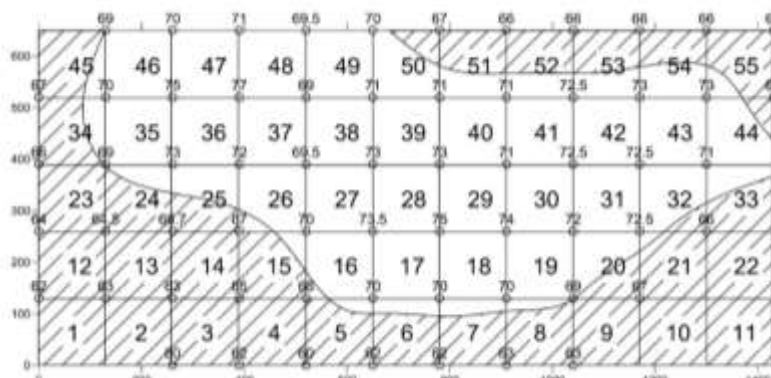


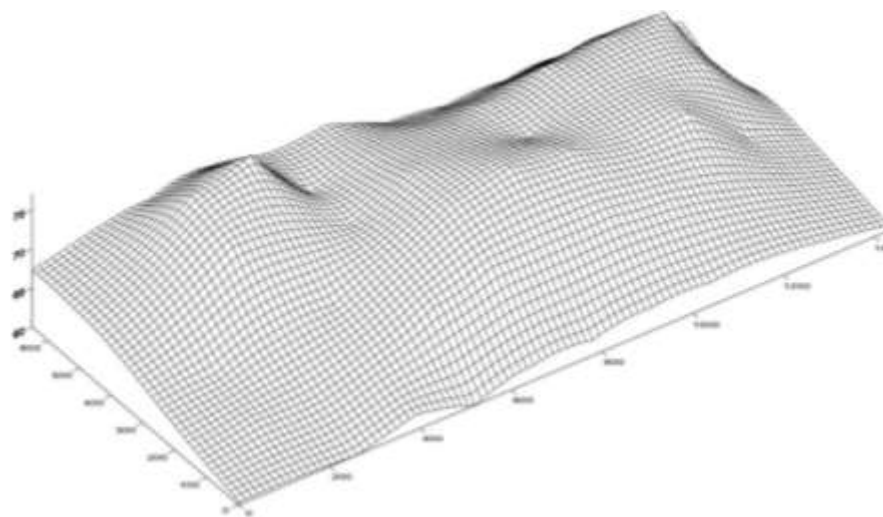
Рисунок 5.6 – Графічна схема сітки квадратів для розрахунків обсягів земляних робіт по рекультивації хвостосховища: 1-55 – номери квадратів; підписи у точках вершин квадратів – висотна відмітка поверхні, м; штриховка – насип; пусті квадрати – виїмка)

У загальному вигляді розрахунок висотної відмітки лінії нульових робіт за умови збереження балансу ґрунтових мас (об’єм ґрунту виїмки дорівнює об’єму насипу) наступний:

$$H_0 = \frac{\sum h_1 + 2 \sum h_2 + 3 \sum h_3 + 4 \sum h_4}{4 \cdot n}, \quad (5.2)$$

де: $\sum h_1$ – сума висотних відміток квадратів з однією вершиною;
 $2 \sum h_2$ – подвійна сума висотних відміток квадратів з двома вершинами;
 $3 \sum h_3$ – потрійна сума висотних відміток квадратів з трьома вершинами;
 $4 \sum h_4$ – сума висотних відміток квадратів з чотирма вершинами помножена на чотири;
 n – кількість квадратів.

Загальний обсяг розробки фосфогіпсу для формування спланованого покриття хвостосховища РАВ становить близько 1435200 м³ при відхиленні від проектного об’єму насипу у 2,9 %. Цей показник є прийнятним для виконання подальших проектних техніко-економічних розрахунків. Після визначення об’ємів та положення висотних відміток точок проектний вигляд спланованої поверхні хвостосховища може мати наступний вигляд (рис. 5.7).



а)



б)

Рисунок 5.7 – Об'ємна модель (3D) сучасного рельєфу поверхні хвостосховища (а) та після перепланування (б)

Після завершення планувальних робіт проєктом передбачається формування зосереджених ділянок стоку поверхневих вод (атмосферних опадів). У центральній частині хвостосховища буде розташований водорозділ, який умовно поділяє всю поверхню на чотири окремих ділянки водозбору (рис. 5.8).

Загальна територія проєктних робіт становить 94,6 га. Отже, площа двох більших (поздовжніх) ділянок складатиме по 26,96 га кожна. Площі двох інших (поперечні ділянки) становлять по 20,34 га відповідно. При цьому планується облаштування двох основних ловчих каналів по периметру хвостосховища. Орієнтовна їх довжина становить близько 2100 м кожного.

Слід враховувати, що конфігурація водозбірних ділянок і, відповідно, обсяги земляних робіт можуть бути скориговані. Такі зміни неминуче вплинуть

на кошторисну вартість всього комплексу інженерних робіт. Щоб обрати найбільш економічно доцільне рішення та реалізувати проєкт у межах наявних інвестицій, необхідно провести порівняльний техніко-економічний аналіз кількох варіантів форм покриття хвостосховища.

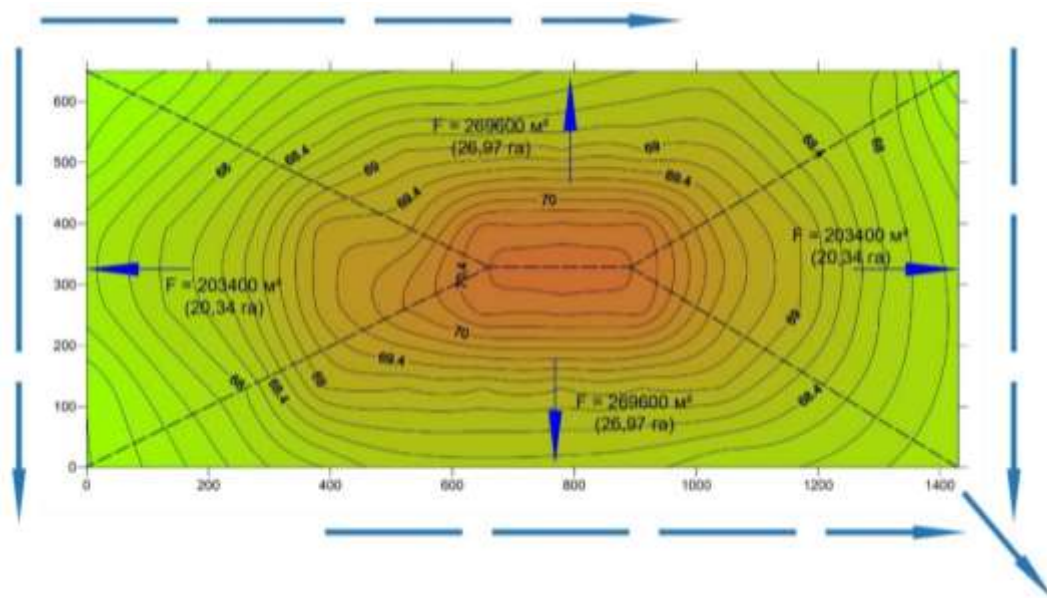
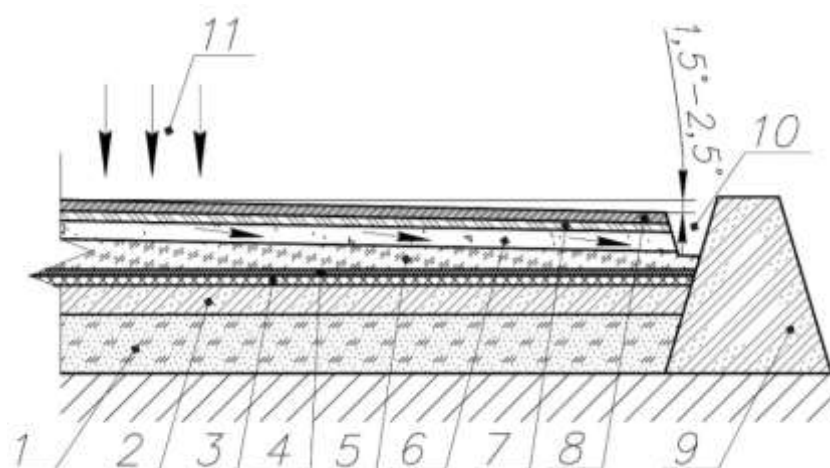


Рисунок 5.8 – Формування водозбірних ділянок на поверхні хвостосховища (стрілками вказаний напрямок потоку водовідведення)

Одним із центральних завдань цього дослідження є створення надійного протифільтраційного покриття на поверхні сховища радіоактивних відходів (РАВ). Цей результат пропонується досягти шляхом пошарового влаштування гідроізоляційних та захисних матеріалів. Як гідроізоляційний елемент може бути використаний, наприклад, радіаційно стійкий гумовий матеріал [267], поверх якого послідовно насипаються водонепроникні, дренажні та родючі шари з різних видів відсіпки. Досвід успішної рекультивації аналогічних хвостосховищ [268, 269] надає міцну основу для обґрунтування та впровадження нових технічних рішень, адаптованих спеціально для досліджуваного об'єкта (рис. 5.9).

Запропонований метод рекультивації передбачає таку послідовність робіт:

1. Початкове вирівнювання поверхні – вирівнювання поверхні хвостосховища із застосуванням наявного матеріалу, такого як фосфогіпс, для запобігання вітровій ерозії.



1 – РАВ, 2 – спланований шар фосфогіпсу, 3 – гідроізоляційний шар, 4 – геотекстиль, 5 – глина, 6 – піщано-гравійний дренаж, 7 – суглинок, 8 – родючий ґрунт, 9 – захисна дамба обвалування, 10 – ловчий канал, 11 – атмосферні опади та тала вода

Рисунок 5.9 – Проектна схема улаштування протифільтраційного покриття хвостосховища РАВ «Дніпровське»

2. Облаштування гідроізоляційного шару – влаштування по периметру гідроізоляційного шару з радіаційно стійкого матеріалу товщиною 1 – 2 мм.

3. Формування водонепроникного бар'єра – нанесення на гідроізоляцію, пошарове насипання та ущільнення глини загальною товщиною 0,3 – 0,5 м.

4. Створення ухилу – встановлення кута нахилу протифільтраційного покриття у межах $1,5^{\circ}$ – $2,5^{\circ}$ (від центру до дамб обвалування) для забезпечення самопливного відведення талих та атмосферних вод.

5. Влаштування дренажу – формування та ущільнення над водонепроникним шаром піщано-гравійного дренажу товщиною 0,3 – 0,4 м.

6. Формування суглинкового шару (проміжний шар) – поступове насипання та ущільнення проміжного суглинкового шару товщиною 0,2 – 0,3 м, який слугує основою для фінального родючого шару та/або забезпечує необхідну капілярну підпірку.

7. Створення біологічного шару – поверхня покривається родючим ґрунтом (гуміфікований ґрунт або чорнозем) товщиною 0,15–0,2 м, який засівається багаторічними травами із потужною кореневою системою.

8. Облаштування водовідведення – по периметру захисного шару створюються дренажні та ловчі канали для організованого збору та відведення води.

Застосування такої методики рекультивації сховищ відходів уранопереробних виробництв дозволить підвищити якість захисту протифільтраційного покриття та мінімізувати техногенний вплив об'єкта на навколишнє середовище. Усі види та обсяги робіт зведено у підсумкову відомість, яка є основою для подальшого техніко-економічного розрахунку та визначення кошторисної вартості проєкту (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Зведена відомість земляних та будівельно-монтажних робіт

№ з/п	Види робіт	Одиниця вимірювання	Показник (об'єм робіт)
1	Корчування чагарників та невеликих дерев на поверхні хвостосховища	га	28,2
2	Розробка фосфогіпсу з переміщенням рекультивованої маси з місця виїмки до ділянок насипу	м ³	1435200
3	Планування поверхні хвостосховища	м ²	946000
4	Улаштування гідроізоляційного матеріалу з радіаційно стійкої гуми (плівки) на спланованій поверхні	м ²	993000
5	Улаштування геотекстилю (крани, монтажники)	м ²	993000
6	Формування протифільтраційного шару з глини	м ³ / м ²	378400 / 946000
7	Формування дренажного шару з піщано-гравійної суміші	м ³ / м ²	283800 / 946000
8	Відсіпка суглинковим ґрунтом	м ³ / м ²	189200 / 946000
9	Покриття хвостосховища родючим шаром ґрунту	м ³ / м ²	141900 / 946000
10	Розробка траншей для монтажу ловчих каналів	м ³	6300
11	Улаштування піщано-гравійної суміші в основі ловчих каналів	м ³	420
12	Монтаж ловчих каналів із залізобетонних лотків	м	4200
13	Висів багаторічних трав на поверхні хвостосховища	га	94,6

На підставі техніко-економічних розрахунків, виконаних із застосуванням спеціалізованого програмного комплексу АВК-5, загальна кошторисна вартість проєкту рекультивації хвостосховища радіоактивних відходів (РАВ) становить орієнтовно 550–600 млн грн. Через значну фінансову вартість проєкту, його виконання виключно за рахунок державного чи місцевого бюджетів у поточних економічних умовах є малоімовірним. З огляду на це, найбільш перспективним шляхом забезпечення фінансування є залучення ресурсів від міжнародних організацій, зокрема МАГАТЕ (Міжнародне агентство з атомної енергії). У

перерахунку за обмінним курсом, що дорівнює 38-40 грн за 1 долар США, загальні витрати становитимуть від 14,5 до 16 млн доларів США.

Завдяки співпраці з Державним підприємством «Бар'єр», що здійснює обслуговування досліджуваного об'єкта [270], та доступу до їх попередніх звітів, з'явилася можливість провести порівняльний аналіз існуючих проєктних варіантів рекультивації. Раніше, у якості альтернативних технічних рішень для підвищення безпеки хвостосховища, були запропоновані:

Спорудження протифільтраційної завіси: цей захід передбачає створення водонепроникного бар'єра безпосередньо у тілі гідротехнічної споруди (грунтової дамби).

Планування поверхні з влаштуванням захисного екрану: ця пропозиція фокусувалася на формуванні верхнього ізоляційного шару, використовуючи глинисті ґрунти.

Порівняння цих підходів з розробленим у поточному дослідженні багат шаровим покриттям є критично важливим для обґрунтування вибору оптимальної та найбільш ефективної стратегії.

Перший проєкт відзначається своєю дорожнечою (за нинішніх цінових умов – понад 80 млн доларів США), складністю технічної реалізації й тривалістю виробництва робіт – 4-5 років. Небезпечним з точки зору надійності та цілісності конструкції огорожувальної дамби є процес буріння значної кількості свердловин та нагнітання протифільтраційного розчину. Крім цього, такий варіант зменшення фільтраційної міграції РАВ не вирішує проблему їх постійного обводнення внаслідок живлення атмосферними водами.

Другий варіант є аналогом проєктних рішень запропонованих у даному дослідженні. Його орієнтовна вартість оцінюється близько 22 млн доларів США. Він полягає в улаштуванні площинного тампонажу, що включає планування поверхні хвостосховища, укладку шару щебню потужністю 0,2 м і покриттям його глино-цементно-силікатним матеріалом методом вільного наміву.

Крім запропонованих способів рекультивації поверхні Дніпровського хвостосховища можливе біологічне закріплення поверхні захисного шару цього

небезпечного об'єкту за допомогою висадки різних рослин і перепрофілювання поверхні [271-273].

В результаті аналізу виконаних досліджень визначено, що однією з основних причин низького рівня радіаційної та екологічної безпеки хвостосховища є процес надмірного насичення РАВ атмосферними водами. Це викликано змінами кліматичних умов, що обґрунтовує формування паводків внаслідок дощів зливового характеру, а шар фосфогіпсу, який вкриває хвостосховище, інфільтрує воду до РАВ.

Запропоновано та обґрунтовано технічний проєкт з рекультивації поверхневого захисного покриття хвостосховища. Рівномірність планування поверхні та удосконалення пошарової відсипки протифільтраційного покриття надає змогу знизити обсяги потрапляння атмосферної води у процесі інфільтрації до хвостів РАВ.

Гідрологічними розрахунками обґрунтовані параметри максимальних витрат весняних повеней і дощових паводків. Це дозволяє запропонувати конструктивні рішення щодо улаштування водозбірних каналів і організованого відведення води по периметру хвостосховища.

Порівняння кошторисної вартості запропонованого проєкту з попередніми дослідженнями засвідчують про доцільність його впровадження. Загальна оціночна вартість робіт з рекультивації сягає близько 14,5-16 млн доларів США, що є достатньо прийнятним показником з огляду на небезпечність даного об'єкту, підвищену увагу зі сторони держави та міжнародних організацій. Перспективою у реалізації запропонованих технічних рішень з рекультивації хвостосховища «Дніпровське» та підвищення рівня його радіаційної безпеки є залучення міжнародних інвестицій (наприклад – МАГАТЕ).

Таким чином, запропонований проєкт рекультивації з багат шаровим покриттям (\$14,5–16\$ млн США) є найбільш економічно доцільною стратегією порівняно з іншими дослідженими альтернативами, хоча його реалізація вимагає залучення міжнародного фінансування.

5.3.2 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки дамби ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції хвостосховища «Сухачівське».

Для підвищення загальної стійкості укосів дамби ставка-накопичувача вод поверхневого стоку першої секції хвостосховища «Сухачівське» застосовують їх згладжування шляхом зменшення крутизни профілю або влаштування розвантажувальних призм із крупнозернистого ґрунту в підшві. Ефективним інженерним заходом є влаштування горизонтального дренажу, наприклад, дренажних призм або берм у підшві укосу. Цей захід має на меті зниження рівня ґрунтових вод та критичного фільтраційного тиску, що є ключовим фактором стійкості. Крім того, стійкість підвищують закріпленням укосу шарами дренуючого матеріалу (зворотні фільтри), що забезпечує організоване відведення фільтраційних вод.

Поверхню низового укосу необхідно укріплювати покриттям для захисту від атмосферних опадів та поверхневої ерозії. Для цього використовують дернування, посів трав, кам'яне накидання або бетонні плити. Перевагу рекомендується надати біологічним способам рекультивації [271, 272, 273, 274]. За необхідності може бути проведене підвантаження нижнього укосу, яке виконується за допомогою кам'яного накидання, плит або інших важких матеріалів. Додатково, для закріплення відсипаного ґрунту з боку низового укосу облаштовують упорну призму або зуб в основі дамби (рис. 5.10).



Рисунок 5.10 – Забезпечення стійкості низового укосу завдяки виположуванню укосу і влаштуванню упорної призми (зуба)

При реконструкції може знадобитися проведення обвалення старого низового укосу греблі, щоб забезпечити його подальше посилення. Після цього виконується викладання нового укосу з наступним ретельним ущільненням ґрунту для досягнення необхідної міцності. Можливо використовувати з'єднання відсипаного ґрунту з тілом існуючої греблі за допомогою анкерного кріплення та георешітки з великим перерізом осередку (рис. 5.11, 5.12).



Рисунок 5.11 – Конструкція георешітки (а) і анкерних кріплень (б)

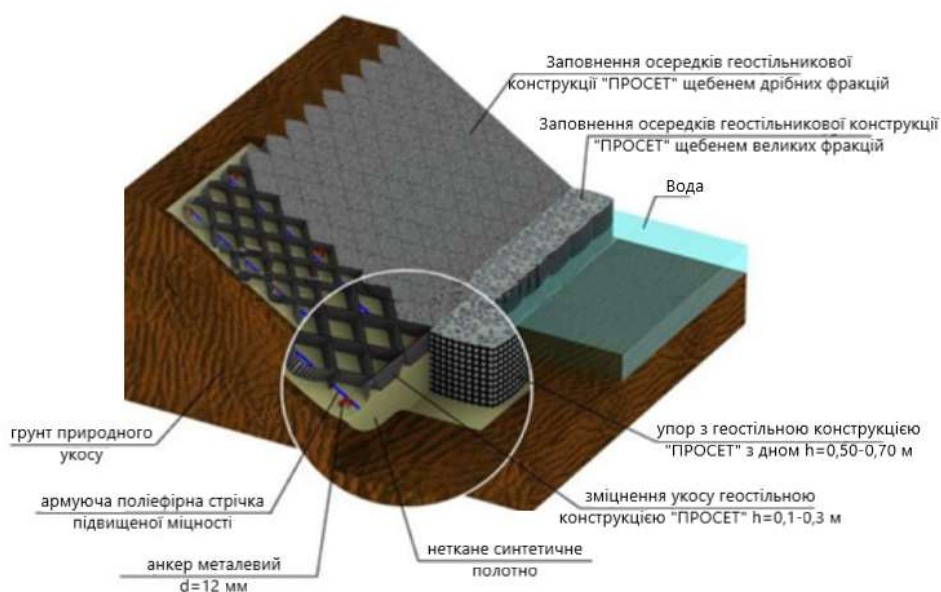


Рисунок 5.12 – Кріплення схилу із застосуванням геостільникової конструкції

Застосування геосинтетичних матеріалів забезпечує надійне зчленування нового та старого тіла споруди.

Гребінь дамби слід спланувати у бік нижнього б'єфу та ущільнити. Таке планування запобігає накопиченню та стоянню дощових і талих вод на гребені. Критично важливим є передбачити зливовий водоскид та відведення води з

гребеня ГТС на пляж з боку НБ. Для цього імовірно влаштовувати два швидкотоки поверху ГТС (залізобетонні лотки або монолітний бетон) з обов'язковим гасінням енергії потоку.

Регулярний моніторинг і контроль стану укусу (вимірювання деформацій, фільтрації та положення депресійної кривої) є критично важливими для своєчасного втручання та запобігання аварійним ситуаціям.

Для зниження пиління хвостосховища «Сухачівське» на сільськогосподарські землі рекомендується один із фізичних заходів – засипка поверхні фосфогіпсом або глиною, що створює захисний шар, який запобігає безпосередньому винесенню часток вітром.

Ефективним є також зрошення хвостосховища, зокрема з використанням технічних вод, як-то стічні води м. Кам'янське з Баглійської зрошувальної системи, для постійного зволоження поверхні. Крім того, застосовується мульчування соломою або іншими рослинними залишками, які механічно прикривають поверхню від ерозії. Цей агротехнічний захід є важливим, оскільки на другий рік рослинні залишки утворюють біоту, що сприяє природному закріпленню ґрунту. Для довгострокового ефекту впроваджують біологічну рекультивацію — висадку спеціальних рослин, стійких до умов хвостосховища, для формування постійного дернового покриву. Комплексне застосування цих фізичних, агротехнічних та біологічних методів забезпечує надійний захист від пиління та мінімізує екологічні ризики.

Таким чином, у підрозділі представлено комплексний підхід до забезпечення стійкості та надійності ґрунтової дамби, що охоплює гідрогеологічні, геотехнічні та конструктивні заходи. Отримані результати підтверджують можливість значного підвищення експлуатаційних характеристик споруди за рахунок застосування сучасних інженерних рішень та постійного контролю.

5.3.3 Розробка інженерних рішень для підвищення надійності та безпеки експлуатації хвостосховища Вільногірського ГМК.

Збільшення об'єму існуючих хвостосховищ, зокрема Вільногірського ГМК, є загальною проблемою гірничодобувних підприємств через обмеженість ресурсів і значні фінансові витрати на нові сховища. Збільшення корисного об'єму сховищ досягається переважно за рахунок підйому рівня гребня дамб, що, однак, супроводжується низкою технічних та економічних проблем. Нарощування гребель вимагає застосування сучасних технологій і значних фінансових ресурсів для виконання будівельно-монтажних робіт. Критичним наслідком збільшення розмірів є підвищення ризику та масштабу можливих аварій.

Найгострішим питанням при реконструкції є забезпечення стійкості та фільтраційної міцності ґрунтів тіла гідротехнічної споруди. Збільшення висоти дамби викликає підйом рівня води у верхньому б'єфі, що збільшує фільтраційні витрати і градієнти напору. Це, в свою чергу, призводить до підйому рівня кривої депресії та підвищення порового тиску в тілі ГТС. Під дією цих факторів зростає небезпека обвалення (сповзання) низових укосів та появи пливунів. Дослідження підтвердили, що на дамбі в б. Скажена ВГМК не виключені прояви таких небезпечних процесів, оскільки максимальне підвищення кривої депресії сягало 6 м.

Для протидії зсувним силам і відштовхуючому тиску необхідною мірою є виположування низового укосу шляхом відсипки ґрунтом. Додатково необхідно привантаження укосу гірничою масою для збільшення власної ваги ГТС.

Другим варіантом ремонтно-відновлювальних робіт на ГТС є створення протифільтраційної завіси в тілі споруди методом ін'єктування глиноцементних розчинів. Необхідно відмітити, що процес ін'єктування у штучно створеному об'єкті, який не має обмежуючих зовнішніх сил протидії, під час нагнітання є дуже складним і відповідальним, оскільки гребля знаходиться під тиском води і наносів зі сторони верхнього б'єфу і, навпаки, нічим не обмежена зі сторони нижнього. У випадку недотримання технологічних параметрів ін'єктування з урахуванням конструктивних особливостей споруди, існує небезпека її руйнування або розкриття тріщин за рахунок збільшення витрат або тиску рідини при нагнітанні

[275, 233]. Дані особливості потребують детального вивчення технічного стану ГТС та інженерно-геологічних вишукувань під час розробки проєкту з улаштування протифільтраційної завіси методом ін'єктування.

Розрахунок табл. 5.5 проведений за схемою (рис. 5.13) та виконаний згідно рекомендацій [276] за рівняннями 6.3-6.7.

Таблиця 5.5— Розрахунок об'ємів глиноцементного розчину при створенні протифільтраційної завіси методом ін'єктування на греблі хвостосховища ВГМК

Пікети	Відстань між ділянками нагнітання розчину L , м	Середня глибина до основи h , м	Відстань між свердловинами R , м	Кількість свердловин n , шт.	Загальна довжина свердловин L , м	Площа перерізу свердловини при діаметрі долота 118 мм S , м ²	Об'єм ін'єкційного розчину для свердловини $V_{св}$, м ³	Об'єм ін'єкційного розчину завіси ($R=2,2$ м; $K_{пор.}=0,12$) V , м ³	Загальний об'єм розчину V_p , м ³
ПК4-ПК5	100,0	30,0	2,2	45	1364	0,011	15,0	621,7	636,7
ПК5-ПК6	100,0	35,0	2,2	45	1591	0,011	17,4	725,3	742,8
ПК6-ПК7	100,0	40,0	2,2	45	1818	0,011	19,9	829,0	848,9
ПК7-ПК8	100,0	40,0	2,2	45	1818	0,011	19,9	829,0	848,9
ПК8-ПК9	100,0	38,0	2,2	45	1727	0,011	18,9	787,5	806,5
ПК9-ПК10	100,0	35,0	2,2	45	1591	0,011	17,4	725,3	742,8
Всього				273	9909	—	108,7	4517,8	4626,5

Відстань між свердловинами залежить від діаметру розповсюдження розчину з урахуванням коефіцієнтом запасу:

$$R = 1/\xi \cdot D_0, \text{ м} \quad (5.3)$$

де: ξ – коефіцієнт запасу = 1,3;

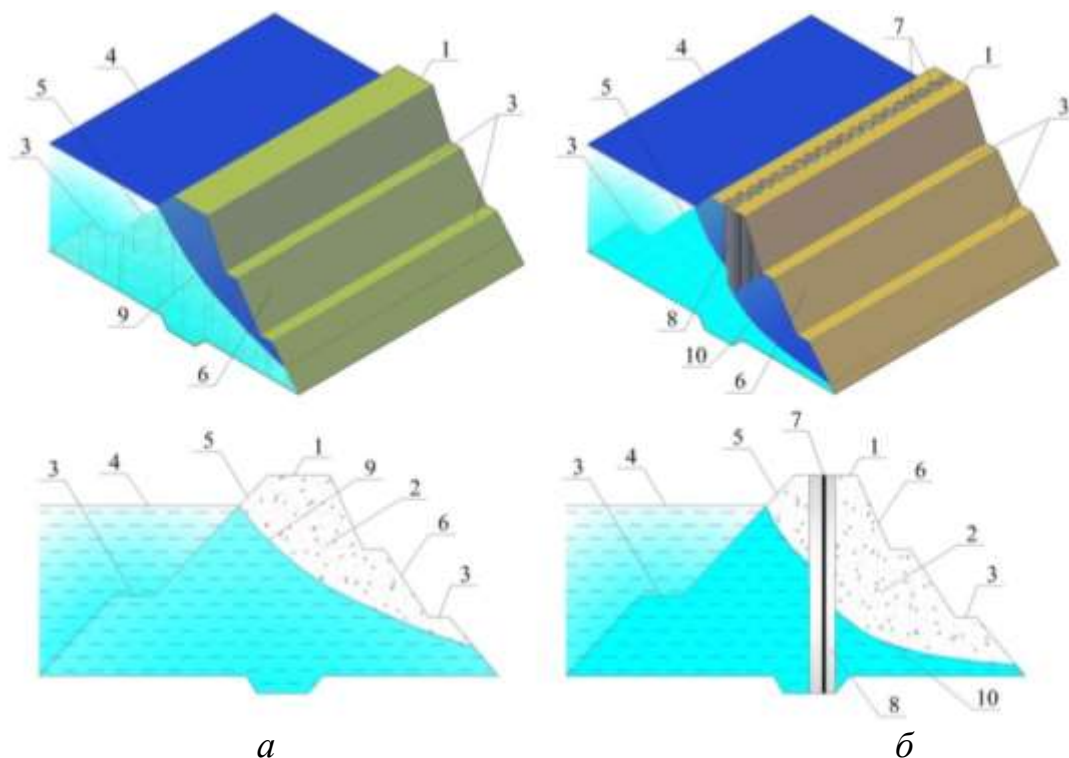
D_0 – діаметр розповсюдження розчину, 3 м.

Кількість свердловин на кожній ділянці дорівнює:

$$N = L/R, \text{ шт.} \quad (5.4)$$

де: L – довжина окремої ділянки, м;

R – відстань між свердловинами, м.



1 – гребінь ґрунтової греблі; 2 – тіло ГТС; 3 – берма; 4 – рівень води у верхньому б’єфі;
 5 – верхній укіс; 6 – низовий укіс; 7 – ін’єкційна свердловина; 8 – зона ущільнення;
 9 – крива депресії в тілі ГТС; 10 – пониження рівня кривої депресії

Рисунок 5.13 – Схема до розрахунку об’ємів робіт при створенні протифільтраційної завіси: – до проведення реконструкції; б – після проведення реконструкції

Площа перерізу свердловини при бурінні долотом діаметром 118 мм:

$$S = \pi \cdot r^2, \text{ м} \quad (5.5)$$

Об’єм ін’єкційного розчину, що нагнітається в одну свердловину, встановлюється в залежності від радіусу розповсюдження, об’єму пор і пустот, які необхідно заповнити, а також об’єму свердловини:

$$V_p = V_{\text{св.}} + V_{\text{п}}, \text{ м}^3 \quad (5.6)$$

де: $V_{\text{св.}}$ – об’єм інтервалу свердловини, м^3 ;

$V_{\text{п}}$ – об’єм пор і пустот, м^3 .

Об'єм пор у суглинках тіла споруди приймаємо рівним 12 % від загального:

$$V_{\text{п}} = 0,12 \cdot S \cdot L, \text{ м}^3 \quad (5.7)$$

де: S – площа розповсюдження розчину, м^2 ;

L – глибина свердловини, м.

Отже, нарощування хвостосховищ, як-то Вільногірського ГМК, через підйом дамб підвищує ризик аварій, оскільки збільшує фільтраційні витрати та поровий тиск, що критично загрожує стійкості ґрунтів тіла гідротехнічної споруди. Для забезпечення стійкості рекомендовано два основних технічні рішення: виположування та привантаження низового укосу, або створення протифільтраційної завіси методом ін'єктування глиноцементних розчинів.

Детальні розрахунки підтвердили технічну реалізованість другого варіанту, показавши, що для створення протифільтраційної завіси на вибраних ділянках необхідно пробурити 273 свердловини та використати загальний об'єм ін'єкційного розчину, що складає приблизно 4,6 тис. м^3 .

З метою недопущення небезпечних процесів та у випадку потенційного нарощування гребеня дамби проведено порівняння двох техніко-економічних варіантів виробництва робіт.

За першим варіантом вартість і об'єми робіт при відсипці ґрунтом та привантаженні низового укосу гірничою масою, встановлені, керуючись конструктивними параметрами греблі. Спочатку визначається довжина низового укосу з урахуванням коефіцієнтів їх закладання і ширини берми на характерних висотних відмітках. Товщина шару відсипки мінеральним ґрунтом ($\rho = 1,7 \text{ т/м}^3$) приймається рівною 0,3 м. Привантаження гірничою масою товщиною від 0,5 м до 1,5 м виконується на бермах. Таким чином, об'єм мінерального ґрунту відсипки сягає близько 67 тис. м^3 , а об'єми гірничої маси для привантаження 128 тис. м^3 . Наближена вартість реалізації запропонованих заходів розрахована за допомогою програмного комплексу АВК-5 сягає понад 30 млн грн.

Згідно другого варіанту створення ін'єкційної завіси передбачається шляхом поетапного буріння свердловин з наступним нагнітанням глиноцементного або іншого виду розчину.

Вибір розмірів протифільтраційної завіси залежить від умов роботи та необхідності зменшення фільтраційної витрати води у центральній частині ГТС. Доцільним є проведення ін'єктування на ділянці між ПК4-ПК10, оскільки центральна частина споруди є найбільш вразливою зоною за рахунок навантаження зі сторони ВБ і зосередженого фільтраційного потоку. Глибину свердловини встановлено залежно від рельєфу місцевості і різниці між відмітками гребня греблі та її основи на заданому проміжку.

Визначена кошторисна вартість улаштування протифільтраційної завіси сягає близько 22 млн грн.

В результаті порівнянні двох інженерно-технологічних рішень відносно реконструкції встановлено, що будівництво протифільтраційної завіси є більш доцільним з точки зору економічної ефективності.

В результаті порівняння двох інженерно-технологічних рішень встановлено, що будівництво протифільтраційної завіси є більш доцільним з точки зору економічної ефективності (орієнтовна вартість 22 млн грн. проти понад 30 млн грн.). Крім економічної переваги, ін'єктування розчину створить міцне ядро в тілі ГТС, що призведе до зниження фільтраційних втрат, зменшення рівня кривої депресії та порового тиску. Це, у свою чергу, підвищить фільтраційну міцність і загальну стійкість низового укусу, що є критичним для довгострокової безпеки Вільногірського хвостосховища.

5.4 Обґрунтування та порівняльний аналіз економічної ефективності протифільтраційних заходів на цивільних ГТС

З огляду на щорічне зростання вартості поливної води, фільтраційні втрати з каналів та регулюючих басейнів (РБ) зрошувальних систем (ЗС) безпосередньо впливають на зниження економічної ефективності як міжрайонних управлінь

водного господарства, так і Регіонального офісу водних ресурсів загалом. Таким чином, своєчасне виконання ремонтно-відновлювальних робіт є критично важливим елементом для забезпечення високого рівня коефіцієнта корисної дії споруд та зменшення непродуктивних втрат води. В умовах недостатнього та обмеженого фінансування, комплекс необхідних технічних і технологічних заходів має бути суворо обґрунтований техніко-економічною доцільністю їх впровадження.

З цією метою, оцінка економічної ефективності починається з аналізу кошторисної вартості ремонтно-відновлювальних робіт, виконаних за традиційною технологією. В роботі [67] наведено кошторисна вартість повного циклу ремонтно-відновлювальних робіт одного з регулюючих басейнів за традиційною технологією (із заміною плит облицювання та протифільтраційної плівки), розрахована за допомогою програмного комплексу АВК-5, складає 702,1 тис. грн. та 6420,9 тис. грн. відповідно.

Проведені розрахунки свідчать, що більшість міжрегіональних управлінь не володіють необхідними фінансовими ресурсами для виконання повного циклу ремонту та відновлення усієї інфраструктури. Враховуючи масштаби зрошувальної інфраструктури, що перебуває в управлінні цих агенцій, комплексне поліпшення технічного стану РБ та МК може розтягнутися на десятиліття.

У зв'язку з цим, пропонується поетапний підхід, зосереджуючи увагу насамперед на ділянках, де надмірні фільтраційні втрати спричинені явно деформованим, зміщеним покриттям та/або розірваними протифільтраційними плівками. На таких ділянках є необхідним виконання повного циклу ремонту та реконструкції, включаючи заміну плит і протифільтраційних плівок. За результатами проведеного дослідження, саме ці критичні ділянки становлять 30-50 % в РБ і МК, що дозволило б потенційно зменшити оціночну вартість ремонту та реконструкції на 50-70 %.

Для усунення втрат води в прихованих зонах просочування, де візуально не спостерігається пошкоджень плит і протифільтраційної плівки, пропонуються

два альтернативні методи поліпшення технічного стану каналів зрошувальних систем і регулюючих басейнів з істотно меншими фінансовими витратами.

Герметизація деформаційних швів. На першому етапі для обох альтернативних комплексів заходів необхідно провести ретельне очищення деформаційних швів між плитами та наявних тріщин, а після очищення заповнити ці шви сумішшю глини або важкого ґрунту з полімерним в'язучим [277]. Цей захід дозволить суттєво зменшити просочування води через деформаційні шви. За попередніми розрахунками, вартість цих робіт для РБ-1 КЗС становить 212,980 тис. грн.

Ущільнення ґрунтів відкосів. Для зменшення фільтрації крізь відкоси на другому етапі пропонується комплекс заходів з ущільнення ґрунтів дамб регулюючих басейнів та магістральних каналів: фізико-механічне, хімічне або електрохімічне [278]. Ці методи вважаються досить ефективними і широко використовуються у будівництві, особливо на лесових та глинистих ґрунтах.

Основна мета методів покращення властивостей порід полягає у відновленні їхньої монолітності та щільності, підвищенні міцності і стійкості, а також у зниженні водопроникності. Серед них ключовими є цементація, глинизація та бітумізація, а для тимчасового покращання – заморожування.

Найчастіше застосовується цементація. Суть цього методу полягає у нагнітанні цементного розчину в породи через спеціально пробурені свердловини (після їхнього промивання водою). Розчин проникає у тріщини й порожнини, твердне та забезпечує монолітність, щільність, стійкість і міцність порід, значно знижуючи їх водопроникність.

Цементация традиційно застосовується в таких випадках [279]:

1. Для покращення природних основ будівель і споруд (площинна цементація порід у дні котловану).
2. Для підвищення стійкості гірських порід у підземних виробках і захисту від водоприпливів (цементация за облицюванням для гідроізоляції).
3. Для підвищення стійкості гірських порід в укосах виїмок, кар'єрів і стінках котлованів (місцева або площинна цементація для монолітності).

При спорудженні протифільтраційних завіс (цементування вздовж певної зони для перегородження руху підземних вод). Наприклад, завіси влаштовують під греблями та в місцях їхнього примикання для запобігання значним втратам води на фільтрацію та зменшення зважувальної дії води в основах споруд.

Хімічні та електрохімічні методи є більш коштовними. До хімічних методів належить ін'єкційне закріплення ґрунтів, яке забезпечує значне підвищення водостійкості, довговічності та міцності, впливаючи на структуру ґрунтів. Під час ін'єкційного закріплення введені суміші або розчини формують у масивах ґрунту міцні структурні зв'язки, що сприяє зменшенню коефіцієнтів фільтрації та вологості. Хімічні методи закріплення ґрунтуються на взаємодії між хімічними реагентами та активною частиною ґрунту.

До хімічних засобів закріплення належать силікатизація, смолизація та амонізація. Для зменшення водопроникності ґрунтів дамб рекомендовано застосовувати газову силікатизацію, ефективну для лесоподібних порід із коефіцієнтом фільтрації від 0,1 до 0,5 м/добу і надає міцність ґрунтам та здатну підвищити міцність ґрунтів до 0,5-2 МПа. Процес газової силікатизації передбачає послідовну обробку ґрунтів: спочатку вуглекислим газом, потім силікатом натрію, і на завершення – знову вуглекислим газом для забезпечення отвердіння силікатного розчину. Оскільки методика та апаратура для цього методу детально розроблені, немає необхідності наводити її опис у цій роботі [280].

Електрохімічні засоби застосовуються для укріплення суглинистих та глинистих ґрунтів із коефіцієнтом фільтрації менше ніж 0,3 м/добу [281]. Вони поділяються на три напрямки:

1. Електроосмотичне осушення, яке використовує сумісну дію постійного електричного струму та голкофільтрового водопониження. Це ініціює фізико-хімічні процеси, що сприяють електроосмотичному руху води в порах [281].

2. Електрохімічне закріплення – довготривала дія постійного електричного струму, що призводить до ущільнення ґрунту біля анода, розрідження біля катода з подальшим його ущільненням.

3. Електросилікатизація – комбінація силікатизації та електричної обробки.

Під тиском крізь ін'єктори вводяться силікатні розчини, після чого подається електричний струм. В якості ін'єкторів-електродів використовуються перфоровані труби діаметром 50 мм із глибиною занурення від 1 до 3 м. Відстань між електродами рекомендована 50-75 см [189]. Як силікатні розчини для ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації 0,1-0,5 м/добу автори [278, 279, 282] пропонують застосовувати рідке скло Na_2SiO_3) у поєднанні з хлористим кальцієм CaCl_2 або фосфорною кислотою H_3PO_4 . Детальний опис апаратури та методики використання електросилікатизації доступний у відповідних роботах [278, 279, 282].

Порівняльний аналіз економічної ефективності: На практиці найбільшого поширення набуло застосування протифільтраційної завіси для зменшення непродуктивних втрат води з об'єктів водогосподарської інфраструктури. На прикладі РБ-1 КЗС розглянуто різні за трудомісткістю варіанти відновлення технічного стану ГТС [67]. Одним із варіантів є улаштування фільтраційної завіси вздовж пошкоджених ділянок басейну, загальною довжиною 86,3 м (згідно з даними зйомки ПЕМПЗ, див. пп. 3.3). Буріння 22 свердловин діаметром 100 мм на глибину 6 м, до стовбура яких нагнітається глинистий розчин, оцінюється в 319,9 тис. грн.[280].

Другим, менш фінансово затратним способом, є поточний ремонт, який включає закладення деформаційних швів між плитами та істотних тріщин в них в'язучими матеріалами з полімерами. Кошторисна вартість цього методу, як було показано раніше на прикладі РБ-1 КЗС, склала 212,98 тис. грн.

Відновлення належного технічного стану каналів та регулюючих басейнів неминуче призведе до зменшення фільтраційних втрат і, відповідно, до більш раціонального використання водних ресурсів. Розрахунки фільтраційних втрат з РБ-1 КЗС виконано за формулою Ведерникова В.В. з урахуванням різних коефіцієнтів фільтрації відповідно до запланованих ремонтних робіт: для повного комплексу ремонтно-відновлювальних робіт — за даними чинного стандарту ДБН В.2.4-1-99 [165]; для протифільтраційної завіси — згідно з [283]; для поточного ремонту із закладенням деформаційних швів та істотних тріщин у плитах — [165, 178] (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Розрахунок окупності ремонтних робіт на регулюючому басейні за різними методами [67]

Види робіт	Повний комплекс ремонтно-відновлювальних робіт		Протифільтраційна завіса		Закладення деформаційних швів	
	до ремонту	після ремонту	до ремонту	після ремонту	до ремонту	після ремонту
Загальні капіталовкладення, грн	702078		319933		212984	
Вартість робіт, грн./п.м.	8135		3707		2468	
Питомі втрати води, $Q_{\text{п}}, \text{м}^2/\text{добу}$	1,87	0,13	1,87	0,19	1,87	0,15
Добові втрати води, $Q_{\text{доб}}, \text{м}^3/\text{добу}$	161,3	11,92	161,3	16,13	161,3	12,95
Втрати води за місяць, $Q_{\text{міс}}, \text{м}^3/\text{міс}$	4841	337	4841	484	4841	389
Річні втрати води, $Q_{\text{рік}}, \text{м}^3/\text{рік}$	24200	1683	24200	2420	24200	1943
Вартість фільтраційних втрат води, грн.	96800	6732	96800	9680	96800	7772
Різниця втрат води до та після ремонту, грн.	90068		87120		89028	
Термін окупності капіталовкладень, рік	8		4		3	

Примітка: При визначенні терміну окупності запланованих ремонтних робіт на регулюючому басейні РБ-1 КЗС було використано вартість зрошувальної води, яка становить 4 грн. за 1 м³ (за даними Синельниківської дільниці Павлоградського міжрайонного управління водних ресурсів).

Отже, результати розрахунків чітко демонструють, що повний комплекс робіт з відновлення каналів та регулюючих басейнів із заміною пошкоджених плит та протифільтраційної плівки є найбільш капіталоемним і має проєктний термін окупності вісім-десять років. Водночас, цей метод забезпечує мінімізацію фільтраційних втрат. Альтернативні методи — улаштування протифільтраційної завіси та виконання поточного ремонту із закладенням деформаційних швів — є економічно вигіднішими з термінами окупності чотири та три роки відповідно.

5.5 Висновки до Розділу 5

Проведені дослідження підтвердили, що хвостосховище радіоактивних відходів (РАВ) «Дніпровське» становить критичну екологічну та радіаційну небезпеку серед гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення. Основною причиною зниження його надійності та безпеки є неконтрольоване обводнення тіла і огорожувальної дамби хвостосховища внаслідок інфільтрації атмосферних опадів.

Було встановлено, що слабо водопроникний шар фосфогіпсу, який покриває об'єкт, не забезпечує необхідного протиінфільтраційного захисту. Це призводить до інтенсивного виносу радіонуклідів у горизонти підземних та поверхневих вод. Додатковим критичним фактором є підвищення рівня ґрунтових вод у чаші хвостосховища, що, як підтверджують розрахунки, спричиняє негативну тенденцію до зниження стійкості огорожувальних ґрунтових дамб. Таким чином, основне завдання інженерного проєктування полягало у розробці комплексного рішення, спрямованого на мінімізацію інфільтрації атмосферних вод та забезпечення організованого поверхневого стоку.

Для вирішення поставленого завдання було розроблено та обґрунтовано комплексний технічний проєкт рекультивації поверхневого захисного покриття хвостосховища. Реалізація проєкту поділялася на кілька ключових інженерних етапів: гідрологічне обґрунтування та водовідведення; проєктування багатошарового покриття.

На основі аналізу багаторічних метеорологічних даних для Дніпропетровської області встановлено суттєву нерівномірність випадіння інтенсивних опадів, що обумовлює формування паводків зливого характеру. Для коректного проєктування водовідвідних систем було проведено гідрологічні розрахунки максимальних витрат дощових вод.

Зважаючи на малу площу водозбору об'єкта ($0,9462 \text{ км}^2$), для визначення розрахункових витрат було застосовано формулу граничної інтенсивності стоку відповідно до чинних нормативних документів. На підставі розрахунків,

отримано ключові параметри максимальних витрат заданої забезпеченості ($Q_{1\%} = 15,6 \text{ м}^3/\text{с}$ і $Q_{5\%} = 6,54 \text{ м}^3/\text{с}$). Ці гідрологічні дані дозволили обґрунтувати конструктивні рішення щодо улаштування водозбірних та ловчих каналів по периметру об'єкта з орієнтовною довжиною 2100 м кожного. Проєктом передбачено формування водорозділу у центральній частині та поділ всієї поверхні на чотири окремі ділянки стоку, що забезпечує організоване та швидке відведення атмосферних вод, запобігаючи їхній інфільтрації.

Ключовим елементом підвищення надійності є формування надійного протифільтраційного покриття. Для цього запропоновано комплекс заходів з перепланування поверхні із застосуванням існуючого матеріалу (фосфогіпсу) та влаштування багатошарового захисного екрану.

Запропонований метод дозволить суттєво знизити обсяги потрапляння атмосферних вод до тіла РАВ, мінімізуючи його техногенний вплив на довкілля.

Для остаточного обґрунтування інженерного рішення проведено порівняльний техніко-економічний аналіз запропонованого проєкту з двома альтернативними варіантами рекультивації, які розглядалися раніше ДП «Бар'єр».

Запропоноване рішення з багатошаровим протифільтраційним покриттям є найбільш економічно доцільним порівняно з альтернативними.

На прикладі інших хвостосховищ гірничодобувної промисловості, було досліджено додаткові критичні фактори безпеки. Зокрема, для підвищення стійкості ґрунтових дамб (на прикладі "Сухачівське 1 С") необхідно застосовувати їх виположування, влаштування упорних призм/зубів та горизонтального дренажу для зниження рівня ґрунтових вод. Для зменшення пиління хвостосховища «Сухачівське» на сільськогосподарські землі рекомендується комплексне застосування фізичних (засипка фосфогіпсом/глиною або зрошення технічними водами), агротехнічних (мульчування соломою) та біологічних методів. Ці заходи спрямовані на створення постійного захисного шару, що запобігає винесенню часток вітром, забезпечує закріплення поверхні та мінімізує екологічні ризики.

Крім того, критичний аналіз реконструкції Вільногірського хвостосховища

підтвердив, що нарощування гребель критично збільшує фільтраційні витрати та поровий тиск, що створює високий ризик втрати стійкості низових укосів. Для вирішення цієї проблеми було розглянуто два основні інженерні підходи: механічне привантаження укосу та створення протифільтраційної завіси методом ін'єктування. Детальні розрахунки підтвердили технічну реалізованість ін'єктування, визначивши необхідний обсяг глиноцементного розчину на рівні близько 4,6 тис. м³ для центральної, найбільш вразливої ділянки (ПК4-ПК10). Згідно з техніко-економічним аналізом, вартість створення ін'єкційної завіси становить орієнтовно 22 млн грн, що є значно економічнішим рішенням порівняно з відсіпкою ґрунтом та привантаженням (>30 млн грн). Ін'єктування забезпечує створення ядра в тілі гідротехнічної споруди, підвищуючи її фільтраційну міцність. Як наслідок, цей метод призведе до зниження рівня кривої депресії та зменшення порового тиску, що є критичним для забезпечення стійкості. Таким чином, створення протифільтраційної завіси є найбільш обґрунтованою та технологічно доцільною стратегією реконструкції. Цей проєкт дозволяє мінімізувати небезпеку зсувних явищ і гарантує підвищення довгострокової безпеки експлуатації хвостосховища Вільногірського ГМК.

Нарешті, оскільки питання фінансування є ключовим для всіх інженерних проєктів, було досліджено економічну доцільність ремонтно-відновлювальних робіт на зрошувальних системах. Необхідність їх своєчасного виконання зумовлена щорічним зростанням вартості поливної води, що робить фільтраційні втрати з каналів та регулюючих басейнів прямим фактором зниження економічної ефективності водного господарства.

В умовах обмеженого фінансування міжрайонні управління водних ресурсів не можуть виконати повний цикл ремонту усієї інфраструктури одночасно, що вимагає впровадження економічно обґрунтованих, цілеспрямованих заходів.

Було запропоновано поетапний підхід, який передбачає зосередження повного ремонту (із заміною плит) лише на критичних ділянках з явними пошкодженнями, що потенційно може знизити кошторисну вартість ремонту на 50-70%.

Для усунення втрат у прихованих зонах просочування обґрунтовано

застосування двох менш капіталоємних альтернативних методів: герметизації деформаційних швів та ущільнення ґрунтів відкосів.

Розглянуто комплекс методів ущільнення ґрунтів, включаючи ефективні хімічні (газова силікатизація) та електрохімічні (електросилікатизація) засоби, придатні для суглинистих і лесоподібних порід.

На прикладі РБ-1 КЗС проведено порівняльний аналіз трьох варіантів ремонту за критерієм терміну окупності.

Повний комплекс ремонтно-відновлювальних робіт (заміна плит) є найбільш капіталоємним (702,1 тис. грн) і має найдовший термін окупності – 8 років. Улаштування протифільтраційної завіси є середнім за витратами (319,9 тис. грн) та має термін окупності 4 роки, забезпечуючи значне зменшення фільтраційних втрат. Виконання поточного ремонту із закладенням деформаційних швів є найменш витратним (212,98 тис. грн), демонструючи найкращий економічний результат із терміном окупності лише 3 роки.

Таким чином, дослідження чітко доводить, що за умов обмеженого фінансування найбільш економічно ефективними та доцільними для швидкого зменшення непродуктивних втрат води є поточний ремонт із герметизацією швів та улаштування протифільтраційної завіси.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено нову актуальну наукову проблему з розробки науково-технічних засад управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення, які ґрунтуються на закономірностях трансформації фільтраційного режиму та гідрогеомеханічної стійкості огорожувальних дамб під впливом комбінованих техногенних, кліматичних та військових чинників, що дає можливість інтегрувати промислові та цивільні об'єкти у єдину захисну гідродинамічну систему і є підґрунтям для забезпечення сталого розвитку промислових регіонів та реалізації стратегії повоєнного відновлення України.

Основні наукові та технічні результати полягають у такому:

1. На основі системного аналізу стану експлуатації промислових хвостосховищ та цивільних іригаційних систем в Україні, зокрема у Дніпропетровській області, виявлено критичне погіршення їхньої експлуатаційної надійності. У ході досліджень встановлено глибокий розрив між деградацією технічних параметрів огорожувальних дамб і застарілими методами контролю, що не дозволяють здійснювати превентивний моніторинг фільтраційних та деформаційних процесів. Зважаючи на це, обґрунтовано гостру актуальність вирішення масштабної проблеми створення інтегральної методології управління екологічною безпекою сумісного функціонування промислових і цивільних гідротехнічних споруд, що безпосередньо відповідає завданням Стратегії сталого розвитку держави та плану повоєнної відбудови України.

2. За результатами систематичного огляду літературних джерел з технологій забезпечення екологічної безпеки та експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд виявлено, що наявні підходи здебільшого зосереджені на фрагментарному оцінюванні промислових об'єктів без урахування їхньої взаємодії з меліоративними системами. У ході критичного аналізу публікацій встановлено відсутність інтегральних методологій, які б поєднували експрес-діагностику

прихованих зон фільтрації методами неруйнівного контролю із прогнозним математичним моделюванням напружено-деформованого стану дамб в умовах зміни клімату та підвищених техногенних ризиків. На основі окресленого наукового розриву спрогнозовано перспективні напрями досліджень, що полягають у розробці єдиних науково-технічних засад проактивного управління екологічною безпекою сумісного функціонування промислових і цивільних гідротехнічних споруд як взаємопов'язаної гідродинамічної мережі регіону.

3. Встановлено, що ключовими факторами виникнення надзвичайних ситуацій на промислових гідротехнічних спорудах є фізичне старіння конструкцій, тривала експлуатація поза межами проєктних ресурсів і систематичне перевищення потужностей. Статистично доведено, що найбільш уразливими є наливні конструкції (51,2% від усіх інцидентів), де основними безпосередніми причинами руйнувань виступають порушення стійкості схилів дамб, сейсмічні коливання та переповнення чаші накопичувачів через інтенсивні опади.

4. Виявлено, що сучасна зміна клімату (зокрема, підвищення середньої температури та паводки зливого характеру) суттєво знижують коефіцієнт стійкості споруд. За умов тривалих посух відбувається пересихання ґрунтового покриву дамб із подальшим тріщиноутворенням, а наступні інтенсивні зливи призводять до неконтрольованого перезволоження матеріалів, активізації внутрішньої фільтрації та ерозійних процесів (суфозії), що щороку розширює зони замочування дамб на 10–15%.

5. Доведено високу ефективність та доцільність інтеграції неруйнівних геофізичних методів у систему постійного еколого-технічного моніторингу ГТС. Комплексне поєднання методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі для локалізації прихованих зон фільтрації та тектонічних мікропорушень, вертикального електричного зондування для фіксації рівнів залягання ґрунтових вод та радіометрії для контролю міграції небезпечних речовин створює надійну інформаційну основу для оперативного аудиту технічного стану об'єктів.

6. Розроблено та теоретично обґрунтовано комплексну методику діагностики ГТС, яка поєднує прогнозну та розрахункову складові. Метод

базується на інтеграції даних тектонічного аналізу тріщинуватості району розташування об'єкту (з урахуванням впливу глибинних розломів Українського щита й техногенних вібрацій) та математичних моделей напружено-деформованого стану в програмних комплексах чисельного моделювання, що дозволяє виявляти критичні деформації на ранніх стадіях.

7. Виконано оцінку геомеханічної стійкості дамб хвостосховищ «Дніпровське» і «Сухачівське». За методологією UBA розраховано загальні індекси небезпеки (THI) та ризику (TRI), де найвищий рівень загрози зафіксовано для хвостосховища «Дніпровське» ($THI = 13,18$; $TRI = 10$) через його розташування у заплаві р. Дніпро.

8. На основі комп'ютерного моделювання водної міграції радіонуклідів встановлено, що фронт уранового забруднення від хвостосховища «Дніпровське» наразі не досяг берегової лінії річки Коноплянка, проте динаміка його поширення створює довгострокову потенційну загрозу для гідродинамічної мережі регіону. Обґрунтовано, що упередження екологічних ризиків і забруднення водних об'єктів вимагає негайного відновлення та модернізації системи комплексного гідрохімічного моніторингу підземних і поверхневих вод у зоні впливу об'єкта.

9. Визначено, що для забезпечення довгострокової екологічної безпеки нових об'єктів необхідний перехід до пастового згущення та сухого складування відходів, що дозволяє повертати до 85% води у цикл та відмовитися від наливних дамб. Для застарілих та діючих споруд підтверджено високу інженерно-економічну ефективність таких заходів, як формування протифільтраційних завіс за технологією струминної цементації, створення протифільтраційних екранів, а також облаштування зовнішніх щебеневих дренажних шарів для запобігання суфозійному виносу матеріалу.

10. Сформульовано та обґрунтовано засади нової наукової концепції, яка вперше пропонує розглядати промислові хвостосховища та цивільні меліоративні системи як єдину взаємопов'язану гідродинамічну мережу регіону. Доведено наявність кумулятивного ефекту підтоплення територій та обґрунтовано можливість використання ресурсного потенціалу цивільних ГТС як превентивних інженерних бар'єрів для оперативного перехоплення токсичних

фільтраційних витоків або для резервного водопостачання промислових комплексів і населених пунктів під час кризових періодів та бойових дій.

11. Забезпечено надійний контроль деформаційних і фільтраційних процесів на критичних об'єктах гідротехнічної інфраструктури Дніпропетровської області – зокрема на хвостосховищі радіоактивних відходів «Дніпровське» та магістральних каналах Вищетарасівської, Кільченської й Солоняно-Томаківської меліоративних систем – шляхом практичного застосування розроблених науково-технічних засад проактивного управління екологічною безпекою. Технічне впровадження запропонованих протифільтраційних рішень у діяльність Державного підприємства «Бар'єр» і Регіонального офісу водних ресурсів у Дніпропетровській області дозволило оперативно локалізувати приховані дефекти дамб, мінімізувати ризики забруднення річки Коноплянка.

12. Доведено високу економічну та екологічну доцільність інтеграції розроблених рішень, що підтверджено розрахунками вартості оптимального проекту багат шарового захисного покриття для хвостосховища «Дніпровське» в межах 14,5 – 16,0 млн. доларів США. Встановлено, що впровадження комплексної методики превентивного дослідження та інструментів діагностики прихованих дефектів дамб забезпечує стійке зниження витрат підприємств на поточний експлуатаційний контроль гідротехнічних споруд на 25–30%. Обґрунтовано, що очікуваний екологічний ефект від запобігання потенційним гідродинамічним аваріям та мінімізації фільтраційного забруднення підземних і поверхневих вод дозволяє упередити ймовірні збитки навколишньому середовищу регіону на суму понад десятки мільйонів гривень.

Отже, сформульовані науково-технічні засади дозволили перейти від пасивного спостереження до проактивного забезпечення екологічної безпеки хвостосховищ, що базується на врахуванні технологічних рішень з модернізації, стабілізації та рекультивації гідротехнічних споруд хвостосховищ у їх взаємодії із динамічним геологічним середовищем. Таким чином, дисертація є завершеною науковою роботою, в результаті якої вирішена актуальна науково-технічна проблема управління екологічною безпекою ГТС гірничопромислового комплексу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. STATE OF WORLD MINE TAILINGS PORTFOLIO 2020. URL: <https://worldminetailingsfailures.org/> (дата звернення: 26.12.2025).
2. Про найбільші екокатастрофи, пов'язані з аваріями на хвостосховищах промвідходів. URL: <https://ecolog-ua.com/news/pro-naybilshi-ekokatastrofy-povyazani-z-avariyamy-na-hvostoshovyshchah-promvidhodiv> (дата звернення: 26.12.2025).
3. Chronology of major tailings dam failures. (from 1960). (last updated 24 Nov 2025). URL: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (дата звернення 15.12.2025)
4. Радчук О., Махінько А. Аварії на огорожувальних спорудах хвостосховищ: аналіз статистичних даних. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*, 2024. Вип. № 28. С. 183–191.
5. S. Azam. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Geotechnical News*. 2010. №28. С. 50–53.
6. ICOLD. Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences. Bulletin 121. – Paris, France: United Nations Environmental Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics (DTIE) and International Commission on Large Dams (ICOLD). 2001. 144 с. URL: <https://www.icoldchile.cl/boletines/121.pdf> (дата звернення: 26.12.2025).
7. EPA. Damage Cases and Environmental Releases from Mines and Mineral Processing Sites. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, 1997. 223 с. URL: [Damage Cases and Environmental Releases from Mines and Mineral Processing Sites](#) (дата звернення: 26.12.2025).
8. Islam K., Murakami S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*. 2021. №70 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361:102361>
9. Piciullo L. A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering*

Geology. 2022. №303:106657. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657>

10. Bowker L.N., Chambers D.M. The Risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/283321865_The_Risk_Public_Liability_Economics_of_Tailings_Facility_Failures (дата звернення: 26.12.2025).

11. Roche C., Thygesen K., Baker E. Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident – A Rapid Response Assessment. A UNEP RapidResponse Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal, 2017. 70 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/327498940_Mine_tailings_storage_safety_is_no_accident (дата звернення: 26.12.2025).

12. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context / M. Rico та ін. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. №152. С. 846–852. URL: [51-rico-et-al-2008-reported-tailings-dam-failures-a-review-of-the-european-incidents-in-the-worldwide-context_0.pdf](https://www.researchgate.net/publication/327498940_Mine_tailings_storage_safety_is_no_accident) (дата звернення: 26.12.2025).

13. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history / Z. Lyu та ін. *Advances in Civil Engineering*. 2019. С. 1–18. <https://doi.org/10.1155/2019/4159306>

14. USCOLD. TDI. – Denver, CO, USA:US Committee on Large Dams. – 1994.

15. United Nations Environment Programme UNEP. Environmental and Safety Incidents Concerning Tailings Dams at Mines: Results of a Survey for the Years 1980–1996. Nations Environment Programme, Industry and Environment. 1996. 135 с. URL: <https://wedocs.unep.org/items/d228395c-5d47-4f1a-b7c2-abb536bc187b> (дата звернення: 26.12.2025).

16. Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., & Hudson-Edwards, K.A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*. 2014, (51). С. 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>

17. Singh, S., Kumar, A., & Sitharam, T.G. Stability analysis of tailings dam using finite element approach and conventional limit equilibrium approach. *Lecture*

Notes in Civil Engineering. 2022. (185), C. 91–103. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5601-9_9

18. Sitharam, T.G., Hegde, A. Stability analysis of rock-fill tailing dam: An Indian case study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016. 11(4), C. 332-342. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1221574>

19. Rios, A.C., Porfírio, M., & Assis, A. (2018). A probabilistic approach to the stability of a dam under rapid drawdown conditions. *PanAm Unsaturated Soils* 2017. <https://doi.org/10.1061/9780784481691.012>

20. Yi, Y., Wei, S., Shufen, L. Tailings dam stability analysis of the process of recovery. *Procedia Engineering*. 2011. (26), C. 1782-1787. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2367>

21. Responsible Investor, 2019. How big is the mining sector tailings dam problem? URL: <https://www.responsible-investor.com/em-td/> (дата звернення 15.12.2025)

22. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. 2021. 524 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 26.12.2025).

23. На межі екологічної катастрофи: чому Україні слід боятися промислових відходів. URL: <https://ecolog-ua.com/news/na-mezhi-ekologichnoyi-katastrofy-chomu-ukrayini-slid-boyatysya-promyslovyh-vidhodiv> (дата звернення: 26.12.2024).

24. Техногенна аварія на Арселорі: під Кривим Рогом дачі затопило отруєною водою з хвостосховища, що будується. URL: <https://svoi.kr.ua/novyny/tehnogenna-avariya-na-arselori-pid-kryvym-rogom-dachi-zatopylo-otruyenoyu-vodoyu-z-hvostoshovyshha-shho-buduyetsya/> (дата звернення: 26.12.2025).

25. Global Tailings Portal. URL: <https://tailing.grida.no/#header> (дата звернення: 26.12.2024).

26. Tailings.info. URL: <https://tailings.info/storage/containment.htm> (дата

звернення: 26.12.2025).

27. Life cycle assessment: Principles and practice. *National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development*. 2006. 80 p. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1000L86.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006%20Thru%202010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C06THRU10%5CTX%5C00000002%5CP1000L86.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=88> (дата

звернення: 26.12.2025).

28. Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities. The Mining Association of Canada, 2013. 52 p. URL: https://mining.ca/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/06/DevelopinganOMSManualforTailingsandWaterManagementFacilities2011_0.pdf (дата звернення: 26.12.2025).

29. Winkelmann-Oei G., Riedl O., Má dai F., Kovacs M.A. Tailings Management Facilities (TMF) Safety Methodology. German Environment Agency, 2023. 99 p. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/14_2023_texte_tailings_management_facilities_tmf_safety_methodology_0.pdf (дата звернення: 26.12.2025); URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/15_2023_texte_tailings_management_facilities_tmf_safety_methodology_rus_0.pdf (дата звернення: 26.12.2025).

30. Рудаков. Д.В. Безпека хвостосховищ: Конспект лекцій. Дніпро НТУ «ДП», 2024. 90 с.

31. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc= (дата звернення: 26.12.2025).

32. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля: Постанова від 30.03.1998 № 391. Дата початку дії 26. 09.2024 р. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=52205 (дата звернення: 26.12.2025).

33. Методика проведення натурних обстежень земляних гребель і захисних дамб водогосподарського призначення. Посібник до ВБН В.2.4-33-2.3-03-2000 «Регулювання русел річок. Норми проєктування». Київ, 2003. 36 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/2809/1/nd121%20zah.pdf> (дата звернення: 23.12.2025).

34. Червинський Я.Й., Шумінський В.Д., Титаренко В.А. Розробка ДБН В.2.4-Х:201Х «Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення». *Галузеве машинобудування, будівництво: збірник наукових праць*. Вип. 1(40). 2014. С. 239-247.

35. ДБН А.2.1-1:2014 Інженерні вишукування для будівництва. Проєкт, друга редакція [на заміну ДБН А.2.1-1-2008; дата прийняття 24.03.2014; статус недіючий]. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_a_2_1_1_2014/1-1-0-1167 (дата звернення: 25.12.2025).

36. ДБН А.2.1-1-2008 Вишукування, проєктування і територіальна діяльність. Інженерні вишукування для будівництва [на заміну СНиП 1.02.07-87; чинний від 01.07.2008]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-183> (дата звернення: 25.12.2025).

37. ДБН Б.2.2-12:2018 Планування і забудова територій [на заміну ДБН 360-92, ДБН Б.2.4-1-94, ДБН Б.2.4-3-95, ДБН Б.2.4-4-97, ДБН Б.1-2-95, СНиП II-89-80; дата початку дії 01.09.2018; статус не визначено]. URL:

https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/b_2_2_12/1-1-0-1802 (дата звернення: 25.12.2025).

38. Національні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2020 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2021. 542 с. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/natsionalni-dopovidi-pro-stand-navkolyshnogo-prirodnoho-seredovyshha-v-ukrayini/> (дата звернення: 25.12.2025).

39. Шевелев, О.І., Гринюк, В.І., Капука, В.А., Андрієвський, В.М. Історія розвитку та сучасний стан меліорації і водного господарства Дніпропетровщини. Дніпропетровськ, 2005. 166 с.

40. Стратегія зрошення та дренажу в Україні до 2030 року: проєкт (оголошення від 12.10.2018). Міністерство екології та природних ресурсів України: офіційний портал. URL: <https://menr.gov.ua/news/32835.html> (дата звернення: 25.12.2025).

41. Рудаков, Л. М., Гапіч, Г. В. Сучасний стан, динаміка змін та перспективи розвитку гідротехнічних меліорацій у Дніпропетровській області. *Меліорація і водне господарство*. 2019. №1. С. 54–60. <https://doi.org/10.31073/mivg201901-161> (дата звернення: 25.12.2025).

42. Сташук В.А. Наукові засади управління водогосподарсько-меліоративним комплексом України: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 06.01.02. Київ, 2009. 31 с.

43. Демиденко І. Розвиток зрошення – шлях до процвітання // Аграрний тиждень. Україна: Електронний журнал (новини від 27.04.2012). Офіційний сайт. URL: <http://a7d.com.ua/novini/6431-rozvitok-zroshennya-shlyah-do-procvattannya.html> (дата звернення: 05.01.2019).

44. Наукові засади відновлення та розвитку зрошення в Україні в сучасних умовах / М. І. Ромащенко та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2017. Том 1. Випуск № 106 (2). С. 3-14.

45. Волочнюк Є.Г., Сакара О.Ю. Оцінка технічного стану гідротехнічних споруд Інгулецької зрошувальної системи та методи його поліпшення.

Перспективные направления развития водного хозяйства, строительства и землеустройства: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (м. Херсон, 19-20 травня 2016 р.). Херсонський державний аграрний університет. Херсон: ПП «ЛТ–Оффис», 2016. С. 204–206. URL: http://www.eecca-water.net/file/kherson_conference_2016.pdf (дата звернення: 25.12.2025).

46. Юзюк О.Ю. Характеристика технічного стану протифільтраційних облицювань каналів Нижньо-Дністровської зрошувальної системи та шляхи його удосконалення. *Меліорація і водне господарство*. 2016. Випуск № 102. С. 102–106.

47. Петроченко В.І. Основні напрямки інноваційної діяльності з підвищення ефективності використання зрошувальних каналів. *Меліорація і водне господарство*. 2016. Випуск № 104. С. 113-118.

48. Регіональний офіс водних ресурсів Дніпропетровської області: офіційний сайт. URL: http://douvr.gov.ua/Info/Info_Mel.html (дата звернення 25.12.2025).

49. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2018. 98 с.

50. Стратегія зрошення дозволить щороку додатково отримувати продукції на 135 млрд грн. // Пропозиція: ел. журнал (новини від 21.12.2018 р.). URL: <https://propozitsiya.com/ua/strategiya-zroshennya-dozvolit-shchoroku-dodatkovu-otrimuvati-produkciyi-na-135-mlrd-grn-naan> (дата звернення: 25.12.2025).

51. Ромащенко М.І. Концептуальні засади відновлення зрошення у Південному регіоні України. *Меліорація і водне господарство*. 2013. Том 1. Випуск № 100. С. 7-17.

52. Рудаков Л.М. Небезпечні техногенні процеси в ґрунтових гідротехнічних спорудах. *Сучасний стан та перспективи розвитку меліорації земель*. Матер. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. до дня пам'яті доктора

географічних наук, професора Литовченка О.Ф. (30 листопада 2020 р.). Дніпро: ДДАЕУ, 2020. С.64–66.

53. Порядок обстеження та оцінки технічного стану бетонних та залізобетонних гідротехнічних споруд водогосподарського призначення // Офіційний сайт Державного агентства України з водних ресурсів. URL: http://www.scwm.gov.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=576. (дата звернення: 24.01.2019).

54. ДБН В.2.4-3:2010 Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. [на заміну СНиП 2.06.01-86; чинний з 01.01.2011]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 39 с. URL: https://dnaop.com/html/29894/doc-ДБН_В.2.4-3_2010 (дата звернення: 25.12.2025).

55. Рудаков Л.М., Орлінська О.В., Пікареня Д.С. Роль водогосподарської інфраструктури у забезпеченні водної та екологічної безпеки в умовах військового стану *Україна 2025: виклики та перспективи сталого розвитку*. Матер. І Міжнар. конф. (23 жовтня 2025 р.). Київ, 2025. С.59–61. URL: <https://e-u.edu.ua/ua/articles/zaproshujemo-do-uchasti-u-i-mizhnarodnij-naukovo-praktichnij-konferentsiji-ukrajina-2025-vikliki-ta-perspektivi-stalogo-rozvitku-kon> (дата звернення: 25.12.2025).

56. Пікареня Д.С., Орлінська О.В., Рудаков Л.М., Гапіч 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> (дата звернення: 25.12.2025).

57. Кліматичні біженці з Азії та Африки прагнуть переселитися в Україну, — науковиця // Електронний портал TEXTY.ORG.UA. URL: <https://texty.org.ua/fragments/111722/klimatychni-bizhenci-z-aziyi-ta-afryky-prahnutymut-pereselytysya-v-ukrayinu-naukovycya/> (дата звернення: 25.12.2025).

58. Wilson, L., New, S., Daron, J., Golding, N. (2021). Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office, 2021. 34 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp->

content/uploads/2023/07/2_Vplyv-zminy-klimatu-v-Ukrayini.pdf (дата звернення 25.12.2025). (Українською мовою).

59. Особливості зміни клімату в Україні: сценарії, наслідки для природи та агроєкосистем / С. Бойченко та ін. *Матеріали Національного авіаційного університету*. 2016. 4(69) С. 96–113.

60. Бойченко С., Кучма Т., Хлобистов І.В. (). Зміни площі водної поверхні водосховищ Кримського півострова та штучне збільшення кількості опадів як одне з можливих рішень проблеми нестачі води. *Sustainability*. 2022. 14, 9995. URL: <https://doi.org/10.3390/su14169995> (дата звернення 25.12.2025).

61. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, 2023. 3056 с. URL: <https://doi.org/10.1017/9781009325844> (дата звернення 25.12.2025).

62. Kordun O., Makhinko A. The Influence of Global Warming on the Change of Climatic Loads on the Territory of Ukraine. *Environmental Challenges in Civil Engineering III*. 2024. С. 83–93. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=4GUrEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA83&ots=IMC1uj9mIY&sig=lf2oh_H0ULf8K8v6kmj8gShVgFE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (дата звернення 25.12.2025).

63. Skrypnyk A., Zhemoysda O., Klymenko N., Galaieva L., Koval T. Econometric Analysis of the Impact of Climate Change on the Sustainability of Agricultural Production in Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. 22(3). С. 275–288. <https://doi.org/10.12911/22998993/132945>

64. Vyshnevskyi V., Shevchuk S. Thermal regime of the Dnipro Reservoirs. *J. Hydrol.Hydromech.*, 2021. 69, 3, С. 300–310. <https://doi.org/10.2478/johh-2021-0016>

65. Рудаков Л.М. Вплив змін клімату на гідрологічний режим водозбору та екологічну безпеку Дніпровського хвостосховища. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2025. №(49), С.48–52. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.49.38-52>

66. Vyshnevskyi V. I. Climate Change in Ukraine and its Consequences. *Journal*

of *Landscape Ecology*. 2025. Vol. 18. №. 4. С. 150–174.
<https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0032>

67. Чушкіна І.В. Комплексна оцінка зон фільтрації води із регулюючих басейнів и каналів зрошувальних систем. Дис...канд. техн. наук: 06.01.02. Київ, 2020 р. 254 с.

68. Пікареня Д.С., Орлінська О.В., Рудаков Д.В. Комплексне візуальне обстеження як обов'язковий інструмент безпечної експлуатації хвостосховищ. *MININGMETALTECH 2023 – Гірничо-металургійний сектор: інтеграція бізнесу, технологій та освіти*. Зб. Матер. Міжнар. наук. конф. (29–30 листопада 2023 р.). Том 2. Рига: «Baltija Publishing», 2023. С. 211–214. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-148>

69. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [на заміну ДБН В.1.2-14:2009; чинний від 01.01.2019] Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 33 с. URL: http://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_1_2_14/1-1-0-1826 (дата звернення: 12.12.2025).

70. Ani Chinedu, Arewa Ogah. Electrical Resistivity Imaging of Suspected Seepage Channels in an Earthen Dam in Zaria, North-Western Nigeria. *Open Journal of Applied Sciences*. 2013, 3. С 145–154.

71. Chih-Ping Lin, Yin-Chun Hung, Zen-Hung Yu, and Po-Lin Wu. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography. *Journal of GeoEngineering*. August, 2013. Vol. 8. №. 2. С. 61–70.

72. Aal G., Ismail A., Anderson N., Atekwana E. Geophysical investigation of seepage from an earth fill dam, Washington county, MO. URL: https://www.researchgate.net/publication/242269748_GEOPHYSICAL_INVESTIGATION_OF_SEEPAGE_FROM_AN_EARTH_FILL_DAM_WASHINGTON_COUNTY_MO (дата звернення 25.12.2025).

73. Suryo, E. A. Stability Analysis Of Earth Dam Slopes Subjected To Earthquake Using ERT Results Interpretation. *Rekayasa Sipil*. 2018. 11(2). С. 159–

165. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil/2017.011.02.10>

74. Ganesh Mainali. Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods. Lulea University of Technology, Sweden, 2006. 74 p. URL: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:999052/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення 25.12.2025).

75. IMPACT-ADD, Deliverable D6.2.1 Review of geophysical monitoring methods, Partner No. 10. 26 p. URL: http://www.impact-project.net/cd4/cd/AnnexII_DetailedTechnicalReports/AnnexII_PartE1_WP6/IMPACT-D6.1_Report.pdf (дата звернення 29.06.2019).

76. Johansson. S. Seepage Monitoring in Embankment Dams. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1997. 62 p. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/55d1/289344d48a5004cedf278b817bceabc15cbd.pdf> (дата звернення 22.12.2025).

77. Sjödahl Pontus, Johansson Sam. Experiences from internal erosion detection and seepage monitoring based on temperature measurements on Swedish embankment dams. ICSE6. Paris. August 27-31, 2012. p. 1361-1368. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/37043118/experiences-from-internal-erosion-detection-and-seepage-1> (дата звернення 22.12.2025).

78. Пікареня Д. С., Орлінська О. В. Досвід застосування методу природного імпульсного електро-магнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) для рішення інженерно-геологічних і геологічних задач. Дніпропетровськ: Вид-во «СВІДЛЕР», 2009. 120 с.

79. Спосіб встановлення зон підвищеної фільтрації ґрунтових дамб (гребель): пат. 90731 Україна: МПК (2014.01) G01V 3/00. № u201314976; заявл. 20.12.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11. – 5 с.

80. Спосіб встановлення ділянок підвищеної фільтрації води з регулюючих басейнів зрошувальних мереж: пат. 101875 Україна: МПК (2015.01) E02V 13/00. № u 201501587; заявл. 24.02.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19. – 4 с.

81. Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers / H. Napich et. al. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 2(10 (116)). С. 18–29.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167>

82. Environmental safety of the territory of uranium mining and milling legacy in Ukraine / Т. V. Dudar et al. *Екологія/Ecology– 2019*: 3б. наук. праць VII-й Всеукр. з'їзду екологів з міжнар. участю. (25–27 вересня, 2019 р.). Вінниця: ВНТУ, 2019. С. 51.

83. Спосіб встановлення шляхів фільтраційної міграції радіонуклідів крізь порушені ділянки конструкції ґрунтових дамб обвалування хвостосховищ: пат. кор. мод. 156782 Україна: МПК (2024.01) G01V 3/00. № u 202302610(22); заявл. 29.05.2023(24), опубл. 07.08.2024, Бюл.№ 32. – 5 с.

84. Можливості застосування електророзвідки для оцінки міцностних та фільтраційних властивостей тіла дамби / Д. С. Пікареня та ін. *AQUA UKRAINE* 3б. матер. IX Междунар. водного форуму. (Київ, 8-11 листопада 2011 р.). С. 52.

85. Оцінка міцностних властивостей ґрунтових дамб методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі / О. В. Орлінська та ін. *Зб. наук. праць НГУ*. 2012. №37. С. 17–23.

86. Можливості застосування електророзвідки для оцінки міцностних та фільтраційних властивостей тіла дамби / О. В. Орлінська та ін. *Бібл. Всеукр. екол. Ліги. Сер. «Стан навколишнього середовища»*. 2013. №11. К.: ТОВ Вид-во «Аспект-Поліграф», 2013. С. 15-18.

87. A. D. Chinedu, A. J. Ogah. Electrical Resistivity Imaging of Suspected Seepage Channels in an Earthen Dam in Zaria, North-Western Nigeria. *Open Journal of Applied Sciences*. 2013. 3. С. 145–154. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2013.31020>

88. Chih-Ping Lin, Yin-Chun Hung, Zen-Hung Yu, Po-Lin Wu. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography. *Journal of GeoEngineering*. 2013. Vol. 8, No. 2. С. 61–70. URL: <https://scholar.nycu.edu.tw/en/publications/investigation-of-abnormal-seepages-in-an-earth-dam-using-resistiv/> (дата звернення 22.12.2025).

89. Aal G., Ismail A., Anderson N., Atekwana E. Geophysical investigation of seepage from an earth fill dam, Washington county, MO. URL:

https://www.researchgate.net/publication/242269748_GEOPHYSICAL_INVESTIGATION_OF_SEEPAGE_FROM_AN_EARTH_FILL_DAM_WASHINGTON_COUNTY_MO (дата звернення 25.12.2025).

90. Ganesh Mainali. Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2006. – 74 p.

91. Литвиненко П.Є., Коваленко О.В. Електрометричні методи визначення місць фільтраційних втрат на гідротехнічних спорудах меліоративних систем. *Меліорація і водне господарство*. 2009. Вип. 97. С. 209–220.

92. Горб О., Нестеренко С., Афанасьєв О., Байструк О. Напрями застосування штучного інтелекту при геодезичному моніторингу будівель та споруд. *Комунальне господарство міст*. 2023. Том 3, випуск 177. С. 109–114. DOI <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-109-114>

93. Бондар К. М., Бобровський Т. А., Цюпа І. В. Вивчення ефективності георадарних досліджень на території національного заповідника «Софія Київська» для вирішення археологічних завдань. *Геоінформатика*. 2016. № 4 (60). С. 75–80.

94. Станкевич С. А., Свіденюк М. О., Дудар Т. В. Застосування багаточасової радарної інтерферометрії для виявлення зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні. *Екологічна безпека*. № 2/2019 (28). С. 18–23. URL: [https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2019_2\(28\)/PDF/18_23.pdf](https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2019_2(28)/PDF/18_23.pdf) (дата звернення 25.12.2025).

95. Pieraccini M., Miccinesi L. Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review. *Remote Sens.* 2019. 11(9), 1029. <https://doi.org/10.3390/rs11091029>

96. Толстой М. І., Гожик А. П., Рева М. В., Степанюк В. П., Сухорада А. В. Основи геофізики (методи розвідувальної геофізики): Підручник. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2006. 446 с.

97. Вижва С.А.. Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. К.: ВГЛ «Обрії», 2004. 236 с.

98. Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Гапіч Г. В., Максимова Н. М. Дослідження технічного стану дамб на малих річках геофізичним методом. *Цілі збалансованого розвитку для України*. Матер. Міжнар. конф. (Київ, 18-19 червня 2013 р.). К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2013. С. 63–67.

99. Виявлення зон підвищеної фільтрації та обводнення тіла земляних дамб малих водосховищ / Д. С. Пікареня та ін. *Екологічні аспекти регіонального партнерства в надзвичайних ситуаціях*. Зб. матер. 1 міжвуз. наук.-метод. конф. (Харків, 21 листопада 2012). Харків: Вид-во Нац. ун-ту цивільн. захисту України, 2012. С. 84-85.

100. Chushkina I., Pikarenia D., Orlinska O., Maksymova N. Experimental substantiation of the NPEMFE geophysical method to solve engineering and geological problems. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Geology. Geography. Ecology»*. 2020. Volume 51. С. 109–123. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-08>

101. Економічна ефективність застосування геофізичних методів під час діагностики технічного стану регулюючого басейну / І. В. Чушкіна та ін. *Збірник наукових праць НГУ*. 2021. № 66. С. 267–281. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.267>

102. Оцінка ризику аварії та розрахунок процесу руйнування ґрунтової греблі хвостосховища / Г. В. Гапіч та ін. *Комунальне господарство міст*, 2020. 3(156). С. 99–104. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-99-104>

103. Оцінка технічного стану та екологічної безпеки експлуатації магістрального каналу Кільченської зрошувальної системи / О. В. Орлінська та ін. *Збірник наукових праць НГУ*, 2020. №60, С. 186–195. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.186>

104. Рудаков Л. М. Оцінювання рівня екологічної безпеки хвостосховища радіоактивних відходів із застосуванням контрольних списків. *Екологічні науки*, 2023. №2 (47). С.107–111. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.17>

105. Оцінка стійкості огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське» /

Д. С. Пікареня та ін. Кривий Ріг: ТОВ "БАЙТПРОДЖЕКТ", 2022. 154 с.

106. Rudakov, D., Pikarenia, D., Orlinska, O., Rudakov, L., Napich, H. A predictive assessment of the uranium ore tailings impact on surface water contamination: Case study of the city of Kamianske, Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2023. 268-269, 107246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107246>

107. Писаренко В.Н., Пікареня Д.С., Орлинская О.В. Возможности метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли для решения горных и геологических задач. *Горный журнал Казахстана*. 2010. №3. С. 8-10.

108. Визначення геофізичними методами зон фільтрації та розрахунок обсягів втрат води з регулюючих басейнів РБ 1 Василівської зрошувальної системи за с. Оріхове, РБ 1 Петровської зрошувальної системи 32 км траси Дніпропетровськ-Запоріжжя, РБ 2 Петровської зрошувальної системи біля с. Любимівка, РБ 1 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Перше Травня, РБ 2 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Малозахарине та магістрального каналу МК 4 Солоняно-Томаківської зрошувальної системи біля с. Григорівка Солонянського району Дніпропетровської області: *Заключний звіт за договором № 509* / Відп. Викон. О. В. Орлінська. Дніпропетровськ: ДДАЕУ, 2014. 70 с.

109. Фурман В.В., Віхоть Ю.М., Павлюк О.М. Основи геофізики (фізика Землі. Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2016. 104 с.

110. Pande, G.N., Beer, G., & Williams, J.R. Numerical Methods in Rock Mechanics. John Wiley and Sons, 1990. 327 с.

111. Duncan, J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *J. Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*. 2000. С. 307–316.

112. Карпіловський В.С. Метод скінченних елементів і задачі теорії пружності. Київ: «Софія А», 2022. 275 с.

113. Tymoshchuk, V., Rudakov, L., Pikarenia, D., Orlinska, D., Napich, H. Analyzing stability of protective structures as the elements of geotechnical tailing

pond safety. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. №17(4) С. 116-122.
<https://doi.org/10.33271/mining17.04.116>

114. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. *Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport*, Second Edition. Academic Press, 2015. 564 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091638-5.00018-3>.

115. McWhorter D.B., Sunada, D.K. *Ground-water hydrology and hydraulics*. Colorado: Water Resources Publications, LLC, 2010. 290 p.

116. Bear J., Cheng A.H.D. *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Series “Theory and Applications of Transport in Porous Media”. Springer Nature. 2009. Vol. 23. 854 p.

117. Рудаков Д.В. Моделювання в гідрогеології. Навчальний посібник. Д.: Державний ВНЗ «НГУ». 2011. 88 с.

118. Рудаков Д.В. Математичні методи в охороні підземних вод. Д.: ДВНЗ «НГУ», 2012. 158 с.

119. Langevin, Ch.D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, S., & Provost, A.M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Chapter 55 of Section A, Groundwater Book 6, Modelling Techniques. U.S.G.S. <https://doi.org/10.3133/tm6A55>

120. Diersch H.-J.G. *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014. 996 p.

121. Ніколаєва І., Ленько Г., Лободзінський О. Хвостосховища Донбасу. Київ, 2019. 52 с. URL: <https://www.osce.org/sites/default/files/f/documents/b/b/456847.pdf> (дата звернення 15.12.2025).

122. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області у 2023 році. Дніпро: Дніпропетровська ОДА, 2024. 328 с.

123. Пікареня Д. С., Орлінська О. В. Техногенна небезпека зберігання радіоактивних відходів. *Поводження з відходами в Україні: законодавство,*

економіка, технології. Зб. матер. Нац. форуму (м. Київ, 23–24 листопада 2021 р.). К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2021. С. 35-38.

124. Орлінська О.В., Пікарень Д.С. Науково-технічний звіт про результати обстеження технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» за даними геофізичної зйомки методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі. Дніпро 2016, 11с.

125. Рудаков Л.М. Дніпровське хвостосховище: історія, сучасна небезпека, методи контролю і заходи для захисту довкілля. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. №78. С. 174-185. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.174>

126. Рудаков Д.В., Тимошук В.І Оцінка гідрогеомеханічної стійкості низового укосу огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське»: науково-технічний звіт. Дніпро, 2017, 49 с.

127. Пікарень Д.С., Орлінська О.В., Сорока Ю.М., Молчанов А.І., Гапіч Г.В. Дослідження сховищ відходів переробки радіоактивних руд методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі у м. Дніпродзержинську. *Зб. наук. праць НГУ*. 2014. №. 43. С. 129–136.

128. Інформаційний ЗВІТ на закупівлю наукових досліджень та розробок за планом першочергових заходів на період 2009 р. з поліпшення екологічного стану м. Дніпродзержинськ: «Прогнозна оцінка виносу радіонуклідів із хвостосховищ водними шляхами з метою обрання технології приведення хвостосховищ в екологічно безпечний стан». Договір 1/09 з ДП «Бар'єр» від 09.06.2009 р. Етап 2: «Узагальнення даних попередніх гідрогеологічних досліджень і моніторингу хвостосховищ “Західне”, “Центральний Яр”, “Південно-східне”, “Дніпровське” , “База С”, “Сухачівське” 1 та 2 секції, схематизація гідрогеологічних умов і міграційних процесів; чисельна реалізація і калібрування фільтраційних та міграційних моделей, розробка сценаріїв водокористування і адаптація дозиметричних моделей» / Скальський О.С. та ін. Київ: Гео-Еко-Консатинг, 2009. 97 с.

129. Заключний звіт: «Передпроектні роботи для розробки ТЕО обґрунтування оптимальних варіантів здійснення заходів на хвостосховищі

«Дніпровське». Жовті Води: ДП «УкрНДПІпромтехнології», 2012, 38 с.

130. Програма першочергових робіт з ліквідації відкритих радіоактивних виходів на поверхні хвостосховищ ДП «ПХЗ» для запобігання міграції РАВ у річку Коноплянка (Хвостосховище «Д»). Жовті Води: ДП «УкрНДПІпромтехнології», 2000. 12 с.

131. Невідкладні роботи на захисних спорудах сховищ радіоактивних відходів переробки уранових руд Державного підприємства «Придніпровський хімічний завод». Хвостосховище «Дніпровське». Технічні рішення щодо створення мережі спостережних свердловин. Жовті Води: ДП «УкрНДПІпромтехнології», 2000. 21 с.

132. Робочий проєкт «Невідкладні роботи з укріплення дамби на хвостосховищі радіоактивних відходів «Дніпровське» Придніпровського хімічного заводу в м. Дніпродзержинську». Том 1 – Технологічні рішення. Жовті Води: ДП «УкрНДПІпромтехнології», 2001. 44 с.

133. Інструментальний контроль стану захисних споруд хвостосховища «Дніпровське»: звіт / А. І. Кисіль та ін. Кам'янське: ТОВ «УТБ-2», 2016. 37 с.

134. 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. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-10>

135. Рудаков Л.М. Екологічна та експлуатаційна безпека хвостосховищ: аналіз аварій, причин та методів діагностики технічного стану. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. 46, №2, С.66-84. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.66-84>

136. Визначення фільтраційних властивостей ґрунтової дамби хвостосховища / Д. С. Пікареня та ін. *Меліорація та водовикористання – сталий розвиток водогосподарського комплексу країни*: Матер. наук.-практ. конф. (Мелітополь, 17 березня 2017 р.). Мелітополь. 2017. С. 22-24.

137. Орлінська О.В. Обґрунтування заходів щодо поліпшення технічного

стану огорожуючої греблі хвостосховища «Дніпровське», (м. Кам'янське) : кваліф. магістерська робота : спец. 183 «Технології захисту навколишнього середовища». – Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, 2023. – 63 с.

138. 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>

139. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT). [на заміну : ДСТУ 3921.1-1999, ДСТУ 3921.2-2000; чинний від 01.01.2007]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52981 (дата звернення 15.12.2025).

140. ДБН В.2.3-19:2025 Залізничі колії 1520 мм. Норми проектування. *БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України*. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=117342 (дата звернення: 17.04.2026).

141. ДБН В.1.1-12-2014 Будівництво у сейсмічних районах України + Зміна №1. [На заміну ДБН В.1.1-12:2006; чинний з 01.07.2015 р.]. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083> (дата звернення 15.12.2025).

142. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Рудаков Д.В., Рудаков Л.М. Роль тектонічного фактору у підвищенні екологічної безпеки хвостосховищ. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. №4. С. 40–49. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-5> (дата звернення 25.12.2025).

143. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Рудаков Л.М. Оцінка тектонічного ризику порушення стійкості гідротехнічних споруд хвостосховища «Дніпровське» на основі аналізу лінеаментних зон та геофізичних даних. *Impact of Artificial Intelligence and Other Technologies on Sustainable Development: Proc. of the 3rd Int. Sci. and Pract. Internet Conf.* (December 11-12, 2025). Dnipro: FOP

Marenichenko V.V., 2025. С. 225–229.

144. Юськів Ю.В. Екологічний стан хвостосховищ уранового виробництва Дніпродзержинського промислового вузла в зв'язку з впливом новітньої тектоніки : дис. ... канд. геол. наук : 21.06.01, Київ, 2014. 155 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0414U005791> (дата звернення 25.12.2025).

145. Верховцев В. Г., Лисиченко Г. В., Юськів Ю. В. Оцінка безпеки за неотектонічними критеріями району розташування хвостосховищ радіоактивних відходів Дніпродзержинського промислового вузла. *Зб. наук. праць Ін-ту геохімії навколишнього середовища*. 2009. № 17. С. 98–108. URL: <https://journals.igns.kyiv.ua/index.php/geotech/article/view/311/286> (дата звернення 15.12.2025).

146. Геологія і корисні копалини України. Масштаб 1:5000 000. Атлас / Гол. ред. Л.С. Галецький. Київ: Національна академія наук України, 2001. 35 с.

147. Орлінська О. В., Беседін С. Д. Проект заходів по поліпшенню технічного стану греблі Сухачівського хвостосховища радіоактивних відходів в м. Кам'янське Дніпропетровської області. *Зрошуване землеробство: сьогодення, проблеми, перспективи*: Матер. регіональної наук.-практ. інтернет-конф. (Дніпро, 2-3 листопада 2017 р.). Дніпро: ДДАЕУ, 2017. С. 113–114.

148. Пікареня Д.С., Орлінська О.В., Рудаков Д.В. Комплексне візуальне обстеження як обов'язковий інструмент безпечної експлуатації хвостосховищ. *MININGMETALTECH 2023 – Гірничо-металургійний сектор: інтеграція бізнесу, технологій та освіти*: зб. матер. Міжнар. наук. конф. (29–30 листопада 2023 р.). Том 2. Рига, Латвія: «Baltija Publishing», 2023. С. 211–214. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-148>

149. Орлінська О.В., Пікареня Д.С. Звіт про результати обстеження технічного стану верхньої дамби хвостосховища «Сухачівське» (1 секція) за даними геофізичної зйомки методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі. Дніпропетровськ, 2016. 21с.

150. Рудаков Л. М., Чушкіна І. В., Орлінська О. В., Пікареня Д. С. Геологічні та тектонічні фактори впливу на технічний стан гідротехнічних

споруд цивільного призначення. Зб. наук. праць НГУ. 2025. № 82 С. 129–138. DOI <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.129>

151. Пікареня Д. С. Орлінська О. В., Зберовський А. В., Лазніков А. М. Дослідження з оцінки міцності та фільтраційних властивостей гідротехнічної споруди в балці «Скажена» Вольногорського ГМК. Зб. наук. праць НГУ. 2012. №37. С. 310–315. URL: <https://znp.nmu.org.ua/pdf/2012/37.pdf> (дата звернення 15.12.2025).

152. Рудаков Л. М., Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Гапич Г. В. Діагностика технічного стану ґрунтової дамби хвостосховища Вільногірського ГМК геофізичними методами та заходи з підвищення рівня екологічно безпечної експлуатації. Зб. наук. праць НГУ. 2025. №80. С. 324–335. DOI <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.324>

153. Хвостосховище в б. Скажена. Нарощування основної дамби до відмітки 133,00 м. Реконструкція: робочий проєкт. Київ: Державний НДПВІ «УкрНДІводоканалпроєкт», 2004 .

154. ДБН В.2.4-5:2012. Хвостосховища і шламонакопичувачі. Частина І. Проєктування. Частина ІІ. Будівництво К.: Мінрегіонбуд України, 2012. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3083672408050107465?doc_type=2 (дата звернення 15.12.2025).

155. Геологічне довивчення площ масштабу 1:200 000 аркушу М-36-XXXV (Дніпродзержинськ): проєкт / М.М. Шурко та ін. Дніпропетровськ, Казенне підприємство «Південукргеологія», 2009. 238 с.

156. UBA (2017). Water Hazard Classes (Wassergefährungsklassen), German Environment Agency. URL: <https://webriigoletto.uba.de/rigoletto/public/welcome.do> (дата звернення 15.12.2025).

157. Solomos G., Pinto A., Dimova S. A Review of the Seismic Hazard Zonation in National Building Codes in the Context of EUROCODE 8. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008. 82 с. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d501c141-7e3a-446e-9175-f65055257fc7> (дата звернення 15.12.2025).

158. GFZ (2011). Global Seismic Hazard Map Data. German Research Centre for Geosciences. URL: http://gmo.gfz-potsdam.de/pub/download_data/download_data_frame.html. (дата звернення 15.12.2025).

159. ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування Київ, Мінрегіонбуд України, 2009. [не чинний]. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v21_10_2009/1-1-0-319 (дата звернення 15.12.2025).

160. Coduto D. P., Man-chu R. Y., Kitch W. A. Geotechnical Engineering: Principles and Practices. 2nd Ed. Prentice-Hall, 1998. 16 с.

161. Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Fredlund, M. D. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Inc. 2012. 944 с.

162. The Hydraulic Transport and Storage of Extractive Waste. Guidelines to European Practice. / Ed. M. Cambridge. Springer, Cham, Switzerland, 2018. 356 с.

163. Рудаков Л.М., Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Оцінка індексів небезпеки та ризику хвостосховищ Дніпропетровської області. *Development of Education, Science and Business: Results 2025*: Proc. of the Int. Sci. and Pract. Internet Conf. (December 18-19, 2025). Dnipro: FOP Marenichenko V.V. С. 432–434.

164. Водна безпека – запорука сталого розвитку України / М. І. Ромащенко та ін. *Вісник аграрної науки*, 2018. №11 (788). С. 177–185.

165. ДБН В.2.4-1-99. Меліоративні системи та споруди. [Чинний з 01.01.2000 р.]. Держбуд України. Київ. 2000. URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Flegalaid.wiki%2Fimages%2F4%2F42%2F%25D0%2594%25D0%2591%25D0%259D_%25D0%2592.2.4-1-99.doc&wdOrigin=BROWSELINK (дата звернення 15.12.2025).

166. Рудаков Л. М., Орлінська О. В., Гапіч Г. В. Оцінка стану гідротехнічних споруд меліоративних систем Дніпропетровської області. *Природа і вода: Матер. Наук.-практ. Конф. присвяч. до Всесвітнього дня води*, (Дніпро, 22 березня 2018 р.). Дніпро: ДДАЕУ, 2018. С. 49–50.

167. Гапіч Г. В. Підвищення експлуатаційної безпеки ґрунтових гідротехнічних споруд водогосподарсько-меліоративного призначення. Дис ... канд. техн. наук: 06.01.02. Київ, 2017. 214 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0417U002537> (дата звернення 15.12.2025).

168. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Гапіч ГВ, Рудаков Л.М. Визначення технічного стану магістрального каналу №1 (МК-1) Кільченьської зрошувальної системи на ділянці між головними насосними станціями №1, №2 та №3 і №4 (ГНС-1, ГНС-2, ГНС-3, ГНС-4) комплексом геофізичних методів та розрахунку фільтраційних втрат води: заключний звіт за договором №48-19. Жовті Води: ТОВ ЦРЕМ, 2019. 53с.

169. Рубан С.А., Шинкаревський М. А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України. К.: УкрДГРІ, 2005. 572 с.

170. Меліорація і водне господарство Української РСР / Укладачі: С. Т. Тищенко-Василевський, Т. О. Дейнега. Київ: Реклама, 1976. 89 с.

171. Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000. Пояснювальна записка. Аркуш М-36-XXIX (Кобеляки) / С. І. Переверзєв, Є. Г. Арчакова – К: Мін-во екології та природних ресурсів України, Державна служба геології та надр України, Казенне підприємство „Південукргеологія”, 2011 р. 200 с.

172. Орлінська О. В., Максимова Н. М., Льовкіна А.С. Оцінка ризику розвитку підтоплення с. Степове. *Відновлення біотичного потенціалу агроєкосистем*: Матер. IV Міжнар. конф. (8-9 жовтня 2020 р., м. Дніпро). – Дніпро: Середняк Т.К., 2020. С. 54–56.

173. Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Гапіч Г. В. Визначення зон фільтрації води з регулюючих басейнів зрошувальних мереж для запобігання підтоплення території. *Вісник Кременчуцького національного університету*. 2013. № 6. С. 125–129.

174. Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Гапіч Г. В., Соломончук Д. А. Застосування комплексу геофізичних методів для зниження екологічного впливу штучних водних об'єктів на довкілля (на прикладі регулюючих водних

басейнів) *Зб. наук. праць Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту (технічні науки)*. 2013. Вип. 3 (23). Дніпрозержинськ: ДДТУ, 2013. С. 143 – 148.

175. Основи гідрогеології та інженерної геології: навч. посібник / М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – 258 с

176. Орлінська О. В., Чушкіна І. В., Стрепетова Х. В. Вплив фільтраційних втрат води з регулюючих басейнів на прилеглі території. *Молодий вчений*. 2019. № 6 (70). С. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-6-70-5>

177. Максимова Н. М. Чушкіна І. В., Орлінська О. В. Оцінювання екологічного ризику підтоплення територій, прилеглих до гідротехнічних споруд водогосподарської інфраструктури у сільській місцевості. *Екологічні науки*. 2021. № 5(38). С. 60-66 с. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.5-38.11>

178. Про затвердження Методичних рекомендацій з районування ризиків підтоплення міст і селищ. (2010) Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 23.12.2010 № 468. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0468738-10#Text> (дата звернення 15.12.2025).

179. Рудаков Л.М. Оцінка гідрологічного режиму ґрунтів на полях під посівами сільськогосподарських культур в Степу і Лісостепу України. *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія*: Матер. 5-ої Всеукр. Наук. конф. (Чернівці. 22-24 вересня 2011 р.). С.48-50

180. Рудаков Л.М. Проблема зникнення малих річок на прикладі межиріччя Коноплянки і Дніпра. *Прискорення змін для подолання водної кризи в Україні*: Зб. тез XI Міжнар. наук.-прак. онлайн-конф., присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів. Київ, 2023. С. 141–142.

181. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Рудаков Л.М. Визначення геофізичними методами зон фільтрації та розрахунок обсягів втрат води з магістрального каналу МК-1 Вищитарасівської зрошувальної системи: заключний звіт за договором №565. Дніпро, ДДАЕУ, 2017. 64 с.

182. Рудаков Л.М. Оцінка втрат води з магістрального каналу Вищетарасівської зрошувальної системи. *Вода для всіх: Матер. Міжнар. наук.-практ. Конф., присвяченої Всесвітньому дню води* (м. Київ, 21 березня 2019). С. 274–275.

183. Орлінська О. В., Пікареня Д. С., Рудаков Л. М., Гапіч Г. В. Дослідження шляхів фільтрації води з гідротехнічних споруд зрошувальних мереж. *Грунтові води: Матер. Регіон. Наук.-практ. Конф. До Всесвітнього дня води.* (03 червня 2022 р.). Дніпро: ДДАЕУ, 2022. С. 51–52. URI: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/9274> (дата звернення 15.12.2025).

184. Приходько А. П., Рудаков Л. М. К вопросу о состоянии бетонных и железобетонных покрытий мелиоративных каналов юга Украины. *Настоящи изследвания и развитие – 2014: Матер. за X междунар. науч. Практ. Конф. (17-25 януари, 2014).* Т.29. София Болгария. С. 76–79.

185. Переверзев С.І., Шпильчак В.Я. Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000: Пояснювальна записка. Аркуш М-36-XXXVI (Синельникове). Київ: Міністерство екології та природних ресурсів України, Державна служба геології та надр України, Казенне підприємство «Південукргеологія», 2010. 187 с.

186. Рудаков Л.Н., Чушкіна І.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С. Геологічні та тектонічні фактори впливу на технічний стан гідротехнічних споруд цивільного призначення. *Зб. наук. праць НГУ.* 2025. № 82, С. 129–138. DOI <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.129>

187. Тяпкін К.Ф., Тяпкін О.К., Якимчук М.А. Основи геофізики. Київ: Карбон, 2000. 248 с.

188. Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Чушкіна І.В., Рудаков Л.М. Визначення геофізичними методами зон фільтрації та розрахунок обсягів втрат води з регулюючих басейнів РБ-3а, РБ-3 та РБ-6 Царичанської зрошувальної системи Дніпропетровської області: заключний звіт за договором №541. Дніпро: ДДАЕУ, 2016. 61 с.

189. Орлінська О.В., Чушкіна І.В. Визначення технічного стану

регулюючих басейнів в Синельниківському, Солонянському та Царичанському районах Дніпропетровської області. *Меліорація та водокористування*: матер. наук.-практ. конф. (м. Мелітополь, 30 вересня 2016 р.). Мелітополь: ТДАТУ, 2016. С. 25–27.

190. Орлінська О.В., Чушкіна І.В., Пікареня Д.С. Моніторинг технічного стану регулюючого басейну Калинівської зрошувальної системи геофізичними методами. *Природа для води*: матер. Міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої дню водних ресурсів. (Київ, 22 березня 2018 р.). Київ: ІВПіМ, 2018. С. 204–205.

191. Орлінська О.В., Рудаков Л.М., Чушкіна І.В., Гапіч Г.В. Визначення втрат води з регулюючого басейну РБ-6 Царичанської зрошувальної системи за поливний період. *Управління водними ресурсами в умовах змін клімату*: ма-тер. Міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів. (Київ, 21 березня 2017 р.). Київ: ІВПіМ, 2017. С. 104–105.

192. Переверзев С.І., Арчакова Є.Г. Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000. Пояснювальна записка. Аркуш М-36-XXIX (Кобеляки). Київ: Міністерство екології та природних ресурсів України, Державна служба геології та надр України, Казенне підприємство «Південукргеологія», 2011. 200 с.

193. Safety of the Tailings Management Facilities in the Danube River Basin. Technical Report. German Environment Agency. 2020. 113 p. URI: https://www.icpdr.org/sites/default/files/2023-09/Technical%20Report_Danube%20TMF%20Project.pdf (дата звернення 15.12.2025).

194. Raising Knowledge among Students and Teachers on Tailings Safety and its Legislative Review in Ukraine. 2017. German Environment Agency. 62 p. URI: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_texte_34-2018_tailings_safety_ukraine.pdf (дата звернення 15.12.2025).

195. Assistance in safety improvement of Tailings Management Facilities in Armenia and Georgia. German Environment Agency. 2020. 74 p. URI: <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/sustainability-strategies->

international/cooperation-eecca-centraleastern-european-states/project-database-advisory-assistance-programme/assistance-in-safety-improvement-of-tailings (дата звернення 15.12.2025).

196. Land monitoring service. Water bodies. URL: https://land.copernicus.eu/en/products/water-bodies?tab=river_and_lake_water_level (дата звернення 15.12.2025).

197. Прогнозна оцінка виносу радіонуклідів із хвостосховищ водними шляхами з метою обрання технології приведення хвостосховищ в екологічно-безпечний стан. Звіт про НТП за договором 1/09 з ДП «Бар'єр» / О. С. Скальський та ін.. Київ: ПП «Гео-Еко-Консалтинг», 2009. 221 с.

198. Звіт про аналіз безпеки провадження діяльності з переробки уранових руд у частині ліквідації, консервації чи перепрофілювання уранових об'єктів на державному підприємстві «Бар'єр». Дніпродзержинськ: ДП «Бар'єр». 2016. 52 с.

199. Розробка макету паспортів хвостосховищ і об'єктів колишнього уранового виробництва. Розробка технічних завдань на інвентаризацію, здійснення польових робіт і розробка паспортів хвостосховищ: звіт. Книга 1. Том 9. Паспорт місця видалення відходів (МВВ). Хвостосховище «Дніпровське». / М. В. Кушинов та ін. Дніпропетровськ: ТОВ НВП «Екосфера», 2009 р. 98 с

200. Технічні випробування та аналіз на території уранового виробництва колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Аналітичні вимірювання проб матеріалу всіх хвостосховищ за показниками спектру пріоритетних альфа- і гама-випромінюючих радіонуклідів U-Th рядів засобами низькофонові напівпровідникової альфа- і гама-спектрометрії. УкрНДГМІ. 2009 р.

201. Паспорт уранових об'єктів на проммайданчиках колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Реєстраційний №: 4, дата реєстрації : 04.11.2011 р. Хвостосховище «Дніпровське». 66 с.

202. Екологічні особливості формування гідробіоценозів в умовах промислового та радіаційно-хімічного впливу на водойми Придніпров'я: звіт про науково-дослідну роботу №3-206-09. Дніпропетровськ: ДНУ, НДІ біології ДНУ, 2010. 172 с.

203. Гудим Н. Г. Накопичення штучних та природних радіонуклідів у гідробіонтах р. Коноплянка (м. Кам'янське, Дніпропетровська область). *Рибогосподарська наука України*. 2024. 4(70). 217–237. DOI <https://doi.org/10.61976/fsu2024.04.217>
204. ДНАОП 0.03-3.24-97 Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Київ: МОЗ України, 1998. 134 с.
205. Шепель Н.М. Закономірності деформування геотехнічної системи «споруда – лесовий масив» в зоні дії динамічних навантажень: автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.15.09. – Дніпропетровськ, 2016. 23 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/4896420a-2ed4-4348-bfed-55e435d4b27a/content> (дата звернення 15.12.2025).
206. Гідрогеологічний моніторинг і математичне моделювання радіоактивного забруднення підземних вод у Чорнобильській зоні відчуження і на уранових об'єктах колишнього Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське) / Д. О. Бугай та ін. *Геологічний журнал*. 2018. 4(365), С. 47–57. DOI <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.4.148466>
207. Рудаков Д.В. Моделювання масоперенесення радіонуклідів у потоках підземних вод. Д.: Герда, 2010. 160 с.
208. Rudakov, D.V., Rudakov, V.C. Analytical modeling of aquifer pollution caused by solid waste depositories. *Ground Water*. 1999. 37(3), С. 352–357. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb01111.x>.
209. Carbol, P., Engkvist, I. Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment. Svensk Kärnbränslehantering AB, 1997, 77 с. URL: <https://www.skb.com/publication/13614/R-97-13.pdf> (дата звернення 15.12.2025).
210. Ibrahim, M. Z., Laili, Z., Omar, M., & Phillip, E., 2010. Sorption distribution coefficients of uranium, thorium and radium of selected Malaysian peat soils. *International Nuclear Information System (INIS)*. 10 p. URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21557274> (дата звернення 15.12.2025).
211. Dalvi, A. A., Kumar, S. D., Reddy, A. V. R., A site-specific study on the measurement of sorption coefficients for radionuclides. *Int. J of Environ Science and*

Technology. 2013. 11(3). C. 617–622. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0254-8>

212. Seidou, C. D., Wang, T. J., Espoire, M. M. R. B., Dai, Y.B., & Zuo, Y. T. A Review of the Distribution Coefficient (K_d) of Some Selected Heavy Metals over the Last Decade (2012-2021). *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2022. 10, C. 199–242. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.108014>

213. Bauer, P., Attinger, S. & Kinzelbach, W. Transport of a decay chain in homogenous porous media: Analytical solutions. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2001. 49(3-4). C. 217–39. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(00\)00195-9](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(00)00195-9)

214. Cetnar, J. General solution of Bateman equations for nuclear transmutations. *Annals of Nuclear Energy*. 2006. 33(7). C. 640–645. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.02.004>

215. Lindstrom F.T., Boersma L. Analytical solutions for convective-dispersive transport in confined aquifers with different initial and boundary conditions. *Water Resour. Res.* 1989. V.25. №2. C. 241–256.

216. Yates S.R. An analytical solution for one-dimensional transport in heterogeneous porous media. *Water Resour. Res.* 1990. V.26. №10. C. 2331–2338.

217. Vogt C. International Assessment of Marine and Riverine Disposal of Mine Tailings. *A Report Prepared for LC/LP, IMO and UNEP GPA*. 2012. 134 c.

218. Cadden A., Newman P., Fordham M. New Developments in Surface Paste Disposal of Mine Wastes. *Proceedings of Disposal Minerals Industry*, London. 2003

219. Bascetin A., Tuylu S., Adiguzel D., Akkaya U. G. The Study of Surface Paste Disposal Technology for Pb-Zn Mine Tailings. *Leadership in Uncertain Times: SME Annual Meeting and Exhibit*, (Feb. 23-26, 2014, Salt Lake City, UT-USA). Preprint 14-020.

220. Bowker L. M., Chamber D. M., The Risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures. Report. 2015. 56 c. URL: https://www.researchgate.net/publication/283321865_The_Risk_Public_Liability_Economics_of_Tailings_Facility_Failures (дата звернення 25.12.2025).

221. Bascetin A., Ozdemir O., Tuylu S., Adiguzel D., Akkaya U. G. Storage of

Mining Processing Tailings at Surface Using Paste Technology. *MT Scientific Journal of Underground Resources*. 2015. C.33-49.

222. Bascetin A., Tuylu S., Adıguzel D., Ozdemir O. New Technologies on Mine Process Tailing Disposal. *Journal of Geological Resource and Engineering*. 2016. 2. C. 63–72. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/fca7/50bdf14dcf5dc90951e4ce8ec3a181f8f50d.pdf> (дата звернення 25.12.2025).

223. Spagnoli G., Clement F., Dilnesa B.Z., Cao F.H., Feng P. A new waterproofing membrane for tailings ponds. *Paste 2019: Proc. of the 22nd Int. Conf. on Paste, Thickened and Filtered Tailings*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2019. C. 153–164. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1910_08_Spagnoli

224. Бобова М. Современные хвостохранилища Казахстана: всухую или концы в воду? *Добывающая промышленность: Центральная Азия*. 2023. №1. С. 64–70. URL: <https://dprom.kz/wp-content/uploads/2023/03/DP-KZ-1-2023.pdf> (дата звернення 25.12.2025).

225. De Bona Becker L., Salgueiro de Aguiar A. L., Alvarenga Lacerda W. Variability of the undrained strength of the plastic tailings from the Germano dam in Mariana, Brazil. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024. Vol. 10, no. 1. 17 с. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00750-4> (дата звернення 25.12.2025).

226. Static Liquefaction Susceptibility of a Brazilian Iron Ore Tailings Dam: A Combined Laboratory Testing and Numerical Modeling Approach / R. S. Coutinho et al. *International Journal of Geomechanics*. 2025. Vol. 25, no. 8. <https://doi.org/10.1061/ijgnai.gmeng-11018>

227. Iron ore tailings stabilization with alternative alkali-activated cement for dry stacking: mechanical and microstructural insights / H. Portela Farenzena et al. *Canadian Geotechnical Journal*. 2024. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0125>

228. Seismic hazard analysis of tailings ponds in Honghe Prefecture based on information quantity model and analytic hierarchy process / S. Li et al. *Frontiers in Earth Science*. 2025. Vol. 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1698729>

229. The Role of Fabric, Stress History, Mineralogy, and Particle Morphology on the Triaxial Behavior of Nontextbook Geomaterials / J. V. d. A. Carvalho et al. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2024. Vol. 150, no. 8. <https://doi.org/10.1061/jggefk.gteng-12319>

230. Aleksandrov V. I., Sharkovskiy D. O., Ponomarev S. V. Technical and economic indicators of a slurry tailings hydrotransport system when replacing steel slurry lines with polyurethane-coated slurry lines. *Obogashchenie Rud*. 2021. P. 20–25. <https://doi.org/10.17580/or.2021.01.04>

231. Clareti Pereira A. Tailings liquefaction and dam stability: advances in diagnosis, monitoring, standards and mitigation – a critical review. *Revista multidisciplinar do nordeste mineiro*. 2025. Vol. 21, no. 02. P. 1–55. <https://doi.org/10.61164/erfqjg05>

232. Brien, K.O., Brien, T.O., Robinson. B. Use of the NorSand constitutive model as a tool for assessing the static and dynamic stability of tailings impoundments containing compressive material. Proc. of the 88th Annual Meeting of the Int. Commission on Large Dams – ICOLD. New Delhi, 2021. 10 c. URL: https://arq.co.za/wp-content/uploads/2021/11/K-O_Brien_Using_the_NorSand_Constitutive_Model_as_a_Tool_in_Assessing_the_Static_and_Dynamic_Stability_of_Tailings_Slopes_Containing_Contractive_Material.pdf (дата звернення 25.12.2025).

233. Study on Risk Assessment and Risk Prevention of Dam Failure During the Operation Period of Tailings Pond / T. Gao et al. *Buildings*. 2025. Vol. 15, no. 16. P. 2833. <https://doi.org/10.3390/buildings15162833>

234. Static Liquefaction Susceptibility of a Brazilian Iron Ore Tailings Dam: A Combined Laboratory Testing and Numerical Modeling Approach / R. S. Coutinho et al. *International Journal of Geomechanics*. 2025. Vol. 25, no. 8. <https://doi.org/10.1061/ijgnai.gmeng-11018>

235. Integrated Field and Laboratory Framework for Upstream Tailings Dam Closure / T. M. Gonçalves et al. *Indian Geotechnical Journal*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s40098-025-01441-x>

236. Spatial and Temporal Analysis of Surface Displacements for Tailings Storage Facility Stability Assessment / W. Koperska et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 22. P. 10715. <https://doi.org/10.3390/app142210715>

237. Das S., Priyadarshana A., Grebby S. Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time-series data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02713-3>

238. Application of Sentinel-1 InSAR to monitor tailings dams and predict geotechnical instability: practical considerations based on case study insights / N. M. Rana et al. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2024. Vol. 83, no. 5. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03680-3>

239. Historic Tailing Dam Failures through the Application of InSAR Technologies - A Discussion of Grace Mine Based on Sentinel Data / S. Fu et al. *59th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, (Santa Fe, New Mexico, 8–11 June 2025). 2025. <https://doi.org/10.56952/arma-2025-0570>

249. Improvement of the Monitoring Methodology Using Space Images in the Tasks of Assessing Tailings Dam Subsidence / M. Raximova et al. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2025. X-5/W3-2025. P. 29–34. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-x-5-w3-2025-29-2025>

241. Sordo B., Rathje E., Kumar K. Hybrid Finite-Element and Material Point Method for Modeling Liquefaction-Induced Tailings Dam Failures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2025. Vol. 151, no. 8. <https://doi.org/10.1061/jggef.k.gteng-13377>

242. Bertolino, G., Guimarães, M., & Almeida, M. Numerical sensitivity analysis for stress–strain simulation of mine tailings using NorSand. *Soils and Rocks*. 2024. 47(3). 9 c. URL: <https://simples.serdigital.com.br/clientes/soils/arquivos/504.pdf> (дата звернення 25.12.2025).

243. Bokkisa, S. V., et al. (). Challenges in NorSand to model CSD stress paths and liquefaction in tailings. *Canadian Geotechnical Journal*. 2025.

<https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0546>

244. Almeida M. S. S., Bertolino G., Guimarães M., Figueiredo M. Toward sustainable tailings disposal: A geotechnical and governance perspective. *Soils and Rocks*. 2025. 48(1). URL: <https://simples.serdigital.com.br/clientes/soils/arquivos/618.pdf> (дата звернення 25.12.2025).

245. Deep Learning-Based Identification of Typical Hazards in Tailings Ponds Under Unmanned Aerial Vehicle Photography / X. Zhang et al. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01254-9>

246. Laks I., Achtenberg K. Use of Drone LIDAR Scanning for Volume Estimation of Stockpiles Accumulated in Post-Flotation Sedimentation Ponds – A Case Study of Bukowno (Southern Poland). *Inżynieria Mineralna*. 2025. Vol. 2, no. 2. URL: <https://doi.org/10.29227/im-2025-02-02-032>

247. Hadzalic E., Ibrahimbegovic A. Quantifying Durability and Failure Risk for Concrete Dam–Reservoir System by Using Digital Twin Technology. *Computation*. 2025. Vol. 13, no. 5. P. 118. <https://doi.org/10.3390/computation13050118>

248. Assessment of Geoelectrical and Seismic Methods for Tailing Dams – Catalão GO / G. Sá et al. *Revista de Geociências do Nordeste*. 2025. Vol. 11, no. 1. P. 696–707. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1id38814>

249. Stability analysis of valley-type upstream tailings dams using a 3D model / H. Yue et al. *Open Geosciences*. 2025. Vol. 17, no. 1. <https://doi.org/10.1515/geo-2025-0901>

250. Joint Inversion of Noise Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio and Multimode Dispersion Curves: Method and Verification / M. Rong et al. *Seismological Research Letters*. 2025. <https://doi.org/10.1785/0220240461>

251. RST-DeepLabv3+: Multi-Scale Attention for Tailings Pond Identification with DeepLab / X. Feng et al. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17, no. 3. P. 411. <https://doi.org/10.3390/rs17030411>

252. Deep Learning-Based Identification of Typical Hazards in Tailings Ponds

Under Unmanned Aerial Vehicle Photography / X. Zhang et al. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01254-9>

253. Contreras C. A., Yniesta S., Aubertin M. Improvement of Tailings Impoundment Seismic and Post-Seismic Stability Using Densification and Waste Rock Inclusions. *Canadian Geotechnical Journal*. 2023. <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0196>

254. Advanced monitoring of tailings dam performance using seismic noise and stress models / S. M. Ouellet et al. *Communications Earth & Environment*. 2022. Vol. 3, no. 1. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00629-w>

255. Monitoring of tailings dam stability using cross-spectral-density-based passive HVSR measurement / Ruijing Li et al. *Structural Health Monitoring*. 2026. <https://doi.org/10.1177/14759217251403153>

256. Ayoub A. AT., Song Y., Sagiroun M. IA. Radiological Hazard Assessment for human from Nuclear Power Plant effluent released under normal operation scenario (hypothetical case study). *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. 216, 111380. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111380>

257. Williams D. J. Lessons from tailings dam failures—where to go from here? *Minerals*. 2021. 11(8), 853. <https://doi.org/10.3390/min11080853>

258. World Information Service on Energy. Chronology of major tailings dam failure. URL: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (дата звернення 25.12.2025).

259. Climate change and landscape development in post-closure safety assessment of Solid Radioactive Waste Disposal: Results of an initiative of the IAEA / T. Lindborg et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018, 183, C. 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.006>

260. Williams, D. The influence of climate on seepage from mine waste storages during deposition and post-closure. *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*. 2008. https://doi.org/10.36487/acg_repo/852_42

261. Labonté-Raymond P.-L., Pabst T., Bussière B., & Bresson É. Impact of climate change on extreme rainfall events and surface water management at Mine

Waste Storage Facilities. *Journal of Hydrology*. 2020. 590, 125383.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125383>

262. Untangling the environmental and tectonic drivers of the Noto earthquake swarm in Japan / Q.-Y. Wang et al. *Science Advances*. 2024. Vol. 10, no. 19. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado1469>

263. Radiological conditions in the Dnieper River basin: Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2006. 200 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1230_web.pdf (дата звернення 25.12.2025).

264. Review of geomechanical problems of accumulation and reduction of mining industry wastes, and ways of their solution / M. Chetveryk et al. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. 12(4). С. 63–72. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.063>

265. Литовченко О.Ф. Інженерна гідрологія та регулювання потоку. К.: Вища школа, 1999. 360 с.

266. ДБН В.2.4-8:2014 Визначення розрахункових гідрологічних характеристик. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58776 (дата звернення: 17.04.2026).

267. Some problems of the new radiation-resistant rubber mechanics in vibrating machines at hard γ -radiation. / Vitalii Dyrda et al. 2022 *IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci.*, 970, 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012017>

268. Sawatsky L. F., Cooper D. L., McRoberts E., Ferguson H. Strategies for reclamation of tailings impoundments. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 1996. 10(3). С. 131–134. <https://doi.org/10.1080/09208119608964816>

269. Cacciuttolo C., Pastor A., Valderrama P., & Atencio E. Process Water Management and seepage control in tailings storage facilities: Engineered Environmental Solutions applied in Chile and Peru. *Water*. 2023. 15(1). 196. <https://doi.org/10.3390/w15010196>

270. Barrier State Enterprise. Enterprise objects. URL: <https://web.archive.org/web/20140527140539/http://baryer.dp.ua/index.php/activity-of-enterprise/objects-enterprise/> (дата звернення 25.12.2025).

271. Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ: пат. 156998 Україна: МПК 21C41/00; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35. 5 с.

272. Спосіб рекультивації хвостосховищ: пат. 156999 Україна: МПК E21C41/32 E21F15/00; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35. 4 с.

273. Спосіб рекультивації хвостосховищ: пат. 156936 Україна: МПК E21C41/32 E21F15/00; заявл. 27.02.2024; опубл. 28.08.2024, Бюл. № 35. 5 с.

274. Спосіб рекультивації відпрацьованих хвостосховищ уранопереробних виробництв: пат. 155030 Україна: МПК E21C41/32; заявл. 10.07.2023; опубл. 10.01.2024. Бюл. №2. 4 с.

275. Determination of critical state line (CSL) for silty-sandy iron ore tailings subjected to low-high confining pressures / N. C. Consoli et al. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.014>

276. Дудля М.А., Садовенко І.О. Техніка та технологія буріння гідрогеологічних свердловин: Підручник / За ред. акад. НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2007. 399 с.

277. В'яжуче: пат. 107674 Україна: МПК C04B 28/08. № u 2015 09453; заявл. 01.10.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. 5 с.

278. Покатилов А.В., Простов С.М. Контроль процесів електрохімічного закріплення волагонасичених глинистих ґрунтів електрофізичним методом. *Вісник КузГТУ*. 2006. № 4. С. 15–19.

279. Простов С.М., Нікулін Н.Ю. Закономірності зміни фізичних властивостей ґрунтового масиву при експериментальному електрохімічному закріпленні. *Фізико-технічні проблеми розробки корисних копалин*. 2015. №5. С. 59–68.

280. Розчин для протифільтраційної завіси: пат. 102040 Україна: МПК E 02 B 3/16. № u 2015 04103; заявл. 28.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19. 5 с.

281. Бондаренко В.І., Півняк Г.Г., Зорін О.М. Закономірності омонолічування пухких водонасичених порід під впливом електричного струму. Диплом на відкриття № 1211. *Наукове відкриття*. 1996. С. 36–37.

282. Простов С.М., Дем'янов В.В., Покатілов А.В. Технічне забезпечення технології електрохімічного закріплення вологонасичених глинистих ґрунтів. *Вісник КДТУ*, 2006. № 3. С. 18–22.

283. Ольховик О. І., Білецький А. А. Технологія будівництва гідротехнічних, водогосподарських та природоохоронних споруд. Рівне : НУВГП, 2019. 377 с.

284. Pikarenia, D., Orlinska, O., Napich, H., Rudakov, L., Chushkina, I., & Mazurenko, R. Utilization of phosphogypsum from industrial dumps as an element of environmentally safe energy- and resource-conserving technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. 1348(1). 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012053>

285. Гапіч Г.В., Орлінська О.В., Пікареня Д.С., Рудаков Л.М. Шляхи рекультивації хвостосховища радіоактивних відходів у місті Кам'янське. *Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада - 2023*: матер. міжнар. конф. (м. Дніпро, 11-13 жовтня 2023 р.). Д.: НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. С. 57-59.

ДОДАТОК А

ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

ДОДАТОК А.1

Сума атмосферних опадів за рік і середньорічні значення температур повітря
(на метеостанціях Кам'янське, Губиниха і Комісарівка)

№ з/п	Рік	Опади, мм			Температура повітря, °С		
		Кам'янське	Губиниха	Комісарівка	Кам'янське	Губиниха	Комісарівка
1	1981	802			8,9		
2	1982	399			8,0		
3	1983	366			9,4		
4	1984	465			8,2		
5	1985	562			6,7		
6	1986	414			8,4		
7	1987	370			6,0		
8	1988	477			8,3		
9	1989	379			10,1		
10	1990	392			9,8		
11	1991	437			8,9		
12	1992	427			8,3		
13	1993	464			7,4		
14	1994	406			8,4		
15	1995	654			8,7		
16	1996	495			7,7		
17	1997	598			7,3		
18	1998	432			8,6		
19	1999	549			9,8		
20	2000	549			8,9		
21	2001	540			9,0		
22	2002	508			9,5		
23	2003	513			9,1		
24	2004	773			8,3		
25	2005	546	564	454	7,6	9,4	9,4
26	2006	517	504	380	8,4	8,6	8,7
27	2007	459	546	473	10,6	10,3	10,6
28	2008	545	482	593	9,5	9,5	9,5
29	2009	567	624	456	9,5	9,6	9,8
30	2010	651	662	658	9,7	10,2	10,1
31	2011	461	381	441	8,4	8,7	8,8
32	2012	556	529	481	9,8	10	10
33	2013	417	422	464	9,8	10,1	10,1
34	2014	483	460	486	9,4	9,7	9,7
35	2015	588	631	687	9,9	10,2	10,1
36	2016	683	764	737	9,3	9,5	9,7
37	2017	499	568	711	9,7	10,1	10
38	2018	586	779	1069	9,8	9,9	9,8
39	2019	508	433	507	10,5	10,7	10,5
40	2020	436	472	337	10,9	10,9	11,1
41	2021	622	559	679	9,4	9,5	9,5
42	2022	530			10,0		
	Середнє	514,9	551,7	565,5	8,9	9,8	9,8

Суми атмосферних опадів за літо і теплий період (травень-вересень) та їх відношення до річних значень (метеостанція Кам'янське)

№ з/п	Рік	Сума опадів, мм				
		за рік	літо (2006-2008)	%	травень-вересень	%
1	1981	802	173,0	21,6	238,6	29,7
2	1982	399	136,4	34,2	185,0	46,4
3	1983	366	162,3	44,3	192,1	52,5
4	1984	465	165,8	35,7	216,2	46,5
5	1985	562	237,9	42,3	315,1	56,1
6	1986	414	84,9	20,5	117,9	28,5
7	1987	370	128,0	34,6	185,3	50,1
8	1988	477	144,6	30,3	252,8	53,0
9	1989	379	75,3	19,9	83,8	22,1
10	1990	392	119,0	30,4	186,5	47,6
11	1991	437	173,0	39,6	254,9	58,3
12	1992	427	121,0	28,3	213,0	49,9
13	1993	464	129,3	27,9	237,5	51,2
14	1994	406	90,6	22,3	162,9	40,1
15	1995	654	175,8	26,9	293,1	44,8
16	1996	495	137,3	27,7	265,2	53,6
17	1997	598	231,1	38,6	304,6	50,9
18	1998	432	124,8	28,9	137,0	31,7
19	1999	549	126,5	23,0	132,6	24,1
20	2000	549	175,8	32,0	328,8	59,9
21	2001	540	137,2	25,4	243,0	45,0
22	2002	508	155,8	30,7	191,6	37,7
23	2003	513	194,5	37,9	221,5	43,2
24	2004	773	283,2	36,6	443,9	57,4
25	2005	546	190,9	35,0	217,2	39,8
26	2006	517	174,4	33,7	286,3	55,4
27	2007	459	98,1	21,4	213,1	46,4
28	2008	545	155,0	28,4	314,2	57,6
29	2009	567	101,0	17,8	208,7	36,8
30	2010	651	138,8	21,3	292,9	45,0
31	2011	461	195,2	42,3	254,6	55,2
32	2012	556	174,3	31,3	249,3	44,8
33	2013	417	128,3	30,8	203,6	48,8
34	2014	483	131,9	27,3	287,0	59,4
35	2015	588	163,0	27,7	229,1	39,0
36	2016	683	135,7	19,9	270,4	39,6
37	2017	499	98,0	19,6	160,3	32,1
38	2018	586	106,3	18,1	211,4	36,1
39	2019	508	142,5	28,0	243,3	47,9
40	2020	436	110,6	25,4	224,8	51,6
41	2021	622	243,0	39,1	316,4	50,9
42	2022	530	134,7	25,4	216,6	40,9
	Середнє	514,9		29,3		45,0

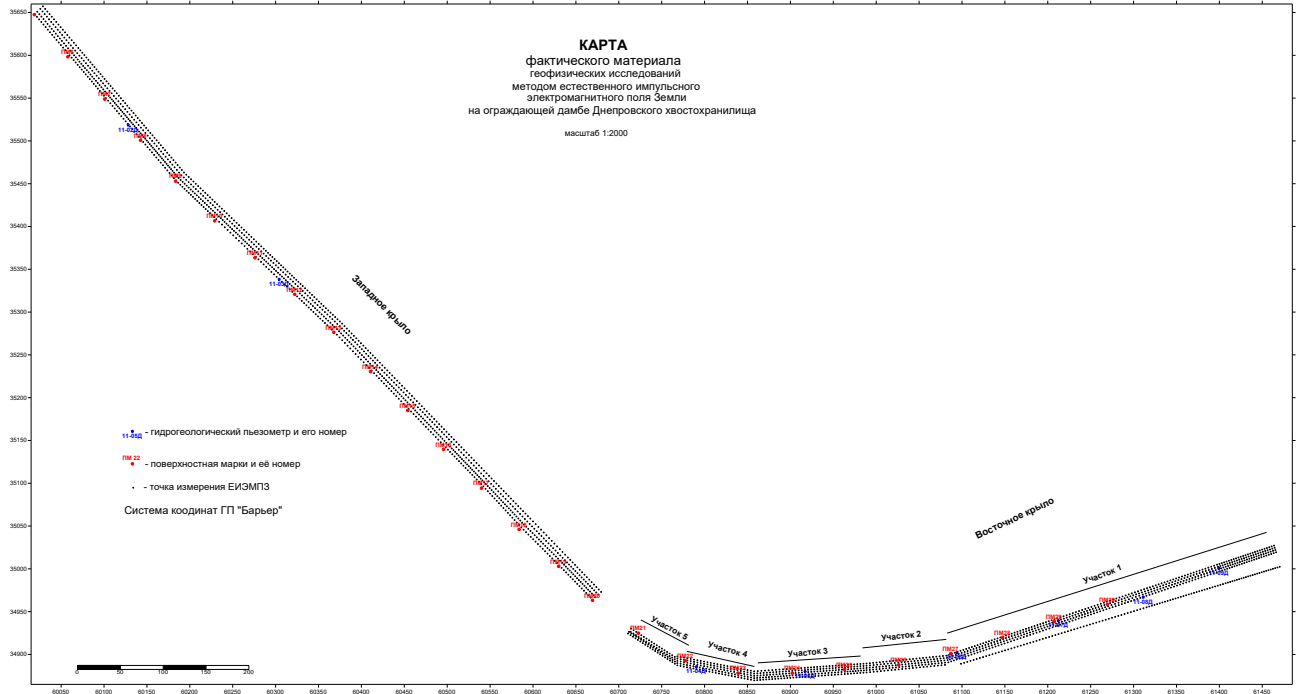
Суми добових значень атмосферних опадів, мм

Дата	Метеостанція					
	Губиниха	Комісарівка	Синельникове	Чаплине	Лошкарівка	Нікополь
<i>Зима</i>						
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
<i>Весна</i>						
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
<i>Літо</i>						
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
<i>Осінь</i>						
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

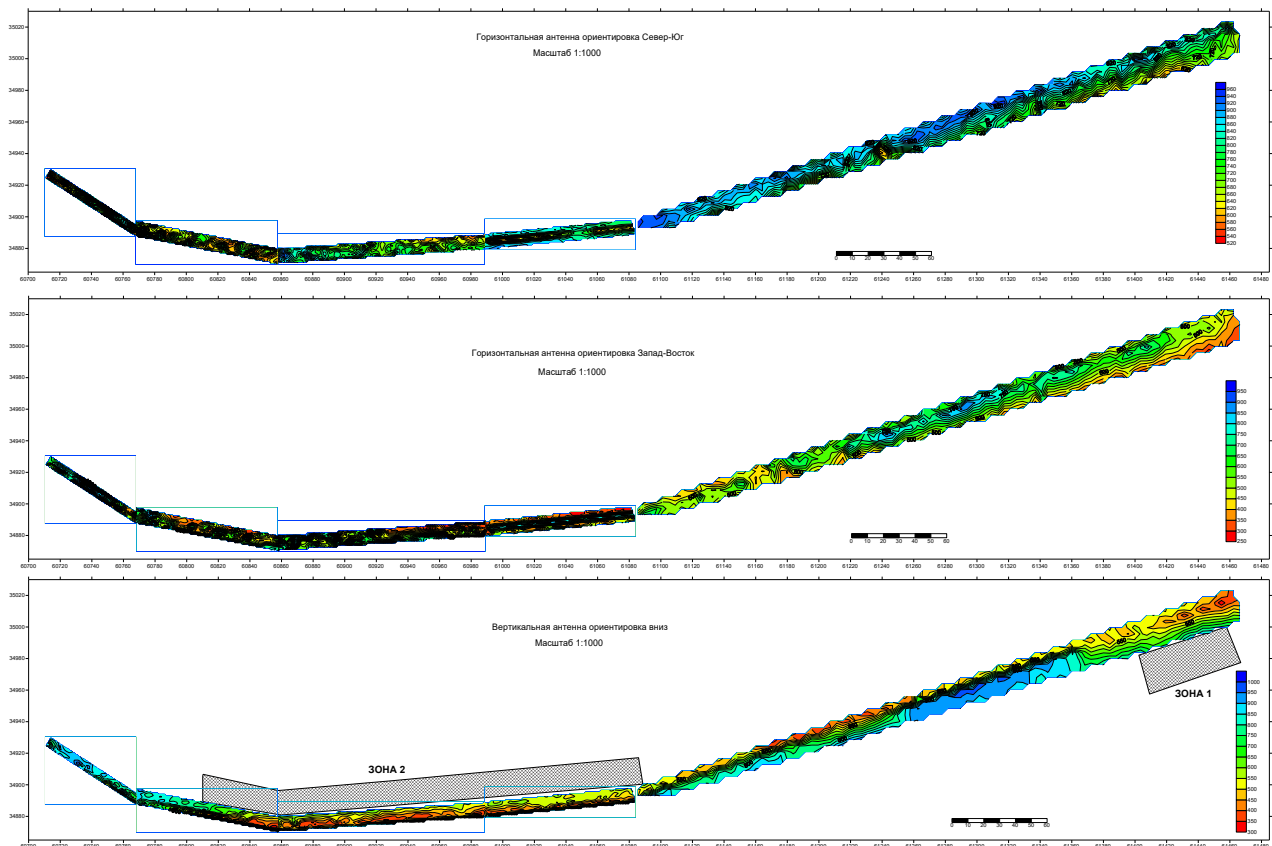
ДОДАТОК Б

РЕЗУЛЬТАТИ ПОЛЬОВИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ХВОСТОСХОВИЩАХ

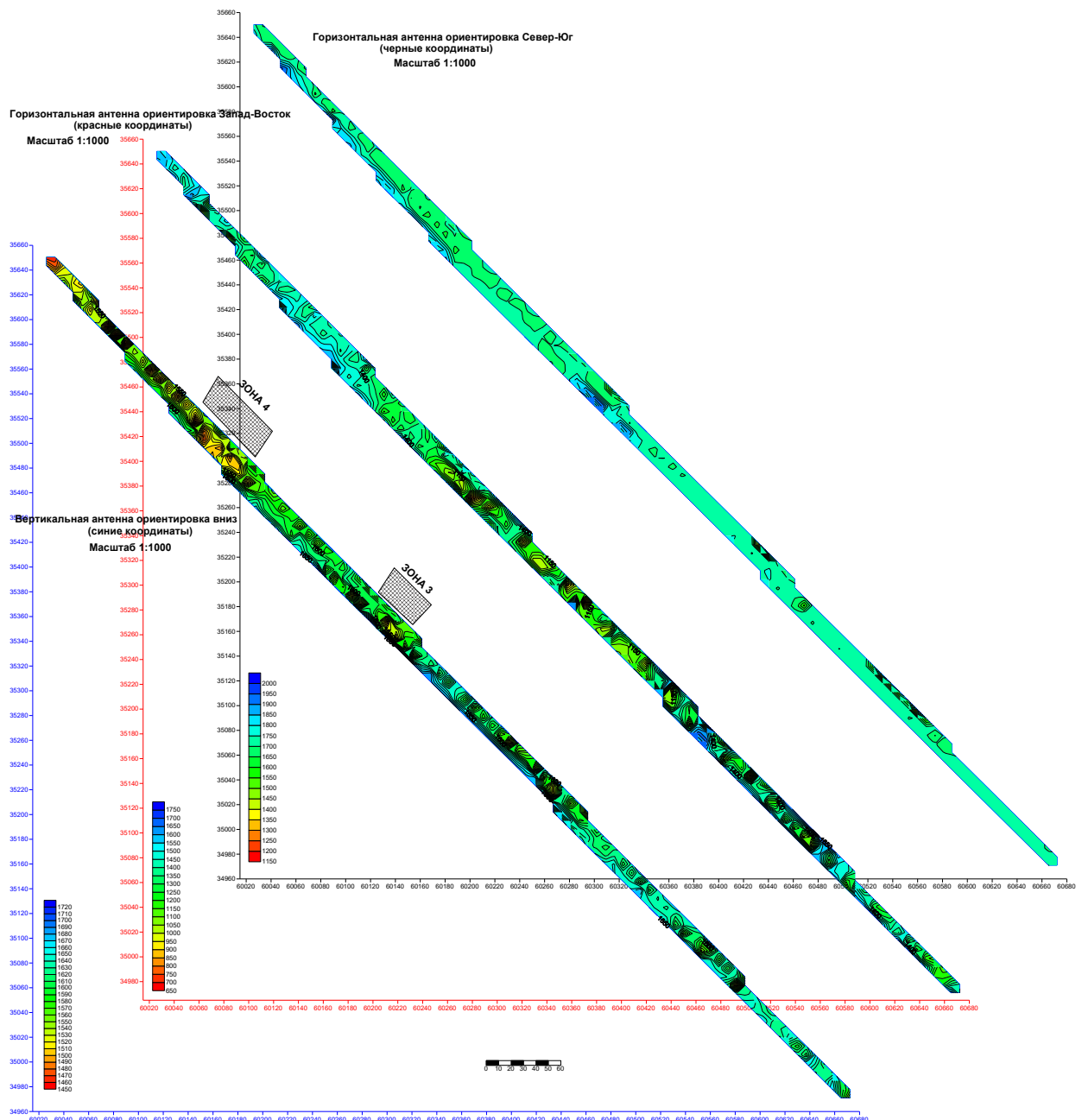
Карта фактичного матеріалу геофізичних досліджень методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі на дамбі хвостосховища «Дніпровське», 2016 рік



Карти щільності потоку імпульсів магнітної складової поля ПЕМПЗ в інтервалі частот 0-10 кГц для східного крила хвостосховища «Дніпровське» з зонами замочування (синя клітка). Колірна шкала – кількість імпульсів ПЕМПЗ за одиницю часу. Система координат ДП «Бар'єр», 2016 рік.



Карти щільності потоку імпульсів магнітної складової поля ПЕМПЗ в інтервалі частот 0-10 кГц для західного крила хвостосховища «Дніпровське» з зонами замочування (синя клітка). Колірна шкала - кількість імпульсів ПЕМПЗ за одиницю часу. Система координат ГП «Бар'єр», 2016 рік.



Карти щільності потоку імпульсів магнітної складової поля ПЕМПЗ в інтервалі частот 0-10 кГц для західного крила дамби хвостосховища «Дніпровське» з зонами замочування (синя клітка)

Цвєтова шкала - кількість імпульсів ПЕМПЗ за одиницю часу
Система координат ГП «Бар'єр»

Схема розташування точок гамма-зйомки на Південному крилі хвостосховища «Дніпровське», 2016 рік

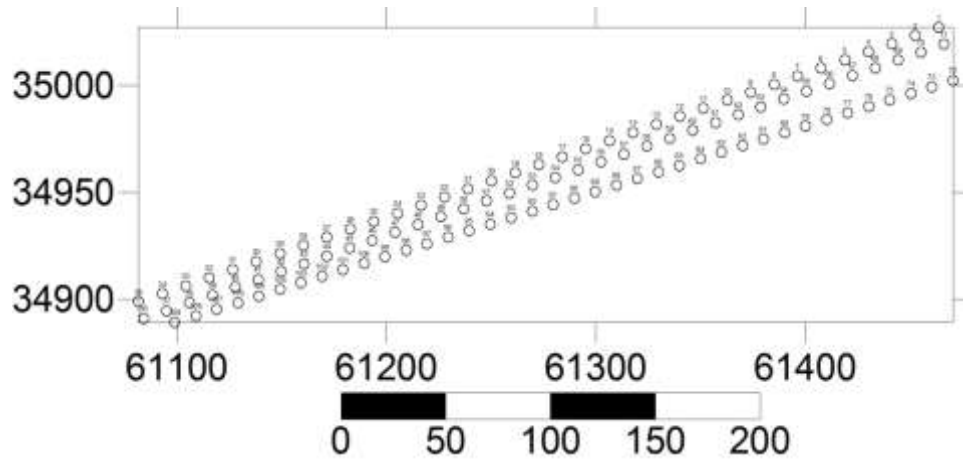
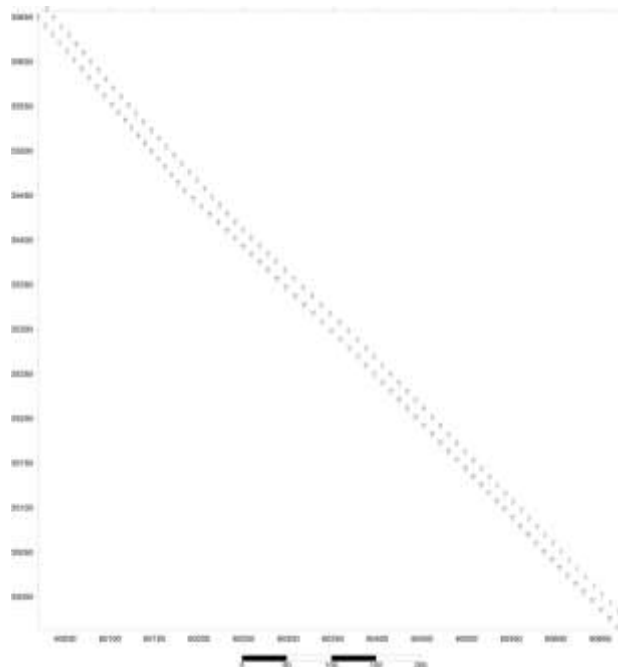


Схема розташування точок гамма-зйомки на Західному крилі хвостосховища «Дніпровське», 2016 рік



**Зведена таблиця фізико-механічних характеристик ґрунтового матеріалу
огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське», 2016 рік**

Глибина відбору, м	Природна вологість, W , %	Щільність ґрунту, γ , г/см ³	Щільність сухого ґрунту, γ_s , г/см ³	Щільність частинок ґрунту, $\gamma_{s, \text{ч.од.}}$	Шпаруватість, n , %	Коефіцієнт шпаруватості e , ч.од.	Ступінь вологості, S_r , ч.од.	Повна вологоємність, W_{sat} , ч.од.	Вологість на межі текучості, W_L , %	Вологість на межі розкатування, W_{cl} , %	Число пластичності, I_p , %	Показник консистенції, I_L , ч.од.	Модуль деформації, E , МПа при навантаженні, P , МПа				Опір зсуву, τ , МПа при нормальному напруженні, σ , МПа			Коефіцієнт тертя, ψ , ч.од.	Питоме зчеплення, C , кПа	Кут внутрішнього тертя, φ , град.	Примітка
													0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	0,10	0,20	0,30				
Свердловина № 5																							
3,0	12,8	1,80	1,60	2,67	40,07	0,669	0,511	0,251	22,3	17,1	5,2	< 0	-	-	-	-	0,0675	0,110	0,1575	0,450	21,7	24,0	
4,0	13,8	2,10	1,85	2,67	30,71	0,443	0,832	0,166	23,0	16,5	6,5	< 0	8,78	11,65	26,05	-	-	-	-	-	-	-	
6,0	12,1	1,96	1,75	2,67	34,46	0,526	0,614	0,197	22,1	17,0	5,1	< 0	6,95	12,28	13,74	-	-	-	-	-	-	-	
7,5	28,8	1,86	1,44	2,67	46,07	0,854	0,900	0,320	30,0	22,5	7,5	0,840	-	-	-	-	0,050	0,090	0,130	0,400	10,0	22,0	
Свердловина № 8																							
1,0	13,4	1,85	1,63	2,67	38,95	0,638	0,557	0,239	22,7	16,5	6,2	< 0	-	-	-	-	0,065	0,115	0,160	0,475	13,3	25,0	
3,0	13,4	1,64	1,45	2,67	45,69	0,841	0,425	0,315	23,4	16,4	7,0	< 0	-	-	-	-	0,060	0,105	0,150	0,450	15,0	24,0	
4,0	11,5	2,08	1,87	2,67	29,96	0,428	0,717	0,160	22,9	17,1	5,8	< 0	13,12	14,95	20,82	-	-	-	-	-	-	-	
5,0	17,1	2,01	1,72	2,67	35,58	0,552	0,827	0,207	23,2	16,8	6,4	0,047					0,0675	0,1150	0,1625	0,475	20,0	25,0	
6,0	19,4	1,96	1,64	2,67	38,58	0,628	0,825	0,235	23,5	16,4	7,1	0,423	2,57	2,99	7,10	-	-	-	-	-	-	-	
7,0	22,4	1,90	1,55	2,67	41,95	0,723	0,827	0,271	23,8	18,5	5,3	0,736	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9,3	15,2	1,71	1,48	2,34	36,75	0,581	0,612	0,248	32,6	22,3	10,3	< 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Свердловина № 11																							
1,5	14,6	1,82	1,59	2,67	40,45	0,679	0,574	0,254	23,0	16,8	6,2	< 0	-	-	-	-	0,0650	0,1050	0,1500	0,425	21,7	23	
3,5	15,3	2,06	1,79	2,67	32,96	0,492	0,830	0,184	23,6	17,4	6,2	< 0	3,00	3,95	5,50	-	-	-	-	-	-	-	
5,5	15,6	1,98	1,71	2,67	35,96	0,561	0,742	0,210	23,0	16,8	6,2	< 0	-	-	-	-	0,0700	0,1150	0,1600	0,450	15,6	24	
Свердловина № 15																							
5,0	16,9	1,93	1,66	2,67	37,83	0,608	0,725	0,228	24,6	17,6	7,0	< 0	-	-	-	-	0,0700	0,1175	0,1625	0,463	24,2	25	
6,0	17,7	2,08	1,77	2,67	33,71	0,508	0,930	0,190	27,2	19,6	7,6	< 0	7,88	9,98	15,57	-	-	-	-	-	-	-	
7,5	24,3	1,92	1,54	2,67	42,32	0,734	0,884	0,275	28,0	20,5	7,5	0,507	-	-	-	-	0,0550	0,1000	0,1400	0,425	13,3	23	
10,0	22,5	1,97	1,61	2,67	39,70	0,658	0,913	0,246	26,6	21,1	5,5	0,255	2,48	4,51	7,68	7,61	-	-	-	-	-	-	

Схема розташування ділянок проведення геофізичних робіт на дамбі хвостосховища «Дніпровське» у 2022 році

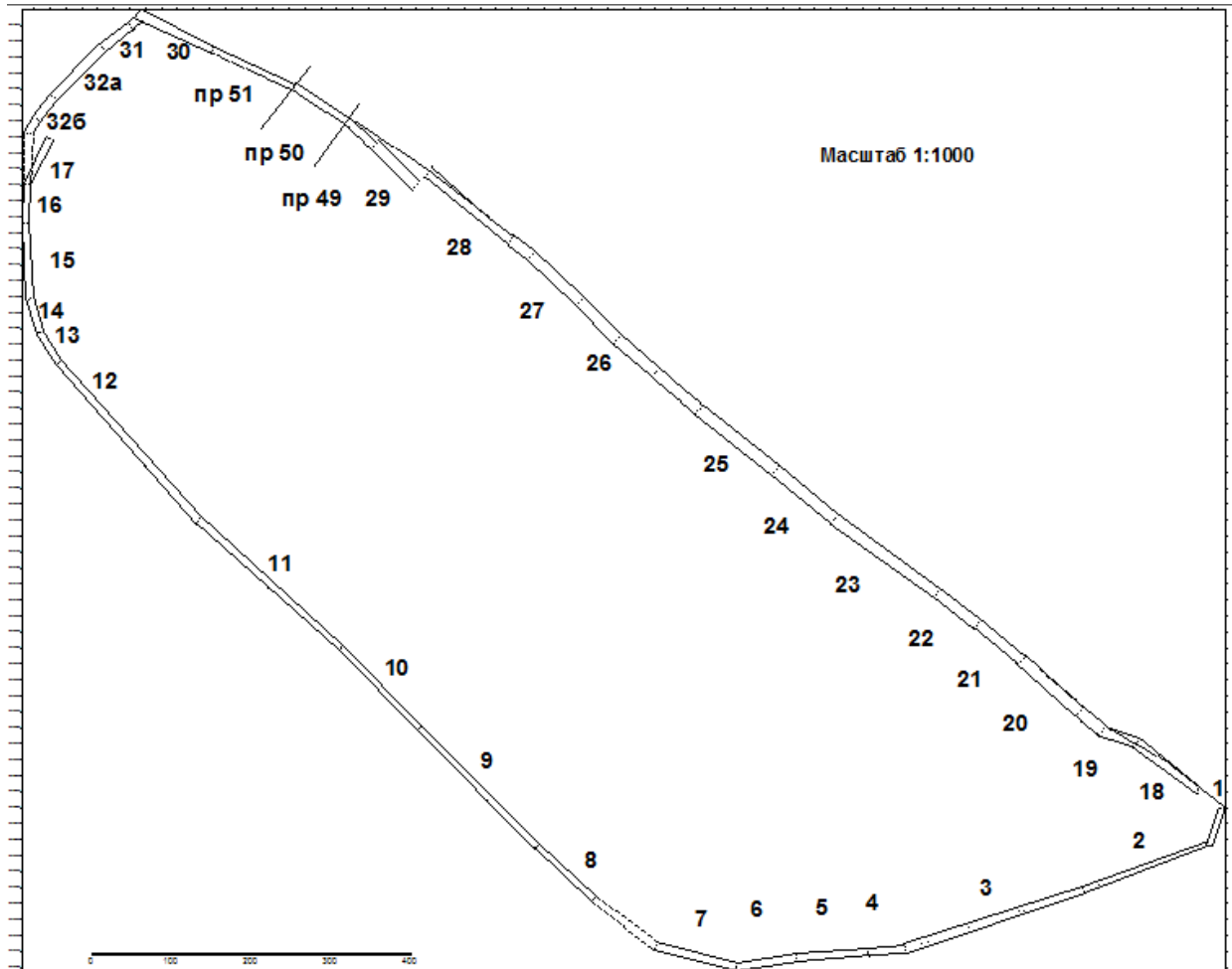


Схема розташування точок спостережень методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі та радіометричної зйомки на дамбі хвостосховища «Дніпровське» у 2022 році

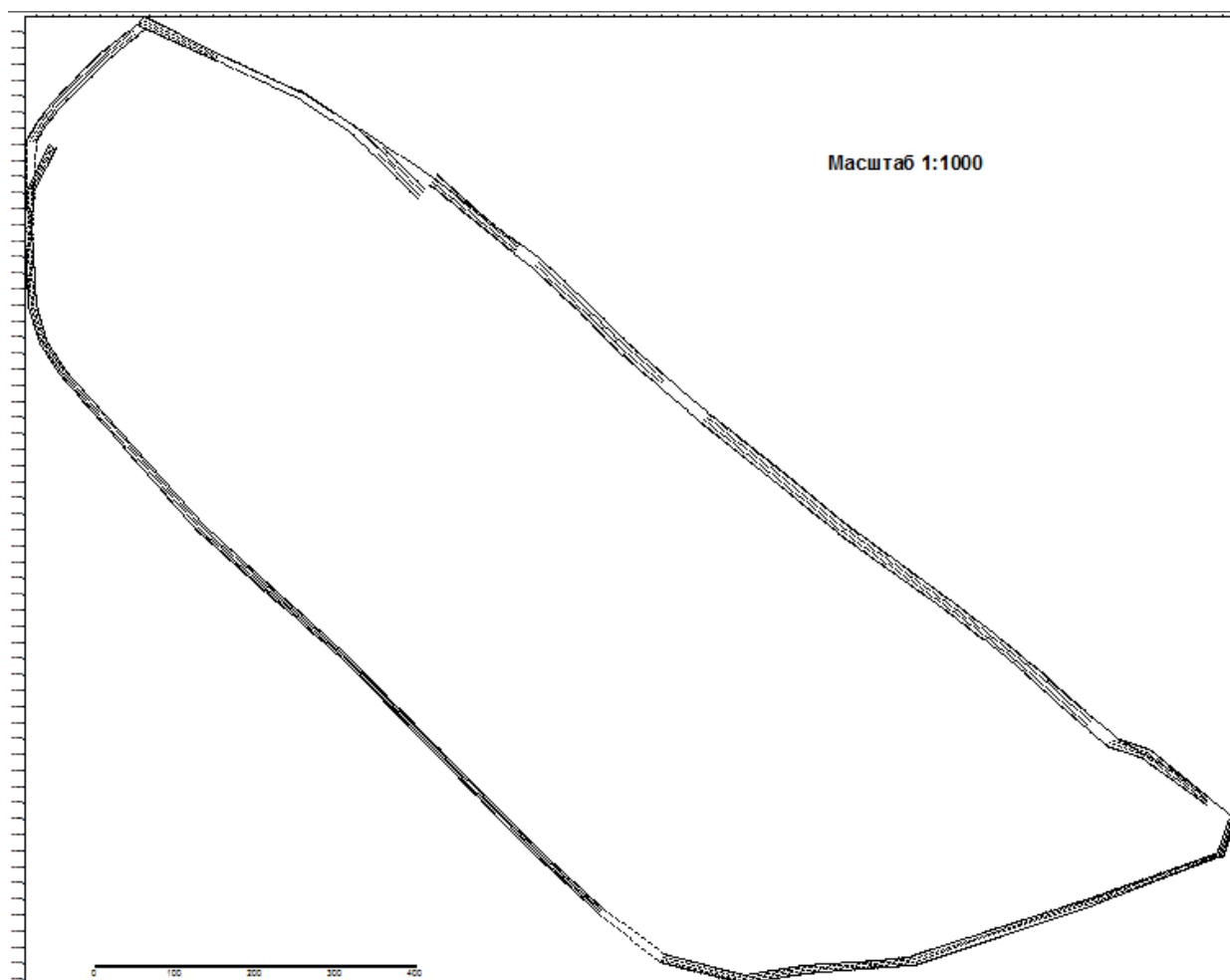
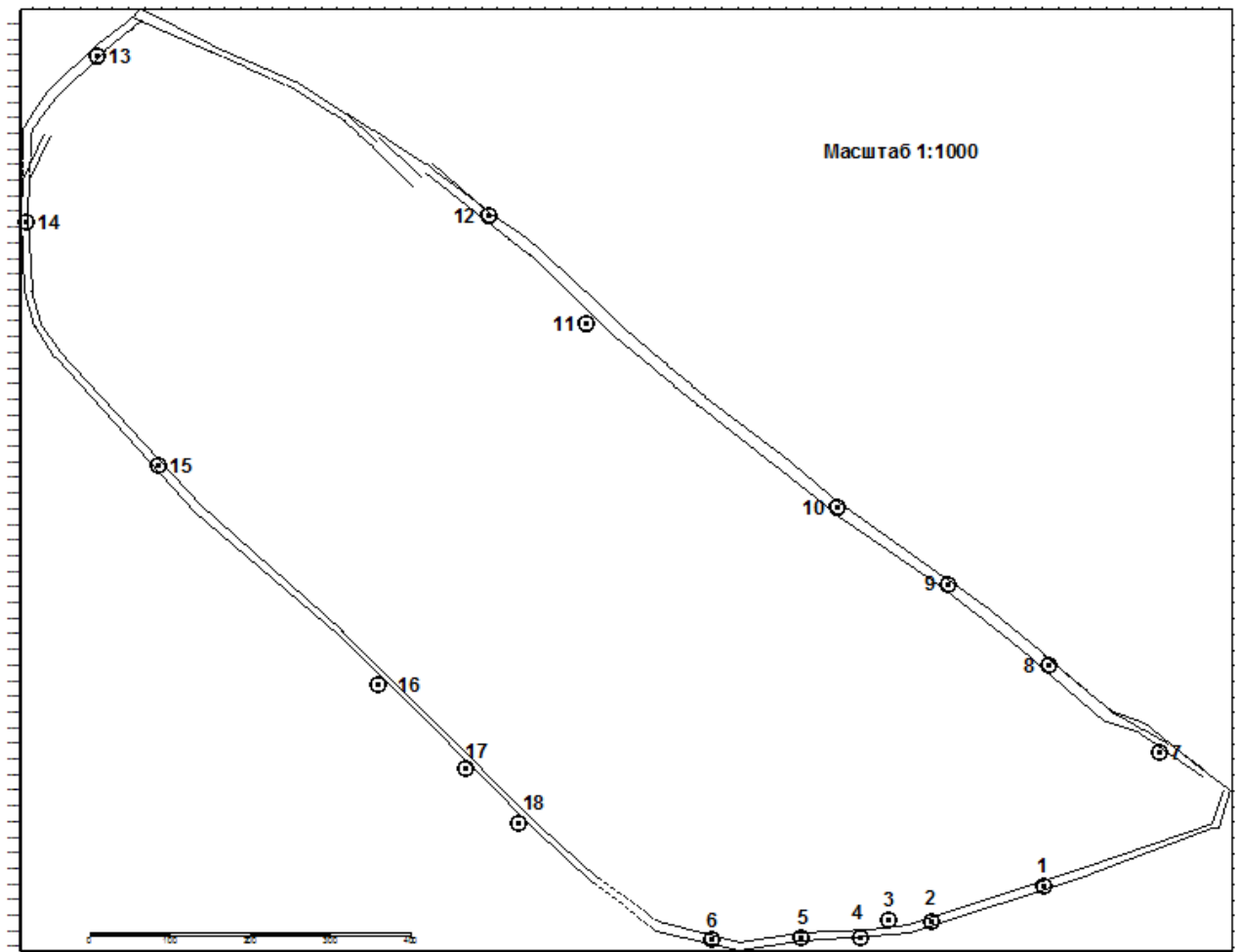


Схема розташування точок спостереження методом вертикального електричного зондування на дамбі хвостосховища «Дніпровське» у 2022 році



Таблиця результатів лабораторних визначень фізико-механічних показників ґрунтів дамби хвостосховища «Дніпровське»

ЗВЕДЕНА ТАБЛИЦЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛАБОРАТОРНИХ ВИЗНАЧЕНЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ҐРУНТІВ

Об'єкт: Хвостосховище "Дніпровське"

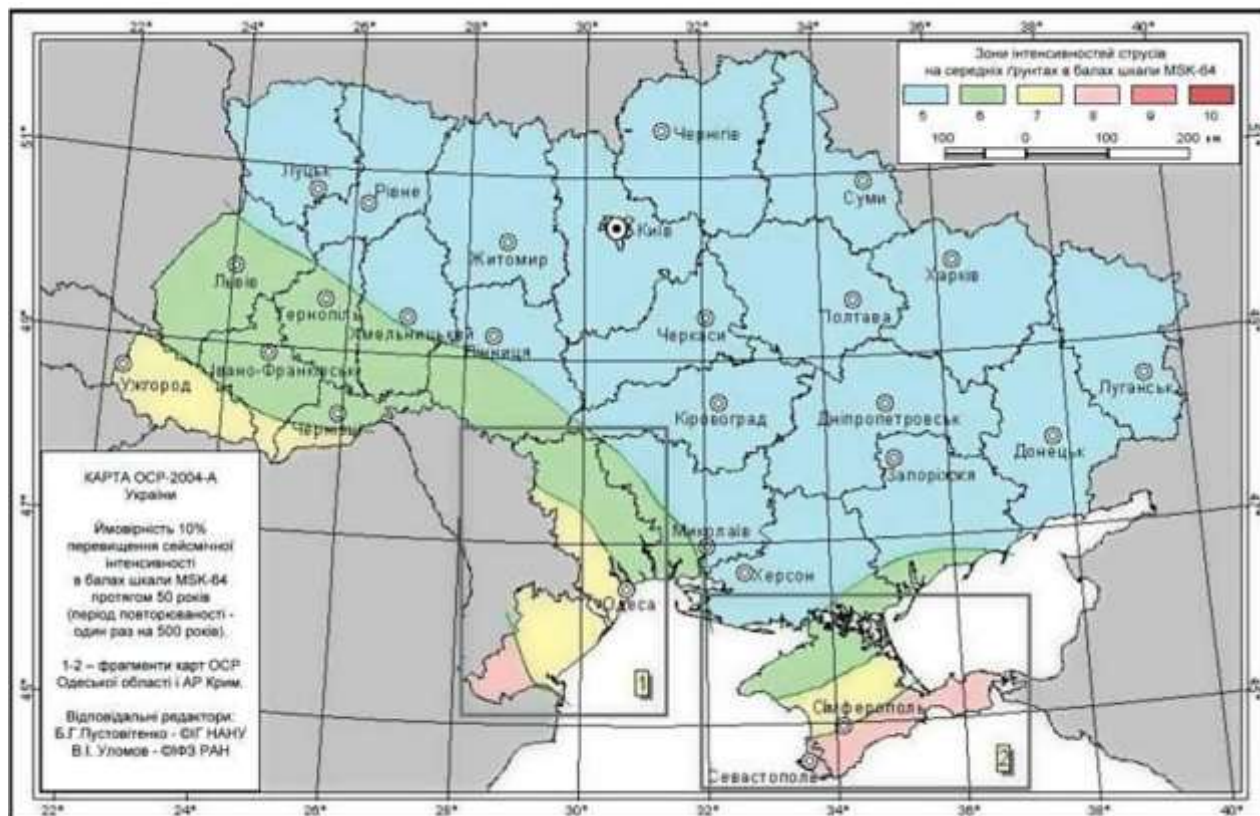
№ ґ/п	Номер скважини		Інтервал відбору		Стратиграфічний надріз	ГЕ	Лабораторне найменування ґрунту	Порядок вологості, %	Консистенція				Показник текучості I_L	Щільність, г/см ³			Пористість ρ_v , %	Коефіцієнт пористості, e	Ступінь вільнозв'язаної вологи, %	Міцність		Деформованість	
									на межі текучості I_{LC}	на межі розкислення I_{LP}	число пластичності I_P			ґрунта ρ_d	сухої ґрунта ρ_s	часток ґрунту ρ_w				Кул внутрішнього тертя ϕ , °	Пітоме випливання c , МПа	Модуль деформації E , МПа	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1	1	1.4	1.8	вб Ґ І-III	1	ґрунт поглинувальний	0.087	0.250	0.119	0.081	0.22	1.94	1.65	2.60	38.39	0.623	0.804		24.0	0.033	64.58	33.19	
2	3	2.4	2.8	вб Ґ І-III	2	ґрунт пластинчастий	0.224	0.259	0.191	0.048	0.51	1.83	1.49	2.67	44.70	0.789	0.745		70.0	0.018	44.77	41.82	
3	4	1.4	1.8			ґрунт пластинчастий	0.172	0.232	0.164	0.048	0.12	1.80	1.54	2.67	42.68	0.738	0.622		22.0	0.01	21.81	19.31	
4	5	1.8	1.7			ґрунт твердий	0.074	0.237	0.169	0.048	-1.40	1.92	1.73	2.67	33.74	0.509	0.388		29.0	0.019	44.77	30.87	
5		1.8	2.1			ґрунт твердий	0.079	0.234	0.170	0.064	-1.42												
6		4.0	4.2	вб IV (вб Ґ І-III)	3	ґрунт поглинувальний	0.188	0.274	0.186	0.088	0.02	1.94	1.65	2.60	38.44	0.624	0.807		24.0	0.033	44.74	39.67	
7		4.9	5.1			ґрунт тугопластичний	0.194	0.254	0.170	0.084	0.29	1.91	1.60	2.60	40.31	0.673	0.778		22.0	0.027	29.76	27.28	
8	6	2.9	3.1	вб Ґ І-III	2	ґрунт твердий	0.122	0.238	0.169	0.049	-0.48	1.86	1.64	2.67	37.91	0.611	0.533		28.0	0.016	35.95	27.88	
9		6.4	6.6			ґрунт твердий	0.122	0.235	0.172	0.048	-0.83	1.95	1.74	2.67	34.91	0.554	0.607		29.0	0.018	57.05	50.42	
10		6.6	6.8			ґрунт твердий	0.133	0.236	0.174	0.042	-0.66	1.98	1.75	2.67	34.35	0.528	0.673		29.0	0.018	50.87	42.90	
11		7.0	7.2	вб Ґ І-III	4	ґрунт твердий	0.102	0.244	0.174	0.078	-0.31	1.93	1.68	2.67	37.25	0.594	0.684		25.0	0.034	52.01	45.34	
12	7	1.9	2.1	вб Ґ І-III	3	ґрунт твердий	0.077	0.225	0.156	0.049	-1.14	2.13	1.98	2.67	25.93	0.350	0.587				11.79	15.61	
13		2.9	3.1	вб Ґ І-III	4	ґрунт твердий	0.081	0.225	0.158	0.077	-0.92	1.89	1.74	2.67	34.88	0.534	0.634		25.0	0.039	72.01	45.86	
14		4.0	4.2	вб Ґ І-III	3	ґрунт твердий	0.074	0.227	0.162	0.045	-1.33	1.73	1.61	2.67	39.78	0.641	0.307		27.0	0.015	30.34	34.77	
15		4.9	5.1	вб Ґ І-III	4	ґрунт твердий	0.101	0.237	0.159	0.078	-0.62	2.06	1.85	2.67	30.35	0.440	0.674		24.0	0.047	76.41	71.99	

Всього 15 рядків

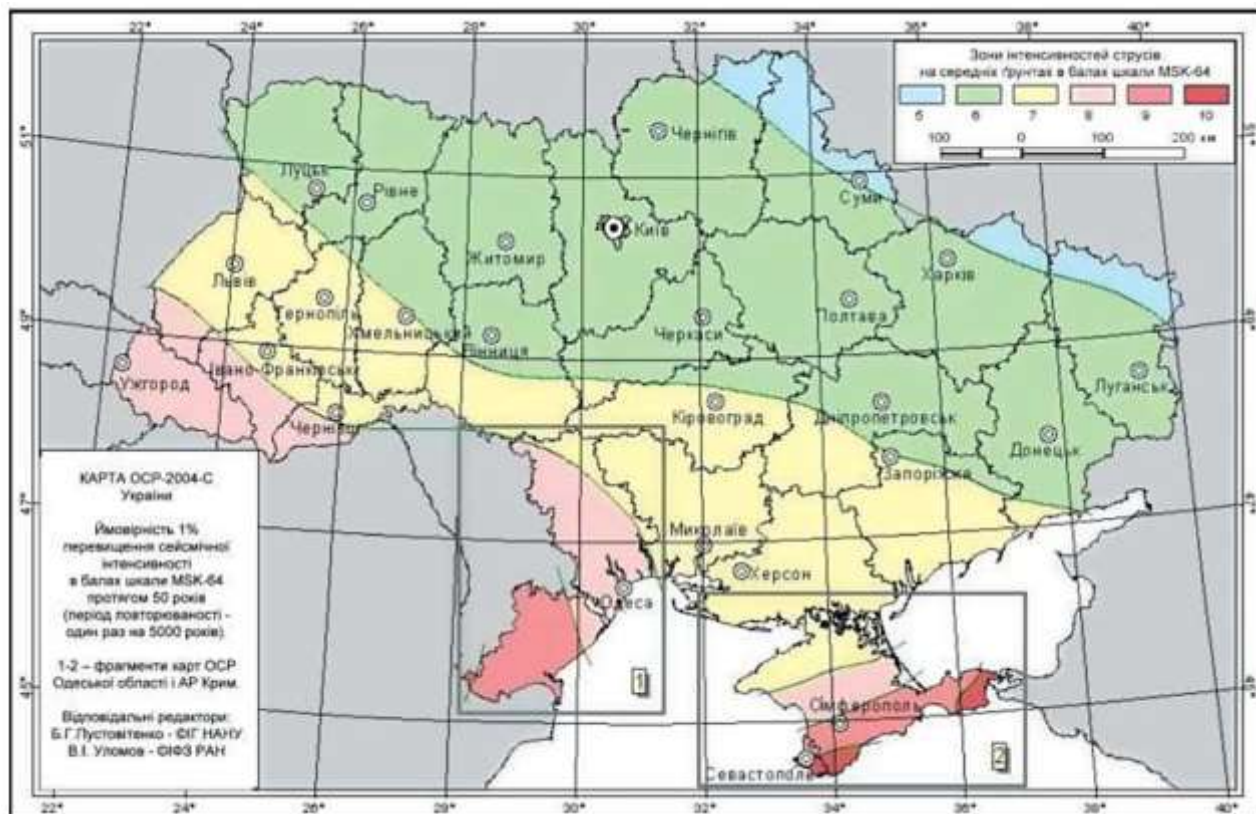
Примітка 1. **Численні** - виключені з розрахунку значення, **пунктир** - показники виключені вручну.

2. Нормативні значення показників "C" і "φ" ґрунтів ГЕ 1-4 визначені на підставі результатів лабораторних досліджень, а також за таблиці ПА додатку П ДБН А.2.1-1-2018.

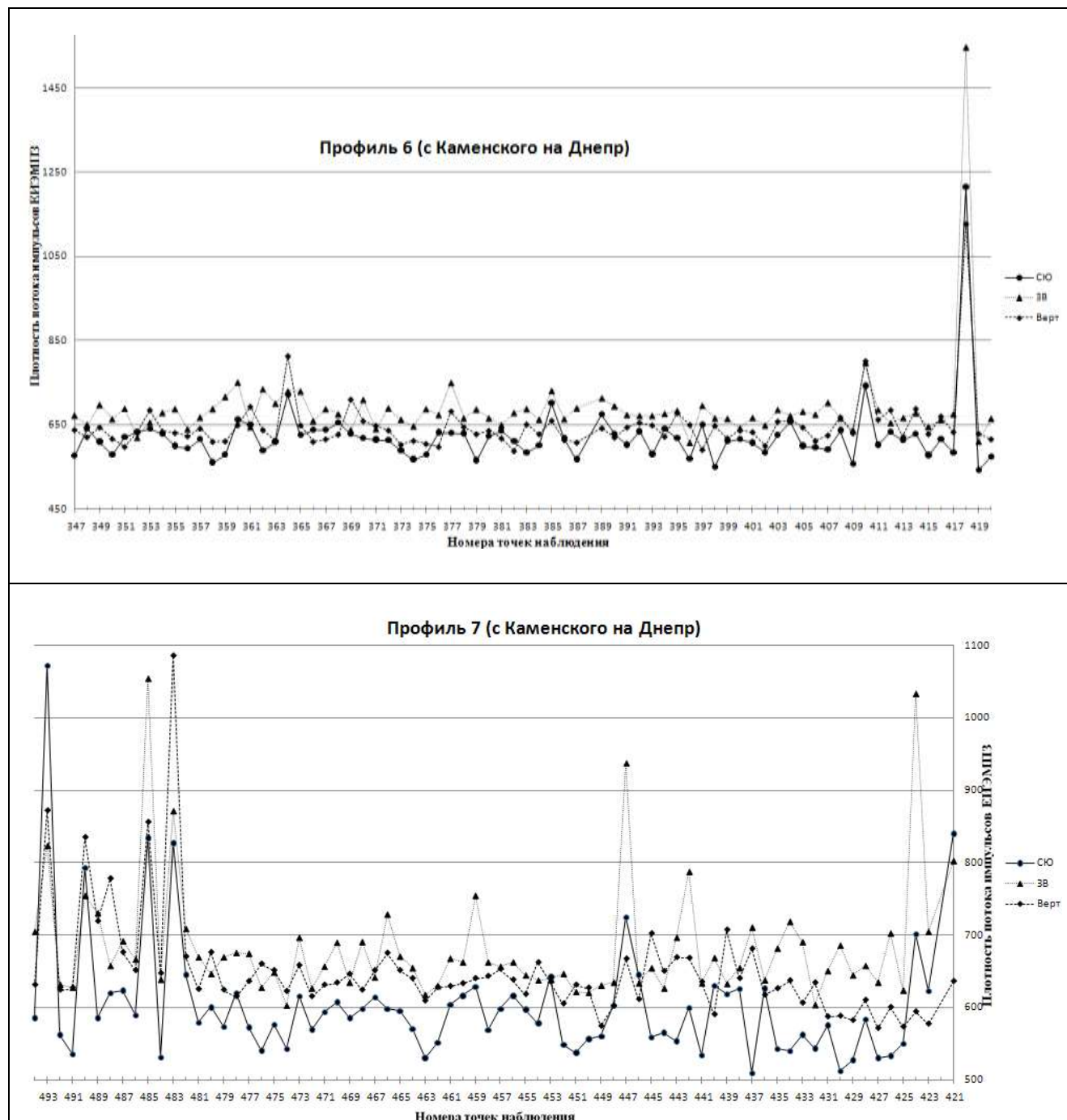
Карта 10 % ймовірності перевищення сейсмічної інтенсивності в балах шкали МСК-64 протягом 50 років [141]

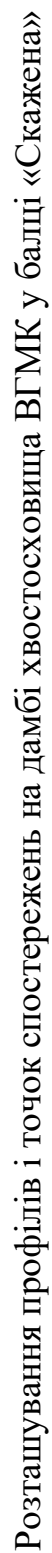


Карта 1 % ймовірності перевищення сейсмічної інтенсивності в балах шкали МСК-64 протягом 50 років [141]



Діаграма розподілу щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ по профілям 6-7 на дамбі хвостосховища «Сухачівське»





ДОДАТОК В

**РЕЗУЛЬТАТИ ПОЛЬОВИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НА ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Параметри ділянок фільтрації води з каналу МК-1 Кільченської зрошувальної системи по різних бортам

Ділянка 1						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
1	27–36	9		1	0–8	8
2	70–110	40		2	34–44	10
3	153–166	13		3	70–95	15
4	222–258	36		4	125–134	9
5	308–326	18		5	293–304	11
6	347–373	26		6	345–367	22
7	392–416	24				
Ділянка 2						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
8	540–555	15		7	400–435	35
9	615–632	17		8	475–484	9
10	658–666	8		9	505–513	8
11	685–696	11		10	526–534	8
12	752–765	13		11	543–553	10
				12	595–613	18
				13	645–677	32
				14	700–714	14
Ділянка 3						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
13	800–806	6		15	800–811	11
14	848–858	10		16	825–835	10
15	885–894	9		17	854–865	11
16	905–914	9		18	874–885	11
17	934–948	14		19	903–920	17
18	1000–1008	8		20	945–954	9
19	1034–1043	9		21	1039–1048	9
20	1058–1065	7		22	1105–1134	29
21	1073–1100	27		23	1150–1158	8
22	1110–1117	7		24	1185–1193	8
23	1122–1130	8		25	1194–1200	6
24	1147–1154	7				
25	1178–1186	8				
26	1193–1200	7				
Ділянка 4						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
27	1213–1225	12		26	1205–1215	10
28	1245–1264	19		27	1225–1235	10
29	1274–1284	10		28	1260–1267	7
30	1298–1308	10		29	1310–1319	9
31	1322–1332	10		30	1338–1349	11
32	1355–1366	11		31	1383–1393	10
33	1395–1405	10		32	1448–1462	14
34	1440–1450	10		33	1507–1515	8
35	1492–1500	8		34	1532–1543	11
36	1513–1523	10		35	1563–1573	10
37	1555–1567	12				
38	1588–1599	11				

Продовження Додатку В.1

Ділянка 5						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
39	1605–1615	10		36	1783–1812	29
40	1636–1643	7		37	1847–1860	13
41	1692–1698	6		38	1868–1881	13
42	1707–1720	13		39	1910–1942	32
43	1728–1742	14		40	1985–2000	15
44	1765–1781	16				
45	1800–1808	8				
46	1817–1825	8				
47	1845–1855	10				
48	1865–1876	11				
49	1897–1908	11				
50	1920–1962	42				
51	1985–1995	10				
Ділянка 6						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
52	2050–2060	10		41	2025–2035	10
53	2105–2114	9		42	2055–2098	43
54	2150–2168	18		43	2118–2127	9
55	2220–2234	14		44	2142–2150	8
56	2265–2287	22		45	2169–2212	43
57	2335–2344	9		46	2228–2238	10
58	2358–2390	32		47	2253–2265	12
				48	2275–2288	13
				49	2305–2318	13
				50	2332–2340	8
				51	2362–2386	24
Ділянка 7						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
59	2400–2405	5		52	2405–2417	12
60	2414–2423	9		53	2427–2437	10
61	2437–2455	18		54	2453–2463	10
62	2463–2480	17		55	2472–2485	13
63	2497–2508	11		56	2500–2515	15
64	2520–2530	10		57	2525–2535	10
65	2563–2585	22		58	2546–2560	14
66	2610–2620	10		59	2655–2669	14
67	2629–2639	10		60	2695–2716	21
68	2668–2687	19		61	2750–2762	12
69	2744–2758	14				
70	2780–2789	9				
Ділянка 8						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
71	2821–2834	13		62	2813–2825	12
72	2876–2897	21		63	2840–2865	25
73	2985–2996	11		64	2890–2910	20
74	3032–3054	22		65	2960–2973	13
75	3175–3190	15		66	2990–3020	30
				67	3192–3200	8
Ділянка 9						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
76	3200–3215	15		68	3200–3208	8
77	3255–3269	14		69	3250–3269	19
78	3313–3325	13		70	3378–3390	12
79	3355–3373	18		71	3433–3444	11
80	3385–3405	20		72	3530–3539	9
81	3420–3430	10		73	3582–3594	12
82	3450–3459	9				
83	3472–3493	21				
84	3505–3515	10				
85	3520–3530	10				
86	3553–3565	12				
87	3587–3596	9				

Продовження Додатку В.1

Ділянка 10						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
88	3610–3743	133		74	3680–3710	30
89	3825–3835	10		75	3762–3790	28
90	3862–3871	9		76	3802–3837	35
91	3888–3903	15		77	3850–3863	13
92	3924–3940	16		78	3916–3928	12
93	3970–3978	8		79	3945–3954	9
94	3985–3995	10				
Ділянка 11						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
95	4006–4015	9		80	4088–4110	22
96	4027–4036	9		81	4142–4152	10
97	4057–4065	8		82	4173–4183	10
98	4075–4084	9		83	4261–4278	17
99	4101–4115	14		84	4338–4358	20
100	4170–4178	8		85	4393–4400	7
101	4277–4288	11				
102	4304–4313	9				
103	4324–4338	14				
Ділянка 12						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
104	4403–4415	12		86	4409–4423	14
105	4433–4452	19		87	4447–4662	15
106	4487–4502	15		88	4486–4508	22
107	4514–4521	7		89	4624–4653	29
108	4550–4560	10		90	4696–4705	9
109	4598–4609	11		91	4725–4737	12
110	4623–4629	6		92	4776–4786	10
111	4637–4644	7				
112	4650–4662	12				
113	4688–4706	18				
114	4745–4762	17				
115	4773–4787	14				
Ділянка 13						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
116	4800–4808	8		93	4804–4813	9
117	4828–4836	8		94	4833–4843	10
118	4863–4875	12		95	4871–4891	20
119	4909–4923	14		96	4925–4938	13
120	4936–4943	7		97	5054–5063	9
121	4975–4984	9				
122	5007–5013	6				
123	5020–5032	12				
124	5057–5073	16				
125	5136–5146	10				
126	5165–5174	9				
Ділянка 14						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
127	5200–5209	9		98	5269–5280	11
128	5223–5234	11		99	5285–5296	11
129	5270–5281	11		100	5357–5382	25
130	5336–5359	23		101	5431–5443	12
131	5459–5474	15		102	5542–5552	10
132	5490–5498	9		103	5568–5591	23
133	5505–5224	19				
134	5537–5552	15				
135	5584–5595	11				

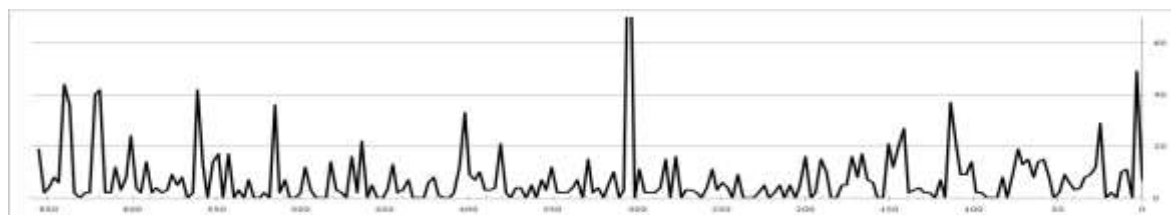
Закінчення Додатку В.1

Ділянка 15						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
136	5609–5620	11		104	5610–5646	36
137	5631–5649	18		105	5754–5765	11
138	5664–5676	12		106	5803–5812	9
139	5692–5706	14		107	5834–5853	19
140	5713–5733	20		108	5904–5917	13
141	5742–5748	6		109	5949–5959	10
142	5761–5774	13				
143	5785–5796	11				
144	5825–5838	13				
145	5863–5869	6				
146	5880–5887	7				
147	5905–5924	19				
148	5960–5975	15				
149	5986–6000	14				
Ділянка 16						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
150	6003–6028	25		110	6000–6112	112
151	6059–6083	24		111	6238–6261	23
152	6172–6185	13		112	6173–6209	36
153	6320–6338	18				
154	6352–6364	12				
155	6383–6395	12				
Ділянка 17						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
156	6400–6415	15		113	6403–6425	22
157	6512–6524	12		114	6473–6487	14
158	6545–6566	21		115	6514–6580	66
159	6580–6598	18		116	6597–6612	15
160	6636–6651	15		117	6663–6710	47
161	6668–6694	26				
162	6719–6745	26				
Ділянка 18						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
163	6800–6808	8		118	6820–6854	34
164	6841–6864	23		119	7011–7027	16
165	6936–6944	8		120	7186–7200	14
166	7012–7048	36				
Ділянка 19						
№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м		№ зони фільтрації	Інтервал від ГНС-1, м	Довжина зони, м
<i>Лівий борт</i>				<i>Правий борт</i>		
167	7262–7350	88		121	7201–7210	9
168	7500–7590	90		122	7353–7385	32
				123	7474–7550	76
Всього по лівому борту		2519		Всього по правому борту		2134

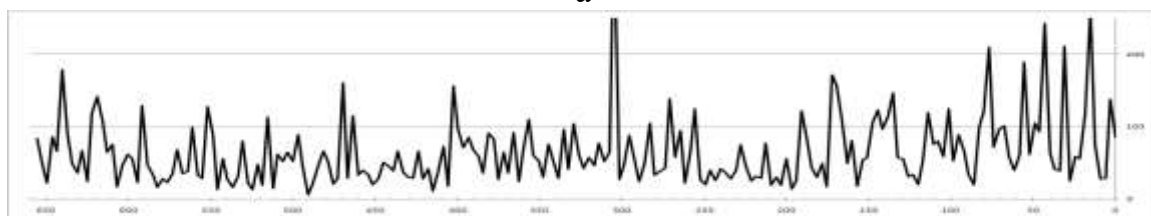
Параметри ділянок фільтрації води з водосховища лівого борту перед аванкамерою ГНС-3 та ГНС-4 Кільченської зрошувальної системи

№ зони фільтрації	Інтервал від лівого повороту, м	Довжина зони, м
1	15–25	20
2	49–70	21
3	97–112	15
4	128–143	15
5	280–382	102
6	432–444	12
7	502–560	58
8	610–634	24
Всього по водосховищу		267

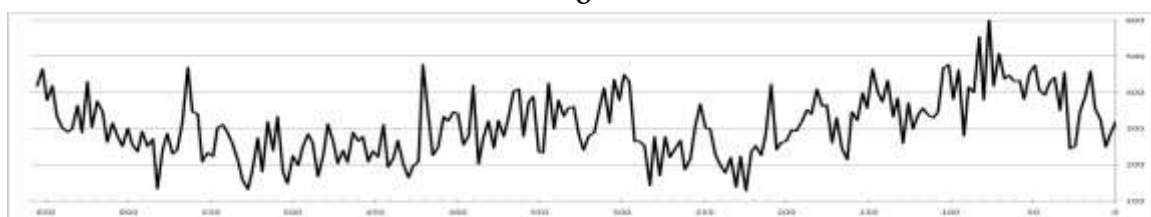
Графік щільності потоку магнітної складової імпульсного електромагнітного поля Землі лівого борту магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи в порожньому стані на ділянці 1 (Хід від НСП-1 до першого повороту)



а



б



в

а – горизонтальна антена вздовж каналу,

б – горизонтальна антена поперек каналу,

в – вертикальна антена.

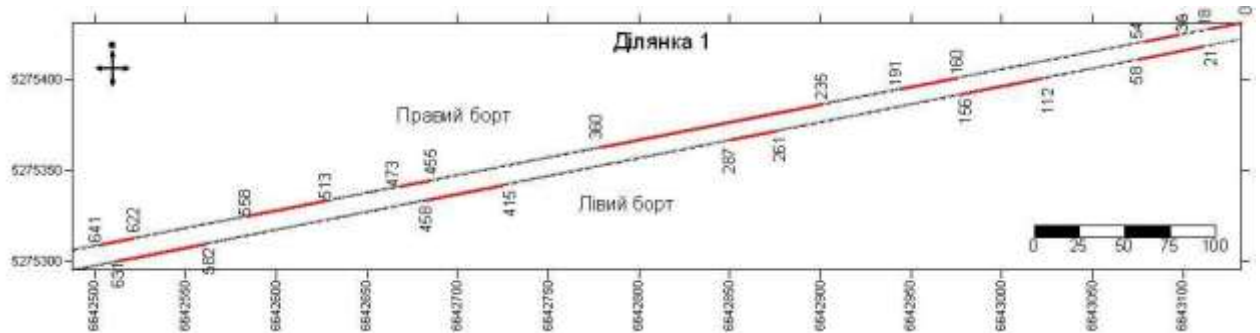
Горизонтальна шкала – відстані в метрах, вертикальна – кількість імпульсів ПЕМПЗ за одиницю часу.

Додаток В.4

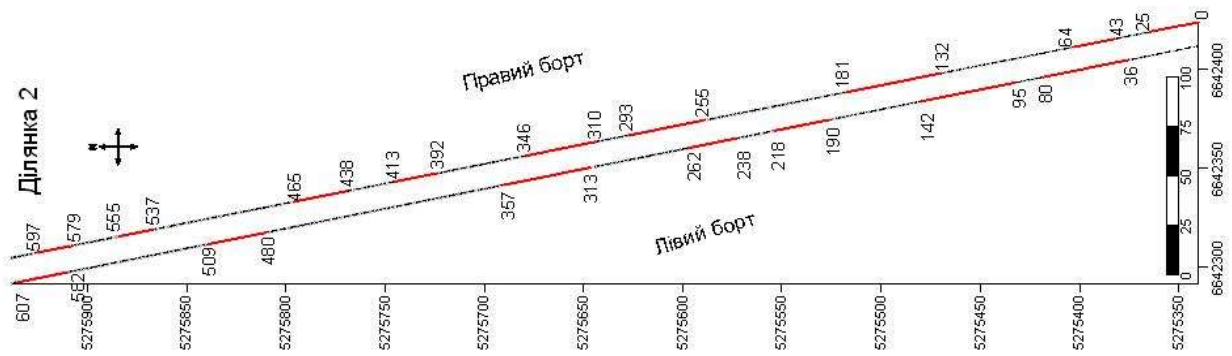
Параметричні характеристики зон фільтрації крізь борти магістрального каналу
МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи

Лівий борт		Правий борт	
Інтервал, м	Довжина, м	Інтервал, м	Довжина, м
ДІЛЯНКА 1			
21-58	37	0-18	18
112-156	44	35-54	19
262-287	26	160-191	31
415-458	43	235-360	125
582-631	49	455-473	18
		513-558	45
		622-641	19
Разом	199		275
ДІЛЯНКА 2			
36-80	44	0-25	25
95-142	47	43-64	21
190-218	28	132-181	49
238-262	24	255-293	38
313-357	44	310-346	36
480-509	29	392-413	21
582-607	25	438-465	27
		537-555	18
		579-597	18
Разом	241		253
ДІЛЯНКА 3			
118-147	29	48-64	16
192-226	34	75-90	15
263-281	18	172-192	20
310-327	17	208-239	31
360-374	14	383-418	35
390-400	10	445-472	27
418-452	34	500-518	18
496-528	32	525-553	28
597-649	52	572-588	16
		638-649	11
Разом	240		217
ДІЛЯНКА 4			
575-598	23	90-115	25
615-632	17	190-208	18
698-722	24	406-428	22
765-785	20	452-483	31
809-823	14	590-609	19
880-898	18	632-653	21
923-941	17	872-890	18
959-976	17	1185-1215	30
1005-1021	16	1263-1284	21
1071-1089	18	1320-1355	35
1218-1253	35	1360-1398	38
1340-1355	15	1455-1470	15
1374-1382	8	1540-1608	68
1433-1465	32		
1497-1519	22		
1562-1573	11		
1590-1612	22		
Разом	655		389
ДІЛЯНКА 5			
25-49	27	0-27	27
75-112	37	35-61	26
180-231	51	101-138	37
350-396	46	175-248	73
418-496	78	386-431	45
576-681	105	441-465	24
749-782	33	490-526	36
836-884	48	575-601	26
		630-662	32
		675-700	25
		728-786	58
		1021-1049	28
		1096-1122	26
		1162-1181	19
		1200-1256	56
Разом	422		548
ВСЬОГО	1757		1682

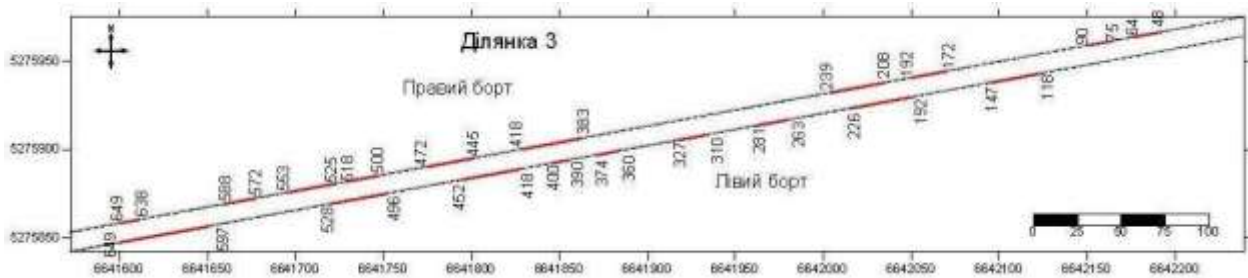
Положення зон фільтрації води та замочування бортів (червоний колір) магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи на ділянках: а – 1; б – 2; в – 3. Цифрами позначені інтервали виділених зон у метрах. Система координат прямокутна, метрична, СК-42



а

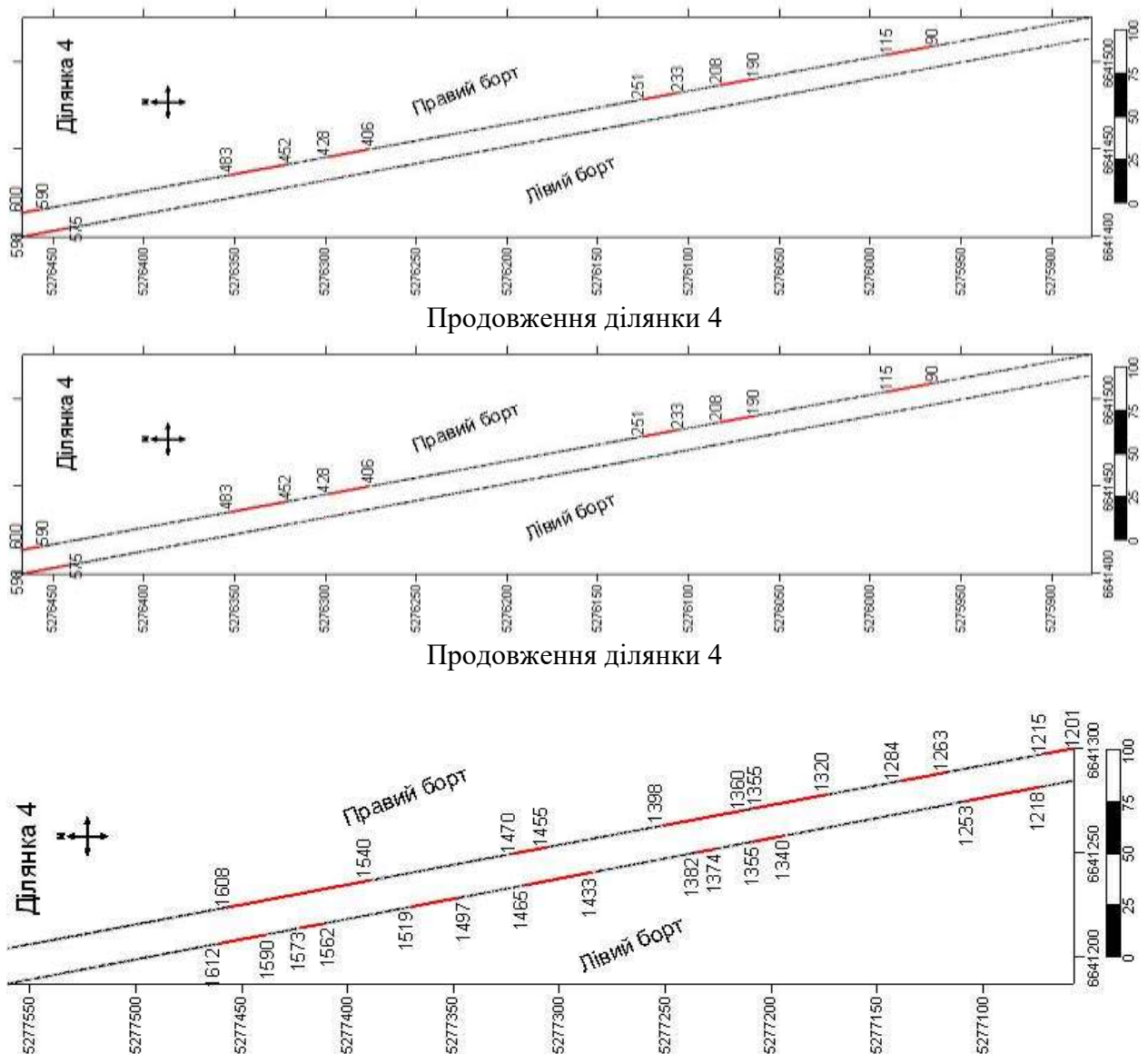


б



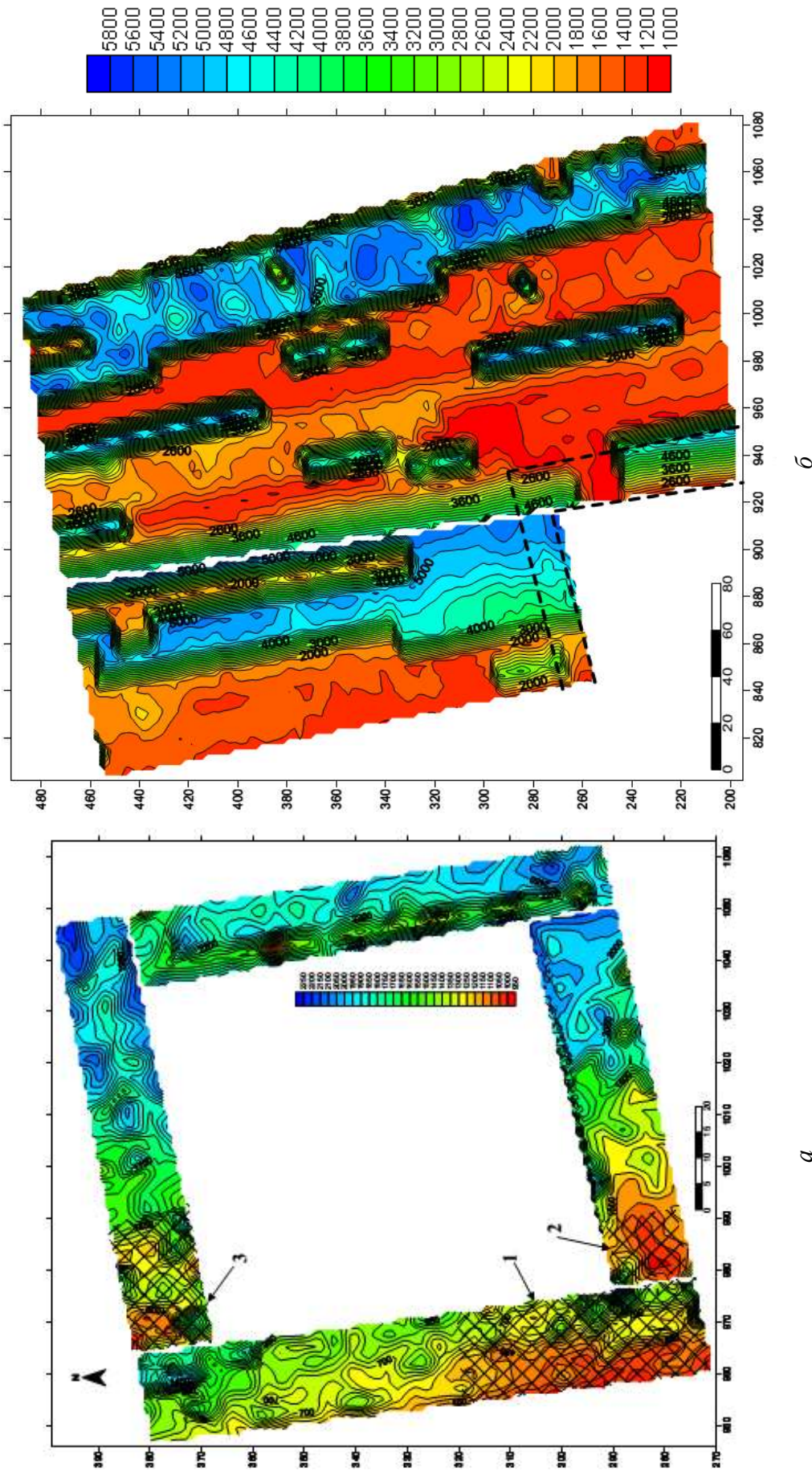
в

Положення зон фільтрації води та замочування бортів (червоний колір) магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи на ділянці 4. Цифрами позначені інтервали виділених зон у метрах. Система координат прямокутна, метрична, СК-42



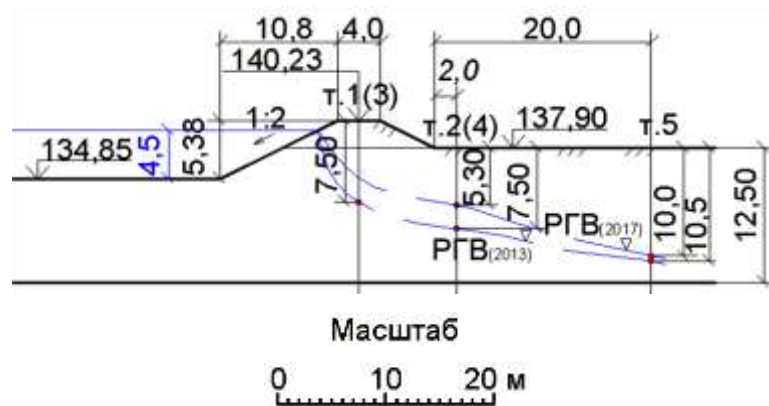
Положення зон фільтрації води та замочування бортів (червоний колір) магістрального каналу МК-1 Вищетарасівської зрошувальної системи на ділянці 5. Цифрами позначені інтервали виділених зон у метрах. Система координат прямокутна, метрична, СК-42



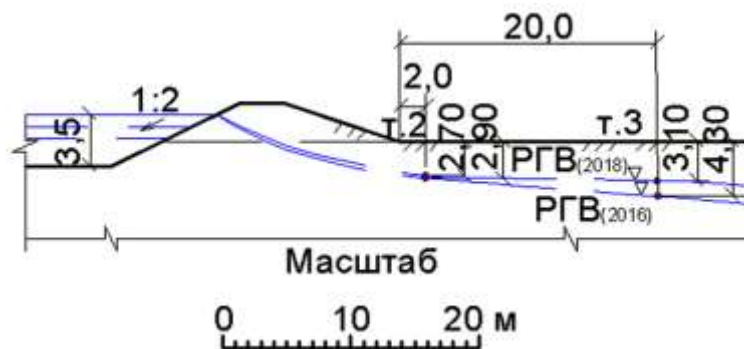


Карта-схема щільності потоку імпульсів магнітної складової імпульсного електромагнітного поля Землі на РБ КЗС за даними зйомки ПЕМПЗ у 2017 р (а) та у 2018 р (б). Штриховкою показано положення зон поглинання сигналу та наведені їх номери. Система координат умовна, метрична. Кольорова шкала характеризує щільність

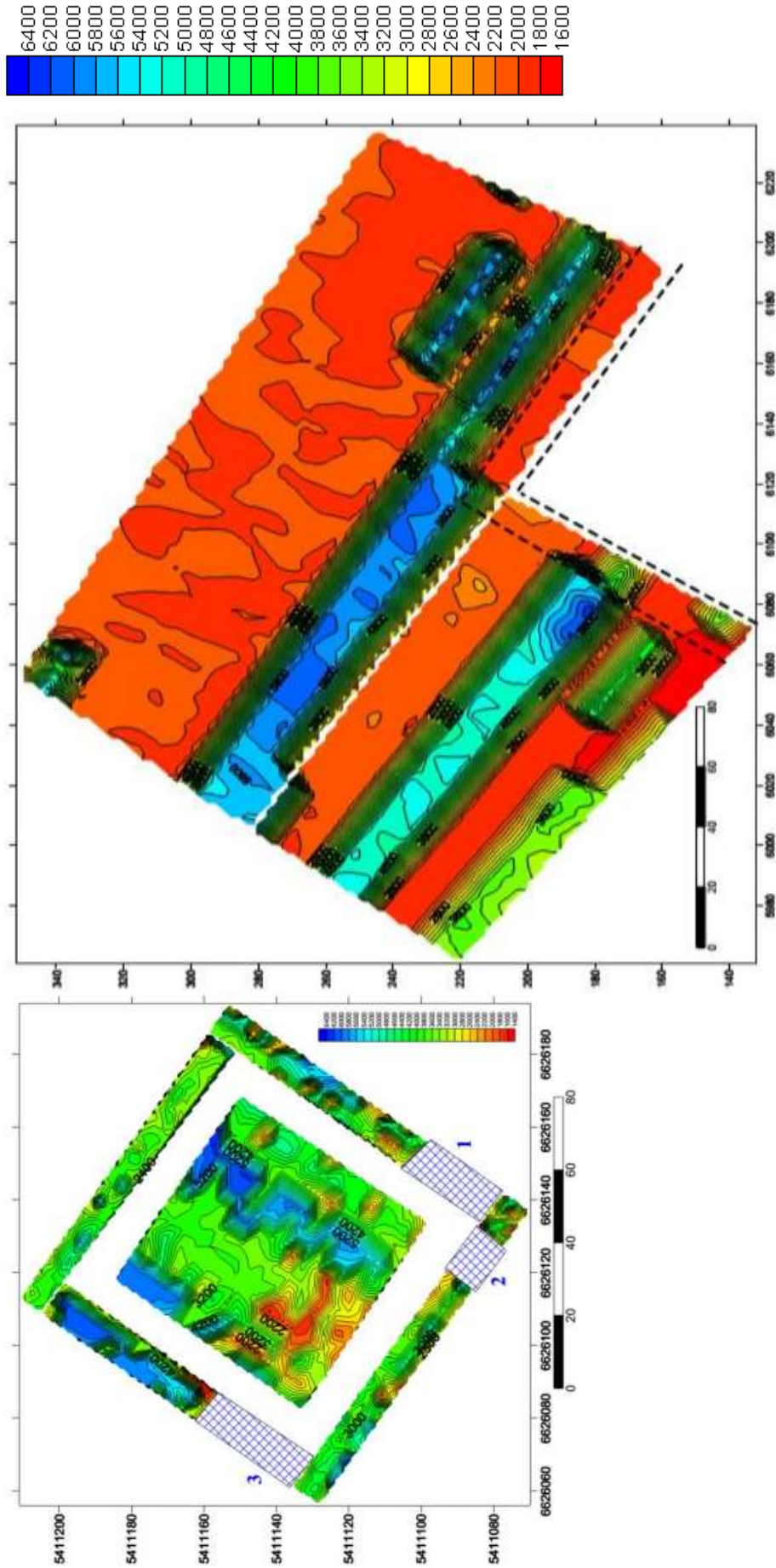
Положення рівня ґрунтових вод на регулюючому басейні КЗС у 2013 р. та у 2017 р. (А), та на регулюючому басейні РБ-6 ЦЗС у 2016 і 2018 роках за даними інтерпретації результатів вертикального електричного зондування (Б)[186, 189, 190]



А



Б



б

а

Карта-схема щільності потоку імпульсів магнітної складової імпульсного електромагнітного поля Землі регулюючого басейну РБ-6 ЦЗС за даними зйомки ПЕМПЗ у 2016 р (а) та у 2018 р. (б). Штриховкою показані зони замочування ґрунтів та їх номери. Система координат умовна, метрична [131, 134, 135]. Градаційна шкала показує щільність потоку імпульсів, імп./с

ДОДАТОК Г

ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАКТИЧНУ ЦІННІСТЬ



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 102040

(13) U

(51) МПК

E02B 3/16 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

- (21) Номер заявки: **u 2015 04103**
 (22) Дата подання заявки: **28.04.2015**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.10.2015**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.10.2015, Бюл.№ 19**

- (72) Винахідник(и):
Мартиненко Тетяна Володимирівна (UA),
Чушкіна Ірина Вікторівна (UA),
Гришко Ганна Миколаївна (UA),
Кухарук Петро Володимирович (UA),
Рудаков Леонід Миколайович (UA),
Бегун Олександр Іванович (UA),
Дерев'янко Віктор Миколайович (UA),
П'ятниця Ірина Вікторівна (UA)

- (73) Власник(и):
Мартиненко Тетяна Володимирівна,
 вул. Чернишевського, 25, к. 36, м.
 Дніпропетровськ, 49600 (UA),
Чушкіна Ірина Вікторівна,
 вул. Фурманова, 7, кв. 37, м.
 Дніпропетровськ, 49000 (UA),
Гришко Ганна Миколаївна,
 Донецьке шосе, 7, кв. 235, м.
 Дніпропетровськ, 49000 (UA),
Кухарук Петро Володимирович,
 пр. К. Маркса, 39-а, к. 38, м.
 Дніпропетровськ, 49600 (UA),
Рудаков Леонід Миколайович,
 вул. Ворошилова, 25, к. 128, м.
 Дніпропетровськ, 49600 (UA),
Бегун Олександр Іванович,
 вул. Наримська, 80, кв. 55, м.
 Дніпропетровськ, 49008 (UA),
Дерев'янко Віктор Миколайович,
 вул. Чернишевського, 25, к. 36, м.
 Дніпропетровськ, 49600 (UA),
П'ятниця Ірина Вікторівна,
 вул. Житомирська, 358 м. Дніпропетровськ,
 49046 (UA)

UA 102040 U

(54) РОЗЧИН ДЛЯ ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНОЇ ЗАВІСИ

(57) Реферат:

Розчин для протифільтраційної завіси включає глину, бокситовий шлам, золу ТЕС і воду. Додатково вводиться дистилерна рідина - відхід виробництва кальцинованої соди.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **155030** (13) **U**
(51) МПК
E21C 41/32 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2023 03383	(72) Винахідник(и): Рудаков Леонід Миколайович (UA), Гапіч Геннадій Васильович (UA), Калганков Євген Васильович (UA)
(22) Дата подання заявки: 10.07.2023	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 11.01.2024	(73) Володілець (володілці): Рудаков Леонід Миколайович, вул. Набережна Перемоги, 42/4, к. 109, м. Дніпро, 49094 (UA), Гапіч Геннадій Васильович, вул. Інженерна, 4, кв. 134, м. Дніпро, 49033 (UA), Калганков Євген Васильович, вул. Дмитра Скоробогатова, 7, кв. 83, м. Дніпро, 49006 (UA)
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 10.01.2024, Бюл.№ 2	

(54) СПОСІБ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ХВОСТОСХОВИЩ УРАНОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ

(57) Реферат:
Спосіб рекультивациі відпрацьованих хвостосховищ уранопереробних виробництв включає облаштування над хвостосховищем шаруватого захисту з дренажу, водотривкого та родючого шару ґрунту. Для запобігання потраплянню атмосферних опадів і талих вод у відходи, по периметру хвостосховища облаштовують уловлювальні канали та захисний гідроізоляційний шар із радіаційностійкого еластомерного матеріалу, наприклад гуми, товщиною 3-5 мм, поверх якої укладають геотекстиль та насипають глинистий шар товщиною 0,9-1 м з кутом нахилу від центра до країв хвостосховища 1,5°-2,5° і пошарово ущільнюють методом прикатування та формують родючий шар ґрунту з висівом багаторічних трав.

UA 155030 U



УКРАЇНА

(19) UA (11) 156936 (13) U
(51) МПК (2024.01)
E21C 41/32 (2006.01)
E21F 15/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 01010	(72) Винахідник(и): Кобець Анатолій Степанович (UA), Пугач Андрій Миколайович (UA), Рудаков Леонід Миколайович (UA)
(22) Дата подання заявки: 27.02.2024	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 22.08.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 21.08.2024, Бюл.№ 34	(73) Володілець (володільці): ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО- ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600 (UA)

(54) СПОСІБ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ХВОСТОСХОВИЩ

(57) Реферат:

Спосіб рекультивациі хвостосховищ включає вирівнювання поверхні хвостосховища різнозернистим матеріалом, перекриття шаром піску, обробленого гідрофобною рідиною, послідовне вкладання водоутримуючого шару глинистих ґрунтів. При досягненні проєктних розмірів хвостосховища його поверхню намулюють трикомпонентною сумішшю: відходи збагачення фабрик, комунально-побутові стічні води, лесоподібні суглинки у співвідношенні 1:2:1.

UA 156936 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **156999** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
E21C 41/32 (2006.01)
E21F 15/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 01033	(72) Винахідник(и): Кобець Анатолій Степанович (UA), Пугач Андрій Миколайович (UA), Рудаков Леонід Миколайович (UA)
(22) Дата подання заявки: 27.02.2024	(73) Володілець (володільці): ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО- ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 29.08.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 28.08.2024, Бюл.№ 35	

(54) СПОСІБ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ХВОСТОСХОВИЩ

(57) Реферат:

Спосіб рекультивациі хвостосховищ включає вирівнювання поверхні хвостосховища різнозернистим матеріалом, перекриття шаром піску, обробленого гідрофобною рідиною, послідовне вкладання водоутримуючого шару глинистих ґрунтів. Відходи збагачення залізних руд перекривають наміванням органічних осадків міських стоків шаром 5...15 см.

UA 156999 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **156782** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
G01V 3/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2023 02610 (22) Дата подання заявки: 29.05.2023 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 08.08.2024 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 07.08.2024, Бюл.№ 32	(72) Винахідник(и): Рудаков Леонід Миколайович (UA), Орлінська Ольга Вікторівна (UA), Пікареня Дмитро Сергійович (UA), Гапич Геннадій Васильович (UA) (73) Володілець (володільці): Рудаков Леонід Миколайович, вул. Набережна Перемоги, 42/4, кв. 109, м. Дніпро, 49094 (UA), Орлінська Ольга Вікторівна, вул. Д. Яворницького, 113, кв. 53, м. Дніпро, 49038 (UA), Пікареня Дмитро Сергійович, вул. Д. Яворницького, 113, кв. 53, м. Дніпро, 49038 (UA), Гапич Геннадій Васильович, вул. Інженерна, 4, кв. 134, м. Дніпро, 49033 (UA)
---	--

(54) СПОСІБ ВСТАНОВЛЕННЯ ШЛЯХІВ ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ КРИЗЬ ПОРУШЕНІ ДІЛЯНКИ КОНСТРУКЦІЇ ҐРУНТОВИХ ДАМБ ОБВАЛУВАННЯ ХВОСТОСХОВИЩ

(57) Реферат:

Спосіб встановлення шляхів фільтраційної міграції радіонуклідів кризь порушені ділянки конструкції ґрунтових дамб обвалування хвостосховищ полягає у використанні геофізичних методів: природного імпульсного електромагнітного поля Землі та вертикального електричного зондування. До геофізичних методів додають методи радіометричної розвідки та проводять вимірювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання і визначають зони фільтрації радіаційно забруднених розчинів зсередини хвостосховища й встановлюють шляхи міграції радіонуклідів кризь тіло ґрунтової гідротехнічної споруди.

UA 156782 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **156756** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
A01B 79/00
E21C 41/26 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 01006	(72) Винахідник(и): Кобець Анатолій Степанович (UA), Пугач Андрій Миколайович (UA), Рудаков Леонід Миколайович (UA)
(22) Дата подання заявки: 27.02.2024	(73) Володілець (володільці): ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО- ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 01.08.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 31.07.2024, Бюл.№ 31	

(54) СПОСІБ БІОЛОГІЧНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ХВОСТОСХОВИЩ

(57) Реферат:

Спосіб біологічного закріплення поверхні хвостосховищ включає розробку м'яких порід розкриву у процесі відвалоутворення, між суміжними відвальними заходками у виробленому просторі формують робочі ділянки хвостосховища, які заповнюють рідкими відходами збагачення з видаленням профільтрованих вод до акумулюючої ділянки хвостосховища. Проводять формування техногенного едафотопу, при якому наминають на фільтруючу поверхню сухих пляжів з дна хвостосховища глинисту пульпу шаром 4-12 см. При підсиханні глинистої маси проводять фрезерний обробіток техногенного едафотопу, після чого перемішують глину та пісок шаром 14-20 см. Проводять посів багаторічних бобових та тонконогових трав з внесенням повного мінерального добрива.

UA 156756 U

ДОДАТОК Д

ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО ВОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
РЕГІОНАЛЬНИЙ ОФІС ВОДНИХ РЕСУРСІВ У ДНІПРОПЕТРОВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

пр-кт Дмитра Яворницького, 39-А, м. Дніпро, 49044, тел./факс (056) 720-91-56

E-mail: info@dovr.gov.ua, сайт: dovr.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 01038699

На № _____ від _____ р.

Дніпровський державний
аграрно-економічний університет

Акт

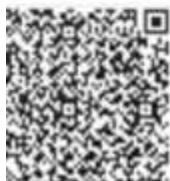
**про застосування результатів дослідно-методичних робіт щодо оцінки
технічного стану цивільних ГТС та можливих зон фільтрації**

В результаті проведення дослідно-методичних робіт групою у складі: професора Орлінської О.В., професора Пікарені Д.С., доцентів Рудакова Л.М., Гапіча Г.В., Чушкіної І.В. на території Дніпровського, Синельниківського та Нікопольського районів було визначено і оцінено технічний стан регулюючих басейнів та магістральних каналів комплексом геофізичних методів (природного імпульсного електромагнітного поля Землі і вертикального електричного зондування). Виявлені зони підвищеного обводнення та фільтрації, встановлені їх морфометричні параметри та розраховані можливі обсяги втрат води. Порівняння розрахованих втрат з фактичними величинами показало добру схожість результатів.

Дослідження із застосуванням комплексу геофізичних методів будуть використовуватися Регіональним офісом водних ресурсів у Дніпропетровській області та іншими водогосподарськими організаціями для оперативного виявлення прихованих зон фільтрації та оцінки технічного стану ГТС.

Заступник начальника

Ольга ЧЕХУН



ДОКУМЕНТ СЕД АСКОД

Сертифікат

5E984D526F82F38F04000000C52CSA014E3F2906

Підписувач ЧЕХУН ОЛЬГА ВАСИЛІВНА

Дійсний з 25.03.2025 14:00:04 по 25.03.2026 23:59:59

РОВР у Дніпропетровській області



№ 169/03-26 від 27.01.2026



**МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «БАР'ЄР»**

51938, м. Кам'янське, пр. Відродження, 179 Б, ЄДРПОУ 31330051
E-mail: dp-baryer@ukr.net

**Акт
впровадження результатів дослідно-методичних робіт щодо моніторингу
і оцінки технічного стану огорожувальних дамб
хвостосховищ радіоактивних відходів ПХЗ**

В результаті проведення дослідно-методичних робіт групою у складі професора Орлінської О.В., професора Пікарені Д.С., доцентів Рудакова Л.М., Гапіча Г.В. щодо оцінки технічного стану огорожувальних дамб на хвостосховищах «Дніпровське» та «Сухачівське» комплексом геофізичних методів (природного імпульсного електромагнітного поля Землі і вертикального електричного зондування) виділені зони підвищеного обводнення та фільтрації, встановлені їх морфометричні параметри, виявлені ділянки суфозійних і зсувних процесів. Зони підвищеного обводнення та фільтрації завірені даними буріння свердловин.

Моніторинг технічного стану огорожувальних дамб показав, що після інтенсивних опадів збільшуються зони підвищеного обводнення та фільтрації, а також ділянки небезпечних техногенних процесів.

Побудовані карти та схеми, зроблені розрахунки стійкості дамб застосовуються при моніторингу їх технічного стану, а ділянкам підвищеного обводнення приділяється особлива увага під час щоденних оглядів периметру хвостосховищ, які знаходяться у сфері діяльності ДП «Бар'єр».

Також результати досліджень залучені до розробки комплексного плану реабілітації території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод».

Т.в.о. директора к.т.н.



Юрій РЕЦЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. ректора Дніпровського державного
аграрно-економічного університету
професор А.С. Кобець
«12» березня 2026 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес

Комісія у складі: завідувач кафедри водогосподарської інженерії, гарант освітньо-професійної програми «Водна інженерія та водні технології», доцент Ткачук А.В.; професор кафедри водогосподарської інженерії, професор Онопрієнко Д.М.; доцент кафедри цивільної інженерії технологій будівництва і захисту довкілля, гарант освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища», доцент Макарова Т.К. склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи доцента Рудакова Леоніда Миколайовича на тему «Науково-технічні засади управління екологічною безпекою гідротехнічних споруд гірничопромислового призначення», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, впроваджені у навчальний процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету.

Результати дослідження використовуються під час підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальностями 183 «Технології захисту навколишнього середовища», 101 «Екологія», 192 «Будівництво та цивільна інженерія» і 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» при викладанні таких дисциплін: «Екологічна безпека та техногенні ризики», «Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища», «Метеорологія та кліматологія», «Інженерна гідрологія і гідравліка», «Управління та поводження з відходами», «Техноекологія» та ін. освітні компоненти професійної спрямованості.

Використання результатів дисертаційного дослідження Рудакова Л.М. дозволило підвищити теоретичний рівень викладання дисциплін, посилити практичну орієнтацію підготовки майбутніх фахівців з екологічної безпеки та забезпечити відповідність навчальних матеріалів сучасним викликам у сфері експлуатації ГТС гірничопромислового комплексу.

Голова комісії: доцент

А.В. Ткачук

Члени комісії: професор

Д.М. Онопрієнко

доцент

Т.К. Макарова